

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MÉRIDA - VENEZUELA**



**Módulo de evaluación de
rendimiento de controladores basado
en lógica difusa**

Rogelio Emilio Rivero Contreras

2009



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA**

MÓDULO DE EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE CONTROLADORES BASADO EN LÓGICA DIFUSA

Proyecto de grado presentado ante la Escuela de Ingeniería Química como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Químico

**PRESENTADO POR:
Br. Rogelio Emilio Rivero Contreras
ASESOR:
Prof. Edinzo Iglesias**

**MÉRIDA, VENEZUELA
2009**

Initium sapientiae timor domini
“El principio de la sabiduría es el temor a Dios”

Salmo 110

www.bdigital.ula.ve

Reconocimiento-No comercial- Compartir igual



DERECHOS DE AUTOR

Otorgo a la Universidad de Los Andes el derecho de reproducir y difundir el presente trabajo, con las únicas limitaciones que establece la legislación vigente en materia de Derechos de Autor.

En la ciudad de Mérida, a los treinta (30) días del mes de marzo de dos mil nueve (2009).

www.bdigital.ula.ve

Br. Rogelio Emilio Rivero Contreras
C.I. V.- 17766738



DEDICATORIA

- ⇒ A mis padres y familia por haberme dado la oportunidad y ofrecerme todo el apoyo requerido en cursar esta profesión y en realizar este proyecto de tesis.
- ⇒ Al denominado "Grupo de los 10", es decir, aquellas personas que han compartido conmigo a lo largo de los estudios cursados en nuestra ilustre Casa de Estudios. Estos son: Astrid, María Alejandra, Elisa, Patricia, Alberto, Jesús, Efraín, Eduardo y Eleazar.
- ⇒ A aquellas personas que de una u otra manera me han brindado su confianza y que he conocido en Mérida: Beatriz, Jenny, Ana, Verity, Adis, Norma, María, entre otros. Me disculpan si se me olvidó mencionar a alguno.
- ⇒ En fin, a todas las personas que de una u otra manera han colaborado en realizar esta tarea, en especial, a todos mis amigos y personas que he conocido durante mi estadía en esta ciudad.

www.bdigital.ula.ve



AGRADECIMIENTOS

- ⇒ Al Prof. Edinzo Iglesias por haberme brindado un voto de confianza al realizar este proyecto. Espero que se hayan cumplido, de forma satisfactoria, los objetivos propuestos.

www.bdigital.ula.ve



ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.	xiii
Capítulo I. Introducción.	14
Capítulo II. Consideraciones Teóricas.	16
Sistema de control.	16
II.1. Sistema de primer orden.	16
II.2. Sistema de segundo orden.	16
Tiempo máximo.	17
Sobrepaso máximo.	17
Tiempo de subida	17
Tiempo de asentamiento.	17
Período de oscilación.	17
Frecuencia.	17
II.3. Controladores.	18
II.3.1. Controlador de dos posiciones.	18
II.3.2. Controlador proporcional.	18
II.3.3. Controlador proporcional-integral.	18
II.3.4. Controlador proporcional-integral-derivativo.	19
II.3.5. Controladores lógicos programables (PLC).	20
II.3.6. Estrategias de control avanzado.	20
Control experto.	20
Control óptimo.	20
Control robusto.	20
Control adaptativo.	20
Control neuronal.	21
II.4. Criterios para la selección de los parámetros del controlador que permiten obtener un desempeño óptimo en sistemas de control de lazo cerrado.	21
II.5. Índices de desempeño.	21
Índices de criterios integrales.	21
Índice total.	22
II.6. Lógica Difusa.	30
II.6.1. Teoría de conjuntos difusos.	31
Función de pertenencia.	31
II.6.1.1. Primer principio de extensión.	32
II.6.1.2. Operaciones básicas de los conjuntos difusos.	33
II.6.1.3. Propiedades de las operaciones de los conjuntos difusos.	33
II.6.2. Relaciones difusas.	33
II.6.3. Reglas difusas.	33
Variable lingüística.	34
II.6.4. Sistema basado en lógica difusa.	34
Difusor.	34
Inferencia.	34
Desdifusor.	34
Método del máximo.	34
Método del centroide.	34
Método de la altura.	34
Capítulo III. Desarrollo del índice difuso.	35
III.1. Definición del índice difuso.	35
III.1.1. Descripción del sistema a estudiar.	35
III.1.2. Determinación de los parámetros de sintonización del controlador.	36
III.1.3. Características a evaluar.	38
III.1.4. Método para definir el módulo difuso.	39
III.2. Evaluación del índice difuso.	41
III.2.1. Reactor químico no isotérmico.	41



III.2.2. Tanque de mezclado.	44
Capítulo IV. Resultados y Discusión.	47
IV.1. Parámetros del controlador obtenidos.	47
IV.2. Características de la respuesta evaluadas.	52
IV.3. Desarrollo del módulo difuso.	58
IV.4. Análisis de los índices de desempeños.	64
IV.5. Evaluación del módulo difuso en procesos químicos.	68
IV.5.1. Reactor no isotérmico.	68
IV.5.2. Mezclador de fluidos de procesos.	69
Conclusiones.	72
Recomendaciones.	73
Bibliografía general.	74
Referencias.	75
Anexos.	77

www.bdigital.ula.ve



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.	Operaciones básicas de los conjuntos difusos.	33
Tabla II.	Propiedades de las operaciones de los conjuntos difusos.	33
Tabla III.	Valores de los parámetros del sistema dinámico modelo en estudio.	36
Tabla IV.	Ecuaciones de sintonización de controladores PID establecidas por López y col., para minimizar los índices de criterio integral al generarse una perturbación externa al lazo de control.	38
Tabla V.	Ecuaciones de sintonización de controladores PID establecidas por López y col., para minimizar los índices de criterio integral al generarse un cambio de punto de control en el sistema.	38
Tabla VI.	Parámetros de diseño y condiciones del proceso para el reactor no isotérmico.	43
Tabla VII.	Parámetros de diseño y condiciones del proceso para el tanque de mezclado.	45
Tabla VIII.	Valores óptimos del controlador para cambios del 10% en consigna y perturbación, respectivamente, en el sistema de control modelo.	47
Tabla IX.	Valores obtenidos de los parámetros del controlador al utilizar las ecuaciones de sintonización de López y col., para cambios del 10% en consigna en el proceso modelo.	48
Tabla X.	Valores obtenidos de los parámetros del controlador al utilizar las ecuaciones de sintonización de López y col., para cambios del 10% en perturbación en el proceso modelo.	49
Tabla XI.	Rangos definidos para las características de la respuesta que cuantifican el desempeño del sistema de lazo cerrado.	59
Tabla XII.	Relaciones difusas entre las características de la respuesta consideradas para cuantificar el desempeño del controlador.	61
Tabla XIII.	Valores de índices de desempeño obtenidos en el sistema modelo de lazo cerrado, para cambios positivos del 10% en el valor de consigna, al utilizar los parámetros óptimos del controlador.	67
Tabla XIV.	Valores de índices de desempeño obtenidos en el sistema modelo de lazo cerrado, para cambios positivos del 10% en perturbación externa, al utilizar los parámetros óptimos del controlador.	67
Tabla XV.	Parámetros óptimos del controlador para el sistema de control del reactor químico no isotérmico, al efectuarse un cambio del 10% en perturbación.	69
Tabla XVI.	Valores de índices de desempeño al efectuarse cambios simples y múltiples de perturbaciones externas al lazo de control del reactor no isotérmico.	69
Tabla XVII.	Parámetros óptimos del controlador para el sistema de control del tanque de mezclado, al efectuarse un cambio del 10% en perturbación.	70



Tabla XVIII.	Valores de índices de desempeño al efectuarse cambios simples y múltiples de perturbaciones externas al lazo de control del tanque de mezclado a volumen constante.	70
Tabla XIX.	Valores de índices de desempeño al efectuarse cambios simples y múltiples de perturbaciones externas al lazo de control del tanque de mezclado a volumen variable.	71
Tabla XX.	Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios en el punto de control por encima del 10% del valor inicial de estado estacionario.	78
Tabla XXI.	Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.	81
Tabla XXII.	Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios en el punto de control sobre el 10% del valor inicial de estado estacionario.	84
Tabla XXIII.	Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.	87
Tabla XXIV.	Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios en el punto de control sobre el 10% del valor inicial de estado estacionario.	90
Tabla XXV.	Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.	93
Tabla XXVI.	Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.	96
Tabla XXVII.	Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.	99
Tabla XXVIII.	Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.	102
Tabla XXIX.	Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.	105
Tabla XXX.	Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.	108
Tabla XXXI.	Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.	111



- Tabla XXXII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ISE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control. 114
- Tabla XXXIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ISE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control. 117
- Tabla XXXIV. Valores del índice difuso obtenidos al realizar cambios por encima del 10% de los valores iniciales de set point y perturbaciones externas, respectivamente, en el sistema de lazo cerrado modelo para valores óptimos del proceso y al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar los índices de desempeño según el criterio integral. 120

www.bdigital.ula.ve



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Respuesta obtenida a un cambio de set point para un sistema de segundo orden.	17
Figura 2.	Interpretación gráfica del IAE.	22
Figura 3.	Descripción del área sobre y por debajo del ssv.	24
Figura 4.	Ángulos asociados a la pendiente en el punto de inflexión.	26
Figura 5.	Representación gráfica de un conjunto convencional para un conjunto de temperaturas dadas.	31
Figura 6.	Diversas representaciones de funciones de pertenencias.	32
Figura 7.	Sistema basado en lógica difusa.	34
Figura 8.	Sistema dinámico a estudiar para establecer las características de la respuesta que indican el desempeño de los controladores.	35
Figura 9.	Respuesta obtenida a la salida del sensor para un cambio tipo escalón en la entrada de la válvula del sistema de control.	37
Figura 10.	Conjunto difuso a definir para las características de la respuesta del sistema que permiten calcular el módulo difuso de desempeño.	40
Figura 11.	Sistema de control para la temperatura de salida de un reactor químico no isotérmico.	41
Figura 12.	Sistema de control para la temperatura de salida del tanque de mezclado.	44
Figura 13.	Respuesta obtenida para los valores del proceso $k_p = 0,5$, $\tau = 1$ y $t_o = 1$ al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b) e ITAE (c) para cambios de consigna.	51
Figura 14.	Respuesta obtenida en el sistema de control modelo para los valores del proceso modelo $k_p = 0,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 3$, al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b), ITAE (c) e ISE (d) para cambios de perturbación.	51
Figura 15.	Efecto del tiempo de retraso $t_o = 1$ (a), $t_o = 2$ (b) y $t_o = 3$ (c) sobre la respuesta del sistema modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE al efectuarse un cambio de consigna en el lazo de control para los valores del proceso $k_p = 0,5$ y $\tau = 1$.	52
Figura 16.	Características de la respuesta que se estudiaron para determinar aquellas que cuantifiquen el desempeño de los sistemas de lazo cerrado.	53
Figura 17.	Respuesta óptima obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, para los valores del proceso $k_p = 0,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 1$, al efectuarse una variación del 10% por encima y debajo en el valor de consigna.	54
Figura 18.	Efecto del valor de consigna en el número de picos.	55



Figura 19.	Respuesta obtenida para los valores del proceso modelo $k_p = 1$, $\tau = 1$ y $t_o = 1$ al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b) e ITAE (c) para cambios de consigna.	54
Figura 20.	Efecto del comportamiento de la respuesta en el período, frecuencia y razón de asentamiento.	56
Figura 21.	Efecto de perturbaciones externas, para cambios del 10% (a) y 20% (b) en el proceso, en los tiempos de asentamiento ± 2 , ± 5 , ± 20 y $\pm 50\%$ de la respuesta del sistema modelo, para los valores del proceso $k_p = 1,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 3$.	56
Figura 22.	Efecto de la magnitud de la perturbación en el tiempo de asentamiento.	56
Figura 23.	Respuesta obtenida en el sistema de control modelo para los valores del proceso modelo $k_p = 1$, $\tau = 1$ y $t_o = 2$, al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b), ITAE (c) e ISE (d) para cambios de perturbación.	57
Figura 24.	Efecto del tiempo de subida en el desempeño de la respuesta del sistema de lazo cerrado.	58
Figura 25.	Conjunto difuso que evalúa el tiempo de subida de la respuesta en el sistema de control para cambios de punto de control y perturbación.	59
Figura 26.	Conjunto difuso que evalúa el tiempo de asentamiento alrededor de la banda $\pm 2\%$ del valor final de estado estacionario de la respuesta en el sistema de control para cambios de punto de control y perturbación.	59
Figura 27.	Conjunto difuso que evalúa el sobrepaso máximo de la respuesta en el sistema de control para cambios de consigna y perturbación.	60
Figura 28.	Conjunto difuso que genera el índice difuso.	60
Figura 29.	Superficie correspondiente al valor del índice difuso relacionado con las características tiempo de asentamiento en la banda del $\pm 2\%$ del valor final de estado estacionario y el tiempo de subida de la respuesta obtenida.	63
Figura 30.	Superficie correspondiente al valor del índice difuso relacionado con las características tiempo de subida y sobrepaso máximo de la respuesta obtenida.	64
Figura 31.	Superficie correspondiente al valor del índice difuso relacionado con las características tiempo de asentamiento en la banda del $\pm 2\%$ del valor final de estado estacionario y sobrepaso máximo de la respuesta obtenida.	64
Figura 32.	Respuesta obtenida en el sistema de control modelo para los valores del proceso modelo $k_p = 0,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 3$, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (a), ITAE (b) e ISE (c) para cambios de perturbación.	65
Figura 33.	Respuesta obtenida para los valores del proceso $k_p = 0,5$, $\tau = 1$ y $t_o = 1$ al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b) e ITAE (c) para cambios de consigna.	66
Figura 34.	Efecto del tiempo de retraso $t_o = 1$ (a), $t_o = 2$ (b) y $t_o = 3$ (c) sobre la respuesta del sistema modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE al efectuarse un cambio de consigna en el lazo de control para los valores del proceso $k_p = 0,5$ y $\tau = 1$.	66



RESUMEN

MÓDULO DE EVALUACIÓN DE RENDIMIENTO DE CONTROLADORES BASADO EN LÓGICA DIFUSA

AUTOR: Rogelio Emilio Rivero Contreras.

ASESOR: Edinzo Iglesias.

Mérida, Marzo de 2009.

Los índices de desempeño de controladores permiten cuantificar el rendimiento que presentan los lazos de control. Para establecer un módulo de medición del rendimiento, se estudiaron las características que describen la respuesta de un sistema de lazo cerrado y que de ser posible cuantifiquen, de manera satisfactoria, el desempeño de un sistema de control. Se comprobó la no dependencia de estas características con el modelo matemático del proceso que se está evaluando y se obtuvo que el tiempo de subida, el sobrepaso máximo y el tiempo de asentamiento alrededor de la banda del $\pm 2\%$ del valor final de consigna son los parámetros que permiten medir el desempeño de los controladores. A partir de los resultados obtenidos y mediante el uso de los fundamentos establecidos por la lógica difusa, se definieron rangos para crear los conjuntos difusos. Al compararse las particularidades de la respuesta, mediante el sistema de inferencia difuso, se obtiene un número de índice que luego se transforma en un valor normalizado único, comprendido entre cero y uno. Este valor indica el desempeño de los controladores, de manera independiente a que se genere un cambio de consigna ó de perturbación externa al lazo cerrado.

PALABRAS CLAVES: Controladores. Índice de desempeño. Lógica difusa.



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años la industria de los procesos químicos ha venido desarrollando una tendencia, que aún persiste, a la sistematización y automatización de las operaciones. La automatización de los procesos tiene como propósito obtener un mejor desempeño en el manejo de los sistemas y aumentar la productividad de la industria. Esto implica una mejora de la relación ganancia/costo.

La sistematización, control y automatización de las operaciones se lleva a cabo en conjunto con el avance de la ingeniería y la ciencia.

Una de las maneras que han conseguido y aplicado los ingenieros de control para cuantificar el comportamiento que presentan los sistemas de lazo cerrado, es mediante el uso de los **índices de desempeño**.

Los primeros índices propuestos se desarrollaron en el año 1950 y corresponden a los denominados criterios integrales (Smith y Corripio, 1991). Estos índices comprenden la integral del valor absoluto del error (IAE), la integral del cuadrado del error (ISE), la integral del valor absoluto del error ponderado en el tiempo (ITAE) y la integral del cuadrado del error ponderado en el tiempo (ITSE). Estos criterios se basan en el análisis del error en la señal del sistema de control.

Por otro lado, con el surgimiento de las técnicas y métodos del control adaptativo (Miller y col., 1991; Datta e Iannou, 1994; Ortega, 1993; Narendra y Balakrishnan, 1997) se han establecido diversos procedimientos con la finalidad de medir el desempeño de un sistema de control de lazo cerrado, siendo estos los que se basan en la medida de la norma L_∞ (Datta e Iannou, 1994; Ortega, 1993), la norma L_2 (Ortega, 1993) ó las modificaciones realizadas a la integral del cuadrado del error (Narendra y Balakrishnan, 1997).

En el año 2004 se desarrolla el índice total (Duarte-Mermoud y Prieto, 2004). Mediante éste se establecen definiciones matemáticas que cuantifican el desempeño de un sistema de control, de lazo cerrado, al evaluar las características que presenta la respuesta. El índice total reúne, en su mayoría, los parámetros necesarios para el diseño y la optimización de los controladores. Este índice establece 3 tipos de subíndices modelos los cuales se ajustan a las características de la respuesta estudiada. El valor del índice que se asigna a cada una de las particularidades consideradas, resulta de la comparación entre la respuesta obtenida en el lazo cerrado con respecto a una respuesta patrón definida por el investigador.

En general, los índices de desempeño cuantifican el trabajo que ejecutan los sistemas de control a lazo cerrado. Los índices basados en criterios integrales ponderan la magnitud del error entre la señal de la respuesta y el valor de consigna, de acuerdo a la definición que estos presentan. Estos índices cuantifican el desempeño del lazo de control según el comportamiento de la respuesta que se obtiene en el sistema. Por ejemplo, el ISE tiene más ponderación para desviaciones elevadas respecto al punto de control las cuales se originan, generalmente, al inicio de la respuesta, y menor ponderación para errores pequeños. Para contrarrestar esto, se establecieron los índices ponderados en el tiempo, ITAE e ITSE.

Si se desea implementar el índice total para cuantificar el desempeño de los controladores, el investigador debe tener conocimientos previos respecto al comportamiento que puede presentar cada una de las características de la respuesta, con la finalidad de asignar la ponderación adecuada para los



parámetros que definen este índice. Desde este punto de vista, el índice total no es práctico si se desea aplicar a procesos industriales y obtener un resultado rápido.

Es así como surge la necesidad de realizar un estudio de la respuesta que se obtiene en un sistema de control de lazo cerrado, con la finalidad de obtener los parámetros que permitan cuantificar el trabajo que ejecuta el sistema y establecer un módulo que permita ponderar el desempeño que presentan los controladores.

Para establecer el módulo de desempeño de los controladores se usó la Lógica Difusa, desarrollada por el profesor L.A. Zadeh en el año 1965 (Reznik, 1997). La lógica difusa se basa en definiciones de conjuntos matemáticos. Estos conjuntos se establecen bajo ciertos criterios y que se definen de acuerdo a los conocimientos del investigador. El uso de esta técnica en los últimos años ha permitido obtener resultados satisfactorios con respecto a los métodos estadísticos y matemáticos tradicionales. La lógica difusa es una técnica de fácil implementación.

En base a lo anterior, se definen los siguientes objetivos:

Objetivo General

Diseñar un módulo que permita evaluar la efectividad y rendimiento de los controladores en lazos SISO (Single Input Single Output), basado en lógica difusa.

Objetivos Específicos

- ⇒ Realizar revisión de los métodos existentes de medición del desempeño de los controladores. Evaluar sus fortalezas y debilidades.
- ⇒ Establecer los parámetros característicos que puedan ser indicativos del desempeño del controlador y/o su sintonización.

Para cumplir de manera satisfactoria con los objetivos propuestos se ejecutan simulaciones de procesos de primer orden con tiempo muerto. Estas simulaciones se llevan a cabo con la finalidad de evaluar cada una de las características de la respuesta del lazo cerrado, incluidas las consideradas por el índice total, para obtener los parámetros que puedan ser indicativos del desempeño de los controladores. A partir de estas características, se establecen las funciones de pertenencias y las reglas de comparación del sistema de inferencia difuso que permitan obtener valores lingüísticos que describan el trabajo del sistema. Estos valores lingüísticos, posteriormente, se convierten en un valor convencional único que muestre de manera clara y correcta el desempeño que presentan los controladores.

Por último, se evalúa el funcionamiento del índice difuso definido empleando simulaciones de procesos químicos. Los sistemas que se consideran son un reactor químico no isotérmico y un tanque de mezclado a volumen constante y variable, respectivamente. En estos procesos se compara la efectividad del módulo difuso con respecto a los índices de desempeños basados en el criterio de la integral del error.



CAPÍTULO II. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

Un **sistema de control** comprende una serie de dispositivos interrelacionados entre sí con la finalidad de llevar a cabo una tarea. Esta tarea tiene como principio básico la regulación automática o guía de sistemas dinámicos. Para ello, los dispositivos del sistema deben estar optimizados para funcionar bajo ciertas condiciones de consigna ó estados estacionarios. Los componentes básicos que integran un sistema de control son: el *sensor*, el cual registra la variable que se desea controlar; el *transmisor*, que tiene como función captar la señal de salida del sensor y llevarla al controlador; el *controlador* que recibe la señal y la compara con un valor de consigna ó punto de control, decidiendo la acción a tomar para corregir el error; y el *elemento final de control* el cual ajusta las entradas que tienden a perturbar el sistema para obtener el valor que se desea. (Smith y Corripio, 1991)

El comportamiento de la instrumentación que se utiliza en los sistemas de control puede ser modelado a través de ciertas funciones matemáticas, entre las cuales se encuentran los sistemas de primer y segundo orden, respectivamente.

II.1. Sistema de primer orden

Presenta una relación entrada-salida, en el dominio de la frecuencia, de acuerdo a la Ec. (1).

$$\frac{S(s)}{E(s)} = \frac{k_p}{\tau s + 1} \quad (1)$$

donde k_p es la ganancia del proceso y τ es la constante de tiempo del proceso.

II.2. Sistema de segundo orden

La función de transferencia de un sistema de este tipo se indica en la Ec. (2).

$$\frac{S(s)}{E(s)} = \frac{\omega_n}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

donde ξ es el factor de amortiguamiento relativo y ω_n es la frecuencia natural no amortiguada.

La respuesta que se genera en un sistema dinámico de segundo orden, al efectuarse un cambio del tipo escalón en el valor de consigna ó de punto de control, se muestra en la Figura 1.

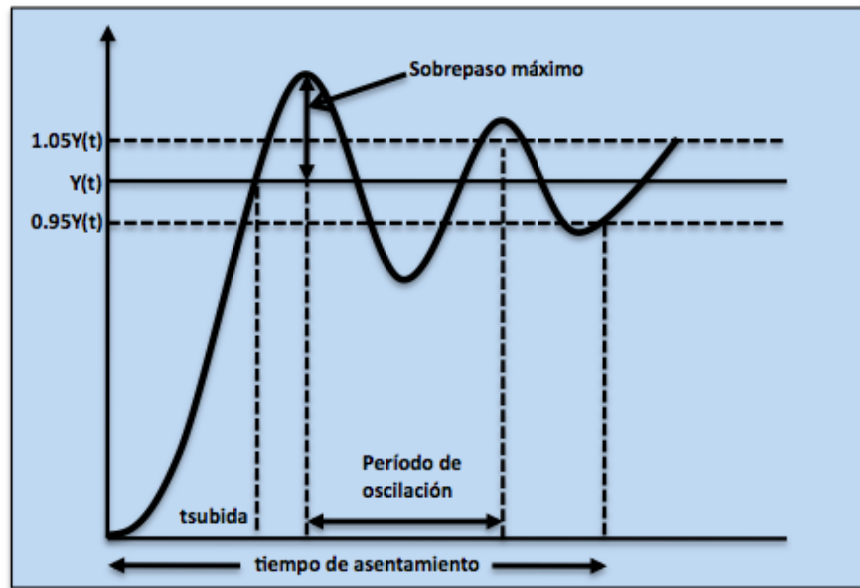


Figura 1. Respuesta obtenida a un cambio de tipo escalón en set point para un sistema de segundo orden.
Fuente: Adaptación de (Molina y col., 2003).

La respuesta característica de un sistema de segundo orden ante un cambio de tipo escalón, en la función de forzamiento, se asemeja a la respuesta obtenida en un lazo de control al efectuarse el mismo cambio. Es por esto que, a menudo, se utilizan algunas particularidades de esta respuesta para caracterizar las respuestas a lazo cerrado.

En la Figura 1, se muestran los parámetros que, en general, se usan para caracterizar la respuesta a lazo cerrado.

- ◆ *Tiempo máximo.* Es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer máximo ó pico del sobrepaso.
- ◆ *Sobrepaso máximo.* Es el valor máximo de la curva de respuesta medido a partir del valor de punto de control. Si el valor final en estado estacionario difiere del valor de consigna, se usa como medida el porcentaje de sobrepaso máximo.
- ◆ *Tiempo de subida.* Es el valor de tiempo en el cual se alcanza por primera vez el valor de punto de control.
- ◆ *Tiempo de asentamiento.* Es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor de punto de control. La Figura 1 muestra el tiempo de asentamiento de la respuesta al definirse una banda de oscilación del $\pm 5\%$ alrededor del valor de consigna.
- ◆ *Período de oscilación.* Es la diferencia entre los tiempos en que ocurren los primeros dos picos, es decir, en que la respuesta describe una oscilación completa.
- ◆ *Frecuencia.* Es el inverso del período de oscilación. (Molina y col., 2003)



II.3. Controladores

Son los dispositivos que eligen la acción que se debe ejecutar en un lazo de control para que el sistema alcance un valor deseado de consigna. Existe una clasificación amplia de controladores, de acuerdo a la aplicación y a la forma en que se encuentran definidos y construidos, siendo la más genérica la siguiente:

- De dos posiciones ó de encendido ó apagado (on-off).
- Controladores PID.
 - ✓ Proporcionales.
 - ✓ Proporcionales-integrales.
 - ✓ Proporcionales-integrales-derivativos.
- Controladores lógicos programables.
- Estrategias de control avanzado.

II.3.1. Controlador de dos posiciones

Este controlador presenta el diseño más simple. El elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas que, en muchos casos, son simplemente encendido y apagado. La acción de control en este modo se realiza de manera discontinua, ocasionando oscilaciones de la variable controlada respecto a la condición requerida, debido a retrasos en la señal de salida del controlador y la respuesta del proceso. Este controlador se utiliza cuando los cambios son lentos y la señal de salida que genera es de encendido ó de apagado sin importar la magnitud del error que ésta conlleva. (Grimaney, 2008)

El control de dos posiciones es relativamente simple y barato. Este controlador presenta usos extendidos en sistemas de control de lazo cerrado tanto industriales como domésticos.

II.3.2. Controlador proporcional

Genera una señal de salida proporcional al tamaño del error en el proceso, $e(t) = c(t) - c_{est}(t)$. La representación de este controlador, en el dominio del tiempo y de la frecuencia, viene dada por las Ec. (3) y (4), respectivamente.

$$\text{Dominio en el tiempo } m(t) = k_c e(t) + \bar{m} \quad (3)$$

$$\text{Dominio en frecuencia } M(s) = k_c E(s) \quad (4)$$

donde k_c es la ganancia proporcional ajustable.

Las ventajas al usar este tipo de controlador radica en la instantaneidad de su aplicación. Un controlador proporcional puede controlar cualquier planta estable, pero posee desempeño limitado y error en régimen permanente (offset), es decir, presenta un desfase entre el valor de punto de referencia y el que se obtiene en el lazo cerrado.

II.3.3. Controlador proporcional-integral

La acción de control que se lleva a cabo en este dispositivo se describe mediante la Ec. (5) y (6).



$$\text{Dominio en el tiempo } m(t) = k_c e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + \bar{m} \quad (5)$$

$$\text{Dominio en frecuencia } M(s) = E(s) \left[k_c + k_i \frac{1}{s} \right] \quad (6)$$

La acción integral en el controlador cuantifica la cantidad de error que se genera en el sistema, eliminando así la desviación en régimen permanente que presentan los controladores proporcionales, pudiendo aumentar el tiempo de respuesta y causar picos.

Muchos controladores industriales PID sólo emplean la acción de control PI. Se puede demostrar que este tipo de controlador resulta adecuado para procesos que presentan una dinámica de primer orden, mediante un ensayo, por ejemplo, de prueba escalón.

II.3.4. Controlador proporcional-integral-derivativo

La acción de control que se lleva a cabo en este dispositivo se describe mediante las Ec. (7) y (8).

$$\text{Dominio en el tiempo } m(t) = k_c e(t) + k_i \int_0^t e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} + \bar{m} \quad (7)$$

$$\text{Dominio en frecuencia } M(s) = \left[k_c + k_i \frac{1}{s} + k_d s \right] E(s) \quad (8)$$

Al incluir la acción derivativa a un controlador proporcional se obtiene un dispositivo con una sensibilidad elevada. Este controlador responde a la velocidad del cambio del error y genera una señal importante que evita que la magnitud de la desviación sea considerable. El uso de los términos proporcional-integral-derivativo, de manera conjunta, tiene aplicación en más del 90% de las operaciones industriales.

La Ec. (8) no incluye los términos que usualmente suelen modificarse para mejorar el desempeño de un controlador PID en un proceso dado. Es así como se definen en las Ec. (9) y (10) los términos constante de tiempo integral y derivativo, respectivamente.

$$\tau_i = k_c / k_i \quad (9)$$

$$\tau_d = k_d / k_c \quad (10)$$

Realizando las sustituciones pertinentes en la Ec. (8) se obtiene la expresión de un controlador PID ideal, como se muestra en la Ec. (11).

$$\text{Dominio en frecuencia } M(s) = \left[1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right] k_c E(s) \quad (11)$$



Debido a que en la práctica es imposible implantar el cálculo de la derivada, se hace una aproximación adelanto/retardo del controlador, obteniéndose así una nueva función de transferencia del dispositivo. Esta se indica en la Ec. (12).

$$\text{Dominio en frecuencia } M(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \left(\frac{\tau_d s + 1}{\alpha \tau_d s + 1} \right) E(s) \quad (12)$$

donde α es una constante de filtro que permite que el controlador sea más robusto, es decir, sea tolerante a los cambios ó perturbaciones que puedan presentarse en las condiciones de trabajo del proceso.

II.3.5. Controladores lógicos programables (PLC)

Este tipo de controlador surge a finales de 1960, debido a la necesidad que tenían los fabricantes de autos en reemplazar los antiguos paneles de relees electromecánicos con sistemas de control de manufactura. En la actualidad, existe una gran variedad de equipos PLCs en el mercado: los controladores micro PLC cuentan con una capacidad de manejo de menos de 50 puntos analógicos; además, existen PLCs con capacidad de 500 puntos ó más los cuales tienen la propiedad de ejecutar lazos PID, monitoreo de variables analógicas, entre otras funciones.

El PLC es un controlador electrónico que consta de un procesador y una memoria lógica programable que almacena instrucciones e implementa funciones específicas. (Grimaney, 2008)

II.3.6. Estrategias de control avanzado

El control avanzado se refiere a la aplicación de estrategias que trascienden a las establecidas en la teoría de control clásica. Estas estrategias implican el desarrollo de algoritmos que se basan en una plataforma computacional. Algunas estrategias de control avanzado son:

- ✓ *Control experto.* Se basa en la recopilación de conocimientos de un sistema. La lógica difusa (Reznik, 1997) es la técnica, dentro de este campo, que ha tenido mayor aceptación a nivel industrial.
- ✓ *Control óptimo.* Este control se basa en la definición de una función que incluye los parámetros que permiten ejecutar la acción de control. Establece un criterio de optimización sobre esta función, ajustándola a los objetivos del sistema de control. El control predictivo por modelo (MPC) (Joe Qin y Badgwell, 1996) es la técnica que mejor representa a este tipo de control.
- ✓ *Control robusto.* En este tipo se define una estructura de control que presente un desempeño acorde a las especificaciones del sistema, de manera independiente a las perturbaciones a la que este se expone. El control óptimo H_∞ (Tham, 2002) es el que tiene mayor desarrollo a nivel académico.
- ✓ *Control adaptativo.* Es apropiado para sistemas variantes en el tiempo. Suele incorporar técnicas de identificación de parámetros por mínimos cuadrados u otras técnicas propias del sistema resultante. El Control adaptativo por modelo de referencia (RMAC) (Sevcik, 2006) es la estrategia más conocida de este tipo.



- ✓ *Control neuronal.* Las redes neuronales (Nauck, 1997) son estructuras matemáticas que representan la información en forma similar a como se estructura en el cerebro. Estas se comportan como una caja negra que pueden emular el comportamiento de un sistema.

II.4. Criterios para la selección de los parámetros del controlador que permitan obtener un desempeño óptimo en sistemas de control de lazo cerrado

El objetivo principal que se debe cumplir en un sistema de control con retroalimentación es asegurar que la respuesta obtenida en el lazo cerrado sea la deseada y estable. Para ello, es necesario que el sistema cumpla con los siguientes criterios de desempeño:

1. El lazo de control debe ser estable, es decir, que para cualquier entrada acotada que perturbe el sistema produzca una salida acotada.
2. El efecto de las perturbaciones sea el mínimo.
3. Las respuestas obtenidas a los cambios de consigna ó punto de control deben ser rápidas y suaves.
4. El error en régimen permanente sea eliminado.
5. Se evite la excesiva acción de control. Para ello se debe minimizar, de forma rápida, la magnitud del error, disminuyendo así el uso que se le da al controlador.
6. El sistema de control debe ser robusto.

En problemas típicos de control, no es posible cumplir con todos estos criterios. Esto genera ciertos conflictos al momento de optimizar y establecer los parámetros de sintonización del controlador, que permitan obtener un buen desempeño de los sistemas de lazo cerrado. Por ejemplo, los ajustes del controlador PID que minimizan las perturbaciones tienden a producir un gran sobrepaso para cambios en el punto de control. Si el controlador es ajustado para proveer una respuesta rápida y suave a los cambios de consigna, usualmente resulta en un control lento para las perturbaciones. Así, es necesario que exista una compensación entre la selección de los ajustes del controlador que conlleven cambios del punto de control y de perturbaciones. (Seaborg y col., 1989)

II.5. Índices de desempeño

Son aquellos que evalúan el trabajo que ejecutan los controladores basados en la respuesta del lazo de control cerrado, al ajustar las relaciones de sintonización del mismo.

Los cuatro índices de desempeño más usados son los que corresponden a los denominados criterios integrales, estos son: la integral del valor absoluto del error (IAE), la integral del cuadrado del error (ISE), la integral del valor absoluto del error ponderado en el tiempo (ITAE) y la integral del cuadrado del error ponderado en el tiempo (ITSE). Las Ec. (13) a (16) definen a estos índices.

$$IAE = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (13)$$

$$ISE = \int_0^{\infty} [e(t)]^2 dt \quad (14)$$



$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (15)$$

$$ITSE = \int_0^{\infty} t[e(t)]^2 dt \quad (16)$$

El índice IAE cuantifica el área bajo la curva de la señal del error que se genera en el lazo de control mientras se alcanza el valor final deseado. La Figura 2 muestra una interpretación gráfica de esta definición.

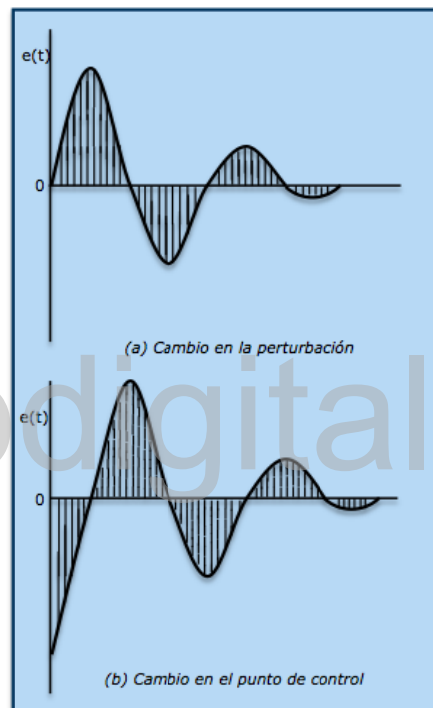


Figura 2. Interpretación gráfica del IAE.
Fuente: Adaptación de (Smith y Corripio, 1991).

En algunos casos, la desviación permanente no tiende a cero. Esto genera un inconveniente en la definición de las integrales. Cuando esto sucede, se reemplaza el error por la diferencia entre la variable controlada y su valor final de estado estacionario.

En base a los índices de desempeño de criterio integral, se han desarrollado relaciones de sintonización para controladores PID. Estas ecuaciones minimizan el error que se genera en el sistema de control al efectuarse un cambio de consigna ó perturbación externa al lazo cerrado.

Existe otro índice de desempeño el cual se denomina **índice total** (Duarte-Mermoud y Prieto, 2004).

El índice total cuantifica la desviación de la respuesta del sistema respecto a una respuesta modelo establecida. Así, este debe cumplir con las siguientes propiedades:



- Debe considerar una serie de parámetros característicos, que describan el comportamiento que presenta la respuesta de un sistema de control a lazo cerrado.
- Debe ser un valor único (positivo o cero) fácil de interpretar.
- Debe ser fácilmente calculado por métodos analíticos.

Para comparar los parámetros asociados al cálculo del índice total se define un intervalo [0 1]. Este representa un valor normalizado que permite lograr una comparación entre la respuesta obtenida en el lazo de control (C_c) y la respuesta modelo establecida por el investigador (C_p). Un valor cercano a 1 indica una buena correspondencia entre ambas respuestas.

Los parámetros que considera el índice total son los siguientes:

⇒ *Valor de estado estacionario (ssv)*. Se denota por I_{ssv} y se define mediante la Ec. (17).

$$I_{ssv} = \begin{cases} 0 & \text{si } ssv_c \notin [0, 2ssv_p] \\ 1 - \exp\left(\frac{0.02ssv_c}{ssv_c - ssv_p}\right) & \text{si } ssv_c \in [0, ssv_p] \\ 1 & \text{si } ssv_c = ssv_p \\ 1 - \exp\left(\frac{0.02(2ssv_p - ssv_c)}{ssv_p - ssv_c}\right) & \text{si } ssv_c \in (ssv_p, 2ssv_p] \end{cases} \quad (17)$$

donde $ssv_p = C_p$ y $ssv_c = C_c$.

⇒ *Tiempo de asentamiento (t_s)*. Se denota por I_{ts} y se define mediante la Ec. (18).

$$I_{ts} = \begin{cases} 1 & \text{si } t_{s_c} \in [0, t_{sp}] \\ \left|\frac{t_f - t_{s_c}}{t_f - t_{sp}}\right|^3 & \text{si } t_{s_c} \in (t_{sp}, t_f] \end{cases} \quad (18)$$

donde $t_{sp} = C_p$ y $t_f = C_c$. t_f es el tiempo final en el que se lleva a cabo el estudio.

⇒ *Índices según criterios integrales*. Se denotan por I_{IAE} , I_{ITAE} , I_{ISE} e I_{ITSE} . El criterio que define este índice es el mostrado en la Ec. (19).

$$I = \begin{cases} 1 & \text{si } C_c \leq C_p \\ \exp[-0.5(C_c - C_p)] & \text{si } C_c > C_p \end{cases} \quad (19)$$



donde C_c es la respuesta característica asociada al sistema ($IAE_c, ITAE_c, ISE_c, ITSE_c$) y C_p es la respuesta patrón ($IAE_p, ITAE_p, ISE_p, ITSE_p$).

⇒ Áreas alrededor del ssv (ap, an). La Figura 3 describe el área que se tiene por encima (ap) y por debajo (an) del valor de ssv.

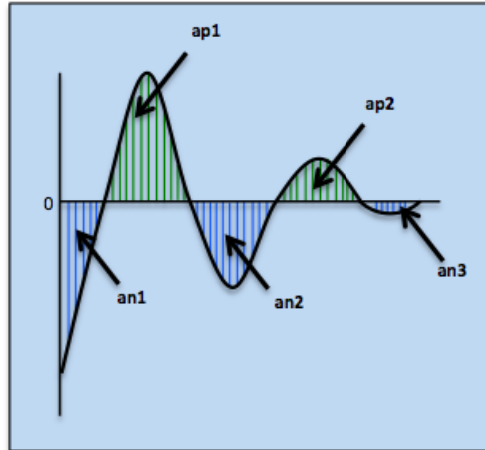


Figura 3. Descripción del área sobre y por debajo del ssv.
Fuente: Adaptación de (Duarte-Mermoud y Prieto, 2004).

Para cuantificar la similitud del área sobre el ssv de la respuesta del sistema (ap_c) respecto al área de la respuesta del modelo (ap_p) se define el índice I_{ap} . Este se muestra en la Ec. (20).

$$I_{ap} = \begin{cases} 1 & \text{si } ap_p \in [0, 0.01tma_p] \text{ y } ap_c \in [0, 0.01tma_p] \\ 0 & \text{si } ap_p \in [0, 0.01tma_p] \text{ y } ap_c \in (0.01tma_p, tma_p] \\ 1 - \exp\left(\frac{0.08(ap_c - tma_p)}{ap_c}\right) & \text{si } ap_p \in [0, 0.01tma_p] \text{ y } ap_c \in [0.01tma_p, tma_p] \\ 1 & \text{si } ap_p > 0.01tma_p \text{ y } ap_c = ap_p \\ 0 & \text{si } ap_p > 0.01tma_p \text{ y } ap_c \notin [0, 2ap_p] \\ \left(1 - \frac{|ap_p - ap_c|}{ap_p}\right)^3 & \text{si } ap_p > 0.01tma_p \text{ y } ap_c \in [0, ap_p] \cup (ap_p, 2ap_p] \end{cases} \quad (20)$$

tma_p se define como la máxima tolerancia de la respuesta modelo y se expresa en la Ec. (21).

$$tma_p = ssv_p \times t_{s_p} \quad (21)$$

De manera análoga, la Ec. (22) define el índice I_{an} para el área bajo el valor del ssv.



$$I_{an} = \begin{cases} 1 & \text{si } an_p \in [0, 0.01tma_p] \text{ y } an_c \in [0, 0.01tma_p] \\ 0 & \text{si } an_p \in [0, 0.02tma_p] \text{ y } an_c \in (0.01tma_p, tma_p] \\ 1 - \exp\left(\frac{0.08(an_c - tma_p)}{an_c}\right) & \text{si } an_p \in [0, 0.01tma_p] \text{ y } an_c \in (0.01tma_p, tma_p] \\ 1 & \text{si } an_p > 0.01tma_p \text{ y } an_c = an_p \\ 0 & \text{si } an_p > 0.01tma_p \text{ y } an_c \notin [0, 2an_p] \\ \left(1 - \frac{|an_p - an_c|}{an_p}\right)^3 & \text{si } an_p > 0.01tma_p \text{ y } an_c \in [0, an_p] \cup [an_p, 2an_p] \end{cases} \quad (22)$$

⇒ *Desviación del área alrededor del ssv (dap, dan).* El área total alrededor del ssv comprende la suma de las áreas por encima y por debajo, como lo define la Ec. (23).

$$aT = ap + an \quad (23)$$

La desviación de las áreas por encima y debajo del valor de consigna respecto al área total viene dada por las Ec. (24) y (25), respectivamente.

$$dap = \frac{ap}{aT} \quad (24)$$

$$dan = \frac{an}{aT} \quad (25)$$

El índice I_{da} estima el porcentaje del área por encima y debajo del ssv de la respuesta del sistema respecto a la respuesta patrón. Al definir las siguientes desviaciones,

$$dap_p = \frac{ap_p}{aT_p} \quad (26)$$

$$dap_c = \frac{ap_c}{aT_c} \quad (27)$$

$$dan_p = \frac{an_p}{aT_p} \quad (28)$$

$$dan_c = \frac{an_c}{aT_c} \quad (29)$$

se puede establecer el par



$$(da_c, da_p) = \begin{cases} (dap_c, dap_p) \\ (dan_c, dan_p) \end{cases} \quad \text{ó} \quad (30)$$

con lo cual es posible obtener el índice I_{da} al seleccionar cualquiera de los dos pares ordenados definidos en la Ec. (30).

$$I_{da} = \begin{cases} (1 - da_c)^4 & \text{si } da_p = 0 \\ da_c^4 & \text{si } da_p = 2 \\ \left(1 + \frac{da_c - da_p}{1 - da_p}\right)^4 & \text{si } da_p \in (0, 0.5] \text{ y } da_c < da_p \\ \left(1 - \frac{da_c - da_p}{1 - da_p}\right)^4 & \text{si } da_p \in (0, 0.5] \text{ y } da_c \geq da_p \\ \left(\frac{da_c}{da_p}\right)^4 & \text{si } da_p \in (0.5, 1) \\ \left(1 - \frac{da_c - da_p}{da_p}\right)^4 & \text{si } da_p \in (0.5, 1) \text{ y } da_c \geq da_p \end{cases} \quad (31)$$

⇒ *Pendiente en el punto de inflexión (s)*. El punto de inflexión da una idea del tiempo de respuesta que tiene un sistema de control de lazo cerrado al aplicarle un cambio de consigna ó de perturbación. Para ello se definen los ángulos mostrados en la Figura 4.

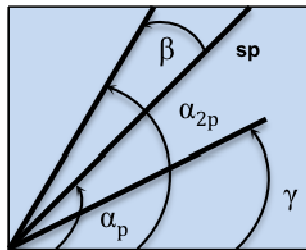


Figura 4. Ángulos asociados a la pendiente en el punto de inflexión.
Fuente: Adaptación de (Duarte-Mermoud y Prieto, 2004).

donde α_p es el ángulo asociado de la respuesta modelo en el punto de inflexión y α_c es el ángulo asociado de la respuesta del sistema.

La Figura 4 permite definir las siguientes relaciones entre los ángulos descritos en ésta. Estas se muestran en las Ec. (32) a (34).

$$\alpha_{2p} = \arctan(2s_p) \quad (32)$$



$$\beta = \alpha_{2p} - \alpha_p \quad (33)$$

$$\gamma = \alpha_p - \beta \quad (34)$$

El índice I_s se obtiene a partir de la Ec. (35).

$$I_s = \begin{cases} 0 & \text{si } \alpha_c \notin [\gamma, \alpha_{2p}] \\ 1 - \left(\frac{\alpha_p - \alpha_c}{\alpha_p - \gamma} \right)^2 & \text{si } \alpha_c \in [\gamma, \alpha_p) \\ 1 & \text{si } \alpha_c = \alpha_p \\ 1 - \left(\frac{\alpha_c - \alpha_p}{\alpha_{2p} - \alpha_p} \right)^2 & \text{si } \alpha_c \in (\alpha_p, \alpha_{2p}] \end{cases} \quad (35)$$

⇒ *Suma del error de los picos, máximos y mínimos.* La suma de los errores de los sobrepasos (sov) y bajopasos (sun) da la idea de la dificultad que puede tener un sistema dinámico en encontrar el valor de estado estacionario. Las Ec. (36) y (37) definen a estos.

$$sov = \sum_{j=1}^n |y(t_j) - ssv| \quad (36)$$

$$sun = \sum_{k=1}^n |y(t_k) - ssv| \quad (37)$$

Se define spk_p como la suma de los sobrepasos y bajopasos para la respuesta modelo, y spk_c como la suma de los sobrepasos y bajopasos para la respuesta del sistema.

$$spk = sov + sun \quad (38)$$

El índice que cuantifica este parámetro se muestra en la Ec. (39).



$$I_{spk} = \begin{cases} 1 & \text{si } spk_p = 0 \text{ y } spk_c \in [0, 0.05ssv_p] \\ 0 & \text{si } spk_p = 0 \text{ y } spk_c \notin [0, 0.05ssv_p] \\ 1 - \exp\left(\frac{0.08(sp k_c - 0.5ssv_p)}{sp k_c}\right) & \text{si } spk_p = 0 \text{ y } spk_c \in [0.05ssv_p, 0.5ssv_p] \\ 0 & \text{si } spk_p \neq 0 \text{ y } spk_c \in [0, spk_p] \\ 1 - \exp\left(\frac{0.08sp k_c}{sp k_c - sp k_p}\right) & \text{si } spk_p \neq 0 \text{ y } spk_c \in [0, spk_p) \\ 1 & \text{si } spk_p \neq 0 \text{ y } spk_c = spk_p \\ 1 - \exp\left(\frac{0.08(2sp k_p - sp k_c)}{sp k_p - sp k_c}\right) & \text{si } spk_p \neq 0 \text{ y } spk_c \in (sp k_p, 2sp k_p] \end{cases} \quad (39)$$

⇒ *Desviación de la suma de los errores de los sobrepasos y bajopasos (dsov, dsun).* Las desviaciones de la suma de los errores de los máximos (dsov) y mínimos (dsun) para las respuestas del modelo y del sistema de lazo cerrado obtenidas se definen en las Ec. (40) a (43), respectivamente.

$$dsov_p = \frac{sov_p}{spk_p} \quad (40)$$

$$dsov_c = \frac{sov_c}{spk_c} \quad (41)$$

$$dsun_p = \frac{sun_p}{spk_p} \quad (42)$$

$$dsun_c = \frac{sun_c}{spk_c} \quad (43)$$

Al igual que para el cálculo de la desviación del área se define un par ordenado para este parámetro, según lo indica la Ec. (44).

$$(dspk_c, dspk_p) = \begin{cases} (dsov_c, dsov_p) \\ (dsun_c, dsun_p) \end{cases} \quad \text{ó} \quad (44)$$

El índice que cuantifica la suma de los errores de los máximos y mínimos I_{dspk} es el que describe la Ec. (45).



$$I_{dspk} = \begin{cases} (1 - dspkc)^4 & \text{si } dspk_p = 0 \\ dspkc^4 & \text{si } dspk_p = 1 \\ \left(1 + \frac{dspkc - dspk_p}{1 - dspk_p}\right)^4 & \text{si } dspk_p \in (0, 0.5] \text{ y } dspkc < dspk_p \\ \left(\frac{dspkc}{dspk_p}\right)^4 & \text{si } dspk_p \in (0.5, 1) \text{ y } dspkc < dspk_p \\ \left(1 - \frac{dspkc - dspk_p}{dspk_p}\right)^4 & \text{si } dspk_p \in (0.5, 1) \text{ y } dspkc \geq dspk_p \end{cases} \quad (45)$$

⇒ *Número de sobrepasos y bajopasos (npk)*. Este parámetro indica el grado de oscilación de la respuesta del sistema. El índice I_{npk} se define en la Ec. (46).

$$I_{npk} = \begin{cases} 1 & \text{si } npk_p = 0 \text{ y } npk_c = 0 \\ \frac{1}{1 + npk_c} & \text{si } npk_p = 0 \text{ y } npk_c \neq 0 \\ \frac{1}{1 + npk_p} & \text{si } npk_p \neq 0 \text{ y } npk_c = 0 \\ \frac{\min(npk_c, npk_p)}{\max(npk_c, npk_p)} & \text{si } npk_p \neq 0 \end{cases} \quad (46)$$

⇒ *Frecuencia de la respuesta (f)*. La frecuencia indica el número de oscilaciones que presenta la respuesta de un sistema dinámico al generarse un cambio de punto de control ó de perturbación. Ésta se define en la Ec. (47).

$$f = \frac{1}{T} \quad (47)$$

Al igual que para los parámetros descritos anteriormente, se debe definir una frecuencia para la respuesta modelo (f_p) y la obtenida en el sistema de lazo cerrado (f_c).

El índice I_f se determina de acuerdo a lo señalado por la Ec. (48).



$$I_f = \begin{cases} 1 & \text{si } f_p = 0 \text{ y } f_c = 0 \\ 0 & \text{si } f_p = 0 \text{ y } f_c \neq 0 \\ 0 & \text{si } f_p \neq 0 \text{ y } f_c \notin [0, 2f_p] \\ 1 - \exp\left(\frac{0.08f_c}{f_c - f_p}\right) & \text{si } f_p \neq 0 \text{ y } f_c \in [0, f_p) \\ 1 & \text{si } f_p \neq 0 \text{ y } f_c = f_p \\ 1 - \exp\left(\frac{0.08(2f_p - f_c)}{f_p - f_c}\right) & \text{si } f_p \neq 0 \text{ y } f_c \in (f_p, 2f_p] \end{cases} \quad (48)$$

Una vez definidos todos los parámetros requeridos para calcular el índice total se define a éste último según la Ec. (49).

$$I_T = \sum I_i \times x_i \quad (49)$$

donde x_i se puede establecer como un factor de ponderación que define el investigador a su criterio de acuerdo a la importancia que puede tener cada parámetro de la respuesta.

II.6. Lógica difusa

Los primeros fundamentos teóricos de la lógica difusa fueron introducidos por el profesor L.A. Zadeh de la Universidad de California en Berkeley en el año 1965. Estos no fueron implementados hasta que el Dr. E.H. Mamdani, quien es profesor en la Universidad de Londres, aplicó la lógica difusa en una práctica para el control automático de un motor de vapor en 1974. Luego, en 1976, Blue Circle Cement y Sira en Dinamarca desarrollaron una aplicación industrial para el control de los hornos de cemento basados en esta técnica. La operación de este sistema comenzó en 1982. A partir de 1980, se han reportado muchas implementaciones difusas en aplicaciones industriales. (Bai y col., 2006)

Al indagar un poco acerca del significado del término difuso, se tiene que éste procede de la palabra inglesa "fuzz", el cual sirve para denominar la pelusa que recubre el cuerpo de los polluelos al salir del huevo. Este término significa "confuso, borroso, indefinido ó desenfocado". (Iglesias, 2002)

En el desarrollo de la rutina diaria se suelen utilizar términos considerados como "difusos". Al momento de responder ó generar opiniones respecto a una situación se suelen utilizar frases como "no muy satisfecho" ó "bastante satisfecho". Estas frases no representan una magnitud o valor exacto al momento de cuantificar el grado ó nivel de la respuesta u opinión que se esté dando. Así, estas respuestas se califican como vagas y sólo pueden ser creadas y aplicadas por los seres humanos, y no por las máquinas.



II.6.1. Teoría de conjuntos difusos

La lógica difusa se basa en el concepto de conjuntos difusos. Este último proporciona un medio para representar la incertidumbre. En general, la teoría de la probabilidad es la principal herramienta para el análisis de la incertidumbre, y ésta se supone que es un proceso aleatorio. Sin embargo, no toda incertidumbre es aleatoria, y la teoría de conjuntos difusos se utiliza para modelar el tipo de incertidumbre asociado con imprecisión, vaguedad y falta de información.

Matemáticamente, un conjunto difuso se representa por medio de la Ec. (50).

$$A = \{(u, \mu_A(u)) | u \in U\} \quad (50)$$

Se define la **función de pertenencia (μ)** como el valor que indica si un elemento pertenece a un conjunto dado. En el caso de los conjuntos convencionales, si los elementos pertenecen a un determinado grupo de elementos se les asigna el valor $\mu = 1$; en caso de que no se encuentren dentro del conjunto en estudio, la función de pertenencia toma el valor de $\mu = 0$. La Figura 5 muestra la representación gráfica de un conjunto convencional, para un rango de temperaturas dadas.

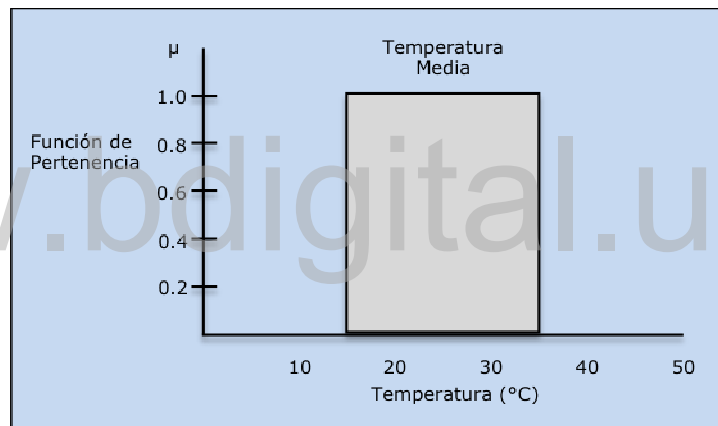


Figura 5. Representación gráfica de un conjunto convencional para un conjunto de temperaturas dadas.
Fuente: Adaptación de (Burns, 2001).

El concepto central de la teoría de conjuntos difusos se basa en que la función de pertenencia, como teoría de probabilidad, puede tomar valores comprendidos entre 0 y 1.

Los conjuntos difusos pueden ser representados por triángulos simétricos (Ver Figura 6). Estos son los más usados debido a que son la forma geométrica más sencilla que permite representar las relaciones entre cada elemento y su pertenencia al conjunto difuso. Además, los conjuntos se pueden representar por triángulos no simétricos, trapezoides y curvas gaussianas. Estas representaciones se pueden observar en la Figura 6.

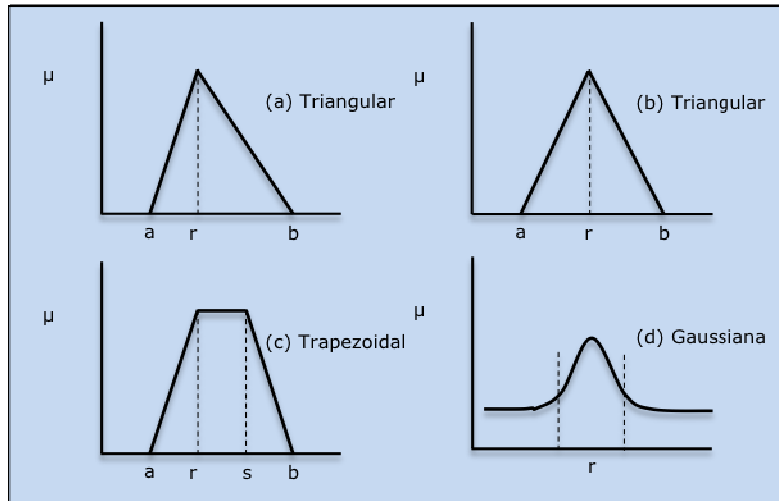


Figura 6. Diversas representaciones de funciones de pertenencias.
Fuente: Adaptación de (Burns, 2001).

Una función de pertenencia se puede descomponer en los siguientes elementos: la **base**, que consiste en el rango en donde los valores de μ son diferentes de cero; y la **altura**, la cual es el valor máximo de la función de pertenencia. Matemáticamente, se pueden representar a través de las Ec. (51) y (52).

$$\text{Base: } S(U) = \{x \in U \mid \mu(x) > 0\} \quad (51)$$

$$\text{Altura: } h(U) = \max_u \mu(x) \quad (52)$$

II.6.1.1. Primer principio de extensión

Si A es un conjunto difuso en el universo U y f es un mapeo de U al universo Y , $y = f(u)$, entonces, el principio de extensión nos permite definir un conjunto difuso B en Y según la Ec. (53).

$$B = f(A) = \left\{ (y, \mu_B(y)) \mid y = f(u), u \in U \right\} \quad (53)$$

donde,

$$\mu_B(y) = \begin{cases} \sup \mu_A(u) & \text{si } f^{-1}(y) \neq \emptyset, u \in f^{-1}(y) \\ 0 & \text{si } f^{-1}(y) = \emptyset \end{cases} \quad (54)$$

Este principio permite relacionar diversas variables que influyen en un determinado proceso y que se interrelacionan entre sí, cuyo comportamiento en términos difusos es conocido.



II.6.1.2. Operaciones básicas de los conjuntos difusos

Dados dos conjuntos difusos A y B dentro de un universo de discurso U y con funciones de pertenencias μ_A y μ_B , se pueden definir las siguientes operaciones de acuerdo a la Tabla I.

Tabla I. Operaciones básicas de los conjuntos difusos.

Operación	Definición matemática
Igualdad	$\mu_A(u) = \mu_B(u)$ para todo $u \in U$
Unión	$\mu_{A \cup B}(u) = \mu_{A+B}(u) = \max \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \}$ para todo $u \in U$
Intersección	$\mu_{A \cap B}(u) = \min \{ \mu_A(u), \mu_B(u) \}$ para todo $u \in U$
Complemento	$\mu_{\neg A}(u) = 1 - \mu_A(u)$ para todo $u \in U$

II.6.1.3. Propiedades de las operaciones de los conjuntos difusos

Al igual que en la teoría de conjunto convencional, se pueden definir algunas propiedades para los conjuntos difusos. Estas se muestran en la Tabla II.

Tabla II. Propiedades de las operaciones de los conjuntos difusos.

Propiedad	Definición matemática
Identidad	$A \cup \emptyset = A$ $A \cap U = A$
Idempotencia	$A \cup U = U$ $A \cap \emptyset = \emptyset$
Involución	$A \setminus \setminus = A$
Conmutatividad	$A \cup B = B \cup A$ $A \cap B = B \cap A$
Asociatividad	$A \cup (B \cup C) = (A \cup B) \cup C$ $A \cap (B \cap C) = (A \cap B) \cap C$
Distributividad	$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$ $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
Absorción	$A \cup (A \cap B) = A$ $A \cap (A \cup B) = A$

II.6.2. Relaciones difusas

Una relación difusa representa el grado de pertenencia ó ausencia de asociación entre elementos de dos ó más conjuntos difusos, por ejemplo: "x es mayor que y". Se suponen U y V dos universos de discurso, la relación difusa R(U,V) es un conjunto difuso en el espacio producto UxV que se caracteriza por la función de pertenencia $\mu_R(x,y)$ dónde x pertenece a U e y pertenece a V, de acuerdo a lo expresado en la Ec. (55).

$$R(U,V) = \{ (x,y), \mu_R(x,y) \mid (x,y) \in U \times V \} \quad (55)$$

II.6.3. Reglas difusas

Las reglas difusas están representadas por secuencias de la forma **SI-ENTONCES**, dando lugar a algoritmos que describen que acción ó salida debe tomarse en un sistema dado. La manera en que se diseñan o construyen un conjunto de reglas difusas se basa en los conocimientos o experiencia del ser humano, y depende de cada aplicación en la que cual se desean utilizar.



Una **variable lingüística** define una serie de elementos que pertenecen a un conjunto difuso. Un ejemplo de esta puede ser:

$$T(\text{temperatura}) = \{baja, media, alta\} \quad (56)$$

Los valores lingüísticos aceptan calificativos como: mucho, muy, poco, entre otros. Estos se utilizan para aumentar ó disminuir la importancia de los valores del conjunto difuso.

II.6.4. Sistema basado en lógica difusa

La estructura básica de un sistema basado en lógica difusa se muestra en la Figura 7.

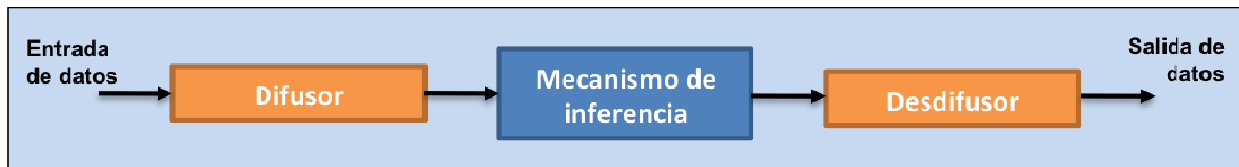


Figura 7. Sistema basado en lógica difusa.
Fuente: Adaptación de (Pérez, 2005).

El sistema está compuesto por los siguientes bloques: difusor o fuzzificación, de inferencia y desdifusor ó desfuzzificación.

El bloque **difusor** permite que a cada variable de entrada se le asigne un grado de pertenencia de acuerdo a los conjuntos difusos que se hayan considerado, mediante las funciones de membresía asociadas a dicha variable. Se aprecia en la Figura 7 que la entrada de datos a este bloque representa valores concretos, mientras que la salida corresponde a los grados de pertenencia de cada variable de entrada.

Por otro lado, el bloque de **inferencia** es aquel que relaciona, mediante una serie de reglas difusas, los conjuntos difusos de entrada y salida del bloque.

El bloque **desdifusor** lleva a cabo la función opuesta al difusor. Este bloque tiene como entrada valores difusos, y la salida es un valor convencional.

Existen diversos métodos y técnicas matemáticas que permiten convertir un número difuso en un valor escalar. Algunos métodos de cálculos son los que se describen a continuación:

- ⇒ **Método del máximo.** Se elige como valor para la variable de salida aquel para el cual la función característica del conjunto difuso de salida es máxima. En general, no es un método óptimo, debido a que este valor se puede alcanzar por diversas salidas del conjunto en estudio.
- ⇒ **Método del centroide.** Utiliza como salida del sistema el centro de gravedad del área total resultante entre las áreas solapadas de las funciones de pertenencias de los conjuntos difusos, donde cada una de estas áreas es producto de una regla de inferencia. Se considera como el método más utilizado ya que con éste se obtiene una solución única.
- ⇒ **Método de la altura.** Para cada regla difusa se calcula el centro de gravedad del conjunto de salida, y luego, se calcula la salida del sistema como la media ponderada. (Pérez, 2005)



CAPÍTULO III. DESARROLLO DEL ÍNDICE DIFUSO

III.1. Definición del índice difuso

Para establecer el módulo de evaluación de rendimiento de los controladores se ejecutan simulaciones de procesos. Estas simulaciones permiten obtener las características de la respuesta que indican el desempeño de un sistema de control de lazo cerrado. Para llevarlas a cabo se utiliza el software MATLAB® en su versión 6.5, desarrollado para funcionar en el sistema operativo Microsoft® Windows® XP®. Este programa incluye las herramientas necesarias para codificar rutinas que describan el comportamiento de la respuesta de los sistemas de lazo cerrado y, a su vez, cuantificar los parámetros definidos por el investigador.

Dentro de las herramientas que incluye el paquete de simulación empleado, se utilizan los Toolbox Simulink®, Optimization® y Fuzzylogic®. Simulink® permite diagramar y simular los sistemas dinámicos. Optimization® se utiliza para determinar los parámetros óptimos de sintonización del controlador, según los valores del proceso que se emplean. FuzzyLogic® se usa para definir el módulo de evaluación de desempeño del controlador, de acuerdo a las características de la respuesta que se consideren.

El uso de las herramientas adicionales se complementa con la codificación de rutinas de programación. Estas rutinas calculan las características de la respuesta definidas por el investigador, y las contempladas por el índice total.

Los valores de las características de la respuesta que se consideran, se obtienen a partir de simulaciones que se realizan a un sistema de control modelo de lazo cerrado. Estos valores se estudian detalladamente para determinar aquellos que permitan cuantificar el desempeño de los controladores.

III.1.1. Descripción del sistema a estudiar

El proceso modelo que se controla en el lazo cerrado es un sistema de primer orden con retraso, teniendo una perturbación externa cuyo efecto sobre el proceso se modela como un sistema de primer orden. Este sistema se muestra en la Figura 8.

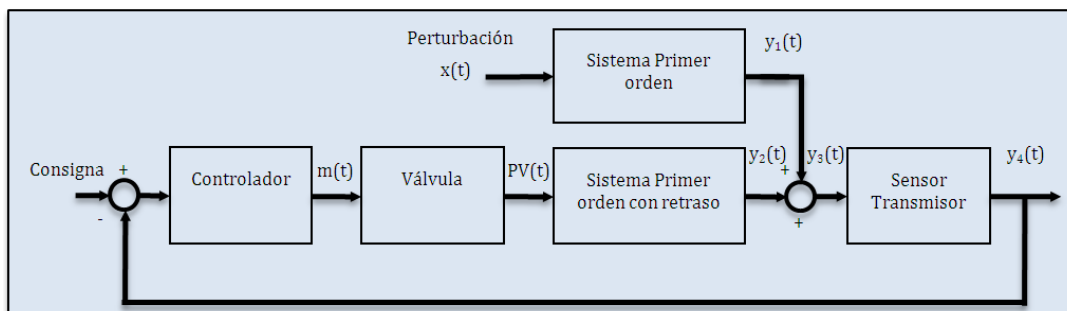


Figura 8. Sistema dinámico a estudiar para establecer las características de la respuesta que indican el desempeño de los controladores.

Las Ec. (57) y (58) definen, en el dominio de la frecuencia, los sistemas de primer orden de la perturbación y primer orden con retraso del proceso incluido dentro del lazo de control.



$$\text{Perturbación} \quad \frac{Y_1(s)}{X(s)} = \frac{k_p}{\tau s + 1} \quad (57)$$

$$\text{Proceso interno} \quad \frac{Y_2(s)}{PV(s)} = \frac{k_p e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (58)$$

donde k_p es la ganancia del proceso; τ es la constante de tiempo del proceso en min; $Y_1(s)$ e $Y_2(s)$ son las señales de salida en los bloques de la perturbación y el proceso interno, respectivamente; $X(s)$ y $PV(s)$ son las señales de entrada en los bloques de la perturbación y el proceso interno, respectivamente, y t_0 es el tiempo de retraso del proceso en min.

El sistema de control está formado por una válvula, un sensor y un controlador PID. Las Ec. (59) a (61) modelan matemáticamente, en el dominio de la frecuencia, el comportamiento que presentan estos instrumentos.

$$\text{Válvula} \quad \frac{PV(s)}{M(s)} = \frac{k_v}{\tau_v s + 1} \quad (59)$$

$$\text{Sensor-Transmisor} \quad \frac{Y_4(s)}{Y_3(s)} = \frac{k_{mt}}{\tau_{mt} s + 1} \quad (60)$$

$$\text{Controlador} \quad M(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \left(\frac{\tau_d s + 1}{\alpha \tau_d s + 1} \right) Y_4(s) \quad (61)$$

donde $M(s)$ es la señal de salida del controlador en porcentaje (%CO) de 0-100, τ_v es la constante de tiempo de respuesta de la válvula en min, k_v es la ganancia de la válvula, τ_{mt} es la constante de tiempo de respuesta del sensor-transmisor en min, k_{mt} es la ganancia del sensor-transmisor, $Y_4(s)$ es la señal de salida del sensor-transmisor en porcentaje (%TO) de 0-100.

La Tabla III especifica los valores que adquieren los parámetros del proceso y la instrumentación utilizada en el sistema de control.

Tabla III. Valores de los parámetros del sistema dinámico en estudio.

	Ganancia (k_i)	Tiempo de respuesta (τ)	Tiempo de retardo (t_0)
Válvula	1,0000	1,0000	No aplica
Sensor	1,6667	1,0000	No aplica
Proceso	0,5000	1,0000	1,0000
	1,0000	3,0000	2,0000
	1,5000	5,0000	3,0000

III.1.2. Determinación de los parámetros de sintonización del controlador

Una vez establecidos los valores que toman los parámetros del proceso en el sistema de control de lazo cerrado, se ejecutan una serie de simulaciones para las posibles combinaciones de los valores del proceso descritos en la Tabla III. Estas simulaciones se llevan a cabo mediante la herramienta Optimization® de MATLAB®, con el objetivo de obtener los parámetros óptimos de sintonización del controlador.



Para ejecutar la rutina de optimización, se lleva a cabo un cambio en la perturbación externa y consigna del lazo de control, de manera individual, del 10% por encima y debajo del valor de estado estacionario. Se asignan valores iniciales a los parámetros del controlador y como criterio de optimización se toma minimizar el IAE. Se toma el IAE como referencia debido a que es el criterio más común en estas rutinas. Al simular el proceso, la rutina de optimización calcula el criterio seleccionado y efectúa variaciones de los parámetros del controlador hasta obtener el menor valor del IAE. Como método numérico del solver se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden con un paso fijo de 0,1 min.

Por otro lado, se estudian las respuestas que se obtienen al aplicar las ecuaciones de sintonización de los parámetros de los controladores PID que minimizan los índices de criterio integral (López y col., 1967), para cambios de consigna ó perturbación. Debido a que cada instrumento presenta una dinámica propia se deben ejecutar simulaciones a lazo abierto del sistema mostrado en la Figura 8, con la finalidad de obtener la dinámica en conjunto de los instrumentos del lazo, y así aplicar las ecuaciones establecidas.

Para determinar los parámetros dinámicos del sistema a lazo abierto se aplica el método de curva de reacción (Smith y Corripio, 1997). Éste método consiste en efectuar un cambio tipo escalón en la señal de entrada de la válvula de control con el sistema a lazo abierto, sin considerar perturbaciones externas al lazo de control, obteniéndose así una respuesta en la señal de salida del sensor. La Figura 9 muestra la respuesta obtenida en el sensor al aplicar este método.

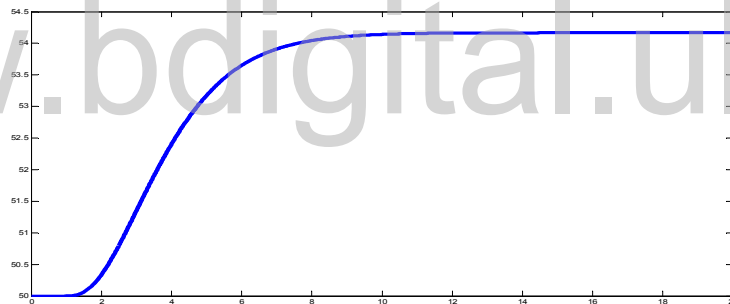


Figura 9. Respuesta obtenida a la salida del sensor para un cambio tipo escalón en la entrada de la válvula del sistema de control a lazo abierto

Una vez obtenida la respuesta a la salida del sensor se calculan los parámetros del lazo de control, de acuerdo a lo definido en las Ec. (62) a (64).

$$k_p = \frac{\Delta salida_{sensor}}{\Delta entrada_{valvula}} \quad (62)$$

$$\tau = 1.5(t_2 - t_1) \quad (63)$$

$$t_o = t_2 - \tau \quad (64)$$

donde t_1 y t_2 son los valores del tiempo donde se alcanza el $0.283\Delta salida_{sensor}$ y el $0.632\Delta salida_{sensor}$, respectivamente.

Las ecuaciones de sintonización de los parámetros del controlador establecidas por López y col., se muestran en las Tablas IV y V.



Tabla IV. Ecuaciones de sintonización de controladores PID establecidas por López y col., para minimizar los índices de criterio integral al generarse una perturbación externa al lazo de control.

Parámetros del controlador		ISE	IAE	ITAE
$k_c = \frac{a_1}{k_p} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{b_1}$	a ₁	1,4950	1,4350	1,3570
	b ₁	0,9450	-0,9210	-0,9470
$\tau_i = \frac{\tau}{a_2} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{b_2}$	a ₂	1,1010	0,8780	0,8420
	b ₂	0,7710	0,7490	0,7380
$\tau_d = a_3 \tau \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{b_3}$	a ₃	0,5600	0,4820	0,3810
	b ₃	1,0060	1,1370	0,9950

Fuente: (López y col., 1967).

Tabla V. Ecuaciones de sintonización de controladores PID establecidas por López y col., para minimizar los índices de criterio integral al generarse un cambio de punto de control en el sistema de lazo cerrado.

Parámetros del controlador		IAE	ITAE
$k_c = \frac{a_1}{k} \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{b_1}$	a ₁	1,0860	0,9650
	b ₁	-0,8690	-0,8550
$\tau_i = \frac{\tau}{a_2 + b_2 \left(\frac{t_o}{\tau} \right)}$	a ₂	0,7400	0,7960
	b ₂	-0,1300	0,1470
$\tau_d = a_3 \tau \left(\frac{t_o}{\tau} \right)^{b_3}$	a ₃	0,3480	0,3080
	b ₃	0,9140	0,9292

Fuente: (López y col., 1967).

III.1.3. Características a evaluar

Una vez obtenidos los parámetros de sintonización de los controladores, usando dos métodos: la rutina de optimización y las ecuaciones de sintonización descritas en las tablas IV y V, se definen las características de la respuesta de los sistemas de lazo cerrado que puedan ser indicativas del desempeño de los controladores. Para ello, se utilizan los parámetros definidos por el índice total así como otros establecidos por el investigador, siendo estos los siguientes:

- A. Valor final de la respuesta en el estado estacionario (ssv).
- B. Número de picos máximos.
- C. Número de picos mínimos.
- D. Número de picos totales (npk).
- E. Suma de los errores en los picos máximos (sov).
- F. Suma de los errores en los picos mínimos (sun).
- G. Suma de los errores en los picos totales (spk).
- H. Desviación de la suma de los errores de los picos máximos respecto al total (dsov).
- I. Desviación de la suma de los errores de los picos mínimos respecto al total (dsun).
- J. Área sobre el valor final de la respuesta en estado estacionario (ap).
- K. Área por debajo del valor final de la respuesta en estado estacionario (an).



- L. Desviación del área sobre el valor final de la respuesta en estado estacionario respecto al total (dap).
- M. Desviación del área por debajo del valor final de la respuesta en estado estacionario respecto al total (dan).
- N. Pendiente en el punto de inflexión (s).
- O. IAE.
- P. ITAE.
- Q. ISE.
- R. ITSE.
- S. Tiempo de asentamiento alrededor de la banda ± 2 (ts2), ± 5 (ts5), ± 20 (ts20) y $\pm 50\%$ (ts50) del valor final de estado estacionario.
- T. Período de oscilación -T- (frecuencia de la respuesta -f-).
- U. Tiempo de subida.
- V. Sobrepaso máximo.
- W. Razón de asentamiento.
- X. Tiempo pico.

Estas características se determinan a partir de la codificación de rutinas de cálculos. Para ello se utilizan estructuras de programación básicas. Dentro de estas se incluyen las estructuras de repetición.

A partir de los resultados obtenidos para cada una de estas características, se seleccionan aquellas que permitan cuantificar el desempeño que presentan los sistemas de lazo cerrado, tanto al efectuarse un cambio de consigna ó perturbación externa al lazo de control. Estas particularidades deben cuantificar el trabajo que realiza el lazo cerrado, de manera independiente al modelo matemático que se esté estudiando.

III.1.4. Método para definir el módulo difuso

Las características de la respuesta consideradas se estudian detalladamente, y se observa el comportamiento que presenta la respuesta del sistema de control para diversos valores del proceso. Las respuestas que se estudian son aquellas que se obtienen al utilizar los valores de los parámetros del controlador, calculados por medio de la rutina de optimización y las relaciones de sintonización.

Se toma como punto de referencia los valores de las características de la respuesta obtenidos al usar los valores óptimos del controlador. A partir de estos valores se definen rangos, a los cuales se les asignan valores lingüísticos y que luego se usan en la definición del módulo difuso. Luego, se comparan cada uno de los valores de las características de las respuestas obtenidas con los rangos definidos, con el objetivo de asignarles valores lingüísticos a cada caso estudiado. A medida que se van asignando los valores lingüísticos a las características evaluadas, se observa la magnitud del valor que estas presentan respecto a lo obtenido con la respuesta óptima, procediendo a descartar aquellas características que no cuantifican, de manera correcta, el desempeño del sistema de lazo cerrado.

Al seleccionar los parámetros de la respuesta que cuantifican el desempeño del lazo de control cerrado, se establecen los conjuntos difusos.

Las variables lingüísticas que definen a los elementos pertenecientes a cada uno de los conjuntos difusos, con sus respectivos calificativos son las siguientes:

- ◆ Muy cerca (MC).



- ◆ Cerca (C).
- ◆ Medio (M).
- ◆ Lejos (L).
- ◆ Muy lejos (ML).

Estos conjuntos se usan para las características que indiquen el desempeño de los controladores.

Las funciones de pertenencias para las particularidades de la respuesta del sistema consideradas se definen, de manera general, en la Figura 10.

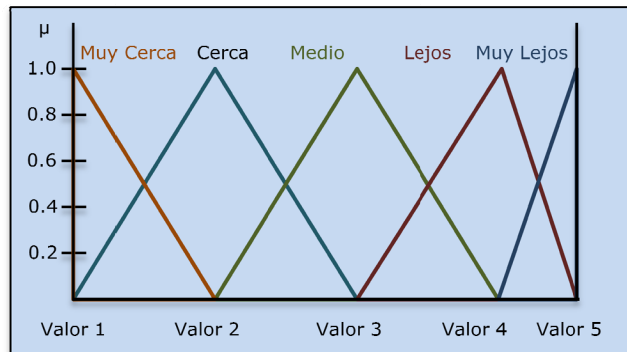


Figura 10. Conjunto difuso a definir para las características de la respuesta del sistema que permiten calcular el módulo difuso de desempeño.

Los valores mostrados en el eje de las abscisas varían de acuerdo a la característica de la respuesta que se considere. El eje de la ordenada representa el valor difuso que adquiere el parámetro evaluado de acuerdo a las variables lingüísticas definidas. La geometría de cada una de las funciones de pertenencias varía dependiendo de la particularidad de la respuesta estudiada.

El bloque desdifusor hace uso de otras variables lingüísticas, dependiendo del desempeño que presenta el sistema, siendo estas:

- ◆ Excelente (e).
- ◆ Bueno (b).
- ◆ Regular (r).
- ◆ Malo (m).
- ◆ Deficiente (d).

Luego de definir los conjuntos difusos se plantea el sistema de inferencia. Para ello, se cuantifican los diversos comportamientos obtenidos en las respuestas evaluadas, descartando aquellos que sean similares. Esto se lleva a cabo al comparar entre sí las respuestas obtenidas con el uso de los valores óptimos del controlador y las ecuaciones de sintonización. El sistema de inferencia difuso se construye como sigue,

Regla 1 → Si Característica 1 == Variable lingüística 1 y
Si Característica 2 == Variable lingüística 2 y
...
...
Entonces
Salida ← Valores difusos 1



Regla 2 → Si Característica 1 == Variable lingüística 1 ó
Si Característica 2 == Variable lingüística 3 y
...
...
Entonces
Salida ← Valores difusos 2
...
Regla n.

El número de reglas difusas obtenidas depende, en primer lugar, de la cantidad de características de la respuesta que se estén evaluando, y en segundo lugar, de las posibles combinaciones entre las variables lingüísticas que se asignaron a cada uno de estos parámetros.

III.2. Evaluación del índice difuso

Para comprobar la efectividad del modulo difuso definido se llevan a cabo simulaciones de modelos de procesos químicos, entre ellos un reactor no isotérmico y un tanque de mezclado en el cual se combinan dos fluidos a ciertas condiciones de proceso.

III.2.1. Reactor químico no isotérmico

El reactor químico no isotérmico se considera un sistema altamente no lineal, debido a la forma en que se encuentra definida la expresión de velocidad de reacción. La Figura 11 muestra de forma esquemática el sistema de control para este proceso.

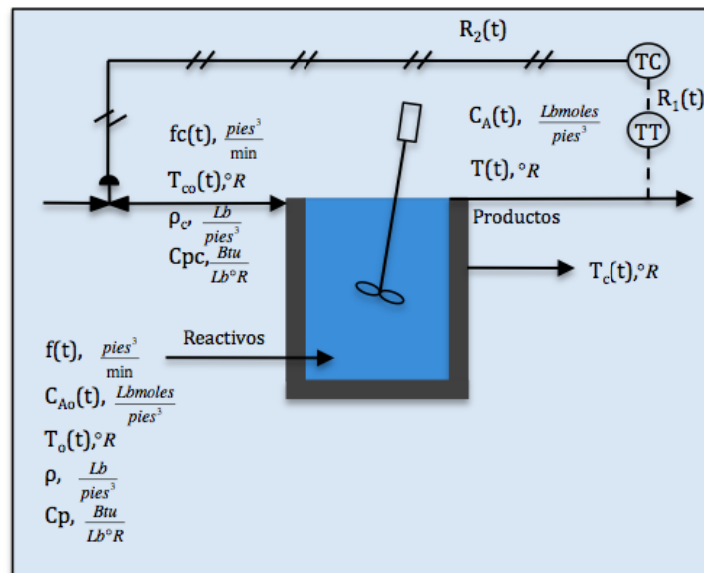


Figura 11. Sistema de control para la temperatura de salida de un reactor químico no isotérmico.
Fuente: Adaptación de (Smith y Corripio, 1997).

Debido a que la reacción que se lleva a cabo ($A \rightarrow B$) se considera exotérmica, se coloca alrededor del reactor una chaqueta con la finalidad de retirar el calor generado. Se supone que no se



producen pérdidas de calor a los alrededores, los fluidos del proceso son líquidos y el nivel de líquido dentro del reactor es constante.

La velocidad de la reacción química viene dada por la Ec. (65).

$$r_A(t) = k_0 e^{-\frac{E}{RT(t)}} C_A^2(t), \frac{\text{lbmol producidos de A}}{\text{pies}^3 \cdot \text{min}} \quad (65)$$

donde k_0 es el factor de frecuencia en $\text{pies}^3/(\text{lbmol} \cdot \text{min})$ y E es la energía de activación en Btu/lbmol .

Las Ec. (66) y (67) describen los balances de materia y energía en estado dinámico, respectivamente, para el fluido del proceso. La Ec. (68) expresa el balance de energía para el fluido de enfriamiento.

$$f(t)C_{A_0}(t) - Vr_A(t) - f(t)C_A(t) = V \frac{dC_A(t)}{dt} \quad (66)$$

$$f(t)\rho CpT_o(t) - Vr_A(t)(\Delta H_r) - UA(T(t) - T_c(t)) - q\rho CpT(t) = V\rho Cv \frac{dT(t)}{dt} \quad (67)$$

$$f_c(t)\rho_c Cp_c T_c(t) + UA(T(t) - T_c(t)) - f_c(t)\rho_c Cp_c T_c(t) = V_c\rho_c Cv_c \frac{dT_c(t)}{dt} \quad (68)$$

donde V es el volumen del reactor en pies^3 , ρ es la densidad del fluido del proceso en lbm/pies^3 ; C_p y C_v son las capacidades caloríficas de los productos y reactivos a presión y volumen constante en $\text{Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$, respectivamente; U es el coeficiente global de transferencia de calor en $\text{Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$; A es el área de transferencia de calor en pies^2 y ΔH_r es el calor de reacción del proceso en Btu/lbmol . Las variables denotadas por el subíndice c tienen el mismo significado que las mencionadas anteriormente, pero aplicadas al fluido de enfriamiento.

Las Ec. (69) a (71) modelan el comportamiento de la válvula, el sensor-transmisor y el controlador PID, respectivamente, utilizados para este proceso.

$$\text{Válvula} \quad \frac{fc(s)}{R_2(s)} = \frac{k_v}{\tau_v s + 1} \quad (69)$$

$$\text{Sensor} \quad \frac{R_1(s)}{T(s)} = \frac{k_{mt}}{\tau_{mt} s + 1} \quad (70)$$

$$\text{Controlador} \quad R_2(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \left(\frac{\tau_d s + 1}{\alpha \tau_d s + 1} \right) R_1(s) \quad (71)$$

donde $R_1(s)$ y $R_2(s)$ son las señales de salida en porcentaje del sensor-transmisor (%TO) y controlador (%CO) en el rango de 0-100; fc es el flujo de salida de la válvula en pies^3/min ; T es la temperatura de salida del flujo de proceso en R ; τ_v es la constante de tiempo de respuesta de la válvula en min ; k_v es la ganancia de la válvula en $\text{pies}^3/\% \text{CO} \cdot \text{min}$, τ_{mt} es la constante de tiempo de respuesta del sensor-transmisor en min y k_{mt} es la ganancia del sensor-transmisor en $\% \text{TO}/R$.



Las condiciones iniciales del proceso y del estado estacionario que se van a tomar en cuenta para llevar a cabo las simulaciones se muestran en la Tabla VI.

Tabla VI. Parámetros de diseño y condiciones del proceso para el reactor no isotérmico.

Información del Proceso	Valores del Estado Estacionario
$V = 13,26 \text{ pies}^3$ $k_o = 8,33 \times 10^8 \text{ pies}^3/(\text{lbmol} \cdot \text{min})$ $E = 27820 \text{ Btu/lbmol}$ $R = 1,987 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{R}$ $\rho = 55 \text{ lbm/pies}^3$ $C_p = 0,88 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$ $\Delta H_r = -12000 \text{ Btu/lbmol}$ $U = 75 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$ $A = 36 \text{ pies}^2$ $\rho_c = 62,4 \text{ lbm/pies}^3$ $C_{p_c} = 1,0 \text{ Btu/lbm} \cdot ^\circ\text{F}$ $V_c = 1,56 \text{ pies}^3$ $k_v = 0,0175 \text{ pies}^3/\% \text{CO} \cdot \text{min}$ $\tau_v = 1 \text{ min}$ $k_{mt} = 0,0737 \text{ \%TO/R}$ $\tau_{mt} = 1 \text{ min}$	$C_{Ao}(t) = 0,5975 \text{ lbmol/pies}^3$ $T_o(t) = 635 \text{ R}$ $T_c(t) = 602,7 \text{ R}$ $f(t) = 1,3364 \text{ pies}^3/\text{min}$ $C_A(t) = 0,2068 \text{ lbmol/pies}^3$ $T(t) = 678,9 \text{ R}$ $T_{co}(t) = 540 \text{ R}$ $f_c(t) = 0,8771 \text{ pies}^3/\text{min}$

En este proceso se llevan a cabo simulaciones utilizando la rutina de optimización definida en MATLAB® y así, obtener los parámetros del controlador que generen una respuesta con el mejor desempeño posible. Para ello se efectúan cambios del 10% por encima del valor en estado estacionario en las variables $f(t)$, $C_{Ao}(t)$ y $T_o(t)$, de manera individual. La variable que se controla es la temperatura de salida del fluido del proceso $T(t)$. La variable que se manipula para mantener el sistema en el valor de consigna deseado es el flujo del fluido de enfriamiento $f_c(t)$. Para ejecutar la rutina de optimización se asignan valores iniciales a los parámetros del controlador y como criterio de optimización se toma minimizar el IAE. Al simular el proceso, la rutina de optimización calcula el criterio seleccionado y efectúa variaciones de los parámetros del controlador hasta obtener el menor valor del IAE. Como método numérico del solver se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden con un paso fijo de 0,1 min.

Al obtener los parámetros de sintonización del controlador, por medio de la rutina de optimización, se ejecutan simulaciones del proceso, efectuando cambios simples y múltiples de las variables que perturban el sistema de control. Estas variables son el flujo $f(t)$ y la temperatura $T_o(t)$ del fluido de proceso que entra al reactor. Los cambios que se generan corresponden a variaciones del 10 y 20% por encima al valor de estado estacionario. Si se consideran cambios múltiples, estos suceden a tiempos diferentes del proceso.

En estas simulaciones, se registran las características definidas para el cálculo del índice difuso. Además, se evalúa el resultado que se obtiene con los índices de desempeño de criterio integral para comparar el resultado que estos arrojan con el módulo difuso generado.



III.2.2. Tanque de mezclado

El diagrama del sistema de control para este proceso se muestra en la Figura 12.

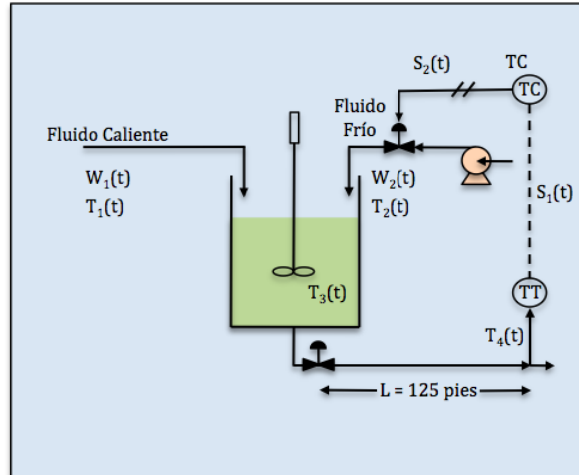


Figura 12. Sistema de control para la temperatura de salida del tanque de mezclado.
Fuente: Adaptación de (Camacho y Smith, 2000).

Se consideran los casos de mezclado de fluidos de proceso a volumen constante y variable, respectivamente.

La Ec. (72) describe el modelo del proceso a volumen constante.

Balance de energía alrededor del tanque de mezclado

$$W_1(t)Cp_1(t)T_1(t) + W_2(t)Cp_2(t)T_2(t) - (W_1(t) + W_2(t))Cp_3(t)T_3(t) = V\rho Cv_3 \frac{dT_3(t)}{dt} \quad (72)$$

donde $W_1(t)$ y $W_2(t)$ son los flujos máxicos que entran al proceso en lbm/min; $Cp_1(t)$, $Cp_2(t)$ y $Cp_3(t)$ son las capacidades caloríficas de los fluidos a presión constante en Btu/lbm-°F; $T_1(t)$, $T_2(t)$ y $T_3(t)$ son las temperaturas de cada uno de los fluidos del proceso en °F; V es el volumen del mezclador en pies³; ρ es la densidad del fluido en lbm/pies³ y Cv_3 es la capacidad calorífica del fluido a volumen constante en Btu/lbm-°F.

En la Figura 19, se observa una distancia que causa retardo entre la salida del fluido de la válvula y la señal que recibe el sensor. Este retardo por efectos de transporte se define en la Ec. (73).

$$t_0 = \frac{LA\rho}{W_1(t) + W_2(t)} \quad (73)$$

donde L es la longitud de tubería desde la salida del tanque hasta el punto donde se encuentra el sensor en pies y A es el área transversal del tubo por el cual circula el fluido en pies².

Las Ec. (74) a (76) modelan el comportamiento de la válvula, el sensor-transmisor y el controlador PID, respectivamente, utilizados para este proceso.



$$\text{Válvula} \quad \frac{W_2(s)}{S_2(s)} = \frac{k_v}{\tau_v s + 1} \quad (74)$$

$$\text{Sensor-Transmisor} \quad \frac{S_1(s)}{T_4(s)} = \frac{k_{mt}}{\tau_{mt} s + 1} \quad (75)$$

$$\text{Controlador} \quad S_2(s) = k_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \left(\frac{\tau_d s + 1}{\alpha \tau_d s + 1} \right) S_1(s) \quad (76)$$

donde $S_1(s)$ y $S_2(s)$ son las señales de salida del sensor-transmisor (%TO) y controlador (%CO) en porcentaje de 0-100; $W_2(s)$ es el flujo de salida de la válvula en lbm/min; $T_4(t)$ es la temperatura que registra el sensor-transmisor del flujo de proceso en °F; τ_v es la constante de tiempo de respuesta de la válvula en min; k_v es la ganancia de la válvula en lbm/%CO-min, τ_{mt} es la constante de tiempo de respuesta del sensor-transmisor en min y k_{mt} es la ganancia del sensor-transmisor en %TO/°F.

Si se considera el caso del mezclado de los fluidos a volumen variable, se debe incluir una ecuación adicional a las mencionadas anteriormente. La Ec. (77) corresponde al balance de materia en el tanque de mezclado.

$$W_1(t) + W_2(t) - C_v \sqrt{h(t)} = \rho A_i \frac{dh(t)}{dt} \quad (77)$$

Donde C_v es el coeficiente de flujo de la válvula en lbm/min-pies^{0,5}; $h(t)$ es la altura del recipiente en pies y A_i es el área transversal del tanque en pie². Las condiciones iniciales y los parámetros de diseño para este proceso se muestran en la Tabla VII.

Tabla VII. Parámetros de diseño y condiciones del proceso para el tanque de mezclado.

Información del Proceso	Valores del Estado Estacionario
$\rho = 62,4 \text{ lbm/pies}^3$ $V = 15 \text{ pies}^3$ $A = 0,2006 \text{ pies}^2$ $L = 125 \text{ pies}$ $k_v = 4 \text{ lbm/\%CO-min}$ $\tau_v = 1 \text{ min}$ $k_{mt} = 0,3375 \text{ \%TO/°F}$ $\tau_{mt} = 1 \text{ min}$ $A_i = 60 \text{ pie}^2$ $C_v = 50 \text{ lbm/min-pies}^{0,5}$	$W_1(t) = 250,00 \text{ lbm/min}$ $W_2(t) = 200 \text{ lbm/min}$ $Cp_1(t) = 0,80 \text{ Btu/lbm-°F}$ $Cp_2(t) = 1,00 \text{ Btu/lbm-°F}$ $Cp_3(t), Cv_3 = 0,90 \text{ Btu/lbm-°F}$ Set Point = 148,4°F $T_1(t) = 250^\circ\text{F}$ $T_2(t) = 250^\circ\text{F}$ $T_3(t) = 250^\circ\text{F}$ $h(t) = 81 \text{ pies}$

En este proceso se llevan a cabo simulaciones utilizando la rutina de optimización definida en MATLAB® y así, obtener los parámetros del controlador que generen una respuesta con el mejor desempeño posible. Para ello se efectúan cambios del 10% por encima del valor en estado estacionario en las variables $W_1(t)$ y $T_1(t)$, de manera individual. La variable que se controla es la temperatura de salida del mezclador, con su retraso, $T_4(t)$. La variable que se manipula es el flujo de fluido frío $W_2(t)$. Para ejecutar la rutina de optimización, se asignan valores iniciales a los parámetros del controlador y como criterio de optimización se toma minimizar el IAE. Al simular el proceso, la rutina de optimización calcula el criterio seleccionado y efectúa variaciones de los parámetros del controlador hasta obtener el menor valor del IAE. Como método numérico del solver se utiliza el método de Runge-Kutta de cuarto orden con un paso fijo de 0,1 min.



Con los parámetros de sintonización del controlador obtenidos, por medio de la rutina de optimización, se ejecutan simulaciones del proceso, efectuando cambios simples y múltiples de las variables que perturban el sistema de control. Estas variables son el flujo $W_1(t)$ y la temperatura $T_1(t)$ del fluido que entran al mezclador. Los cambios que se generan corresponden a variaciones del 10 y 20% por encima del valor de estado estacionario. Si se consideran cambios múltiples, estos suceden en tiempos diferentes del proceso.

En estas simulaciones se cuantifica el valor del índice difuso. Además, se evalúan los resultados que se obtienen para los índices de desempeño de criterio integral y se comparan con los obtenidos con el módulo difuso.

www.bdigital.ula.ve



CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El módulo difuso de evaluación del desempeño de los controladores se obtuvo a partir de las características de la respuesta que permiten medir el trabajo que realizan estos dispositivos. Estas particularidades se definieron al estudiar las respuestas obtenidas en simulaciones ejecutadas en un sistema modelo de lazo cerrado. El sistema modelo de control que se estudió incluye un sistema de primer orden con retraso como proceso interno y un sistema de primer orden estándar como perturbación externa. La Figura 8 muestra el sistema modelo de lazo cerrado estudiado. El comportamiento que tiene la respuesta en este sistema depende, en gran medida, de los valores que toman los parámetros de sintonización del controlador.

IV.1. Parámetros del controlador obtenidos

El controlador utilizado en las simulaciones se modela por la ecuación del PID modificado. El valor del filtro es de 0,1, permaneciendo constante para todas las simulaciones ejecutadas. Los valores óptimos de los parámetros del controlador, para cambios de consigna y/o perturbación, se obtuvieron a partir de una rutina de optimización. Esta rutina permite alcanzar una respuesta que presente un desempeño adecuado, en el proceso modelo que se estudia, utilizando para ello un criterio dado.

Para ejecutar la rutina de optimización, se llevó a cabo un cambio en la perturbación externa y consigna del sistema, respectivamente, del 10% por encima y debajo del valor de estado estacionario. Se asignaron valores iniciales a los parámetros del controlador y como criterio de optimización se tomó minimizar el IAE. Al simular el proceso, la rutina de optimización calculó el criterio seleccionado y efectuó variaciones de los parámetros del controlador hasta obtener el menor valor del IAE. Como método numérico del solver se utilizó el método de Runge-Kutta de cuarto orden con un paso fijo de 0,1 min.

Los valores óptimos obtenidos de los parámetros del controlador se muestran en la Tabla VIII.

Tabla VIII. Valores óptimos del controlador para cambios del 10% en consigna y perturbación, respectivamente, en el sistema de control modelo.

Proceso			Cambio de consigna						Perturbación					
k_p	τ	t_o	10%			-10%			10%			-10%		
			k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d
0,5	1	1	1,4433	2,6621	1,1378	1,4575	2,6511	1,1578	1,6418	2,4814	1,0585	1,6289	2,5067	1,0453
		2	1,0014	2,8492	1,3673	1,0020	2,8476	1,3678	1,0520	2,9361	1,2071	1,0517	2,9362	1,2068
		3	0,8475	3,2193	1,5815	0,8479	3,2185	1,5825	0,8520	3,3306	1,3790	0,8504	3,3326	1,3757
	3	1	2,2650	5,2726	1,4435	2,2910	5,5228	1,4434	2,8781	3,4067	1,3615	2,8536	3,4551	1,3379
		2	1,4695	4,7938	1,7049	1,4718	4,7931	1,7064	1,7401	4,2059	1,5690	1,7373	4,2158	1,5597
		3	1,1656	4,9068	1,9661	1,1655	4,8984	1,9662	1,3187	4,7611	1,7818	1,3166	4,7656	1,7789
	5	1	3,2349	8,6445	1,5291	3,2975	8,6898	1,5270	4,2842	3,9537	1,4385	4,2700	3,9622	1,4382
		2	2,0409	7,4196	1,8176	2,0497	7,4069	1,8192	2,5608	5,0821	1,6857	2,5605	5,0821	1,6857
		3	1,5735	7,1119	2,1264	1,5757	7,1034	2,1293	1,9059	5,8569	1,9459	1,9028	5,8769	1,9366
1	1	1	0,7185	2,5543	1,1368	0,7208	2,5531	1,1385	0,8394	2,4410	1,0939	0,8358	2,4531	1,0828
		2	0,5033	2,8533	1,3561	0,5037	2,8513	1,3578	0,5221	2,1431	1,1876	0,5221	2,1431	1,1876
		3	0,4238	3,2194	1,5813	0,4240	3,2189	1,5822	0,4856	4,3308	1,1522	0,4856	4,3308	1,1522



Tabla VIII. Valores óptimos del controlador para cambios del 10% en consigna y perturbación, respectivamente, en el sistema de control modelo.
(Continuación)

Proceso			Cambio de consigna						Perturbación					
k_p	τ	t_o	10%			-10%			10%			-10%		
			k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d
1	3	1	1,0848	4,5136	1,4572	1,0907	4,5137	1,4585	1,4505	3,4019	1,3686	1,4444	3,4038	1,3653
		2	0,7355	4,6430	1,6840	0,7357	4,6398	1,6857	0,8860	4,1265	1,6263	0,8839	4,1471	1,6136
		3	0,5856	4,8762	1,9546	0,5860	4,8763	1,9552	0,6735	4,6843	1,8536	0,6723	4,6887	1,8528
	5	1	1,5109	7,1503	1,5771	1,5247	7,1417	1,5575	2,1560	3,9142	1,4546	2,1466	3,9321	1,4494
		2	1,0003	6,7451	1,8162	1,0026	6,7318	1,8164	1,2951	5,0069	1,7224	1,2948	5,0072	1,7222
		3	0,7853	6,8511	2,0964	0,7858	6,8518	2,0966	0,9665	5,7711	2,0030	0,9653	5,7788	1,9983
1,5	1	1	0,4797	2,5529	1,1358	0,4806	2,5533	1,1384	0,5709	2,3913	1,1288	0,5682	2,3974	1,1269
		2	0,3355	2,8525	1,3565	0,3358	2,8521	1,2574	0,3696	2,8245	1,3444	0,3692	2,8320	1,3389
		3	0,2825	3,2188	1,5817	0,2826	3,2183	1,5826	0,2988	3,2373	1,5500	0,2986	3,2376	1,5488
	3	1	0,7249	4,4623	1,4505	0,7278	4,4820	1,4538	0,9795	3,3187	1,4064	0,9791	3,3270	1,4030
		2	0,4903	4,6385	1,6850	0,4905	4,6393	1,6854	0,6005	4,0571	1,6732	0,5995	4,0609	1,6722
		3	0,3905	4,8761	1,9546	0,3906	4,8764	1,9553	0,4502	4,1986	2,2213	0,4502	4,1986	2,2213
	5	1	0,9934	6,7231	1,5792	0,9990	6,7054	1,5807	1,4492	3,8666	1,4722	1,4434	3,8781	1,4713
		2	0,6693	6,7437	1,8094	0,6701	6,7178	1,8119	0,8749	4,9015	1,7705	0,8738	4,9177	1,7646
		3	0,5236	6,8521	2,0966	0,5239	6,8521	2,0968	0,6538	5,6635	2,0671	0,6536	5,6808	2,0588

En la tabla VIII, se puede apreciar que los parámetros óptimos del controlador que se obtuvieron al efectuarse un cambio, de igual magnitud, por encima y debajo en consigna y/o perturbación, respectivamente, son similares para los mismos valores del proceso. De este modo, la respuesta del sistema presenta un comportamiento equivalente para los cambios positivos y negativos de la variable que se desea manipular.

Por otro lado, se obtuvieron los parámetros del controlador mediante el uso de las ecuaciones de sintonización (López y col., 1967). Esto se efectuó con la finalidad de estudiar las respuestas que arrojan el uso de estas relaciones y compararlas con las obtenidas con los valores óptimos del controlador. Para utilizar estas ecuaciones se estudió, en primer lugar, la dinámica del sistema de control a lazo cerrado. Esto se hizo al aplicar el método curva de reacción (Smith y Corripio, 1997).

Los valores de los parámetros del controlador obtenidos al utilizar las ecuaciones de sintonización, para cambios de consigna y perturbación, se muestran en las Tablas IX y X, respectivamente.

Tabla IX. Valores obtenidos de los parámetros del controlador al utilizar las ecuaciones de sintonización de López y col., para cambios del 10% en consigna en el proceso modelo.

Proceso			Lazo total			Minimizar IAE			Minimizar ITAE		
k_p	τ	t_o	k_p	τ	t_o	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d
0,5	1	1	0,8333	2,1104	2,1473	1,2838	3,4726	0,7461	1,1410	3,2647	0,6606
		2	0,8333	2,1104	3,1473	0,9209	3,8643	1,0583	0,8229	3,6590	0,9423
		3	0,8333	2,1104	4,1473	0,7245	4,3556	1,3618	0,6499	4,1615	1,2177
	3	1	0,8333	3,6498	2,6239	1,7361	5,6451	0,9394	1,5356	5,2871	0,8273
		2	0,8333	3,6498	3,6239	1,3113	5,9742	1,2619	1,1651	5,6147	1,1167
		3	0,8333	3,6498	4,6239	1,0611	6,3441	1,5767	0,9460	5,9856	1,4005



Tabla IX. Valores obtenidos de los parámetros del controlador al utilizar las ecuaciones de sintonización de López y col., para cambios del 10% en consigna en el proceso modelo.
(Continuación)

Proceso			Lazo total			Minimizar IAE			Minimizar ITAE			
k_p	τ	t_o	k_p	τ	t_o	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d	
0,5	5	1	0,8333	5,3637	2,8423	2,2630	7,9923	1,0446	1,9931	7,4693	0,9157	
		2	0,8333	5,3637	3,8423	1,7415	8,2917	1,3760	1,5403	7,7656	1,2117	
		3	0,8333	5,3647	4,8423	1,4246	8,6158	1,7000	1,2641	8,0877	1,5023	
	1	1	1	1,6667	2,1104	2,1473	0,6418	3,4726	0,7461	0,5705	3,2647	0,6606
			2	1,6667	2,1104	3,1473	0,4604	3,8643	1,0583	0,4114	3,6590	0,9423
			3	1,6667	2,1104	4,1473	0,3622	4,3556	1,3618	0,3249	4,1615	1,2177
		3	1	1,6667	3,6498	2,6239	0,8680	5,6451	0,9394	0,7677	5,2871	0,8273
			2	1,6667	3,6498	3,6239	0,6556	5,9742	1,2619	0,5825	5,6147	1,1167
			3	1,6667	3,6498	4,6239	0,5305	6,3441	1,5767	0,4730	5,9856	1,4005
5	1	1,6667	5,3637	2,8423	1,1315	7,9923	1,0446	0,9965	7,4693	0,9157		
	2	1,6667	5,3637	3,8423	0,8707	8,2917	1,3760	0,7701	7,7656	1,2117		
	3	1,6667	5,3647	4,8423	0,7123	8,6158	1,7000	0,6320	8,0877	1,5023		
1,5	1	1	2,5000	2,1104	2,1473	0,4279	3,4726	0,7461	0,3803	3,2647	0,6606	
		2	2,5000	2,1104	3,1473	0,3069	3,8643	1,0583	0,2743	3,6590	0,9423	
		3	2,5000	2,1104	4,1473	0,2415	4,3556	1,3618	0,2166	4,1615	1,2177	
	3	1	2,5000	3,6498	2,6239	0,5787	5,6451	0,9394	0,5118	5,2871	0,8273	
		2	2,5000	3,6498	3,6239	0,4371	5,9742	1,2619	0,3884	5,6147	1,1167	
		3	2,5000	3,6498	4,6239	0,3537	6,3441	1,5767	0,3153	5,9856	1,4005	
	5	1	2,5000	5,3637	2,8423	0,7543	7,9923	1,0446	0,6643	7,4693	0,9157	
		2	2,5000	5,3637	3,8423	0,5805	8,2917	1,3760	0,5134	7,7656	1,2117	
		3	2,5000	5,3647	4,8423	0,4748	8,6158	1,7000	0,4213	8,0877	1,5023	

Tabla X. Valores obtenidos de los parámetros del controlador al utilizar las ecuaciones de sintonización de López y col., para cambios del 10% en perturbación en el proceso modelo.

Proceso			Lazo total			Minimizar IAE			Minimizar ITAE			Minimizar ISE		
k_p	τ	t_o	k_p	τ	t_o	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d
0,5	1	1	0,8333	2,1104	2,1473	1,6948	2,4351	1,0375	1,6020	2,5387	0,8181	1,7649	1,9426	1,2026
		2	0,8333	2,1104	3,1473	1,1918	3,2425	1,6024	1,1153	3,3663	1,1967	1,2297	2,6086	1,7667
		3	0,8333	2,1104	4,1473	0,9243	3,9868	2,1928	0,8589	4,1265	1,5748	0,9475	3,2269	2,3319
	3	1	0,8333	3,6498	2,6239	2,3337	3,2466	1,2088	2,2259	3,3977	1,0014	2,4506	2,5703	1,4665
		2	0,8333	3,6498	3,6239	1,7334	4,1348	1,7450	1,6395	4,3120	1,3808	1,8062	3,2968	2,0293
		3	0,8333	3,6498	4,6239	1,3849	4,9628	2,3021	1,3016	5,1615	1,7596	1,4347	3,9783	2,5931
	5	1	0,8333	5,3637	2,8423	3,0907	3,7966	1,2558	2,9714	3,9867	1,0864	3,2694	2,9857	1,5856
		2	0,8333	5,3637	3,8423	2,3414	4,7584	1,7693	2,2334	4,9801	1,4664	2,4589	3,7669	2,1474
		3	0,8333	5,3647	4,8423	1,8925	5,6588	2,3015	1,7944	5,9074	1,8459	1,9765	4,5025	2,7100
1	1	1	1,6667	2,1104	2,1473	0,8473	2,4351	1,0375	0,8009	2,5387	0,8181	0,8824	1,9426	1,2026
		2	1,6667	2,1104	3,1473	0,5958	3,2425	1,6024	0,5576	3,3663	1,1967	0,6148	2,6086	1,7667
		3	1,6667	2,1104	4,1473	0,4621	3,9868	2,1928	0,4294	4,1265	1,5748	0,4737	3,2269	2,3319
	3	1	1,6667	3,6498	2,6239	1,1668	3,2466	1,2088	1,1129	3,3977	1,0014	1,2252	2,5703	1,4665
		2	1,6667	3,6498	3,6239	0,8666	4,1348	1,7450	0,8197	4,3120	1,3808	0,9030	3,2968	2,0293
		3	1,6667	3,6498	4,6239	0,6924	4,9628	2,3021	0,6508	5,1615	1,7596	0,7173	3,9783	2,5931



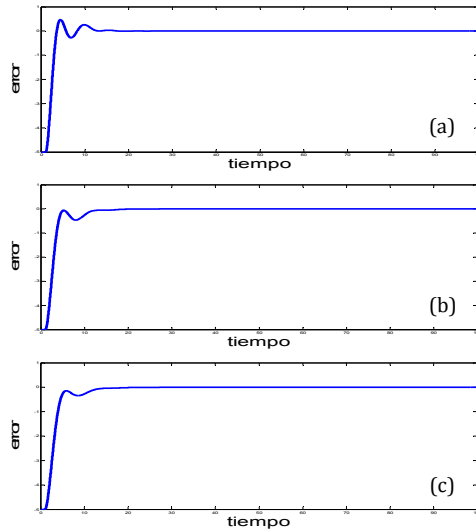
Tabla X. Valores obtenidos de los parámetros del controlador al utilizar las ecuaciones de sintonización de López y col., para cambios del 10% en perturbación en el proceso modelo.
(Continuación)

Proceso			Lazo total			Minimizar IAE			Minimizar ITAE			Minimizar ISE		
k_p	τ	t_o	k_p	τ	t_o	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d	k_c	τ_i	τ_d
1	5	1	1,6667	5,3637	2,8423	1,5453	3,7966	1,2558	1,4856	3,9867	1,0864	1,6346	2,9857	1,5856
		2	1,6667	5,3637	3,8423	1,1706	4,7584	1,7693	1,1167	4,9801	1,4664	1,2294	3,7669	2,1474
		3	1,6667	5,3647	4,8423	0,9462	5,6588	2,3015	0,8971	5,9074	1,8459	0,9882	4,5025	2,7100
1,5	1	1	2,5000	2,1104	2,1473	0,5649	2,4351	1,0375	0,5340	2,5387	0,8181	0,5883	1,9426	1,2026
		2	2,5000	2,1104	3,1473	0,3972	3,2425	1,6024	0,3718	3,3663	1,1967	0,4099	2,6086	1,7667
		3	2,5000	2,1104	4,1473	0,3081	3,9868	2,1928	0,2863	4,1265	1,5748	0,3158	3,2269	2,3319
	3	1	2,5000	3,6498	2,6239	0,7779	3,2466	1,2088	0,7419	3,3977	1,0014	0,8168	2,5703	1,4665
		2	2,5000	3,6498	3,6239	0,5778	4,1348	1,7450	0,5465	4,3120	1,3808	0,6020	3,2968	2,0293
		3	2,5000	3,6498	4,6239	0,4616	4,9628	2,3021	0,4339	5,1615	1,7596	0,4782	3,9783	2,5931
	5	1	2,5000	5,3637	2,8423	1,0302	3,7966	1,2558	0,9904	3,9867	1,0864	1,0898	2,9857	1,5856
		2	2,5000	5,3637	3,8423	0,7804	4,7584	1,7693	0,7444	4,9801	1,4664	0,8196	3,7669	2,1474
		3	2,5000	5,3647	4,8423	0,6308	5,6588	2,3015	0,5981	5,9074	1,8459	0,6588	4,5025	2,7100

Al comparar los valores obtenidos de los parámetros del controlador, por medio de la rutina de optimización y las ecuaciones de sintonización, se puede observar que existe una diferencia considerable entre estos. Los valores de k_c y τ_d calculados mediante las ecuaciones de sintonización son inferiores a los obtenidos en la rutina de optimización. Los valores de τ_i obtenidos mediante el uso de las relaciones son superiores a los óptimos. Esta tendencia se mantiene para cualquier combinación de los valores del proceso.

Las respuestas que se obtuvieron mediante el uso de los parámetros del controlador calculados por las ecuaciones de sintonización, presentan un mayor número de oscilaciones respecto a la respuesta óptima. Este comportamiento se mantiene al realizar variaciones de los valores del proceso considerados. De esta manera, la sintonización del controlador obtenida por las ecuaciones es más agresiva que la descrita por los valores óptimos.

La Figura 13 muestra las respuestas obtenidas, al usar los parámetros del controlador óptimos y los obtenidos mediante las relaciones de sintonización, en el lazo de control al efectuarse un cambio de consigna, para los valores del proceso $k_p = 0,5$, $\tau = 1$ y $t_o = 1$.



Parámetros del controlador

$k_c = 1,4433; \tau_i = 2,6621$ y $\tau_d = 1,1378$

Índices de desempeño

IAE = 13,8239; ITAE = 29,9357;
ISE = 51,2642; ITSE = 57,8760;

Parámetros del controlador

$k_c = 1,2838; \tau_i = 3,4726$ y $\tau_d = 0,7461$

Índices de desempeño

IAE = 16,2296; ITAE = 43,3651;
ISE = 57,6484; ITSE = 76,1542;

Parámetros del controlador

$k_c = 1,1410; \tau_i = 3,2647$ y $\tau_d = 0,6606$

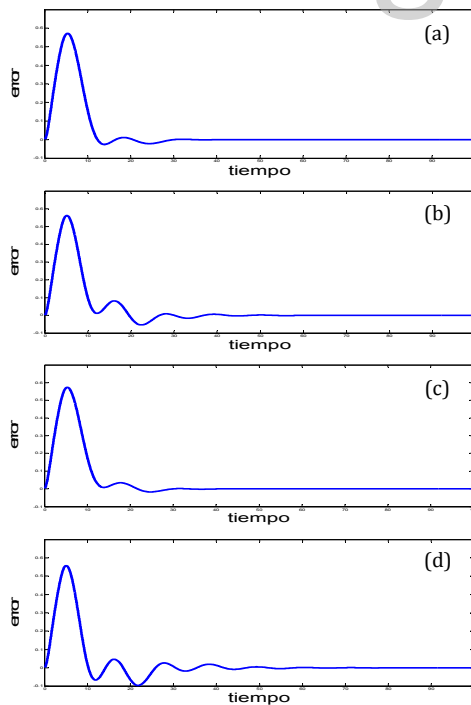
Índices de desempeño

IAE = 17,1723; ITAE = 45,9796;
ISE = 61,0946; ITSE = 85,2608;

Figura 13. Respuesta obtenida para los valores del proceso $k_p = 0,5$, $\tau = 1$ y $t_o = 1$ al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b) e ITAE (c) para cambios de consigna.

En la Figura 13, se observa que el comportamiento de las respuestas obtenidas al aplicar las ecuaciones de sintonización difiere del alcanzado por la respuesta óptima. Las respuestas del sistema al utilizar las ecuaciones para minimizar el IAE y el ITAE describen una trayectoria similar.

La Figura 14 muestra las respuestas obtenidas, al usar los parámetros óptimos y las relaciones de sintonización de los controladores, en el lazo de control al efectuarse un cambio de perturbación externa, para los valores del proceso $k_p = 0,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 3$.



Parámetros del controlador

$k_c = 1,3187; \tau_i = 4,7611$ y $\tau_d = 1,7818$

Índices de desempeño

IAE = 3,9935; ITAE = 26,5512;
ISE = 1,6183; ITSE = 9,0578;

Parámetros del controlador

$k_c = 1,3849; \tau_i = 4,9628$ y $\tau_d = 2,3021$

Índices de desempeño

IAE = 10,8044; ITAE = 103,7695;
ISE = 8,8318; ITSE = 43,7425;

Parámetros del controlador

$k_c = 1,3016; \tau_i = 5,1615$ y $\tau_d = 1,7596$

Índices de desempeño

IAE = 9,7881; ITAE = 61,3676;
ISE = 9,3280; ITSE = 42,6449;

Parámetros del controlador

$k_c = 1,4347; \tau_i = 3,9783$ y $\tau_d = 2,5931$

Índices de desempeño

IAE = 10,6822; ITAE = 115,2770;
ISE = 8,4164; ITSE = 41,4769;

Figura 14. Respuesta obtenida en el sistema de control modelo para los valores del proceso modelo $k_p = 0,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 3$, al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b), ITAE (c) e ISE (d) para cambios de perturbación.



En la Figura 14, se aprecia que la respuesta que tiene un comportamiento cercano al desempeño óptimo del controlador es la descrita por los valores que minimizan el ITAE. Si se usan las ecuaciones que minimizan el ISE se tiene una respuesta con mayor número de oscilaciones.

El aumento del retardo en el proceso incide, de manera significativa, en el comportamiento de la respuesta del sistema de lazo cerrado. La Figura 15 muestra el efecto de esta variable.

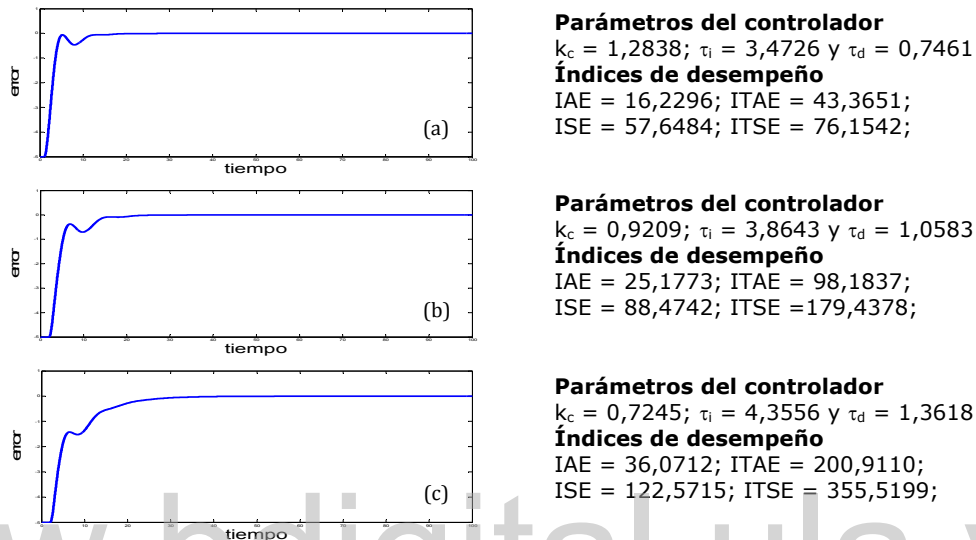


Figura 15. Efecto del tiempo de retraso $t_o = 1$ (a), $t_o = 2$ (b) y $t_o = 3$ (c) sobre la respuesta del sistema modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE al efectuarse un cambio de consigna en el lazo de control para los valores del proceso $k_p = 0,5$ y $\tau = 1$.

En la Figura 15, se observa que al aumentar el tiempo de retraso del sistema se obtiene una respuesta que se aleja considerablemente de una trayectoria óptima. Este comportamiento se debe, principalmente, a que la ganancia que se obtiene en el controlador disminuye al aumentar el tiempo de retraso, con lo cual la respuesta del sistema es lenta. Esto se corresponde con la definición de las relaciones de sintonización.

Los comportamientos descritos en las Figuras 13 a 15 son los que se obtuvieron en la mayoría de las simulaciones y modelan, de manera general, los tipos de respuestas obtenidas en las simulaciones del proceso modelo.

IV.2. Características de la respuesta evaluadas

A partir de las respuestas obtenidas mediante el uso de los valores de los parámetros del controlador calculados, por medio de la rutina de optimización y las ecuaciones de sintonización, se estudiaron las características que estas presentan. Dentro de las particularidades de la respuesta que se evaluaron para determinar el desempeño de los controladores, se incluyeron las contempladas por el índice total y otras definidas por el investigador.

La Figura 16 muestra las características de la respuesta que fueron consideradas.

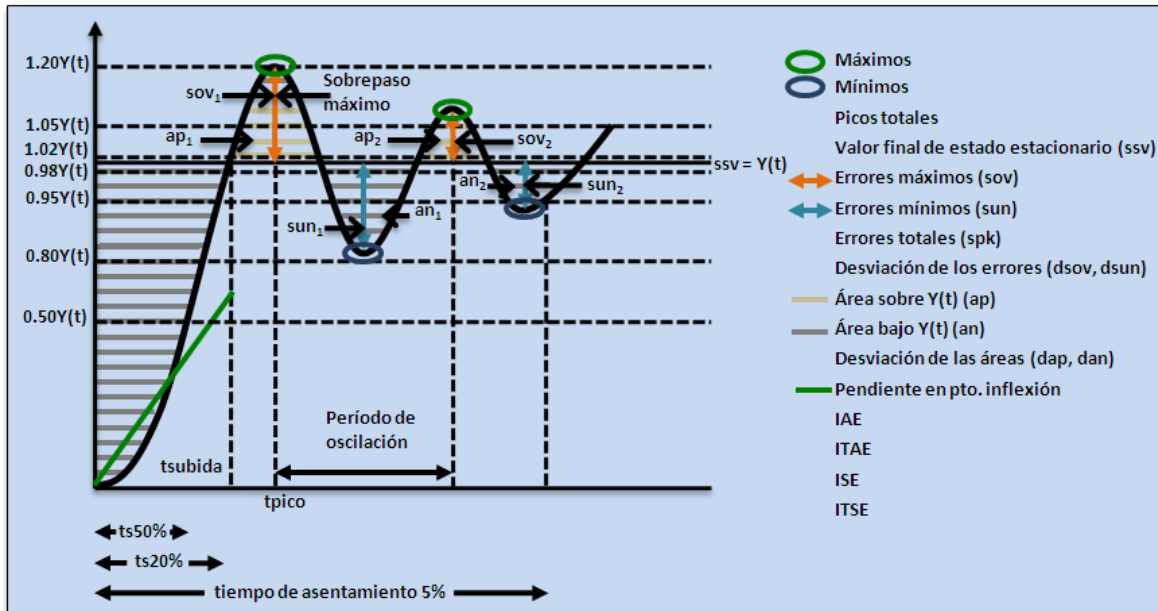


Figura 16. Características de la respuesta que se estudiaron para determinar aquellas que cuantifiquen el desempeño de los sistemas de lazo cerrado.

Los resultados obtenidos de estas características, para los diferentes valores del proceso modelo estudiado, se muestran en las Tablas XX a XXXIV de Anexos.

Al evaluar los valores obtenidos de las características de la respuesta, se pudo observar que existen particularidades que están íntimamente ligadas a la definición matemática del modelo que se estudia ó al tipo de cambio que se ejecute en el sistema, ya sea de consigna ó perturbación. El valor que arrojan estos parámetros depende de la magnitud del cambio que se realice. Las características de la respuesta que cumplen con lo mencionado no pueden ser indicativas del desempeño de los controladores. Esto se debe a que cuando se vayan a definir los conjuntos difusos de las particularidades, se tendrían que establecer rangos específicos según el modelo de proceso que se esté estudiando, no pudiéndose definir así un índice de desempeño general. Dentro de estas características se encuentran: la suma de los errores de los máximos (Ec. (78)) y mínimos (Ec. (79)), las áreas por encima (Ec. (80)) y por debajo (Ec. (81)) del valor final de estado estacionario y la pendiente en el punto de inflexión.

$$sov = \sum_{j=1}^n Y(t_j) - ssv \quad (78)$$

$$sun = \sum_{k=1}^n |Y(t_k) - ssv| \quad (79)$$

$$ap = \sum ap_i \quad (80)$$

$$an = \sum an_z \quad (81)$$

Si no se consideran las características definidas en las Ec. (78) a (81), de forma automática, las particularidades de la respuesta cuyas definiciones están ligadas a estas no se incluyen. La



desviación de la suma de los errores en los picos (Ec. (82) y (83)) y la desviación de las áreas (Ec. (84) y (85)) dependen de las características antes mencionadas.

$$dap = \frac{ap}{aT} \tag{82}$$

$$dan = \frac{an}{aT} \tag{83}$$

$$dsov = \frac{sov}{skp} \tag{84}$$

$$dsun = \frac{sun}{spk} \tag{85}$$

Donde aT es el área total bajo la curva de la señal del error.

Los números de picos máximos y mínimos que se obtienen en la respuesta del sistema de lazo cerrado se relacionan, de forma directa, con los parámetros de sintonización del controlador. Una buena sintonización del dispositivo implica un menor número de picos. Al aumentar la ganancia del controlador el sistema alcanza más rápido el valor de consigna, pudiéndose generar un mayor número de oscilaciones. Debido a que no es posible determinar la cantidad de picos que puede tener una respuesta, no se pueden establecer rangos para definir los conjuntos difusos que permitan considerar a esta característica como parámetro que describa el desempeño del controlador, debido a que es una variable difícil de normalizar.

Otro factor que influye en el número de picos de la respuesta, es la banda alrededor del valor de consigna que se define para cuantificar esta característica. La Figura 17 muestra la respuesta óptima del sistema para los valores del proceso $k_p = 0,5$; $\tau_p = 3$ y $t_o = 1$ y permite observar el efecto de este factor.

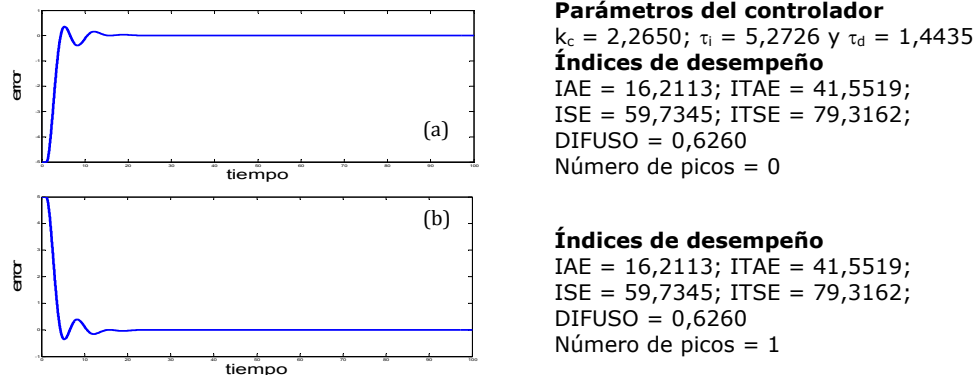


Figura 17. Respuesta óptima obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, para los valores del proceso $k_p = 0,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 1$, al efectuarse una variación del 10% por encima y debajo en el valor de consigna.

El número de picos obtenido no es el mismo para los casos mostrados en la Figura 17 (a) y (b), respectivamente. Esto es debido a que la banda alrededor del valor de consigna que se define para cuantificar esta característica viene dada como un porcentaje de este último. Al ser el valor de consigna diferente, esta banda presenta valores disímiles no cuantificando, de forma correcta, el número de picos para los mismos valores de sintonización de controlador. Esto se aprecia en la figura 18.

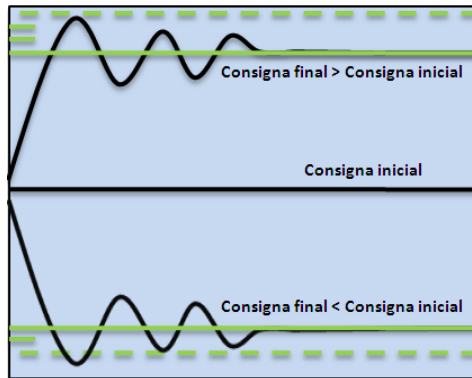
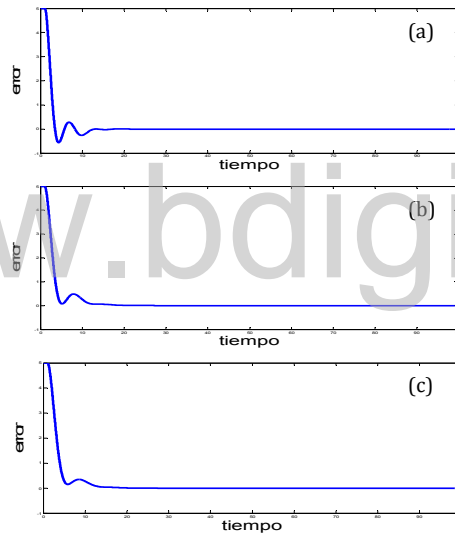


Figura 18. Efecto del valor de consigna en el número de picos.

La Figura 19 muestra el comportamiento que presenta la respuesta del sistema modelo, al utilizar los valores óptimos del controlador y los obtenidos por las relaciones de sintonización, para los valores del proceso $k_p = 1$, $\tau = 1$ y $t_o = 1$.



Parámetros del controlador

$k_c = 0,7208$; $\tau_i = 2,5531$ y $\tau_d = 1,1358$

Índices de desempeño

IAE = 13,6442; ITAE = 29,4726;
ISE = 50,2592; ITSE = 55,8303;

Parámetros del controlador

$k_c = 0,6418$; $\tau_i = 3,4726$ y $\tau_d = 0,7461$

Índices de desempeño

IAE = 16,2322; ITAE = 44,1358;
ISE = 57,1187; ITSE = 75,2389;

Parámetros del controlador

$k_c = 0,5705$; $\tau_i = 3,2647$ y $\tau_d = 0,6606$

Índices de desempeño

IAE = 17,1676; ITAE = 46,3218;
ISE = 60,8610; ITSE = 84,6981;

Figura 19. Respuesta obtenida para los valores del proceso modelo $k_p = 1$, $\tau = 1$ y $t_o = 1$ al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b) e ITAE (c) para cambios de consigna.

Las respuestas que se obtienen, mediante las relaciones de sintonización, presentan un comportamiento similar para cualquier parámetro de proceso utilizado. En las Figuras 18 (b) y (c) se observa que estas respuestas no oscilan alrededor del valor de consigna. Para estos casos, el período, frecuencia y razón de asentamiento de la respuesta no se pueden determinar. Debido a que el módulo difuso a definir debe cuantificar el trabajo del sistema para cualquier respuesta que se obtenga, estas características no son indicativas del desempeño que presentan los sistemas de lazo cerrado. La Figura 20 muestra las características que cumplen con lo anterior.

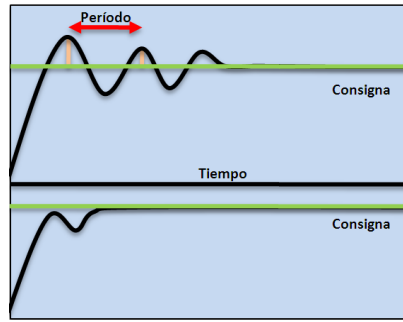
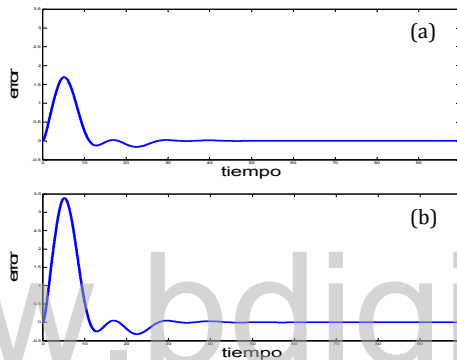


Figura 20. Efecto del comportamiento de la respuesta en el período, frecuencia y razón de asentamiento.

La Figura 21 muestra el efecto que tienen los cambios en perturbaciones externas al lazo cerrado, a diferentes magnitudes, sobre el tiempo de asentamiento de la respuesta del sistema.



Parámetros del controlador

$k_c = 0,4502$; $\tau_i = 4,1986$ y $\tau_d = 2,2213$

Índices de desempeño

IAE = 11,8254; ITAE = 88,3880;
 ISE = 13,3804; ITSE = 73,5482;
 ts2 = 8,0383 min;
 ts5, ts20 y ts50 no se pueden calcular

Índices de desempeño

IAE = 23,6507; ITAE = 176,7760;
 ISE = 53,5217; ITSE = 293,1930;
 ts2 = 9,3435 min; ts5 = 7,3723 min;
 ts20 y ts50 no se pueden calcular

Figura 21. Efecto de perturbaciones externas, para cambios del 10% (a) y 20% (b) en el proceso, en los tiempos de asentamiento ± 2 , ± 5 , ± 20 y $\pm 50\%$ de la respuesta del sistema modelo, para los valores del proceso $k_p = 1,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 3$.

En la Figura 21, se observa que de acuerdo a la magnitud del cambio que se haga en el sistema de lazo cerrado, se pueden determinar ó no los tiempos de asentamiento de la respuesta. La Figura 22 muestra, de forma detallada, las bandas de asentamiento que se utilizan y el comportamiento de la respuesta del sistema.

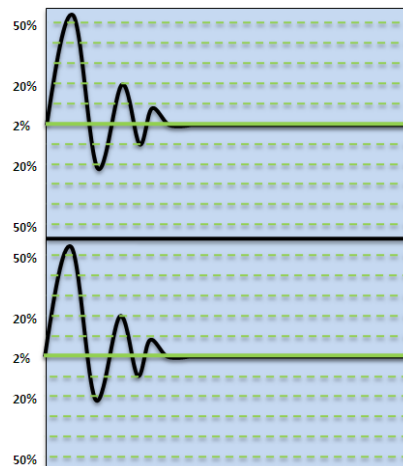


Figura 22. Efecto de la magnitud de la perturbación en el tiempo de asentamiento.



Debido a esto, los tiempos de asentamiento alrededor de la banda del ± 5 , ± 20 y $\pm 50\%$ no son parámetros de la respuesta del sistema que puedan indicar el desempeño.

El tiempo de asentamiento alrededor del $\pm 2\%$ del valor de consigna es una característica que puede ser calculada, inclusive, al efectuarse un cambio de magnitud mínima en el sistema de lazo cerrado, tanto en perturbación como en consigna. Debido a esto, es un parámetro de la respuesta que indica el desempeño de los controladores.

El sobrepaso máximo es la máxima desviación que presenta la respuesta del sistema respecto al valor de consigna. Si el sistema es estable, de manera general, esta desviación se tiene en el primero pico de la respuesta, como se observa en la Figura 21. A medida que se incrementa el sobrepaso máximo, de forma proporcional, el error en el sistema tiende a aumentar. Esta es una característica que puede ser normalizada. Así, se pueden establecer rangos para definir los conjuntos difusos que permitan que el sobrepaso máximo cuantifique el desempeño de los controladores.

La Figura 23 muestra la respuesta del sistema obtenida para un cambio, en perturbación externa, por debajo de su valor inicial, para los parámetros del proceso $k_p = 1$, $\tau = 1$ y $t_o = 2$.

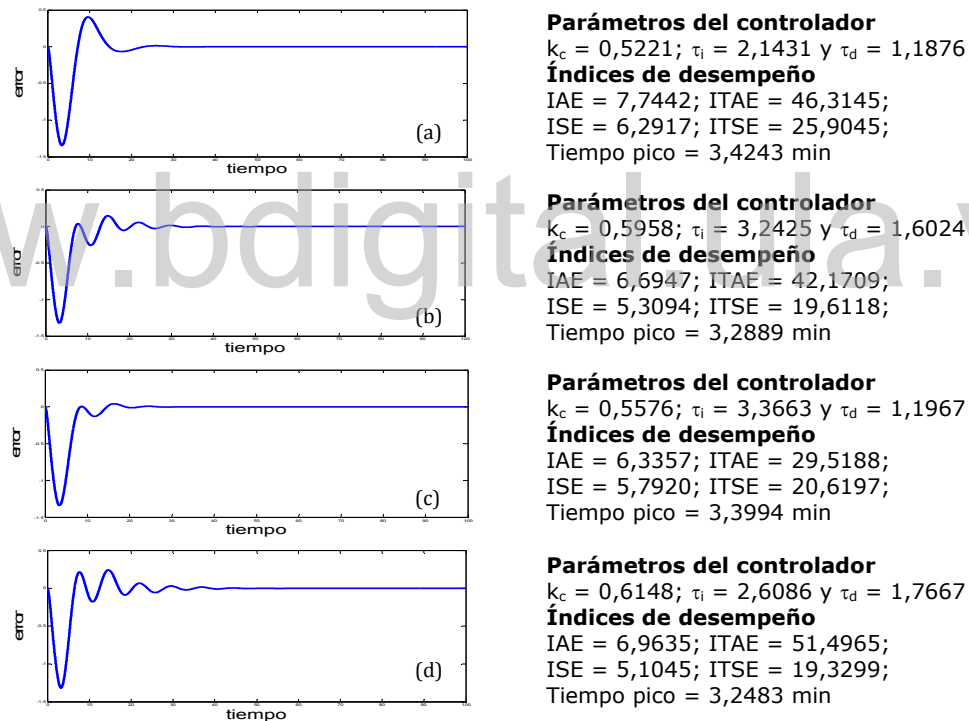


Figura 23. Respuesta obtenida en el sistema de control modelo para los valores del proceso modelo $k_p = 1$, $\tau = 1$ y $t_o = 2$, al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b), ITAE (c) e ISE (d) para cambios de perturbación.

Las respuestas mostradas en la Figura 23 (a) a (d) presentan diferentes comportamientos. En estas, el tiempo pico obtenido se mantiene en un rango muy cercano. A pesar de esto, los índices de desempeño arrojan diversos valores según el comportamiento de la respuesta. Por esta razón, el tiempo pico es una característica que no cuantifica el desempeño de los sistemas de lazo cerrado.

De acuerdo a los resultados obtenidos en las simulaciones, el tiempo de subida presenta un comportamiento similar al sobrepaso máximo. A medida que este se incrementa, el error en el sistema



que cuantifican los índices de desempeño tradicionales aumenta. Esto se muestra en la Figura 24. Por esta razón, es una característica que cuantifica el desempeño de los controladores.

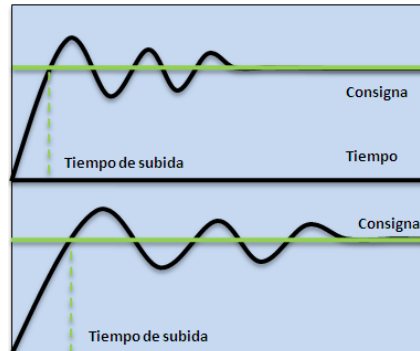


Figura 24. Efecto del tiempo de subida en el desempeño de la respuesta del sistema de lazo cerrado.

Luego de haberse analizado, de forma detallada, cada una de las características de la respuesta de los sistemas de lazo cerrado se pudo observar que el tiempo de asentamiento alrededor del $\pm 2\%$ del valor de consigna, el sobrepaso máximo y el tiempo de subida cuantifican, de manera correcta, el desempeño que presentan los controladores.

IV.3. Desarrollo del módulo difuso

A pesar de haberse obtenido las características que cuantifican, de forma correcta, el desempeño de los controladores, se trató de reproducir un módulo de desempeño similar al índice total. Se hizo el intento por incluir la mayor cantidad de particularidades posibles de la respuesta para obtener un módulo de desempeño que genere mayor confiabilidad en sus resultados.

Se tomaron 14 características de la respuesta del sistema y se definieron sus conjuntos difusos, en un rango amplio, con la finalidad de predecir cualquier comportamiento que tuviese la respuesta que se evaluaba. Se definieron 5 variables lingüísticas para cada una de las características. La forma geométrica que se utilizó para definir las funciones de pertenencias de los conjuntos difusos fue el triángulo. Se compararon cada una de las respuestas obtenidas para todas las simulaciones ejecutadas del proceso modelo, con la finalidad de tener las respuestas que se reproducían con mayor frecuencia. A partir de estas, se definieron las reglas difusas que debían arrojar un resultado según el desempeño que presentase el controlador. La cantidad de reglas difusas obtenidas fue de 254.

A partir del primer módulo difuso obtenido se ejecutaron simulaciones para el proceso modelo, y se pudo observar que arrojaba resultados satisfactorios. Este módulo se probó en los procesos químicos y no midió el desempeño, de forma correcta, de los sistemas estudiados. Se trató de agregar una mayor cantidad de reglas difusas para corregir esta falla. Al analizar la situación que se presentó, de forma detallada, se infirió que para que el módulo arrojase un resultado correcto se deben incluir todas las combinaciones posibles, entre las variables lingüísticas definidas, para las características seleccionadas. El cálculo del número de reglas difusas se hizo mediante el uso de la definición de la combinatoria, dando como resultado un total de $1,04 \cdot 10^{13}$ reglas. El resultado obtenido es de un orden de magnitud exorbitante. Así, se descartó esta posibilidad y sólo se trabajó con las características que demostraron cuantificar, de forma correcta, el desempeño de los sistemas de lazo cerrado.



Las características de la respuesta que cuantifican, de forma satisfactoria, el desempeño que tienen los controladores son el tiempo de subida, el sobrepaso máximo y el tiempo de asentamiento alrededor de la banda del $\pm 2\%$ del valor final de consigna. Las variables lingüísticas definidas, para estas particularidades se muestran en la Tabla VIII.

Tabla XI. Rangos definidos para las características de la respuesta que cuantifican el desempeño del sistema de lazo cerrado.

Característica de la respuesta	muy cerca	cerca	medio	lejos	muy lejos
Tiempo de asentamiento (ts2)	[0 0 2,6]	[0 2,6 8]	[2,6 8 14]	[8 14 100]	[14 100 100]
Sobrepaso máximo	[0 0 2,4]	[0 2,4 5,6]	[2,4 5,6 12]	[5,6 11,9 40]	[11,9 40 40]
Tiempo de subida	[0 0 6]	[0 6 12]	[6 12 22]	[12 22 40]	[22 40 40]

La forma geométrica que se utilizó para definir las funciones de pertenencias de los conjuntos difusos fue el triángulo. Las Figuras 25 a 27 muestran los conjuntos difusos para el tiempo de subida, el tiempo de asentamiento alrededor de la banda $\pm 2\%$ del valor final de consigna y el sobrepaso máximo, respectivamente.

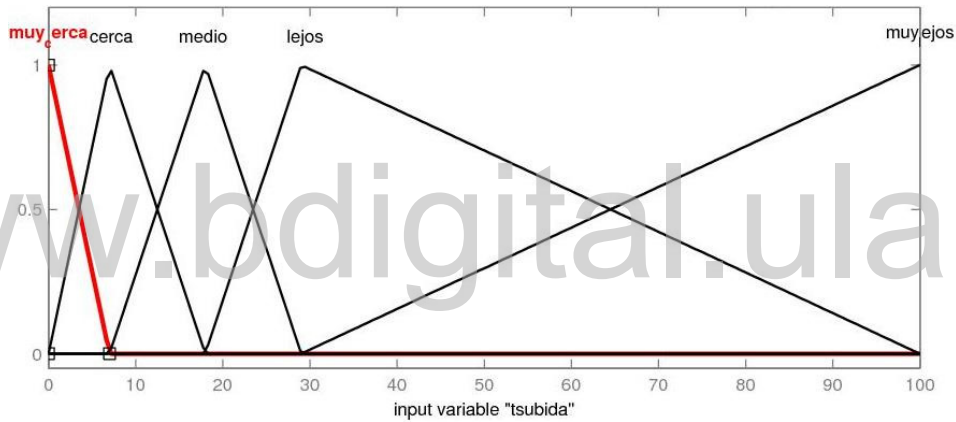


Figura 25. Conjunto difuso que evalúa el tiempo de subida de la respuesta en el sistema de control para cambios de punto de control y perturbación.

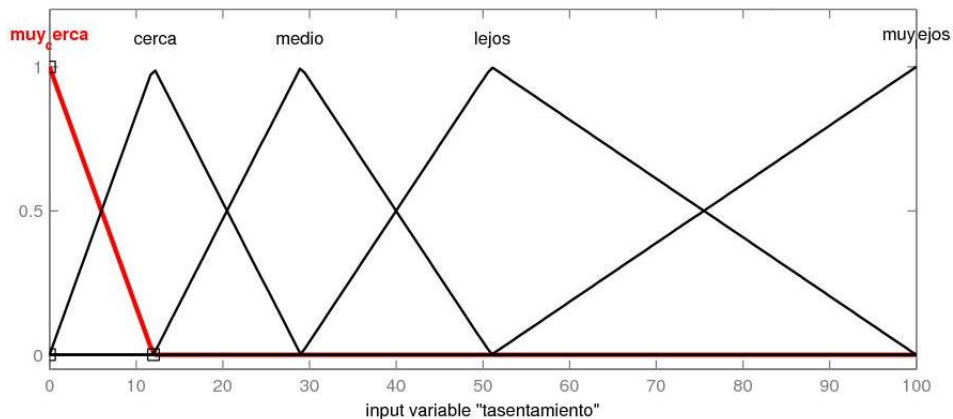


Figura 26. Conjunto difuso que evalúa el tiempo de asentamiento alrededor de la banda $\pm 2\%$ del valor final de estado estacionario de la respuesta en el sistema de control para cambios de punto de control y perturbación.

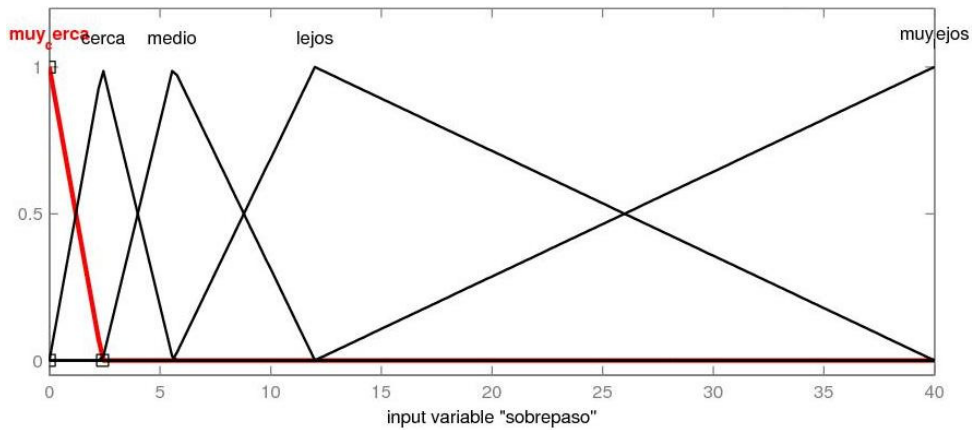


Figura 27. Conjunto difuso que evalúa el sobrepaso máximo de la respuesta en el sistema de control para cambios de consigna y perturbación.

Del mismo modo, se definieron los rangos de la variable de salida del módulo difuso. La Figura 28 muestra el conjunto difuso que cuantifica el desempeño del sistema de control de lazo cerrado.

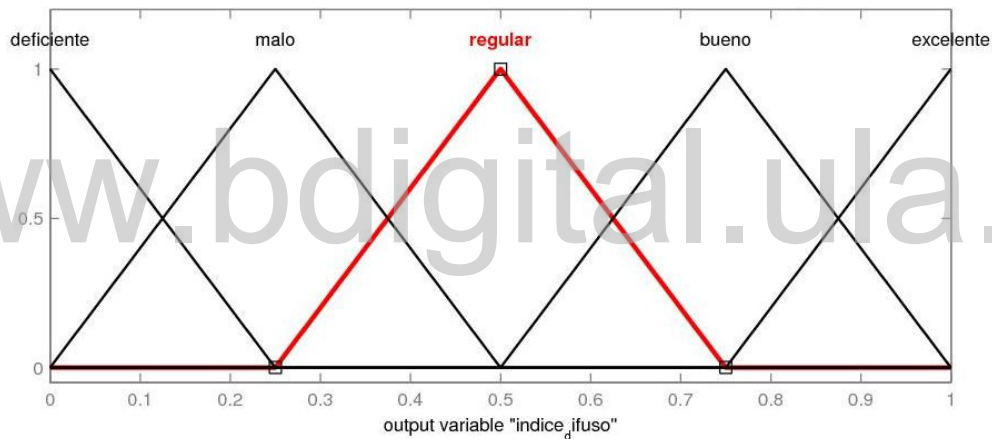


Figura 28. Conjunto difuso que genera el índice difuso.

Se asignaron las variables lingüísticas a los resultados obtenidos para las simulaciones del proceso efectuadas en el sistema de control modelo. Estas se compararon para establecer aquellas respuestas que tienen un comportamiento similar, con el objetivo de cuantificar la cantidad de reglas difusas que se deben definir en el módulo de inferencia. Luego, se estableció el valor difuso que designa el comportamiento que tienen los sistemas de lazo cerrado.

La Tabla XII señala las reglas difusas que se obtuvieron al evaluar cada una de las características analizadas, relacionadas entre sí por el operador "y", así como el valor difuso que se tiene a la salida del módulo de inferencia.



Tabla XII. Relaciones difusas entre las características de la respuesta consideradas para cuantificar el desempeño del controlador.

Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento $\pm 2\%$	Sobrepaso máximo	Salida
MC	MC	MC	e
MC	MC	C	e
MC	MC	M	b
MC	MC	L	r
MC	MC	ML	m
MC	C	MC	e
MC	C	C	b
MC	C	M	b
MC	C	L	r
MC	C	ML	m
MC	M	MC	b
MC	M	C	b
MC	M	M	r
MC	M	L	m
MC	M	ML	m
MC	L	MC	r
MC	L	C	r
MC	L	M	m
MC	L	L	m
MC	L	ML	m
MC	ML	MC	r
MC	ML	C	r
MC	ML	M	m
MC	ML	L	m
MC	ML	ML	m
C	MC	MC	e
C	MC	C	b
C	MC	M	b
C	MC	L	r
C	MC	ML	r
C	C	MC	b
C	C	C	b
C	C	M	r
C	C	L	m
C	C	ML	m
C	M	MC	r
C	M	C	r
C	M	M	r
C	M	L	r
C	M	ML	m
C	L	MC	r
C	L	C	r
C	L	M	r
C	L	L	m
C	L	ML	m
C	ML	MC	r
C	ML	C	r
C	ML	M	m
C	ML	L	m
C	ML	ML	m
M	MC	MC	b
M	MC	C	b
M	MC	M	r
M	MC	L	r
M	MC	ML	m
M	C	MC	b
M	C	C	r



Tabla XII. Relaciones difusas entre las características de la respuesta consideradas para cuantificar el desempeño del controlador.
(Continuación)

Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento $\pm 2\%$	Sobrepaso máximo	Salida
M	C	M	r
M	C	L	m
M	C	ML	d
M	M	MC	r
M	M	C	r
M	M	M	m
M	M	L	m
M	M	ML	m
M	L	MC	r
M	L	C	r
M	L	M	m
M	L	L	m
M	L	ML	m
M	ML	MC	r
M	ML	C	m
M	ML	M	m
M	ML	L	d
M	ML	ML	d
L	MC	MC	b
L	MC	C	r
L	MC	M	r
L	MC	L	m
L	MC	ML	d
L	C	MC	b
L	C	C	r
L	C	M	m
L	C	L	m
L	C	ML	d
L	M	MC	r
L	M	C	r
L	M	M	m
L	M	L	m
L	M	ML	d
L	L	MC	r
L	L	C	r
L	L	M	m
L	L	L	m
L	L	ML	d
L	ML	MC	r
L	ML	C	m
L	ML	M	d
L	ML	L	d
L	ML	ML	d
L	ML	ML	d
L	ML	ML	d
ML	MC	MC	b
ML	MC	C	r
ML	MC	M	r
ML	MC	L	m
ML	MC	ML	d
ML	C	MC	b
ML	C	C	r
ML	C	M	m
ML	C	L	d
ML	C	ML	d
ML	M	MC	r
ML	M	C	m



Tabla XII. Relaciones difusas entre las características de la respuesta consideradas para cuantificar el desempeño del controlador.
(Continuación)

Tiempo de subida	Tiempo de asentamiento $\pm 2\%$	Sobrepaso máximo	Salida
ML	M	M	m
ML	M	L	d
ML	M	ML	d
ML	L	MC	r
ML	L	C	m
ML	L	M	m
ML	L	L	d
ML	L	ML	d
ML	ML	MC	m
ML	ML	C	d
ML	ML	M	d
ML	ML	L	D
ML	ML	ML	D

De esta manera, se obtuvieron 125 reglas difusas. Estas comparan y modelan el comportamiento de las características consideradas para medir el desempeño de los controladores.

Los valores difusos que se obtienen a la salida del sistema de inferencia pasan al bloque desfusor (Ver Figura 28). Al aplicar el método del centroide para desfuzificar los valores difusos que entran a éste bloque, se tiene un valor convencional comprendido entre cero y uno. A partir de este valor se obtiene el trabajo que ejecuta del controlador, donde un valor cercano a 1 indica un buen desempeño del sistema de lazo cerrado.

Las funciones de pertenencia establecidas para el bloque desfusor se definieron geoméricamente iguales, con el objetivo de poder apreciar, de forma clara, el desempeño que presentan los controladores.

La influencia de cada una de las características consideradas para el cálculo del índice difuso, se muestran en las Figuras 29 a 31. La superficie que se genera es el resultado de la aplicación del sistema de inferencia difuso.

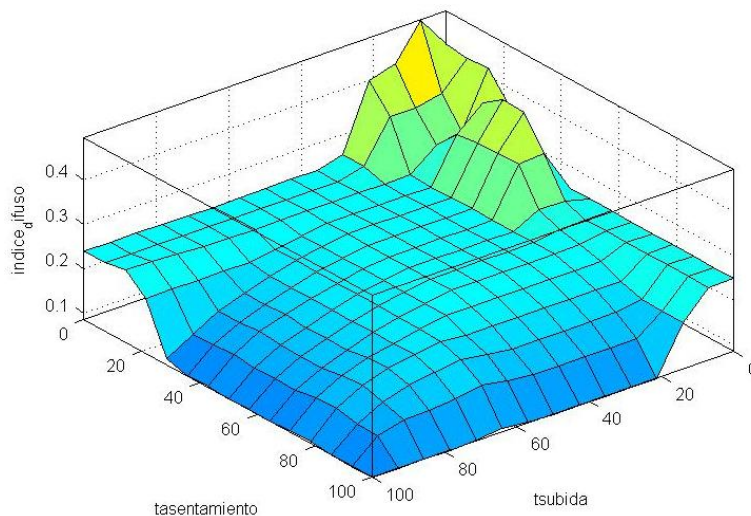


Figura 29. Superficie correspondiente al valor del índice difuso relacionado con las características tiempo de asentamiento en la banda del $\pm 2\%$ del valor final de estado estacionario y el tiempo de subida de la respuesta obtenida.

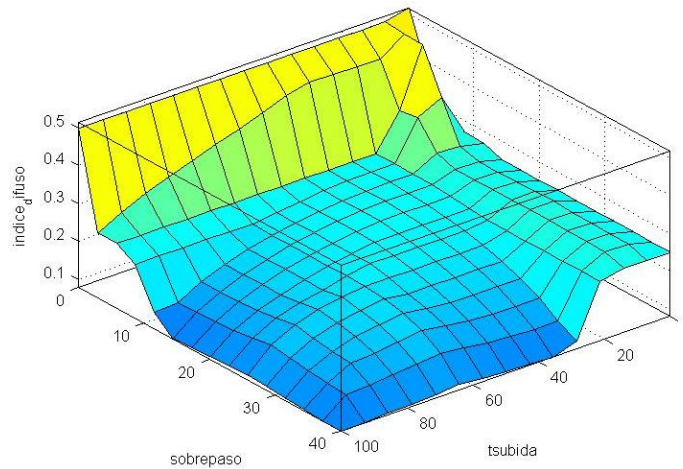


Figura 30. Superficie correspondiente al valor del índice difuso relacionado con las características tiempo de subida y sobrepaso máximo de la respuesta obtenida.

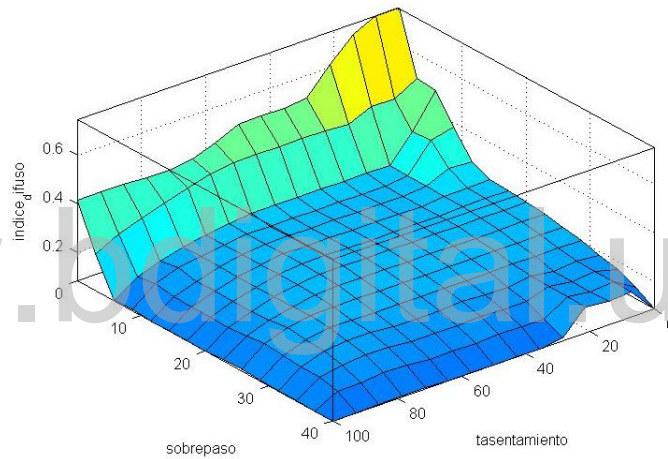
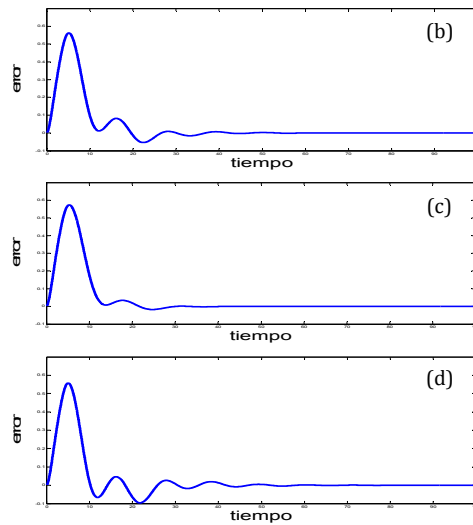


Figura 31. Superficie correspondiente al valor del índice difuso relacionado con las características tiempo de asentamiento en la banda del $\pm 2\%$ del valor final de estado estacionario y sobrepaso máximo de la respuesta obtenida.

IV.4. Análisis de los índices de desempeño

Los índices de desempeño de controladores según el criterio integral cuantifican el error dependiendo del comportamiento que presente la respuesta del sistema de lazo cerrado.

Los índices IAE e ISE cuantifican las desviaciones de la respuesta del sistema, en toda su trayectoria respecto al valor final del estado estacionario. Cuando el sistema oscila por un tiempo prolongado y el error va disminuyendo progresivamente, las últimas desviaciones de la respuesta del sistema respecto al valor de consigna representan un valor muy pequeño. Para este intervalo de tiempo no se pondera, de forma correcta, el desempeño del sistema dinámico. Este comportamiento se observa en las Figuras 32 (a) y (c).



Parámetros del controlador

$K_c = 1,3849$; $\tau_i = 4,9628$ y $\tau_d = 2,3021$

Índices de desempeño

IAE = 10,8044; ITAE = 103,7695;

ISE = 8,8318; ITSE = 43,7425;

Parámetros del controlador

$K_c = 1,3016$; $\tau_i = 5,1615$ y $\tau_d = 1,7596$

Índices de desempeño

IAE = 9,7881; ITAE = 61,3676;

ISE = 9,3280; ITSE = 42,6449;

Parámetros del controlador

$K_c = 1,4347$; $\tau_i = 3,9783$ y $\tau_d = 2,5931$

Índices de desempeño

IAE = 10,6822; ITAE = 115,2770;

ISE = 8,4164; ITSE = 41,4769;

Figura 32. Respuesta obtenida en el sistema de control modelo para los valores del proceso modelo $k_p = 0,5$, $\tau = 3$ y $t_o = 3$, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (a), ITAE (b) e ISE (c) para cambios de perturbación.

En las Figuras 32 (a) y (c) se observa que el índice ITAE cuantifica las desviaciones del sistema cuando estas son muy pequeñas, es decir, corrige la falla que tienen los índices IAE e ISE.

El inconveniente que presentan los índices ITAE e ITSE radica en que, cuando el sistema oscila por un tiempo prolongado, los resultados que estos arrojan son de magnitud elevada. Así, se hace difícil interpretar el comportamiento que presentan los controladores.

Si se comparan los resultados obtenidos de los índices de desempeño convencionales con el módulo difuso generado, en las Figuras 33 y 34, se puede observar que el módulo difuso arroja un valor de desempeño acorde con el comportamiento que presenta la respuesta del sistema. En las Figura 33 (b) y (c) la respuesta del sistema exhibe una trayectoria similar, a pesar de haberse usado criterios de sintonización diferentes, generando un valor de índice difuso semejante para ambos casos. Esto aplica en las Figuras 34 (a) y (b).

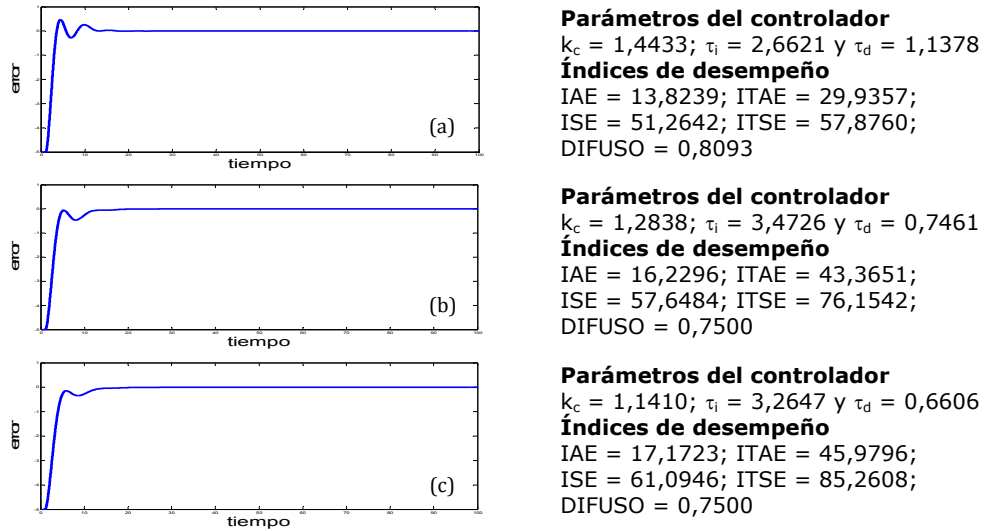


Figura 33. Respuesta obtenida para los valores del proceso $k_p = 0,5$, $\tau = 1$ y $t_o = 1$ al utilizar los valores óptimos del controlador (a) y las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE (b) e ITAE (c) para cambios de consigna.

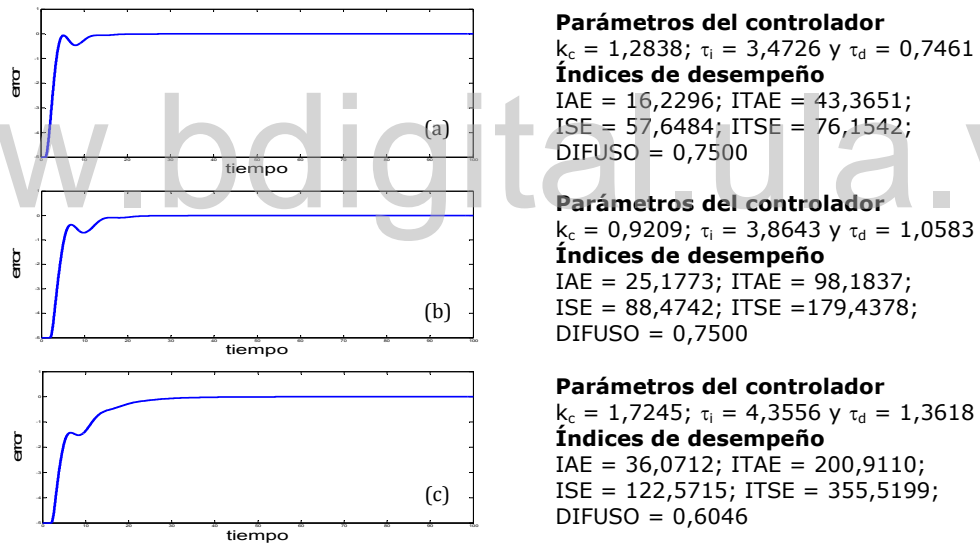


Figura 34. Efecto del tiempo de retraso $t_o = 1$ (a), $t_o = 2$ (b) y $t_o = 3$ (c) sobre la respuesta del sistema modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE al efectuarse un cambio de consigna en el lazo de control para los valores del proceso $k_p = 0,5$ y $\tau = 1$.

En la Figura 34 (c) la desviación del error en el sistema aumenta, de manera considerable, debido al aumento del tiempo de retardo en el proceso. Los índices de desempeño arrojan unos resultados elevados. El módulo difuso, por su parte, disminuye su valor. Esto se corresponde con el comportamiento que presenta el sistema.

Las Tablas XIII y XIV muestran los resultados obtenidos de los índices de desempeño convencionales y el módulo difuso generado, para simulaciones de procesos efectuadas en el sistema de lazo cerrado modelo.



Tabla XIII. Valores de índices de desempeño obtenidos en el sistema modelo de lazo cerrado, para cambios positivos del 10% en el valor de consigna, al utilizar los parámetros óptimos del controlador.

k_p	τ	t_o	k_c	τ_i	τ_d	IAE	ITAE	ISE	ITSE	DIFUSO
0,5	1	1	1,4433	2,6621	1,1378	13,8139	29,9357	51,2642	57,8670	0,8093
		2	1,0014	2,8492	1,3673	20,8028	62,6517	80,6716	139,2114	0,7734
		3	0,8475	3,2193	1,5815	27,4047	104,6471	108,5013	248,3070	0,7508
	3	1	2,2650	5,2726	1,4435	16,2113	41,5519	59,7345	79,3162	0,6260
		2	1,4695	4,7938	1,7049	23,5956	82,8521	89,8281	174,3879	0,6076
		3	1,1656	4,9068	1,9661	30,4591	132,5211	118,5919	299,7087	0,7231
	5	1	3,2349	8,6445	1,5291	17,3059	44,3961	64,7519	93,2273	0,6914
		2	2,0409	7,4196	1,8176	24,2902	91,2668	95,0617	195,7371	0,6812
		3	1,5735	7,1119	2,1264	32,0449	148,6555	123,8355	327,9328	0,6807
1	1	1	0,7185	2,5543	1,1368	13,6442	29,4726	50,2592	55,8303	0,7186
		2	0,5033	2,8533	1,3561	20,8053	62,5983	80,5942	138,9524	0,7710
		3	0,4238	3,2194	1,5813	27,4053	104,6533	108,5006	248,3047	0,7508
	3	1	1,0848	4,5136	1,4572	15,5776	39,7857	56,2093	70,7708	0,6337
		2	0,7355	4,6430	1,6840	23,2968	81,1640	88,1443	168,3129	0,6090
		3	0,5856	4,8762	1,9546	30,3666	132,0918	117,9065	296,4835	0,7256
	5	1	1,5109	7,1503	1,5771	16,2603	42,1579	59,3849	79,0358	0,6950
		2	1,0003	6,7451	1,8162	24,1273	87,8164	90,7757	179,1814	0,6829
		3	0,7853	6,8511	2,0964	31,5194	144,5064	121,1509	314,3007	0,7219
1,5	1	1	0,4797	2,5529	1,1358	13,6481	29,4902	50,2540	55,8280	0,7099
		2	0,3355	2,8525	1,3565	20,8053	62,6035	80,5929	138,9508	0,7710
		3	0,2825	3,2188	1,5817	27,4050	104,6555	108,4999	248,3040	0,7508
	3	1	0,7249	4,4623	1,4505	15,5556	39,6435	56,0010	70,3517	0,6347
		2	0,4903	4,6385	1,6850	23,2976	81,2018	88,1382	168,2971	0,7536
		3	0,3905	4,8761	1,9546	30,3686	132,1308	117,9008	296,4685	0,7256
	5	1	0,9934	6,7231	1,5792	16,0370	41,5732	57,9588	75,6461	0,6963
		2	0,6693	6,7437	1,8094	24,1257	87,7347	90,6620	178,8748	0,6830
		3	0,5236	6,8521	2,0966	31,5205	144,5332	121,1465	314,2897	0,6807

Tabla XIV. Valores de índices de desempeño obtenidos en el sistema modelo de lazo cerrado, para cambios positivos del 10% en perturbación externa, al utilizar los parámetros óptimos del controlador.

k_p	τ	t_o	k_c	τ_i	τ_d	IAE	ITAE	ISE	ITSE	DIFUSO
0,5	1	1	1,6418	2,4814	1,0585	1,7459	5,8695	0,6340	1,7132	0,8352
		2	1,0520	2,9361	1,2071	3,0804	13,2062	1,4706	5,2555	0,8201
		3	0,8520	3,3306	1,3790	4,2568	21,6597	2,2879	9,8462	0,8133
	3	1	2,8781	3,4067	1,3615	1,3969	6,0688	0,3239	1,1114	0,8583
		2	1,7401	4,2059	1,5690	2,7213	15,2278	0,9173	4,2516	0,8233
		3	1,3187	4,7611	1,7818	3,9935	26,5515	1,6183	9,0578	0,7847
	5	1	4,2842	3,9537	1,4385	1,0869	5,0853	0,1832	0,6774	0,8721
		2	2,5608	5,0821	1,6857	2,2428	13,7580	0,5748	2,9132	0,8075
		3	1,9059	5,8569	1,9459	3,4317	25,3665	1,0924	6,7566	0,7732
1	1	1	0,8394	2,4410	1,0939	3,4563	11,8833	2,4588	6,5860	0,7917
		2	0,5221	2,1431	1,1876	7,7442	46,3145	6,2917	25,9045	0,7674
		3	0,4856	4,3308	1,1522	9,1994	56,5551	9,1635	40,6825	0,6866
	3	1	1,4505	3,4019	1,3686	2,7816	12,1623	1,2806	4,3816	0,8198



Tabla XIV. Valores de índices de desempeño obtenidos en el sistema modelo de lazo cerrado, para cambios positivos del 10% en perturbación externa, al utilizar los parámetros óptimos del controlador.
(Continuación)

k_p	τ	t_o	k_c	τ_i	τ_d	IAE	ITAE	ISE	ITSE	DIFUSO	
1	3	1	1,4505	3,4019	1,3686	2,7816	12,1623	1,2806	4,3816	0,8198	
		2	0,8860	4,1265	1,6263	5,3834	30,7290	3,5634	16,3651	0,7973	
		3	0,6735	4,6843	1,8536	7,9087	53,6671	6,3020	34,9297	0,6592	
	5	1	2,1560	3,9142	1,4546	2,1607	10,1859	0,7216	2,6587	0,8389	
		2	1,2951	5,0069	1,7224	4,4466	27,6104	2,2499	11,3280	0,8111	
		3	0,9665	5,7711	2,0030	6,8017	51,0425	4,2703	26,2087	0,7762	
	1,5	1	1	0,5709	2,3913	1,1288	5,1521	18,1950	5,3780	14,3118	0,7665
			2	0,3696	2,8245	1,3444	9,1141	41,6227	12,5068	44,0838	0,7367
			3	0,2988	3,2373	1,5500	12,6410	68,3922	19,6777	83,1243	0,6819
3		1	0,9795	3,3187	1,4064	4,1307	18,4082	2,7968	9,5065	0,7940	
		2	0,6005	4,0571	1,6732	8,0210	46,8111	7,8215	35,6757	0,6981	
		3	0,4502	4,1986	2,2213	11,8254	88,3880	13,3804	73,5482	0,6608	
5		1	1,4492	3,8666	1,4722	3,2195	15,3307	1,5944	5,8496	0,8146	
		2	0,8749	4,9015	1,7705	6,6110	41,8199	4,9308	24,6477	0,6896	
		3	0,6538	5,6635	2,0671	10,1279	77,6137	9,3778	57,1355	0,6366	

Los resultados obtenidos para los índices de desempeño de criterio integral y el módulo difuso, al utilizar los parámetros óptimos del controlador se corresponden con el comportamiento que describe la respuesta del sistema, no generándose ninguna discrepancia entre estos.

El índice total no se calculó en las simulaciones del proceso modelo. De acuerdo a lo expuesto por sus autores, para que éste índice funcione de forma satisfactoria el investigador debe asignar una ponderación adecuada a cada una de las particularidades de la respuesta, con la finalidad de obtener un valor correcto que indique el desempeño de los controladores. Esto conlleva a que el investigador debe conocer detalladamente el sistema dinámico que se está estudiando, lo cual implica un consumo de tiempo importante para conocer cada uno de los parámetros del proceso, no siendo factible la aplicación de este índice si se desea obtener un resultado de forma rápida y precisa.

IV.5. Evaluación del módulo difuso en procesos químicos

Para comprobar la efectividad del índice de desempeño basado en lógica difusa se ejecutaron simulaciones a sistemas de lazo cerrado en procesos químicos. Los procesos que se estudiaron fueron un reactor no isotérmico y un tanque de mezclado.

IV.5.1. Reactor no isotérmico

El diagrama y los valores del proceso se muestran en la Figura 11 y la Tabla VI, respectivamente. Los parámetros de sintonización del controlador para este proceso (Ver Tabla XV) se obtuvieron a partir de la rutina de optimización disponible en Matlab®, estableciendo como criterios los mismos que se aplicaron para el sistema de lazo cerrado modelo.



Tabla XV. Parámetros óptimos del controlador para el sistema de control del reactor químico no isotérmico, al efectuarse un cambio del 10% en perturbación

Variable	k_c	τ_i	τ_d
Flujo de proceso (f)	31,5202	8,0754	2,0594
Concentración inicial (C_{A0}).	79,2834	0,8792	14,0424
Consigna (T).	10,0380	11,8857	1,4898

La Tabla XVI muestra los valores de los índices de desempeño que se obtuvieron al llevarse a cabo perturbaciones externas, simples y múltiples, al lazo de control del reactor no isotérmico.

Tabla XVI. Valores de índices de desempeño al efectuarse cambios simples y múltiples de perturbaciones externas al lazo de control del reactor no isotérmico.

Perturbación			Índices de desempeño				
f	C_{A0}	T_o	IAE	ITAE	ISE	ITSE	DIFUSO
10%	-	-	1,9049	33,3600	0,1535	2,4357	0,7327
20%	-	-	3,9642	73,5618	0,6068	9,8017	0,7180
30%	-	-	6,1667	121,9448	1,3326	22,0049	0,7055
-	10%	-	8,5824	159,3782	2,5692	38,5005	0,6927
-	20%	-	-	-	-	-	-
-	30%	-	-	-	-	-	-
-	-	10%	-	-	-	-	-
-	-	20%	-	-	-	-	-
-	-	30%	-	-	-	-	-
10%*	10%	-	18,2129	1039,5000	5,1207	144,4743	0,6786
20%	10%	-	-	-	-	-	-
10%	10%*	-	15,1538	1019,0000	4,9633	132,0039	0,6816

Nota: El valor señalado con (*) indica que es la primera perturbación que ocurre en el sistema.

En la Tabla XVI se observa que para ciertos cambios en perturbación no se tienen valores de índices de desempeño, esto se debe a que el sistema se vuelve inestable y no tiende a su valor de consigna. Se observa un crecimiento sostenido en los valores de los índices de desempeño al aumentar la magnitud de perturbación. Esto indica una mayor desviación respecto al valor final de estado estacionario. El resultado de desempeño que arroja el módulo difuso es acorde a la definición de éste último y presenta un comportamiento similar a los resultados obtenidos por los índices de la integral del error.

IV.5.1. Mezclador de fluidos de procesos

El diagrama y los valores del proceso se muestran en la Figura 12 y la Tabla VII, respectivamente.

En este proceso se consideran los casos en el que el volumen del tanque permanece constante y variable. Los parámetros de sintonización del controlador para este proceso (Ver Tabla XVII) se obtuvieron a partir de la rutina de optimización disponible en Matlab®, estableciendo como criterios los mismos que se aplicaron para el sistema de lazo cerrado modelo.



Tabla XVII. Parámetros óptimos del controlador para el sistema de control del tanque de mezclado, al efectuarse un cambio del 10% en perturbación

Variable	k_c	τ_i	τ_d
Proceso a Volumen Constante			
Flujo de proceso (W_1)	3,0515	3,7649	1,4962
Temperatura de fluido (T_1).	3,476	3,4484	1,7702
Consigna (T_1).	2,1443	4,5293	2,0086
Proceso a Volumen Variable			
Flujo de proceso (W_1)	9,6358	7,6139	1,6579
Temperatura de fluido (T_1).	11,0513	6,848	1,9014
Consigna (T_1).	4,8813	14,3742	2,4055

Las Tablas XVII y XVIII muestran los valores de los índices de desempeño que se obtuvieron al llevarse a cabo perturbaciones externas, simples y múltiples, al lazo de control del mezclador para los casos considerados.

Tabla XVIII. Valores de índices de desempeño al efectuarse cambios simples y múltiples de perturbaciones externas al lazo de control del tanque de mezclado a volumen constante.

Perturbación			Índices de desempeño				
W_1	T_1	T_2	IAE	ITAE	ISE	ITSE	DIFUSO
10%	-	-	6,5754	63,1984	5,1865	45,6747	0,6396
20%	-	-	12,8185	123,7657	18,0731	153,7654	0,5458
30%	-	-	18,6664	178,6711	36,2626	302,9684	0,4555
-	10%	-	19,7384	190,8288	48,5724	427,6306	0,5724
-	20%	-	38,1609	366,8423	177,0094	1508,9	0,4145
-	30%	-	55,7687	534,0137	370,8626	3097,1	0,2783
-	-	10%	4,5075	46,214	2,2159	20,5029	0,7576
-	-	20%	8,9273	89,8717	8,9249	82,4701	0,6086
-	-	30%	14,1622	147,09	20,435	189,9142	0,5483
10%	10%	-	27,17	470,8992	62,5222	1050,1	0,6254
20%	10%	-	34,6751	580,498	86,6442	1385,3	0,5053
30%	10%	-	42,5674	708,8125	118,0101	1823,2	0,4082
10%	20%	-	47,022	841,591	17,7895	201,7895	0,5901

Tabla XIX. Valores de índices de desempeño al efectuarse cambios simples y múltiples de perturbaciones externas al lazo de control del tanque de mezclado a volumen variable.

Perturbación			Índices de desempeño				
W_1	T_1	T_2	IAE	ITAE	ISE	ITSE	DIFUSO
10%	-	-	4,0749	47,3988	1,4418	15,7486	0,6841
20%	-	-	8,3156	101,0329	5,254	56,4436	0,6482
30%	-	-	12,5803	157,418	10,9931	117,3639	0,615
-	10%	-	10,3852	119,706	10,5476	107,5963	0,6032
-	20%	-	20,9097	249,5189	38,4206	379,4616	0,4435
-	30%	-	45,0659	758,2674	106,2088	1210,1	0,3621



Tabla XIX. Valores de índices de desempeño al efectuarse cambios simples y múltiples de perturbaciones externas al lazo de control del tanque de mezclado a volumen variable.
(Continuación)

Perturbación			Índices de desempeño				
W_1	T_1	T_2	IAE	ITAE	ISE	ITSE	DIFUSO
-	-	10%	2,8782	35,644	0,6604	7,7007	0,7002
-	-	20%	6,2596	81,6916	2,7958	33,1711	0,6742
-	-	30%	10,1897	139,6328	6,728	81,6359	0,6451
10%	10%	-	17,6242	346,9064	20,7076	384,4151	0,5402
20%	10%	-	23,1666	451,3762	30,9608	557,4967	0,5087
30%	10%	-	28,7739	561,2735	43,8437	774,3401	0,4673
10%	20%	-	48,0838	824,9621	233,2656	3817,4	0,5548

Para este proceso las perturbaciones se llevaron a cabo en el mismo instante de tiempo. Se observa que los valores arrojados por los índices de los criterios integrales son equivalentes a los obtenidos por el índice difuso, en cuanto a la definición que presenta cada uno de estos. Así, se pudo comprobar que el índice difuso que se definió con las características de la respuesta antes mencionada funciona de manera adecuada y permite medir el desempeño del sistema de control de manera satisfactoria tanto para cambios de consigna ó perturbación en el sistema de lazo cerrado.

www.bdigital.ula.ve



CONCLUSIONES

- Los valores de los parámetros de sintonización del controlador obtenidos mediante las ecuaciones de sintonización generan una respuesta con mayor número de oscilaciones, respecto a la respuesta obtenida por la rutina de optimización. Esto se debe a que la sintonización, por medio de las ecuaciones, es más agresiva.
- Los índices IAE e ISE no cuantifican, de manera correcta, pequeñas desviaciones de la respuesta respecto al punto de control.
- Al aumentar el tiempo de retraso en el proceso, se obtiene una respuesta con una mayor desviación respecto al valor de consigna.
- Las características suma de los errores en los picos máximos y mínimos, áreas por encima y debajo del valor de consigna y pendiente en el punto de inflexión no cuantifican el desempeño de los controladores. El valor que se obtiene para estas características está relacionado con el modelo de proceso que se está evaluando.
- Los números de picos que se obtienen en la respuesta del sistema de lazo cerrado se relacionan, de forma directa, con los parámetros de sintonización del controlador y con la banda alrededor del valor de consigna que se define para cuantificarlos. Debido a esto, esta característica no mide el desempeño de los sistemas de lazo cerrado.
- El período, frecuencia y razón de asentamiento no ponderan el desempeño de los controladores. En algunas respuestas obtenidas, estas características no pueden ser determinadas.
- Los tiempos de asentamiento alrededor del ± 5 , ± 20 y $\pm 50\%$ del valor final de consigna pueden ó no determinarse en la respuesta del sistema de lazo cerrado. Esto se debe a la magnitud del cambio que se ejecute en el sistema de control. Por esta razón, estas características no miden el desempeño de los controladores.
- Las características de la respuesta de un sistema de lazo cerrado que permiten evaluar el desempeño de los controladores, de manera independiente al modelo de proceso que se esté evaluando, son el tiempo de subida, el sobrepaso máximo y el tiempo de asentamiento alrededor del $\pm 2\%$ del valor final de consigna.
- El índice difuso definido arroja un valor de desempeño del controlador, comprendido entre cero y uno, que puede ser interpretado fácilmente y que cuantifica, de manera correcta, el desempeño de los controladores en procesos lineales y altamente no lineales.



RECOMENDACIONES

- Estudiar la efectividad del índice difuso en sistemas MIMO.
- Implementar, de ser posible, el módulo difuso obtenido en diversas estrategias de control avanzado.

www.bdigital.ula.ve



BIBLIOGRAFÍA GENERAL

- ZIEGLER, J.G. y NICHOLS, N.B. *Optimum setting for automatic controllers*. Transactions ASME 64, 759. (1942)
- JOHNSON, A. y MORADI, M. *PID control. New identification and design methods*. Primera Edición. Springer – Verlag. Londres, 2005.

www.bdigital.ula.ve



REFERENCIAS

- BAI, Y., ZHUANG H. y WANG, D. *Advanced fuzzy logic technologies in industrial applications*. Primera edición. Springer – Verlag. Londres, 2006. Pp. 17.
- BURNS, R. *Advanced control engineering*. Primera edición. Butterworth – Heinemann. Oxford, 2001. Pp. 326-333.
- CAMACHO, O. y SMITH, C. *Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes*. ISA Transactions 39. 205-218. (2000)
- COHEN, G.H. y COON, G.A. *Theoretical consideration of retarded control*. Transactions ASME 65, 444-453. (1950)
- DATTA, A. e IOANNOU, A. *Performance analysis and improvement in model reference adaptative control*. IEEE Trans. Autom. Control AC-39, 2370-2387. (1994)
- DUARTE-MERMOUD, M. y PRIETO, R. *Performance index for quality response of dynamical Systems*. ISA Transactions 43. 133-151. (2004)
- GRIMANEY, J. *Controles eléctricos y automatización*. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Química y Textil. Lima, 2008. Pp. 1-40.
- IGLESIAS, E. *Diseño de un controlador híbrido basado en modo deslizante y lógica difusa. Implementación en procesos químicos no lineales*. Trabajo de ascenso (Profesor Agregado) Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería. Mérida - Venezuela, 2002. Pp. 7.
- JOE QIN, S. y BADGWELL, T. *An overview of industrial model predictive control technology*. (1996) URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.52.8909>. Fecha de consulta: 05-03-2009.
- LÓPEZ, A.M., MURRILL, P.W. y SMITH, C.L. *Controller tuning relationships based on integral performance criteria*. Instrum. Technol. 14 (11), 57. (1967)
- MILLER, D. E. y DAVINSON, E. J. *An adaptative controller which provides an arbitrarily good transient and steady-state response*. IEEE Trans. Autom. Control AC-36, 68-81. (1991)
- MOLINA, J., PERNIA D y LUZARDO, E. *Introducción a los controladores PID*. Postgrado en automatización e instrumentación. Facultad de Ingeniería. Universidad de Los Andes, Mérida - Venezuela. 1-10. (2003)
- NARENDRA, K.S. y BALAKRISHNAN, J. *Adaptative control using multiple models*. IEEE Trans. Autom. Control AC-42, 171-187. (1997)
- NAUCK, D. *Neuro-fuzzy systems: review and prospects*. Aachen, 1044-1053. (1997).
- ORTEGA, R. *Transient bounds of dynamical certainly equivalence adaptative controllers*. Int. J. Adapt. Control Signal Process. 7, 291-295. (1993)
- ORTEGA, R. *On Morses new adaptative controller. Parameter convergence and transient performance*. IEEE Trans. Autom. Control AC-38, 1191-1202. (1993)



- PÉREZ, R. *Procesado y optimización de espectros Raman mediante técnicas de lógica difusa: Aplicación a la identificación de materiales pictóricos*. Tesis de Doctorado. Universidad Politécnica de Catalunya. Catalunya, 2005. Pp. 51-52. 58-59.
- REZNIK, L. *Fuzzy controllers*. Primera Edición. Butterworth – Heinemann. Inglaterra, 1997. Pp. 3-18.
- SEABORG, D.E., EDGAR T.F. y MELLICHAMP, D.A. *Process Dynamic and Control*. Wiley Series in Chemical Engineering. Canadá, 1989. Pp. 272-273.
- SEVCIK, K. *An introduction to model reference adaptative control (MRAC)*. (2006). URL: <http://www.pages.drexel.edu/~kws23/tutorials/MRAC/MRAC.html>. Fecha de consulta: 05-03-2009.
- SMITH, C.A. y CORRIPIO, A.B. *Control automático de procesos teoría y práctica*. Primera Edición. Editorial LIMUSA, S.A. de C.V. México, 1991. Pp. 285-288. 17-19.
- SMITH, C.A. y CORRIPIO A.B. *Principles and practices of automatic process control*. Segunda Edición. John Wiley & Sons Inc. 1997. Pp. 310-314. 154-155.
- THAM, M. *Introduction to robust control*. (2002). URL: <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/robust/imc.pdf>. Fecha de consulta: 05-03-2009.

www.bdigital.ula.ve



ANEXOS

www.bdigital.ula.ve



Tabla XX. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios en el punto de control por encima del 10% del valor inicial de estado estacionario.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	1,3774	1,8667	2,3066	1,1221	2,0112	2,6005	0,6361	1,5538	2,6430
an	12,4365	18,9380	25,0981	15,0892	21,5844	27,8536	16,6697	23,3666	29,5818
dap	0,0997	0,0897	0,0842	0,0692	0,0852	0,0854	0,0368	0,0624	0,0820
dan	0,9003	0,9103	0,9158	0,9308	0,9148	0,9146	0,9632	0,9376	0,9180
s	2,6255	2,0506	1,8796	2,0869	1,6093	1,4208	1,8701	1,4453	1,2654
IAE	13,8139	20,8028	27,4047	16,2113	23,5956	30,4591	17,3059	24,2902	32,0449
ITAE	29,9357	62,6517	104,6471	41,5519	82,8521	132,5211	44,3961	91,2668	148,6555
ISE	51,2642	80,6716	108,5013	59,7345	89,8281	118,5919	64,7519	95,0617	123,8355
ITSE	57,8670	139,2114	248,3070	79,3162	174,3879	299,7087	93,2273	195,7371	327,9328
ts5	2,2821	3,4913	4,6030	2,6934	3,9497	5,1198	2,9362	4,2115	5,3874
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	5,4463	7,2076	8,9903	6,8544	8,9927	10,8481	7,3699	9,8811	11,9371
f	0,1836	0,1387	0,1112	0,1459	0,1112	0,0922	0,1357	0,1012	0,0838
t subida	3,5999	5,3407	6,9917	4,3991	6,1530	7,8545	4,8989	6,6793	8,3461
sobrepaso máx.	0,4677	0,4398	0,4473	0,3569	0,4321	0,4350	0,2719	0,3580	0,4039
razón de asent.	0,5531	0,6535	0,6385	0,4468	0,5204	0,5741	0,3034	0,4134	0,4998
tiempo pico	4,4511	6,4876	8,2917	5,3228	7,5152	9,5486	5,8013	8,0308	10,1151



Tabla XX. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios en el punto de control por encima del 10% del valor inicial de estado estacionario.
(Continuación)

	$k_p =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
	$\tau =$			$\tau =$			$\tau =$		
	1			3			5		
	$t_o =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	1,4895	1,8989	2,3079	1,5477	2,1793	2,6931	1,0314	1,9491	2,6734
an	12,1546	18,9064	25,0974	14,0300	21,1175	27,6736	15,2288	22,1783	28,8460
dap	0,1092	0,0913	0,0842	0,0994	0,0935	0,0887	0,0634	0,0808	0,0848
dan	0,8908	0,9087	0,9158	0,9006	0,9065	0,9113	0,9366	0,9192	0,9152
s	2,7120	2,0566	1,8796	2,2674	1,6768	1,4458	2,0714	1,5731	1,3398
IAE	13,6442	20,8053	27,4053	15,5776	23,2968	30,3666	16,2603	24,1273	31,5194
ITAE	29,4726	62,5983	104,6533	39,7857	81,1640	132,0918	42,1579	87,8164	144,5064
ISE	50,2592	80,5942	108,5006	56,2093	88,1443	117,9065	59,3849	90,7757	121,1509
ITSE	55,8303	138,9524	248,3047	70,7708	168,3129	296,4835	79,0358	179,1814	314,3007
ts5	2,2293	3,4867	4,6030	2,5166	3,8601	5,0821	2,6736	3,9906	5,2447
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	5,4880	7,2391	8,9910	7,0015	9,1040	10,9128	7,5751	10,0338	12,1041
f	0,1822	0,1381	0,1112	0,1428	0,1098	0,0916	0,1320	0,0997	0,0826
t subida	3,4800	5,3180	6,9912	4,0200	5,9497	7,7856	4,3790	6,2195	8,0457
sobrepaso máx.	0,5444	0,4617	0,4478	0,5335	0,5113	0,4695	0,4125	0,4829	0,4812
razón de asent.	0,4780	0,6112	0,6377	0,3227	0,4311	0,5290	0,2230	0,3212	0,4084
tiempo pico	4,3691	6,4868	8,2917	5,0759	7,3842	9,4846	5,4003	7,6964	9,9020



Tabla XX. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios en el punto de control por encima del 10% del valor inicial de estado estacionario.
(Continuación)

	$k_p =$	1,5			3			5		
	$\tau =$	1			2			3		
	$t_o =$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv		33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos		1	0	0	1	0	0	0	0	0
picos mínimos		0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk		1	0	0	1	0	0	0	0	0
sov		0,5512	0	0	0,5662	0	0	0	0	0
sun		0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk		0,5512	0	0	0,5662	0	0	0	0	0
dsov		1	0	0	1	0	0	0	0	0
dsun		0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap		1,5022	1,9004	2,3085	1,6220	2,1883	2,6975	1,2507	1,9871	2,6737
an		12,1459	18,9049	25,0965	13,9355	21,1093	27,6711	14,7863	22,1386	28,8468
dap		0,1101	0,0913	0,0842	0,1043	0,0939	0,0888	0,0780	0,0824	0,0848
dan		0,8899	0,9087	0,9158	0,8957	0,9061	0,9112	0,9220	0,9176	0,9152
s		2,7150	2,0567	1,8797	2,2848	1,6773	1,4462	2,1496	1,5793	1,3400
IAE		13,6481	20,8053	27,4050	15,5556	23,2976	30,3686	16,0370	24,1257	31,5205
ITAE		29,4902	62,6035	104,6555	39,6435	81,2018	132,1308	41,5732	87,7347	144,5332
ISE		50,2540	80,5929	108,4999	56,0010	88,1382	117,9008	57,9588	90,6620	121,1465
ITSE		55,8280	138,9508	248,3040	70,3517	168,2971	296,4685	75,6461	178,8748	314,2897
ts5		2,2285	3,4866	4,6029	2,5046	3,8597	5,0816	2,6004	3,9833	5,2444
ts20		0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50		0	0	0	0	0	0	0	0	0
T		5,4888	7,2376	0,1112	7,0157	9,0994	10,9135	7,6579	10,0532	12,1046
f		0,1822	0,1382	8,9928	0,1425	0,1099	0,0916	0,1306	0,0995	0,0826
t subida		3,4755	5,3178	6,9913	3,9848	5,9481	7,7565	4,2033	6,1924	8,0446
sobrepaso máx.		0,5512	0,4618	0,4477	0,5662	0,5126	0,4706	0,5053	0,4999	0,4815
razón de asent.		0,4729	0,6117	0,6384	0,3071	0,4317	0,5281	0,1877	0,3096	0,4083
tiempo pico		4,3687	6,4867	8,2916	5,0647	7,3839	9,4836	5,2949	7,6869	9,9008



Tabla XXI. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$			$t_o = 2$			$t_o = 3$		
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	0	0	0	1	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	0	0	1	0	0	0	0	0
sov	0	0	0	0,4689	0	0	0	0	0
sun	0,4938	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0,4938	0	0	0,4689	0	0	0	0	0
dsov	0	0	0	1	0	0	0	0	0
dsun	1	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	12,3958	18,9301	25,0923	15,3607	21,5723	27,8378	16,5814	23,3130	29,5536
an	1,4612	1,8786	2,3172	0,8968	2,0325	2,6208	0,7698	1,6311	2,5050
dap	0,8946	0,9097	0,9155	0,9448	0,9139	0,9140	0,9556	0,9346	0,9219
dan	0,1054	0,0903	0,0845	0,0552	0,0861	0,0860	0,0444	0,0654	0,0781
s	-2,6593	-2,0522	-1,8812	-2,0971	-1,6121	-1,4209	-1,8967	-1,4511	-1,2678
IAE	13,8570	20,8086	27,4096	16,2575	23,6048	30,4586	17,3511	24,9441	32,0586
ITAE	30,6487	62,7145	104,7698	41,5427	83,0323	132,4876	45,4133	91,8247	149,0572
ISE	51,0799	80,6592	108,4848	59,7349	89,7956	118,5932	64,5451	94,9802	123,7879
ITSE	57,6855	139,1893	248,2625	79,8701	174,3247	299,7238	92,7769	195,4969	327,7819
ts5	2,4585	3,7529	4,9164	2,9273	4,2653	5,5089	3,1884	4,5542	5,8090
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	5,4139	7,2067	8,9901	6,8853	8,9902	10,8389	7,3248	9,8657	11,9278
f	0,1847	0,1388	0,1112	0,1452	0,1112	0,0923	0,1365	0,1014	0,0838
t subida	3,5486	5,3361	6,9873	4,3936	6,142	7,8517	4,8156	6,647	8,3296
sobrepaso máx.	-0,5006	-0,4434	-0,4499	-0,3327	-0,4378	-0,4383	-0,3163	-0,3747	-0,4108
razón de asent.	0,5646	0,6501	0,637	0,405	0,5181	0,5714	0,3055	0,4105	0,4985
tiempo pico	4,405	6,486	8,2888	5,2694	7,5087	9,5529	5,761	8,0198	10,1069



Tabla XXI. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.
(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	$\tau =$								
	1			2			3		
	$t_o =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	1	1	1	0	1	1
npk	1	1	1	1	1	1	0	1	1
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0,5565	0,4661	0,4502	0,5510	0,5133	0,4722	0	0,4942	0,4836
spk	0,5565	0,4661	0,4502	0,5510	0,5133	0,4722	0	0,4942	0,4836
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	1	1	1	0	1	1
ap	12,1415	18,8971	25,0926	14,0057	21,1100	27,6683	15,1666	22,1423	28,8414
an	1,5154	1,9150	2,3174	1,5906	2,1901	2,7043	1,1146	1,9992	2,6828
dap	0,8890	0,9080	0,9155	0,8980	0,9060	0,9110	0,9315	0,9172	0,9149
dan	0,1110	0,0920	0,0845	0,1020	0,0940	0,0890	0,0685	0,0828	0,0851
s	-2,7226	-2,0597	-1,8812	-2,2797	-1,6782	-1,4471	-2,0752	-1,5768	-1,3407
IAE	13,6570	20,8120	27,4100	15,5963	23,3001	30,3726	16,2812	24,1415	31,5242
ITAE	29,6201	62,7314	104,7721	39,9990	81,2587	132,2350	42,1798	88,0731	144,6048
ISE	50,2137	80,5694	108,4847	56,1412	88,1271	117,8866	59,3933	90,7309	121,1347
ITSE	55,7922	138,9067	248,2616	70,7188	168,2758	296,4283	79,0343	179,0807	314,2609
ts5	2,4105	3,7462	4,9163	2,7315	4,1658	5,4626	2,9159	4,3114	5,6491
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	5,4864	7,2376	8,9913	6,9901	9,0995	10,9145	7,5901	10,0255	12,1051
f	0,1823	0,1382	0,1112	0,1431	0,1099	0,0916	0,1318	0,0997	0,0826
t subida	3,4672	5,3111	6,987	3,9986	5,9456	7,7526	4,3591	6,2029	8,0403
sobrepaso máx.	-0,5565	-0,4661	-0,4502	-0,551	-0,5133	-0,4722	-0,4432	-0,4942	-0,4836
razón de asent.	0,474	0,6095	0,6363	0,3201	0,4319	0,5274	0,2164	0,3201	0,4073
tiempo pico	4,3604	6,4823	8,2889	5,0623	7,3811	9,4805	5,4143	7,6913	9,8987



Tabla XXI. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.
(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	0	1	1	1	1	1	1
npk	1	1	0	1	1	1	1	1	1
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0,5569	0,5493	0	0,5739	0,5131	0,4714	0,5257	0,5093	0,4838
spk	0,5569	0,5493	0	0,5739	0,5131	0,4714	0,5257	0,5093	0,4838
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	0	1	1	1	1	1	1
ap	12,1414	18,8512	25,0926	13,9427	21,1084	27,6701	14,7413	22,0940	28,8414
an	1,5159	1,9998	2,3162	1,6261	2,1918	2,7013	1,3170	2,0439	2,6834
dap	0,8890	0,9041	0,9155	0,8956	0,9059	0,9111	0,9180	0,9153	0,9149
dan	0,1110	0,0959	0,0845	0,1044	0,0941	0,0889	0,0820	0,0847	0,0851
s	-2,7229	-1,9925	-1,8810	-2,2956	-1,6782	-1,4469	-2,1624	-1,5827	-1,3409
IAE	13,6574	20,8509	27,4088	15,5688	23,3001	30,3714	16,0583	24,1379	31,5249
ITAE	29,6225	60,1976	104,7570	39,8311	81,2502	132,2151	41,9246	88,0568	144,6248
ISE	50,2129	81,3045	108,4863	55,9308	88,1281	117,8897	57,8706	90,6166	121,1317
ITSE	55,7918	141,0532	248,2671	70,3018	168,2791	296,4357	75,5189	178,7388	314,2527
ts5	2,4104	3,7915	4,9165	2,7182	4,1658	5,4630	2,8266	4,3032	5,6488
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0,1823	7,3664	8,9893	7,0112	9,0997	10,9131	7,6346	10,0365	12,1051
f	5,4855	0,1358	0,1112	0,1426	0,1099	0,0916	0,1310	0,0996	0,0826
t subida	3,4669	5,3983	6,9879	3,9686	5,9454	7,7539	4,1775	6,1786	8,0396
sobrepaso máx.	-0,5569	-0,5166	-0,4495	-0,5739	-0,5138	-0,4714	-0,5257	-0,5093	-0,4838
razón de asent.	0,4736	0,41	0,6376	0,305	0,4314	0,5281	0,1914	0,3121	0,4073
tiempo pico	4,3603	6,7153	8,2891	5,0465	7,3816	9,4808	5,2806	7,6829	9,898



Tabla XXII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios en el punto de control sobre el 10% del valor inicial de estado estacionario.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	0	1	1	0	0	1	0	0	0
npk	0	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0	0,7027	0,9611	0	0	0,6039	0	0	0
spk	0	0,7027	0,9611	0	0	0,6039	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	0	1	1	0	0	1	0	0	0
ap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
an	16,2296	25,1773	36,0712	19,5096	27,3356	35,8728	21,1903	28,5329	36,2871
dap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dan	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s	1,9901	1,6216	1,4476	1,4730	1,2637	1,1401	1,2936	1,1421	1,0315
IAE	16,2296	25,1773	36,0712	19,5096	27,3356	35,8728	21,1903	28,5329	36,2871
ITAE	43,3651	98,1837	200,9110	64,6640	118,9612	197,3109	77,4544	132,4993	206,3150
ISE	57,6484	88,4742	122,5715	69,3309	98,2632	128,3772	75,5219	103,7273	132,5073
ITSE	76,1542	179,4378	355,5199	110,2359	217,0205	370,9775	130,6463	239,5929	388,8580
ts5	2,5894	3,7947	5,0194	3,1756	4,3472	5,5620	3,4816	4,6389	5,7937
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios en el punto de control sobre el 10% del valor inicial de estado estacionario.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	$\tau =$			$\tau =$			$\tau =$		
$t_o =$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	0	1	1	0	0	1	0	0	0
npk	0	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0	0,7028	0,9613	0	0	0,6116	0	0	0
spk	0	0,7028	0,9613	0	0	0,6116	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	0	1	1	0	0	1	0	0	0
ap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
an	16,2322	25,1801	36,0762	19,5107	27,3377	35,8761	21,1903	28,5690	36,2871
dap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dan	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s	2,0120	1,6214	1,4474	1,5234	1,2872	1,1468	1,3687	1,1952	1,0720
IAE	16,2322	25,1801	36,0762	19,5107	27,3377	35,8761	21,1903	28,5690	36,2871
ITAE	44,1358	98,2101	200,9747	69,2092	121,4269	198,0117	88,5831	142,9948	213,1070
ISE	57,1187	88,4778	122,5809	67,1389	97,2865	128,1476	71,4441	100,6726	130,6402
ITSE	75,2389	179,4604	355,5945	105,1766	214,1396	370,2031	119,9790	229,5176	381,3839
ts5	2,5598	3,7948	5,0197	3,0591	4,2907	5,5110	3,2695	4,4703	5,6826
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios en el punto de control sobre el 10% del valor inicial de estado estacionario.

(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	0	1	1	0	0	1	0	0	0
npk	0	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0	0,7029	0,9611	0	0	0,6115	0	0	0
spk	0	0,7029	0,9611	0	0	0,6115	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	0	1	1	0	0	1	0	0	0
ap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
an	16,2309	25,1828	36,0712	19,5096	27,3356	35,8728	21,1913	28,5674	36,2922
dap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dan	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s	2,0121	1,6213	1,4476	1,5235	1,2873	1,1469	1,3770	1,1953	1,0718
IAE	16,2309	25,1828	35,0712	19,5096	27,3356	35,8728	21,1913	28,5674	36,2922
ITAE	44,1282	98,2345	200,9110	69,2008	121,4062	197,9688	89,6473	142,9772	213,1739
ISE	57,1166	88,4824	122,5715	67,1369	97,2831	128,1421	71,0816	100,6700	130,6481
ITSE	75,2323	179,4852	355,5199	105,1692	214,1209	370,1609	119,1231	229,5016	381,4422
ts5	2,5597	3,7950	5,0194	3,0590	4,2906	5,5108	3,2503	4,4702	5,6829
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	1	1	1	0	1	1	0	0	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	0	1	1	0	0	1
sov	0,4629	0,7027	0,9611	0	0,4588	0,6039	0	0	0,468
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0,4629	0,7027	0,9611	0	0,4588	0,6039	0	0	0,468
dsov	1	1	1	0	1	1	0	0	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	16,2296	25,1773	36,0712	19,5096	27,3356	35,8728	21,1903	28,5674	36,2871
an	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dap	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dan	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s	-1,9901	-1,6216	-1,4476	-1,4730	-1,2637	-1,1401	-1,2936	-1,1420	-1,0315
IAE	16,2296	25,1773	36,0712	19,5096	27,3356	35,8728	21,1903	28,5674	36,2871
ITAE	43,3651	98,1837	200,9110	64,6640	118,9612	197,3109	77,4544	133,1416	206,3150
ISE	57,6484	88,4742	122,5715	69,3309	98,2632	128,3772	75,5219	103,7418	132,5073
ITSE	76,1542	179,437	355,5199	110,2359	217,0205	370,9775	130,646	239,7731	388,8580
ts5	2,8474	4,1434	5,5108	3,5263	4,7590	6,0353	3,8350	5,0906	6,3271
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	$\tau =$			$\tau =$			$\tau =$		
	$t_o =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	1	1	1	0	1	1	0	0	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	0	1	1	0	0	1
sov	0,4867	0,7028	0,9613	0	0,4888	0,6116	0	0	0,5064
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0,4867	0,7028	0,9613	0	0,4888	0,6116	0	0	0,5064
dsov	1	1	1	0	1	1	0	0	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	16,2322	25,1801	36,0762	19,5107	27,3377	35,8761	21,1903	28,569	36,2871
an	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dap	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dan	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s	-2,0120	-1,6214	-1,4474	-1,5234	-1,2872	-1,1468	-1,3687	-1,1952	-1,0720
IAE	16,2322	25,1801	36,0762	19,5107	27,3377	35,8761	21,1903	28,5690	36,2871
ITAE	44,1358	98,2101	200,9747	69,2092	121,4269	198,0117	88,5831	142,9948	213,1070
ISE	57,1187	88,4778	122,5809	67,1389	97,2865	128,1476	71,4441	100,6726	130,6402
ITSE	75,2389	179,4604	355,5945	105,1766	214,1396	370,2031	119,9790	229,5167	381,3839
ts5	2,8153	4,1435	5,5112	3,4002	4,6977	6,0188	3,6534	4,9062	6,2052
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.

(Continuación)

	$k_p = 1,5$			$\tau = 3$			5		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	1	1	1	0	1	1	0	0	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	0	1	1	0	0	1
sov	0,4867	0,7029	0,9611	0	0,4888	0,6112	0	0	0,5064
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0,4867	0,7029	0,9611	0	0,4888	0,6112	0	0	0,5064
dsov	1	1	1	0	1	1	0	0	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	16,2309	25,1828	36,0712	19,5096	27,3356	35,8761	21,1913	28,5674	36,2922
an	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dap	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dan	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s	-2,0121	-1,6213	-1,4476	-1,5235	-1,2873	-1,1469	-1,3770	-1,1953	-1,0718
IAE	16,2309	25,1828	36,0712	19,5096	27,3356	35,8671	21,1913	28,5674	36,2922
ITAE	44,1282	98,2345	200,9110	69,2008	121,4062	197,8611	89,6473	142,9772	213,1739
ISE	57,1166	88,4824	122,5715	67,1369	97,2831	128,1380	71,0816	100,6700	130,6481
ITSE	75,2323	179,4852	355,5199	105,1692	214,1209	370,1061	119,1231	229,5016	381,4422
ts5	2,8152	4,1437	5,5108	3,4001	4,6975	6,0185	3,6322	4,9060	6,2056
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXIV. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios en el punto de control sobre el 10% del valor inicial de estado estacionario.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$			$t_o = 2$			$t_o = 3$		
ssv	33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	0	1	0	0	0	0	0	0	0
npk	0	1	0	0	0	0	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0	0,5644	0	0	0	0	0	0	0
spk	0	0,5644	0	0	0	0	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
an	17,1623	26,6778	38,4198	20,6581	28,9144	37,9636	22,4855	30,2497	38,3879
dap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dan	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s	1,7534	1,3857	1,2222	1,3045	1,0995	0,9668	1,1467	0,9985	0,8839
IAE	17,1623	26,6788	38,4198	20,6581	28,9144	37,9636	22,4855	30,2497	38,3879
ITAE	45,9796	106,5756	224,5806	67,9837	126,1512	211,7336	81,2368	139,9279	218,0455
ISE	61,0946	93,4922	129,5962	73,7873	103,9561	135,5986	80,4902	109,8596	139,8200
ITSE	85,1608	199,7007	399,1308	125,1968	242,6865	413,1822	149,5060	269,9845	433,2874
ts5	2,7665	4,0526	5,3669	3,4014	4,6370	5,9017	3,7310	4,9453	6,1716
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXIV. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios en el punto de control sobre el 10% del valor inicial de estado estacionario.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	0	1	0	0	0	0	0	0	0
npk	0	1	0	0	0	0	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0	0,5645	0	0	0	0	0	0	0
spk	0	0,5645	0	0	0	0	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
an	17,1676	26,6821	38,4257	20,6608	28,9169	37,9636	22,4866	30,2516	38,3909
dap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dan	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s	1,7594	1,3856	1,2221	1,3252	1,1063	0,9691	1,1852	1,0209	0,9001
IAE	17,1676	26,2821	38,4257	20,6608	28,9169	37,9636	22,4866	30,2516	38,3909
ITAE	46,3218	106,6058	224,6606	70,6447	127,1788	211,7229	89,0293	145,6855	221,3478
ISE	60,8610	93,4984	129,6083	72,3462	103,4956	135,5829	77,2835	107,7843	138,7689
ITSE	84,6991	199,7359	399,2320	121,4075	241,1009	413,1168	140,1008	261,9567	428,3255
ts5	2,7536	4,0528	5,3673	3,3258	4,6109	5,9007	3,5652	4,8328	6,1104
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXIV. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios en el punto de control sobre el 10% del valor inicial de estado estacionario.

(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	33	33	33	33	33	33	33	33	33
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	0	1	0	0	0	0	0	0	0
npk	0	1	0	0	0	0	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0	0,5644	0	0	0	0	0	0	0
spk	0	0,5644	0	0	0	0	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	0	1	0	0	0	0	0	0	0
ap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
an	17,1691	26,6788	38,4257	20,6608	28,9119	37,9676	22,4275	30,2516	38,3939
dap	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dan	1	1	1	1	1	1	1	1	1
s	1,7593	1,3587	1,2221	1,3252	1,1065	0,9690	1,1864	1,0209	0,9001
IAE	17,1691	26,6788	38,4257	20,6608	28,9119	37,9676	22,4275	30,2516	38,3939
ITAE	46,3310	106,5756	224,6606	70,6447	127,1283	211,8257	88,2463	145,6855	221,3886
ISE	60,8638	93,4922	129,6083	72,3462	103,4866	135,5903	77,1749	107,7843	138,7744
ITSE	84,7085	199,7007	399,2320	121,4075	241,0468	413,1773	139,6918	261,9567	428,3693
ts5	2,7537	4,0526	5,3673	3,3258	4,6105	5,9010	3,5615	4,8328	6,1106
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXV. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	0	1	0	0	0	1	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	0	1	0	0	0	1	0	0	0
sov	0	0,5644	0	0	0	0,4602	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0	0,5644	0	0	0	0,4602	0	0	0
dsov	0	1	0	0	0	1	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	17,1626	26,6788	38,4198	20,6581	28,9144	37,9636	22,4855	30,2497	38,3879
an	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dap	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dan	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s	-1,7533	-1,3857	-1,2222	-1,3045	-1,0995	-0,9688	-1,1467	-0,9985	-0,8839
IAE	17,1676	26,6788	38,4198	20,6581	28,9144	37,9636	22,4855	30,2497	38,3879
ITAE	46,0289	106,5756	224,5806	67,9837	126,1512	211,7336	81,2368	139,9279	218,0455
ISE	61,0976	93,4922	129,5962	73,7873	103,9561	135,5986	80,4902	109,8596	139,8200
ITSE	85,1806	199,7007	399,1308	125,1968	242,6865	413,1822	149,5060	269,9845	433,2874
ts5	3,0635	4,4637	5,9783	3,8017	5,1177	6,5047	4,1896	5,4731	6,7964
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXV. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	0	1	0	0	0	1	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	0	1	0	0	0	1	0	0	0
sov	0	0,5645	0	0	0	0,4606	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0	0,5645	0	0	0	0,4606	0	0	0
dsov	0	1	0	0	0	1	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	17,1676	26,6821	38,4257	20,6608	28,9169	37,9636	22,4866	30,2516	38,3909
an	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dap	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dan	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s	-1,7594	-1,3856	-1,2221	-1,3252	-1,1063	-0,9691	-1,1852	-1,0209	-0,9001
IAE	17,1676	26,6821	38,4257	20,6608	28,9169	37,9636	22,4866	30,2516	38,3909
ITAE	46,3218	106,6058	224,6606	70,6447	127,1788	211,7729	89,0293	145,6855	221,3478
ISE	60,8610	93,4984	129,6083	72,3462	103,4956	135,5829	77,2835	107,7843	138,7689
ITSE	84,6991	199,7359	399,2320	121,4075	241,1009	413,1168	140,1008	261,9567	428,3255
ts5	3,0499	4,4640	5,9788	3,7224	5,0901	6,5036	4,0148	5,3528	6,7321
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXV. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al usar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios en el punto de control por debajo del 10% del valor inicial de estado estacionario.
(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	27	27	27	27	27	27	27	27	27
picos máximos	0	1	0	0	0	1	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	0	1	0	0	0	1	0	0	0
sov	0	0,5644	0	0	0	0,4607	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0	0,5644	0	0	0	0,4607	0	0	0
dsov	0	1	0	0	0	1	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	17,1691	26,6788	38,4257	20,6608	28,9094	36,9676	22,4877	30,2516	38,3939
an	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dap	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dan	0	0	0	0	0	0	0	0	0
s	-1,7593	-1,3857	-1,2222	-1,3252	-1,1065	-0,9690	-1,1861	-1,0209	-0,9001
IAE	17,1691	26,6788	38,4257	20,6608	28,9094	37,9676	22,4877	30,2516	38,3939
ITAE	46,3310	106,5756	224,6606	70,6447	127,0876	211,8257	89,2036	145,6855	221,3886
ISE	60,8638	93,4922	129,6083	72,3462	103,4850	135,5903	77,2200	107,7843	138,7744
ITSE	84,7085	199,7007	399,2320	121,4075	241,0302	413,1773	139,9270	261,9567	428,3693
ts5	3,0500	4,4637	5,9788	3,7224	5,0896	6,5040	4,0113	5,3828	6,7324
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	0	0	0	0	0	0	0	0
f	0	0	0	0	0	0	0	0	0
t subida	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sobrepaso máx.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
razón de asent.	0	0	0	0	0	0	0	0	0
tiempo pico	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Tabla XXVI. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

	$k_p = 0,5$			$\tau = 3$			5		
	$t_o = 1$			2			3		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	1	1	1	0	0	1	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0,5325	0,6718	0,748	0	0	0,5722	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0,5325	0,6718	0,748	0	0	0,5722	0	0	0
dsov	1	1	1	0	0	1	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	1,6287	2,9357	4,0830	1,2903	2,5691	3,8020	1,0049	2,1137	3,2524
an	0,1173	0,1447	0,1738	0,1066	0,1521	0,1915	0,0820	0,1291	0,1793
dap	0,9328	0,9530	0,9592	0,9237	0,9441	0,9520	0,9246	0,9424	0,9478
dan	0,0672	0,0470	0,0408	0,0763	0,0559	0,0480	0,0754	0,0576	0,0522
s	0,3066	0,3066	0,3066	0,1574	0,1604	0,1604	0,1066	0,1115	0,1115
IAE	1,7459	3,0804	4,2568	1,3969	2,7213	3,9935	1,0869	2,2428	3,4317
ITAE	5,8695	13,2062	21,6597	6,0688	15,2278	26,5515	5,0853	13,7580	25,3665
ISE	0,6340	1,4706	2,2879	0,3239	0,9173	1,6183	0,1832	0,5748	1,0924
ITSE	1,7132	5,2555	9,8462	1,1114	4,2516	9,0578	0,6774	2,9132	6,7566
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,2123	8,8249	11,0332	7,3460	10,4314	13,0877	7,8026	11,1150	14,0106
f	0,1610	0,1133	0,0906	0,1361	0,0959	0,0764	0,1282	0,0900	0,0714
t subida	5,7246	8,0464	9,9059	7,0534	9,9250	12,2989	7,5737	10,7467	13,3517
sobrepaso máx.	0,5235	0,6718	0,7480	0,3384	0,4804	0,5722	0,2462	0,3664	0,4517
razón de asent.	0,0269	0,0198	0,0122	0,0285	0,0221	0,0195	0,0299	0,0228	0,0199
tiempo pico	2,5772	3,4235	4,1604	3,2855	4,4401	5,3485	3,5437	4,8660	5,9234



Tabla XXVI. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.
(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	$\tau =$								
	$t_o =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	1	1	1	1	1	1	0	1	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	1	1	1	0	1	1
sov	1,0401	1,3442	1,495	0,6749	0,9552	1,1399	0	0,7293	0,8996
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	1,0401	1,3442	1,495	0,6749	0,9552	1,1399	0	0,7293	0,8996
dsov	1	1	1	1	1	1	0	1	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	3,1822	5,9245	9,0589	2,5635	5,0204	7,4319	1,9881	4,1563	6,3864
an	0,2741	1,8197	0,1405	0,2182	0,3630	0,4768	0,1726	0,2903	0,4153
dap	0,9207	0,7650	0,9847	0,9216	0,9326	0,9397	0,9201	0,9347	0,9389
dan	0,0793	0,2350	0,0153	0,0784	0,0674	0,0603	0,0799	0,0653	0,0611
s	0,6131	0,6131	0,6131	0,3148	0,3208	0,3208	0,2132	0,2229	0,2229
IAE	3,4563	7,7442	9,1994	2,7816	5,3834	7,9087	2,1607	4,4466	6,8017
ITAE	11,8833	46,3145	56,5551	12,1623	30,7290	53,6671	10,1859	27,6104	51,0425
ISE	2,4588	6,2917	9,1635	1,2806	3,5634	6,3020	0,7216	2,2499	4,2703
ITSE	6,5860	25,9045	40,6825	4,3816	16,3651	34,9297	2,6587	11,3280	26,2087
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,0873	14,1862	10,9637	7,3188	10,2100	12,8238	7,7239	10,9600	13,7612
f	0,1643	0,0705	0,0912	0,1366	0,0979	0,0780	0,1295	0,0912	0,0727
t subida	5,5638	7,1998	9,8123	6,9981	9,6518	11,9095	7,4983	10,5439	13,0503
sobrepaso máx.	1,0401	1,3442	1,4950	0,6749	0,9552	1,1399	0,4905	0,7293	0,8996
razón de asent.	0,0322	0,0492	0,1376	0,0325	0,0252	0,0228	0,0312	0,0245	0,0226
tiempo pico	2,5533	3,4243	4,1517	3,2747	4,4007	5,3055	3,5282	4,8346	5,8812



Tabla XXVI. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.
(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov	1,5508	2,0015	2,238	1,0046	1,4257	1,6936	0,7321	1,0875	1,3433
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	1,5508	2,0015	2,238	1,0046	1,4257	1,6936	0,7321	1,0875	1,3433
dsov	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	4,6704	8,3781	11,7377	3,7594	7,3886	10,5757	2,9438	6,1067	9,3952
an	0,4817	0,7360	0,9033	0,3713	0,6324	1,2496	0,2757	0,5043	0,7327
dap	0,9065	0,9192	0,9285	0,9101	0,9212	0,8943	0,9144	0,9237	0,9277
dan	0,0935	0,0808	0,0715	0,0899	0,0788	0,1057	0,0856	0,0763	0,0723
s	0,9197	0,9197	0,9197	0,4721	0,4811	0,4811	0,3198	0,3344	0,3344
IAE	5,1521	9,1141	12,6410	4,1307	8,0210	11,8254	3,2195	6,6110	10,1279
ITAE	18,1950	41,6227	68,3922	18,4082	46,8111	88,3880	15,3307	41,8199	77,6137
ISE	5,3780	12,5068	19,6777	2,7968	7,8215	13,3804	1,5944	4,9308	9,3778
ITSE	14,3118	44,0838	83,1243	9,5065	35,6757	73,5482	5,8496	24,6477	57,1355
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	5,9890	8,4051	10,4765	7,1955	10,0580	11,7738	7,6652	10,7861	13,5298
f	0,1670	0,1190	0,0955	0,1390	0,0994	0,0849	0,1305	0,0927	0,0739
t subida	5,4137	7,4565	9,2416	6,8462	9,4148	11,2423	7,4030	10,2983	12,7281
sobrepaso máx.	1,5508	2,0015	2,2380	1,0046	1,4257	1,6936	0,7321	1,0875	1,3433
razón de asent.	0,0364	0,0290	0,0268	0,0335	0,0289	0,0144	0,0329	0,0261	0,0253
tiempo pico	2,5313	3,3671	4,1162	3,2463	4,3675	5,2021	3,5100	4,7965	5,8367



Tabla XXVII. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	0	0	1	0	0	0
npk	1	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0,5247	0,6718	0,7481	0	0	0,5274	0	0	0
spk	0,5247	0,6718	0,7481	0	0	0,5274	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	0	0	1	0	0	0
ap	0,1074	0,1444	0,1702	0,0986	0,1495	0,1883	0,0805	0,1290	0,1704
an	1,6463	2,9363	4,0890	1,3094	2,5761	3,8079	1,0084	2,1138	3,2626
dap	0,0612	0,0469	0,0400	0,0700	0,0549	0,0471	0,0739	0,0575	0,0496
dan	0,9388	0,9531	0,9600	0,9300	0,9451	0,9529	0,9261	0,9425	0,9504
s	-0,3066	-0,3066	-0,3066	-0,1574	-0,1604	-0,1604	-0,1067	-0,1115	-0,1115
IAE	1,7537	3,0887	4,2592	1,4080	2,7256	3,9962	1,0888	2,2429	3,4366
ITAE	5,8559	13,2054	21,6485	6,0585	15,2203	26,5434	5,0842	13,7579	25,3561
ISE	0,6415	1,4710	2,2910	0,3302	0,9206	1,6209	0,1840	0,5749	1,0960
ITSE	1,7398	5,2875	9,8662	1,1389	4,2718	9,0788	0,6815	2,9137	6,7868
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,2463	8,8258	11,0400	7,4562	10,4773	13,0930	7,8012	11,1150	14,0433
f	0,1601	0,1133	0,0906	0,1341	0,0954	0,0764	0,1282	0,0900	0,0712
t subida	5,7978	8,0493	9,9981	7,1497	9,9494	12,3296	7,6095	10,7482	13,3999
sobrepaso máx.	-0,5247	-0,6718	-0,7481	-0,3402	-0,4808	-0,5724	-0,2465	-0,3664	-0,452
razón de asent.	0,0274	0,0198	0,0168	0,0278	0,0217	0,0194	0,0293	0,0227	0,0203
tiempo pico	2,5861	3,4238	4,1617	3,3041	4,4452	5,351	3,5481	4,8661	5,9295



Tabla XXVII. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.
(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	$\tau =$								
	1			2			3		
	$t_o =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	1	1	1	0	1	1
npk	1	1	1	1	1	1	0	1	1
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	1,0418	1,3442	1,495	0,6759	0,9562	1,1401	0	0,7293	0,8999
spk	1,0418	1,3442	1,495	0,6759	0,9562	1,1401	0	0,7293	0,8999
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	1	1	1	0	1	1
ap	0,2646	1,8197	0,1405	0,2156	0,3504	0,4686	0,1677	0,2899	0,4099
an	3,1997	5,9245	9,0589	2,5721	5,0423	7,4427	1,9995	4,1571	6,3965
dap	0,0764	0,2350	0,0153	0,0773	0,0650	0,0592	0,0774	0,0652	0,0602
dan	0,9236	0,7650	0,9847	0,9227	0,9350	0,9408	0,9226	0,9348	0,9398
s	-0,6131	-0,6131	-0,6131	-0,3148	-0,3208	-0,3208	-0,2133	-0,2229	-0,2229
IAE	3,4643	7,7442	9,1994	2,7877	5,3927	7,9113	2,1672	4,4470	6,8064
ITAE	11,8381	46,3145	56,5551	12,1477	30,6610	53,6212	10,1764	27,6085	51,0038
ISE	2,4771	6,2917	9,1635	1,2882	3,5816	6,3109	0,7274	2,2505	4,2787
ITSE	6,6476	25,9045	40,6825	4,4145	16,4727	34,9975	2,6855	11,3323	26,2766
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,1258	14,1862	10,9637	7,3409	10,2530	12,8144	7,7543	10,9610	13,7793
f	0,1632	0,0705	0,0912	0,1362	0,0975	0,0780	0,1290	0,0912	0,0726
t subida	5,5978	7,1998	9,8123	7,0721	9,6974	11,9408	7,5462	10,547	13,077
sobrepaso máx.	-1,0418	-1,3442	-1,495	-0,6759	-0,9562	-1,1401	-0,4915	-0,7293	-0,8999
razón de asent.	0,031	0,0492	0,1376	0,0303	0,0253	0,0228	0,0303	0,0244	0,0224
tiempo pico	2,5592	3,4243	4,1517	3,2803	4,4077	5,3075	3,5361	4,835	5,8848



Tabla XXVII. Valores de las características de la respuesta optimizada en el sistema de lazo cerrado modelo para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.
(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
npk	1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	1,5522	2,0019	2,2381	1,0051	1,4262	1,6936	0,7331	1,0882	1,3438
spk	1,5522	2,0019	2,2381	1,0051	1,4262	1,6936	0,7331	1,0882	1,3438
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ap	0,4678	0,7219	0,8990	0,3675	0,6247	1,2496	0,2694	0,4943	0,7207
an	4,6871	8,3926	11,7416	3,7655	7,3985	10,5757	2,9562	6,1222	9,4123
dap	0,0907	0,0792	0,0711	0,0889	0,0779	0,1057	0,0835	0,0747	0,0711
dan	0,9093	0,9208	0,9289	0,9111	0,9221	0,8943	0,9165	0,9253	0,9289
s	-0,9197	-0,9197	-0,9197	-0,4721	-0,4811	-0,4811	-0,3198	-0,3344	-0,3344
IAE	5,1549	9,1145	12,6406	4,1331	8,0233	11,8254	3,2256	6,6165	10,1330
ITAE	18,1233	41,5207	68,3327	18,3946	46,7506	88,3880	15,3111	41,7608	77,5139
ISE	5,4019	12,5273	19,6860	2,8020	7,8343	13,3804	1,6036	4,9451	9,3951
ITSE	14,3902	44,1729	83,1708	9,5273	35,7509	73,5482	5,8922	24,7373	57,2666
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	5,9901	8,4160	10,4792	7,2042	10,0565	11,7738	7,6653	10,8018	13,5555
f	0,1669	0,1188	0,0954	0,1388	0,0994	0,0849	0,1305	0,0926	0,0738
t subida	5,4431	7,4641	9,2488	6,8556	9,4356	11,2423	7,4445	9,546	12,7522
sobrepaso máx.	-1,5522	-2,0019	-2,2381	-1,0051	-1,4262	-1,6936	-0,7331	-1,0863	-1,3439
razón de asent.	0,0357	0,0275	0,0266	0,0339	0,0287	0,0144	0,0321	0	0,0258
tiempo pico	2,5347	3,3687	4,1166	3,2481	4,3696	5,2021	3,5155	4,7822	5,8405



Tabla XXVIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_0 = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	33	30	30
picos máximos	1	1	1	0	0	1	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0,5217	0,6606	0,7426	0	0	0,5625	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0,5217	0,6606	0,7426	0	0	0,5625	0	0	0
dsov	1	1	1	0	0	1	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	1,5915	3,0349	3,9622	1,5807	2,5468	3,8961	1,427	2,2319	3,2204
an	0,1547	0,3142	0,7307	0,1896	0,1614	0,3126	0,1986	0,1997	0,2303
dap	0,9114	0,9062	0,8443	0,8929	0,9404	0,9257	0,8778	0,9179	0,9333
dan	0,0886	0,0938	0,1557	0,1071	0,0596	0,0743	0,1222	0,0821	0,0667
s	0,3066	0,3066	0,3066	0,1578	0,1604	0,1604	0,1075	0,1115	0,1115
IAE	1,7462	3,3491	4,6929	1,7703	2,7072	4,2087	1,6255	2,4316	3,4506
ITAE	5,9664	21,0949	38,2319	8,4859	15,8484	35,4682	9,3206	16,1098	27,8593
ISE	0,6218	1,3273	2,0632	0,4342	0,8878	1,4850	0,3017	0,6161	1,0392
ITSE	1,6711	4,9029	9,1657	1,6610	4,0937	8,3418	1,3450	3,2298	6,3896
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,3939	7,4802	9,2130	0	9,5037	11,0226	0	0	12,1704
f	0,1564	0,1337	0,1085	0	0,1052	0,0907	0	0	0,0822
t subida	5,5037	7,1664	8,3086	8,0606	10,1444	19,6029	9,3883	11,5921	20,8025
sobrepaso máx.	0,5217	0,6606	0,7426	0,3642	0,4764	0,5625	0,2802	0,3710	0,4463
razón de asent.	0,0238	0,1951	0,1269	0,0063	0,0423	0,1458	0,0110	0	0,0542
tiempo pico	2,5639	3,2888	4,0402	3,5678	4,3852	5,1662	4,0678	4,9514	5,8058



Tabla XXVIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	$\tau =$			$\tau =$			$\tau =$		
$t_o =$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	29,9999	30	30	30	30	30	30
picos máximos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov	1,0434	1,3212	1,4853	0,7285	0,9528	1,125	0,5605	0,742	0,8926
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	1,0434	1,3212	1,4853	0,7285	0,9528	1,125	0,5605	0,742	0,8926
dsov	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	3,1832	6,07	9,716	3,1616	5,094	7,7926	2,854	4,4643	6,4314
an	0,3092	0,6277	1,0884	0,3791	0,3227	0,6251	0,3972	0,3993	0,4614
dap	0,9115	0,9063	0,8993	0,8929	0,9404	0,9257	0,8778	0,9179	0,9331
dan	0,0885	0,0937	0,1007	0,1071	0,0596	0,0743	0,1222	0,0821	0,0669
s	0,6131	0,6131	0,6131	0,3157	0,3208	0,3208	0,215	0,2229	0,2229
IAE	3,4924	6,6977	10,8044	3,5407	5,4167	8,4177	3,5212	4,8636	6,8928
ITAE	11,9321	42,1709	103,7695	16,973	31,6977	70,9316	18,6424	32,2241	55,5863
ISE	2,4875	5,3094	8,8318	1,737	3,5517	5,9403	1,2069	2,4647	4,156
ITSE	6,6853	19,6118	43,7425	6,6443	16,3771	33,3692	5,3805	12,9208	25,5473
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,394	7,48	0	0	9,503	0	0	0	0
f	0,1564	0,1337	0	0	0,1052	0	0	0	0
t subida	5,5042	7,1681	16,0987	8,0609	10,1467	19,603	9,3885	11,5935	20,7808
sobrepaso máx.	1,0434	1,3212	1,4853	0,7285	0,9528	1,125	0,5605	0,742	0,8926
razón de asent.	0,0238	0,1951	0,307	0,0063	0,0422	0,1457	0,011	0	0,0503
tiempo pico	2,564	3,2889	4,0416	3,5678	4,3853	5,1663	4,0679	4,9515	5,8058



Tabla XXVIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1,5			3			5		
	$\tau =$								
	$t_o =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	29,9998	30	30	30	30	30	30
picos máximos	1	1	2	1	1	1	1	1	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	2	1	1	1	1	1	1
sov	1,565	1,9818	2,912	1,0927	1,4292	1,6875	0,8407	1,1131	1,3389
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	1,565	1,9818	2,912	1,0927	1,4292	1,6875	0,8407	1,1131	1,3389
dsov	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	4,7746	9,105	14,5738	4,7422	7,6404	11,6889	4,2811	6,6964	9,6616
an	0,4639	0,9416	1,6338	0,5687	0,4843	0,9376	0,5957	0,599	0,6908
dap	0,9114	0,9063	0,8992	0,8929	0,9404	0,9257	0,8779	0,9179	0,9333
dan	0,0886	0,0937	0,1008	0,1071	0,0596	0,0743	0,1221	0,0821	0,0667
s	0,9197	0,9197	0,9197	0,4735	0,4811	0,4811	0,3226	0,3344	0,3344
IAE	5,2385	10,0466	16,2076	5,3109	8,1246	12,6265	4,8768	7,2954	10,3524
ITAE	17,8986	63,2563	155,7117	25,4578	47,5453	106,3974	27,9636	48,3326	83,5816
ISE	5,5966	11,9462	19,871	3,908	7,9906	13,3657	2,7156	5,5455	9,3536
ITSE	15,0412	44,1265	98,4251	14,9486	36,8432	75,0807	12,1061	29,0718	57,5104
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,3939	7,48	0	0	9,5034	0	0	0	0
f	0,1564	0,1337	0	0	0,1052	0	0	0	0
t subida	5,5039	7,1681	16,0983	8,0606	10,1444	19,603	9,3885	11,5935	20,8023
sobrepaso máx.	1,565	1,9818	2,2279	1,0927	1,4292	1,6875	0,8407	1,1131	1,3389
razón de asent.	0,0238	0,1951	0,307	0,0063	0,0423	0,1457	0,011	0	0,0542
tiempo pico	2,5639	3,2889	4,0415	3,5678	4,3852	5,1663	4,0679	4,9515	5,8059



Tabla XXIX. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30,0001	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	0	0	1	0	0	0
npk	1	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0,5217	0,6606	0,7426	0	0	0,5625	0	0	0
spk	0,5217	0,6606	0,7426	0	0	0,5625	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	0	0	1	0	0	0
ap	0,1547	0,3142	0,5446	0,1896	0,1614	0,3126	0,1986	0,1997	0,2303
an	1,5915	3,0349	4,8579	1,5807	2,5468	3,8961	1,4270	2,2319	3,2204
dap	0,0886	0,0938	0,1008	0,1071	0,0596	0,0743	0,1222	0,0821	0,0667
dan	0,9114	0,9062	0,8992	0,8929	0,9404	0,9257	0,8778	0,9179	0,9333
s	-0,3066	-0,3066	-0,3066	-0,1578	-0,1604	-0,1604	-0,1075	-0,1115	-0,1115
IAE	1,7462	3,3491	5,4025	1,7703	2,7082	4,2087	1,6255	2,4316	3,4506
ITAE	5,9664	21,0949	51,9039	8,4859	15,8484	35,4682	9,3206	16,1098	27,8593
ISE	0,6218	1,3273	2,2079	0,4342	0,8878	1,4850	0,3017	0,6161	1,0392
ITSE	1,6711	4,9029	10,9361	1,6610	4,0937	8,3418	1,3450	3,2298	6,3896
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,3939	7,4802	8,8738	0	9,5034	11,0226	0	0	12,1704
f	0,1564	0,1337	0,1127	0	0,1052	0,0907	0	0	0,0822
t subida	5,5037	7,1664	16,0983	8,0606	10,1444	19,6029	9,3883	11,5921	20,8025
sobrepaso máx.	-0,5217	-0,5505	-0,7426	-0,3642	-0,4764	-0,5625	-0,2802	-0,371	-0,4463
razón de asent.	0,0238	0,1951	0,3070	0,0063	0,0423	0,1458	0,011	0	0,0542
tiempo pico	2,5639	3,2888	4,0415	3,5678	4,3852	5,1662	4,0678	4,9514	5,8058



Tabla XXIX. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p =$									
	1			3			5			
	$\tau =$									
	$t_o =$									
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
ssv	30	30	30,0001	30	30	30	30	30	30	
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
picos mínimos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
npk	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
sun	1,0434	1,3213	1,4853	0,7285	0,9528	1,125	0,5605	0,742	0,8926	
spk	1,0434	1,3213	1,4853	0,7285	0,9528	1,125	0,5605	0,742	0,8926	
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
dsun	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
ap	0,3092	0,6277	1,0884	0,3791	0,3227	0,6251	0,3972	0,3993	0,4605	
an	3,1832	6,07	9,716	3,1616	5,094	7,7926	2,854	4,4643	6,4411	
dap	0,0885	0,0937	0,1007	0,1071	0,0596	0,0743	0,1222	0,0821	0,0667	
dan	0,9115	0,9063	0,8993	0,8929	0,9404	0,9257	0,8778	0,9179	0,9333	
s	-0,6131	-0,6131	-0,6131	-0,3157	-0,3208	-0,3208	-0,215	-0,2229	-0,2229	
IAE	3,4924	6,6977	10,8044	3,5407	5,4167	8,4177	3,2512	4,8636	6,9016	
ITAE	11,9321	42,1709	103,7695	16,973	31,6977	70,9316	18,6424	32,2241	55,721	
ISE	2,4875	5,3094	8,8318	1,737	3,5517	5,9403	1,2069	2,4647	4,1572	
ITSE	6,6853	19,6118	43,7425	6,6443	16,3771	33,3692	5,3805	12,9208	25,5602	
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
T	6,394	7,48	0	0	9,503	0	0	0	0	
f	0,1564	0,1337	0	0	0,1052	0	0	0	0	
t subida	5,5042	7,1681	16,0987	8,0609	10,1467	19,603	9,3885	11,5935	20,8023	
sobrepaso máx.	-1,0434	-1,3212	-1,4853	-0,7285	-0,9528	-1,125	-0,5605	-0,742	-0,8926	
razón de asent.	0,2038	0,1951	0,307	0,0063	0,0422	0,1457	0,011	0	0,0542	
tiempo pico	2,564	3,2889	4,0416	3,5678	4,3853	5,1663	4,0679	4,9515	5,8059	



Tabla XXIX. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el IAE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1,5			3			5		
	$\tau =$								
	$t_o =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30,0002	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	2	1	1	1	1	1	1
npk	1	1	2	1	1	1	1	1	1
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	1,565	1,9818	2,912	1,0927	1,4292	1,6875	0,8407	1,1131	1,3389
spk	1,565	1,9818	2,912	1,0927	1,4292	1,6875	0,8407	1,1131	1,3389
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ap	0,4639	0,9416	1,6338	0,5687	0,4843	0,9376	0,5957	0,599	0,6908
an	4,7746	9,105	14,5738	4,7422	7,6404	11,6889	4,2811	6,6964	9,6616
dap	0,0886	0,0937	0,1008	0,1071	0,0596	0,0743	0,1221	0,0821	0,0667
dan	0,9114	0,9063	0,8992	0,8929	0,9404	0,9257	0,8779	0,9179	0,9333
s	-0,9197	-0,9197	-0,9197	-0,4735	-0,4811	-0,4811	-0,3226	-0,3344	-0,3344
IAE	5,2385	10,0466	16,2076	5,3109	8,1246	12,6265	4,8768	7,2954	10,3524
ITAE	17,8986	63,2563	155,7117	25,4578	47,5453	106,3974	27,9636	48,3362	83,5816
ISE	5,5966	11,9462	19,871	3,908	7,9906	13,3657	2,7156	5,5455	9,3536
ITSE	15,0412	44,1265	98,4251	14,9486	36,8432	75,0807	12,1061	29,0718	57,5104
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	6,3939	7,48	0	0	9,5034	0	0	0	0
f	0,1564	0,1337	0	0	0,1052	0	0	0	0
t subida	5,5039	7,1681	16,0983	8,0606	10,1444	19,603	9,3885	11,5935	20,8023
sobrepaso máx.	-1,565	-1,9818	-2,2279	-1,0927	-1,4292	-1,6875	-0,8407	-1,1131	-1,3389
razón de asent.	0,0238	0,1951	0,307	0,0063	0,0423	0,1457	0,011	0	0,0542
tiempo pico	2,5639	3,2889	4,0415	3,5678	4,3852	5,1663	4,0679	4,9515	5,8059



Tabla XXX. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	1	1	1	0	0	1	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0,5371	0,6697	0,7647	0	0	0,5734	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0,5371	0,6697	0,7647	0	0	0,5734	0	0	0
dsov	1	1	1	0	0	1	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	1,7445	3,093	4,8498	1,7188	2,7518	4,0609	1,5336	2,4259	3,4355
an	0,1698	0,0747	0,0446	0,1924	0,1217	0,0954	0,1919	0,1961	0,1433
dap	0,9113	0,9764	0,9909	0,8993	0,9576	0,9770	0,8888	0,9252	0,9600
dan	0,0887	0,0236	0,0091	0,1007	0,0424	0,0230	0,1112	0,0748	0,0400
s	0,3066	0,3066	0,3066	0,1580	0,1604	0,1604	0,1078	0,1115	0,1115
IAE	1,9243	3,1677	4,8940	1,9112	2,8735	4,1564	1,7255	2,6220	3,5788
ITAE	6,6588	14,7593	30,6861	9,1210	15,6809	28,5717	9,8225	16,9864	26,0933
ISE	0,7084	1,4479	2,3319	0,4950	1,0090	1,6583	0,3379	0,6978	1,1733
ITSE	2,0040	5,2288	10,6607	1,9797	4,8419	9,4248	1,5544	3,8132	7,4661
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	7,7543	8,3488	9,3794	0	0	0	0	0	0
f	0,1290	0,1198	0,1066	0	0	0	0	0	0
t subida	5,8076	8,3192	18,3714	8,2578	10,5388	21,7119	9,5977	11,8604	14,3910
sobrepaso máx.	0,5371	0,6697	0,7467	0,3785	0,4900	0,5734	0,2906	0,3826	0,4575
razón de asent.	0,0290	0,0907	0,1759	0,0106	0,0073	0,0595	0,0125	0,0030	0,0003
tiempo pico	2,6695	3,3994	4,1303	3,7166	4,5741	5,3722	4,2176	5,1548	6,0508



Tabla XXX. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p =$									
	1			3			5			
	$\tau =$			$\tau =$			$\tau =$			
	$t_o =$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv		30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos		1	1	1	1	1	1	1	1	1
picos mínimos		0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk		1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov		1,0743	1,3395	1,4934	0,7569	0,98	1,1468	0,5812	0,7652	0,915
sun		0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk		1,0743	1,3395	1,4934	0,7569	0,98	1,1468	0,5812	0,7652	0,915
dsov		1	1	1	1	1	1	1	1	1
dsun		0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap		3,5089	6,1864	9,699	3,4378	5,5038	8,1219	3,0674	4,8519	6,8716
an		0,3402	0,1493	0,0891	0,3848	0,2433	0,1909	0,3838	0,3922	0,2866
dap		0,9116	0,9764	0,9909	0,8993	0,9577	0,9770	0,8888	0,9252	0,9600
dan		0,0884	0,0236	0,0091	0,1007	0,0423	0,0230	0,1112	0,0748	0,0400
s		0,6131	0,6131	0,6131	0,3161	0,3208	0,3208	0,2155	0,2229	0,2229
IAE		3,8492	6,3357	9,7881	3,8226	5,7471	8,3128	3,4512	5,2441	7,1582
ITAE		13,3201	29,5188	61,3676	18,243	31,3624	57,1434	19,6474	33,9729	52,1933
ISE		2,834	5,792	9,328	1,9802	4,0363	6,6331	1,3518	2,791	4,6936
ITSE		8,0175	20,9167	42,6449	7,9193	19,369	37,6991	6,2184	15,2528	29,8689
ts5		0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20		0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50		0	0	0	0	0	0	0	0	0
T		7,7571	8,3486	9,3791	0	0	0	0	0	0
f		0,1289	0,1198	0,1066	0	0	0	0	0	0
t subida		5,8074	8,3216	18,3719	8,285	10,5395	21,7119	9,5981	11,8604	14,3934
sobrepaso máx.		1,0743	1,3395	1,4934	0,7569	0,98	1,1468	0,5812	0,7652	0,915
razón de asent.		0,029	0,097	0,1759	0,0106	0,0073	0,0595	0,0125	0,003	0,0002
tiempo pico		2,6696	3,3994	4,1304	3,7167	4,5741	5,3722	4,2177	5,1548	6,051



Tabla XXX. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1,5			3			5		
	$\tau =$								
	$t_o =$								
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov	1,6113	2,0092	2,24	1,1354	1,47	1,7203	0,8718	1,1478	1,3725
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	1,6113	2,0092	2,24	1,1354	1,47	1,7203	0,8718	1,1478	1,3725
dsov	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	5,2636	9,2784	14,5471	5,1569	8,2553	12,182	4,6013	7,2784	10,3069
an	0,5094	0,2243	0,1339	0,5772	0,3651	0,2864	0,575	0,5883	0,43
dap	0,9118	0,9764	0,9909	0,8993	0,9576	0,9770	0,8889	0,9252	0,9600
dan	0,0882	0,0236	0,0091	0,1007	0,0424	0,0230	0,1111	0,0748	0,0400
s	0,9197	0,9197	0,9197	0,4741	0,4811	0,4811	0,3233	0,3344	0,3344
IAE	5,773	9,5027	14,681	5,7341	8,6204	12,4684	5,1763	7,8667	10,7369
ITAE	19,9764	44,2778	92,0445	27,3658	47,0426	85,7086	29,4611	50,9663	78,2849
ISE	6,3758	13,0305	20,9865	4,4556	9,0813	14,9236	3,0416	6,2804	10,56
ITSE	18,0364	47,0552	95,9389	17,8195	43,5769	84,8155	13,9911	34,3235	67,2
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	7,7543	8,349	0	0	0	0	0	0	0
f	0,1290	0,1198	0	0	0	0	0	0	0
t subida	5,8076	8,3169	18,3703	8,2583	10,5388	21,7117	9,5994	11,8615	14,3922
sobrepaso máx.	1,6113	2,0092	2,24	1,1354	1,47	1,7203	0,8718	1,1478	1,3725
razón de asent.	0,029	0,979	0,1759	0,0106	0,0073	0,0595	0,0125	0,003	0,0003
tiempo pico	2,6695	3,3993	4,1303	3,7167	4,5741	5,3722	4,2177	5,1549	6,0509



Tabla XXXI. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	0	0	1	0	0	0
npk	1	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0,5371	0,6697	0,7467	0	0	0,5734	0	0	0
spk	0,5371	0,6697	0,7467	0	0	0,5734	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	0	0	1	0	0	0
ap	0,1698	0,0747	0,0446	0,1924	0,1217	0,0954	0,1919	0,1961	0,1433
an	1,7545	3,0930	4,8490	1,7188	2,7518	4,0609	1,5336	2,4259	3,4355
dap	0,0882	0,0236	0,0091	0,1007	0,0424	0,0230	0,1112	0,0748	0,0400
dan	0,9118	0,9764	0,9909	0,8993	0,9576	0,9770	0,8888	0,9252	0,9600
s	-0,3066	-0,3066	-0,3066	-0,1580	-0,1604	-0,1604	-0,1078	-0,1115	-0,1115
IAE	1,9243	3,1677	4,8937	1,9112	2,8735	4,1564	1,7255	2,6220	3,5788
ITAE	6,6588	14,7593	30,6815	9,1210	15,6809	28,5717	9,8225	16,9864	26,0933
ISE	0,7084	1,4479	2,3318	0,4950	1,0090	1,6583	0,3379	0,6978	1,1733
ITSE	2,0040	5,2288	10,6599	1,9797	4,8419	9,4248	1,5544	3,8132	7,4661
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	7,7543	8,3488	9,3795	0	0	0	0	0	0
f	0,1290	0,1198	0,1066	0	0	0	0	0	0
t subida	5,8076	8,3192	18,3703	8,2578	10,5388	21,7119	9,5977	11,8604	14,391
sobrepaso máx.	-0,5371	-0,6697	-0,7467	-0,3785	-0,49	-0,5734	-0,2906	-0,3826	-0,4575
razón de asent.	0,029	0,0907	0,1759	0,0106	0,0073	0,0595	0,0125	0,003	0,0003
tiempo pico	2,6695	3,3994	4,1303	3,7166	4,5741	5,3722	4,2176	5,1548	6,0508



Tabla XXXI. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	$\tau =$			$\tau =$			$\tau =$		
$t_o =$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
npk	1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	1,0743	1,3395	1,4937	0,7569	0,98	1,1468	0,5812	0,7652	0,915
spk	1,0743	1,3395	1,4937	0,7569	0,98	1,1468	0,5812	0,7652	0,915
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ap	0,3402	0,1493	0,0731	0,3848	0,2433	0,1909	0,3838	0,3922	0,2866
an	3,5089	6,1864	9,7848	3,4378	5,5038	8,1219	3,0674	4,8519	6,8716
dap	0,0884	0,0236	0,0074	0,1007	0,0423	0,0230	0,1112	0,0748	0,0400
dan	0,9116	0,9764	0,9926	0,8993	0,9577	0,9770	0,8888	0,9252	0,9600
s	-0,6131	-0,6131	-0,6131	-0,3161	-0,3208	-0,3208	-0,2155	-0,2229	-0,2229
IAE	3,8492	6,3357	9,8579	3,8226	5,7471	8,3128	3,4512	5,2441	7,1582
ITAE	13,3201	29,5188	61,823	18,243	31,3624	57,1434	19,6474	33,9729	52,1933
ISE	2,834	5,792	9,3916	1,9802	4,0363	6,6331	1,3518	2,791	4,6936
ITSE	8,0175	20,9167	43,1428	7,9193	19,369	37,6991	6,2184	15,2528	29,8689
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	7,7571	8,3486	9,3374	0	0	0	0	0	0
f	0,1289	0,1198	0,1071	0	0	0	0	0	0
t subida	5,8074	8,3216	18,5289	8,258	10,5395	21,7119	9,5981	11,8604	14,3934
sobrepaso máx.	-1,0743	-1,3395	-1,4937	-0,7569	-0,98	-1,1468	-0,5812	-0,7652	-0,915
razón de asent.	0,029	0,097	0,1768	0,0106	0,0073	0,0595	0,0125	0,003	0,0002
tiempo pico	2,6696	3,3994	4,1343	3,7167	4,5741	5,3722	4,2177	5,1548	6,051



Tabla XXXI. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ITAE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
npk	1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	1,6113	2,0092	2,24	1,1354	1,47	1,7203	0,8718	1,1478	1,3725
spk	1,6113	2,0092	2,24	1,1354	1,47	1,7203	0,8718	1,1478	1,3725
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ap	0,5094	0,2243	0,1339	0,5772	0,3651	0,2864	0,5758	0,5883	0,43
an	5,2636	9,2784	14,5471	5,1569	8,2553	12,182	4,6011	7,2784	10,3069
dap	0,0882	0,0236	0,0091	0,1007	0,0424	0,0230	0,1112	0,0748	0,0400
dan	0,9118	0,9764	0,9909	0,8993	0,9576	0,9770	0,8888	0,9252	0,9600
s	-0,9197	-0,9197	-0,9197	-0,4741	-0,4811	-0,4811	-0,3233	-0,3344	-0,3344
IAE	5,773	9,5027	14,681	5,7341	8,6204	12,4684	5,1769	7,8667	10,7369
ITAE	19,9764	44,2778	92,0445	27,3658	47,0426	85,7086	29,4711	50,9663	78,2849
ISE	6,3758	13,0305	20,9865	4,4556	9,0813	14,9236	3,0415	6,2804	10,56
ITSE	18,0364	47,0552	95,9389	17,8195	43,5769	84,8155	13,9914	34,3235	67,2
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	7,7543	8,349	0	0	0	0	0	0	0
f	0,1290	0,1198	0	0	0	0	0	0	0
t subida	5,8076	8,3169	18,3703	8,2583	10,5388	21,7117	9,5981	11,8615	14,3922
sobrepaso máx.	-1,6113	-2,0092	-2,24	-1,1354	-1,47	-1,7203	-0,8718	-1,1478	-1,3725
razón de asent.	0,029	0,097	0,1759	0,0106	0,0073	0,0595	0,0125	0,003	0,0003
tiempo pico	2,6695	3,3993	4,1303	3,7167	4,5741	5,3722	4,2177	5,1549	6,0509



Tabla XXXII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ISE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	29,9998	30	30	30	30	30	30
picos máximos	1	1	1	0	0	1	0	0	0
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0,511	0,6572	0,7418	0	0	0,5574	0	0	0
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	0,511	0,6572	0,7418	0	0	0,5574	0	0	0
dsov	1	1	1	0	0	1	0	0	0
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	1,4673	2,8017	4,3739	1,4162	2,3014	3,488	1,2506	1,9982	2,8806
an	0,3666	0,6804	0,9681	0,3673	0,4761	0,7152	0,3374	0,4662	0,6026
dap	0,8001	0,8046	0,8188	0,7941	0,8286	0,8298	0,7875	0,8108	0,8270
dan	0,1999	0,1954	0,1812	0,2059	0,1714	0,1702	0,2125	0,1892	0,1730
s	0,3066	0,3066	0,3066	0,1576	0,1604	0,1604	0,1072	0,1115	0,1115
IAE	1,8340	3,4822	5,3420	1,7835	2,7776	4,2032	1,5880	2,4644	3,4832
ITAE	7,2903	25,7576	57,6695	10,1078	19,1879	41,5857	10,7638	19,6225	33,6600
ISE	0,5776	1,2753	2,1041	0,3759	0,8068	1,3880	0,2487	0,5356	0,9403
ITSE	1,5766	4,8329	10,3709	1,4458	3,7122	7,8639	1,1092	2,7850	5,8090
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	7,5762	9,0041	15,3858	0	11,1724	17,1908	0	12,2019
f	0	0,1320	0,1111	0,0650	0	0,0895	0,0582	0	0,0820
t subida	4,9587	6,4636	8,1592	7,1005	8,6012	10,2302	8,2675	9,7723	11,3582
sobrepaso máx.	0,5110	0,6572	0,7418	0,3484	0,4671	0,5574	0,2632	0,3588	0,4380
razón de asent.	0	0,1355	0,2271	0,0361	0	0,0839	0,0456	0	0,0060
tiempo pico	2,4878	3,2483	4,0226	3,3894	4,2501	5,0690	3,8025	4,7273	5,6176



Tabla XXXII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ISE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.
(Continuación)

	$k_p =$								
	1			3			5		
	$\tau =$			$\tau =$			$\tau =$		
	$t_o =$			$t_o =$			$t_o =$		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	29,9997	30	30	29,9999	30	30	30,0001
picos máximos	1	1	1	1	1	1	1	1	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov	1,022	1,3145	1,4835	0,6968	0,9341	1,1148	0,5264	0,7176	0,8759
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	1,022	1,3145	1,4835	0,6968	0,9341	1,1148	0,5264	0,7176	0,8759
dsov	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	2,9347	5,6033	8,7472	2,8325	4,6032	6,976	2,5013	3,9965	5,7612
an	0,7332	1,3603	1,935	0,7347	0,9522	1,4299	0,6748	0,9325	1,2051
dap	0,8001	0,8047	0,8189	0,7940	0,8286	0,8299	0,7875	0,8108	0,8270
dan	0,1999	0,1953	0,1811	0,2060	0,1714	0,1701	0,2125	0,1892	0,1730
s	0,6131	0,6131	0,6131	0,3153	0,3208	0,3208	0,2143	0,2229	0,2229
IAE	3,668	6,9635	10,6822	3,5672	5,5554	8,4059	3,1761	4,9289	6,9663
ITAE	14,581	51,4965	115,277	20,2184	38,3767	83,1507	21,5301	39,307	67,3153
ISE	2,3105	5,1014	8,4164	1,5037	3,2276	5,5521	0,9949	2,1423	3,7614
ITSE	6,3067	19,3299	41,4769	5,7841	14,85	31,4552	4,4373	11,1407	23,2366
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	7,5761	9,004	15,3862	0	11,1722	0	0	12,2017
f	0	0,1320	0,1111	0,0650	0	0,0895	0	0	0,0820
t subida	4,9589	6,4639	8,1598	7,1009	8,602	10,2308	8,2768	9,7726	11,3587
sobrepaso máx.	1,022	1,3145	1,4835	0,6968	0,9341	1,1148	0,5264	0,7176	0,8759
razón de asent.	0	0,1354	0,2271	0,0361	0	0,0839	0,0457	0	0,006
tiempo pico	2,4878	3,2483	4,0226	3,3895	4,2502	5,069	3,8025	4,7274	5,6176



Tabla XXXII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ISE para cambios positivos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.
(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	29,9995	30	30	29,9999	33	30	30,0001
picos máximos	1	1	2	1	1	1	1	1	1
picos mínimos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
npk	1	1	2	1	1	1	1	1	1
sov	1,533	1,9717	2,7306	1,0451	1,4012	1,6722	0,7896	1,0765	1,3139
sun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
spk	1,533	1,9717	2,7306	1,0451	1,4012	1,6722	0,7896	1,0765	1,3139
dsov	1	1	1	1	1	1	1	1	1
dsun	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ap	4,402	8,4052	13,1208	4,2488	6,9047	10,464	3,7518	5,9947	8,6418
an	1,0999	2,0412	2,9024	1,102	1,4283	2,1449	1,0121	1,3987	1,8077
dap	0,8001	0,8046	0,8189	0,7940	0,8286	0,8299	0,7875	0,8108	0,8270
dan	0,1999	0,1954	0,1811	0,2060	0,1714	0,1701	0,2125	0,1892	0,1730
s	0,9197	0,9197	0,9197	0,4729	0,4811	0,4811	0,3215	0,3344	0,3344
IAE	5,5019	10,4465	16,0233	5,3508	8,3331	12,6089	4,7639	7,3934	10,4495
ITAE	21,871	77,2729	172,9155	30,3276	57,565	124,726	32,2913	58,9605	100,973
ISE	5,1985	11,478	18,937	3,3834	7,262	12,4923	2,2382	4,8202	8,4631
ITSE	14,1896	43,4958	93,3231	13,0143	33,4125	70,7742	9,9826	25,0667	52,2823
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	7,5762	9,004	0	0	11,1722	17,1908	0	12,2017
f	0	0,1320	0,1111	0	0	0,0895	0,0582	0	0,0820
t subida	4,9587	6,4636	8,1598	7,1009	8,602	10,2308	8,2765	9,7726	11,3587
sobrepaso máx.	1,533	1,9717	2,2253	1,0451	1,4012	1,6722	0,7896	1,0765	1,3139
razón de asent.	0	0,1355	0,2271	0,0361	0	0,0839	0,0456	0	0,006
tiempo pico	2,4878	3,2483	4,0226	3,3895	4,2502	5,069	3,8025	4,7274	5,6176



Tabla XXXIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ISE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

	$k_p = 0,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	30	30	30,0002	30	30	30	30	30	30
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	1	0	0	1	0	0	0
npk	1	1	1	0	0	1	0	0	0
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	0,511	0,6572	0,7418	0	0	0,5574	0	0	0
spk	0,511	0,6572	0,7418	0	0	0,5574	0	0	0
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	0	0	1	0	0	0
ap	0,3666	0,6804	0,9681	0,3673	0,4761	0,7152	0,3374	0,4662	0,6026
an	1,4673	2,8017	4,3739	1,4162	2,3014	3,4880	1,2506	1,9982	2,8806
dap	0,1999	0,1954	0,1812	0,2059	0,1714	0,1702	0,2125	0,1892	0,1730
dan	0,8001	0,8046	0,8188	0,7941	0,8286	0,8298	0,7875	0,8108	0,8270
s	-0,3066	-0,3066	-0,3066	-0,1576	-0,1604	-0,1604	-0,1072	-0,1115	-0,1115
IAE	1,8340	3,4822	5,3420	1,7835	2,7776	4,2032	1,5880	2,4644	3,4832
ITAE	7,2903	25,7576	57,6695	10,1078	19,1879	41,5857	10,7638	19,6525	33,6600
ISE	0,5776	1,2753	2,1041	0,3759	0,8068	1,3880	0,2487	0,5356	0,9403
ITSE	1,5766	4,8329	10,3709	1,4458	3,7122	7,8639	1,1092	2,7850	5,8090
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	7,5762	9,0041	15,3858	0	11,1724	17,1908	0	12,2019
f	0	0,1320	0,1111	0,0650	0	0,0895	0,0582	0	0,0820
t subida	4,9587	6,4636	8,1592	7,065	8,6012	10,2302	8,2765	9,7723	11,3582
sobrepaso máx.	-0,511	-0,6572	-0,7418	-0,2005	-0,4671	-0,5574	-0,2632	-0,3588	-0,438
razón de asent.	0	0,1355	0,2271	0,0361	0	0,0839	0,0456	0	0,006
tiempo pico	2,4878	3,2483	4,0226	3,3894	4,2501	5,069	3,8025	4,7273	5,7176



Tabla XXXIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ISE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.

(Continuación)

	$k_p =$									
	1			3			5			
	$\tau =$	1		2		3		5		
	$t_o =$	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv		30	30	30,0003	30	30	30,0001	30	30	29,9999
picos máximos		0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos		1	1	1	1	1	1	1	1	1
npk		1	1	1	1	1	1	1	1	1
sov		0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun		1,022	1,3145	1,4835	0,6968	0,9341	1,1148	0,5264	0,7176	0,8759
spk		1,022	1,3145	1,4835	0,6968	0,9341	1,1148	0,5264	0,7176	0,8759
dsov		0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun		1	1	1	1	1	1	1	1	1
ap		0,7332	1,3603	1,935	0,7347	0,9522	1,4299	0,6748	0,9325	1,2051
an		2,9347	5,6033	8,7472	2,8325	4,6032	6,976	2,5013	3,9965	5,7612
dap		0,1999	0,1953	0,1811	0,2060	0,1714	0,1701	0,2125	0,1892	0,1730
dan		0,8001	0,8047	0,8189	0,7940	0,8286	0,8299	0,7875	0,8108	0,8270
s		-0,6131	-0,6131	-0,6131	-0,3153	-0,3208	-0,3208	-0,2143	-0,2229	-0,2229
IAE		3,668	6,9635	10,6822	3,5672	5,5554	8,4059	3,1761	4,9289	6,9663
ITAE		14,581	51,4965	115,277	20,2184	38,3767	83,1507	21,5301	39,307	67,3153
ISE		2,3105	5,1014	8,4164	1,5037	3,2276	5,5521	0,9949	2,1423	3,7614
ITSE		6,3067	19,3299	41,4769	5,7841	14,85	31,4552	4,4373	11,1407	23,2366
ts5		0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20		0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50		0	0	0	0	0	0	0	0	0
T		0	7,5761	9,004	15,3862	0	11,1722	0	0	12,2017
f		0	0,1320	0,1111	0,0650	0	0,0895	0	0	0,0820
t subida		4,9589	6,4639	8,1598	7,1009	8,602	10,2308	8,2768	9,7726	11,3587
sobrepaso máx.		-1,022	-1,3145	-1,4835	-0,6968	-0,9341	-1,1148	-0,5264	-0,7176	-0,8759
razón de asent.		0	0,1354	0,2271	0,0361	0	0,0839	0,0457	0	0,006
tiempo pico		2,4878	3,2483	4,0226	3,3895	4,2502	5,069	3,8025	4,7274	5,6176



Tabla XXXIII. Valores de las características de la respuesta obtenida en el sistema de lazo cerrado modelo, al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar el ISE para cambios negativos del 10% en perturbaciones externas al lazo de control.
(Continuación)

	$k_p = 1,5$								
	$\tau = 1$			$\tau = 3$			$\tau = 5$		
	$t_o = 1$	2	3	1	2	3	1	2	3
ssv	33	30	30,0005	30	30	30,0001	30	30	29,9999
picos máximos	0	0	0	0	0	0	0	0	0
picos mínimos	1	1	2	1	1	1	1	1	1
npk	1	1	2	1	1	1	1	1	1
sov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
sun	1,533	1,9717	2,7306	1,0451	1,4012	1,6722	0,7896	1,0765	1,3139
spk	1,533	1,9717	2,7306	1,0451	1,4012	1,6722	0,7896	1,0765	1,3139
dsov	0	0	0	0	0	0	0	0	0
dsun	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ap	1,0999	2,0412	2,9024	1,102	1,4283	2,1449	1,0121	1,3987	1,8077
an	4,402	8,4052	13,1208	4,2488	6,9047	10,464	3,7518	5,9947	8,6418
dap	0,1999	0,1954	0,1811	0,2060	0,1714	0,1701	0,2125	0,1892	0,1730
dan	0,8001	0,8046	0,8189	0,7940	0,8286	0,8299	0,7875	0,8108	0,8270
s	-0,9197	-0,9197	-0,9197	-0,4729	-0,4811	-0,4811	-0,3215	-0,3344	-0,3344
IAE	5,5019	10,4465	16,0233	5,3508	8,3331	12,6089	4,7639	7,3934	10,4495
ITAE	21,871	77,2729	192,9155	30,3276	57,565	124,726	32,2913	58,9605	100,973
ISE	5,1985	11,478	18,937	3,3834	7,262	12,4923	2,3282	4,8202	8,4631
ITSE	14,1896	43,4958	93,3231	13,0143	33,4125	70,7742	9,9826	25,0667	52,2823
ts5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts20	0	0	0	0	0	0	0	0	0
ts50	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T	0	7,5762	9,004	0	0	11,1722	17,1908	0	12,2017
f	0	0,1320	0,1111	0	0	0,0895	0,0582	0	0,0820
t subida	4,9587	6,4636	8,1598	7,1009	8,602	10,2308	8,2765	9,7726	11,3587
sobrepaso máx.	-1,533	-1,9717	-2,2253	-1,0451	-1,4012	-1,6722	-0,7896	-1,0765	-1,3139
razón de asent.	0	0,1355	0,2271	0,0361	0	0,0839	0,0456	0	0,006
tiempo pico	2,4878	3,2483	4,0226	3,3895	4,2502	5,069	3,8025	4,7274	5,6176



Tabla XXXIV. Valores del índice difuso obtenidos al realizar cambios por encima del 10% de los valores iniciales de set point y perturbaciones externas, respectivamente, en el sistema de lazo cerrado modelo para valores óptimos del proceso y al utilizar las ecuaciones de sintonización para minimizar los índices de desempeño según el criterio integral.

k_p	τ	t_o	OPTIMIZACIÓN		SET POINT		PERTURBACIÓN		
			SET P.	PERT.	IAE	ITAE	IAE	ITAE	ISE
			DIFUSO	DIFUSO	DIFUSO	DIFUSO	DIFUSO	DIFUSO	DIFUSO
0,5	1	1	0,8093	0,8352	0,7500	0,7500	0,8354	0,8337	0,8324
		2	0,7734	0,8201	0,7500	0,7500	0,8122	0,8203	0,8215
		3	0,7508	0,8133	0,6046	0,6046	0,7548	0,8138	0,8138
	3	1	0,6260	0,8583	0,6046	0,6046	0,8547	0,8569	0,8569
		2	0,6076	0,8233	0,7500	0,7500	0,8188	0,8417	0,8417
		3	0,7231	0,7847	0,6807	0,6807	0,7024	0,8171	0,8171
	5	1	0,6914	0,8721	0,6807	0,6807	0,8355	0,8138	0,8138
		2	0,6812	0,8075	0,6807	0,6807	0,7941	0,8266	0,8266
		3	0,6807	0,7732	0,6957	0,6957	0,6917	0,7643	0,7976
1	1	1	0,7186	0,7917	0,7500	0,7500	0,7914	0,7985	0,7928
		2	0,7710	0,7674	0,7500	0,7500	0,7304	0,7765	0,7765
		3	0,7508	0,6866	0,6046	0,6046	0,6211	0,7289	0,7289
	3	1	0,6337	0,8198	0,6046	0,6046	0,8150	0,8178	0,8178
		2	0,6090	0,7973	0,7500	0,7500	0,7974	0,7988	0,7988
		3	0,7256	0,6592	0,6807	0,6807	0,6294	0,6887	0,6887
	5	1	0,6950	0,8389	0,6807	0,6807	0,8312	0,8349	0,8349
		2	0,6829	0,8111	0,7552	0,7512	0,7941	0,7904	0,8159
		3	0,7219	0,7762	0,6876	0,6876	0,6717	0,7976	0,7976
1,5	1	1	0,7099	0,7665	0,7500	0,7500	0,7645	0,7672	0,7672
		2	0,7710	0,7367	0,7500	0,7500	0,7071	0,7556	0,7556
		3	0,7508	0,6819	0,6046	0,6046	0,6051	0,7085	0,7085
	3	1	0,6347	0,7940	0,6046	0,6046	0,7399	0,7870	0,7870
		2	0,7536	0,6981	0,7500	0,7500	0,6767	0,7186	0,7186
		3	0,7256	0,6608	0,6807	0,6807	0,5827	0,5827	0,6870
	5	1	0,6963	0,8146	0,6807	0,6807	0,8057	0,8098	0,8098
		2	0,6830	0,6896	0,6807	0,6807	0,6606	0,7009	0,7009
		3	0,6807	0,6366	0,6876	0,6876	0,6225	0,6603	0,6603