

Colección
Dossier Académico



Ingeniería, Industrias y construcción

Diseño de un controlador difuso multivariable adaptativo para el control de la temperatura y la velocidad en una extrusora para fabricar mangueras

Luis Jacinto Mendoza Cuzme
Danny Gerardo Ramírez Chávez
Aristides Reyes Bacardí



Ediciones
Uleam

**Diseño de un controlador difuso multivariable adaptativo
para el control de la temperatura y la velocidad en una
extrusora para fabricar mangueras**

Luis Jacinto Mendoza Cuzme

Danny Gerardo Ramírez Chávez

Arístides Reyes Bacardí





Texto arbitrado bajo la modalidad doble par ciego en capítulos de libros

Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí
Ciudadela universitaria vía circunvalación (Manta)
www.uleam.edu.ec

Dr. Marcos Zambrano Zambrano, PhD.

Rector

Dra. Jackeline Terranova Ruiz, PhD.

Vicerrectora de Investigación, Vinculación y Postgrado

Dr. Pedro Quijije Anchundia, PhD.

Vicerrector Académico

Dr. Fidel Chiriboga Mendoza, PhD.

Director de Editorial Universitaria

Diseño de un controlador difuso multivariable

Adaptativo para el control de la temperatura y la velocidad en una extrusora para fabricar mangueras

©Luis Jacinto Mendoza Cuzme

©Danny Gerardo Ramírez Chávez

©Aristides Reyes Bacardí

ISBN: 978-9942-827-68-5

Edición: Primera. Abril de 2022. Publicación digital

Editorial Universitaria

Mg. Alexis Cuzme Espinales

Editor General

Mg. José Márquez Rodríguez

Gestor de Diseño Editorial

Mg. Rossana Cedeño García

Gestora de Redacción y trámites documentales del editorial con los autores.

Lic. Anyela Rivas Cevallos

Secretaria General de la Editorial

Una producción de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, registrada en la Cámara Ecuatoriana del Libro.

Sitio Web: www.munayi.uleam.edu.ec

Correo institucional: editorial@uleam.edu.ec

Facebook @Ediciones Uleam

Twitter @EdicionesUleam

Teléfonos: 2 623 026 Ext. 255

Toda la información relacionada al contenido del texto es responsabilidad de los autores.

Primero, dar gracias a Dios, por permitirme llegar hasta estas instancia

A mi madre, pilar fundamental en mi vida profesional.

A mi padre, hermanos y sobre todo a mi esposa e hijos.

Luis Jacinto Mendoza Cuzme

A mi madre, que con su esfuerzo y dedicación supo alentarme.

A mi padre, por apoyarme en todo momento.

A mis hermanos, que me incentivaron a convertirme en un gran profesional.

A mi querida esposa e hijas.

Danny Gerardo Ramírez Chávez

A la memoria de mi madre, padre y esposa.

A mis hijos, inspiración constante en mi vida.

Arístides Reyes Bacardí

Resumen

En la presente investigación se han desarrollado varias técnicas de Control Inteligente para un modelo de múltiples entradas y múltiples salidas, conocido como modelo MIMO de una extrusora. En particular se desarrollaron las Técnicas del Control Difuso aplicadas al control del perfil de temperatura de una extrusora de plástico de un silo tornillo para la fabricación de mangueras.

Los controladores desarrollados e investigados por simulación fueron: un controlador difuso con desacoplamiento dinámico diseñado mediante el cálculo analítico, un controlador difuso con desacoplamiento difuso y un controlador adaptativo difuso.

Se estudió, por simulación, el comportamiento de los controladores ante dificultades tales como la interacción entre los lazos de control, ante perturbaciones de carga y ante incertidumbres en el modelo de la planta.

Se llegan a conclusiones a partir del análisis de los resultados de las respuestas en el dominio del tiempo, determinándose que el controlador de mejores resultados es el controlador difuso con desacoplamiento difuso.

No se excluye la posibilidad de emplear el controlador adaptativo difuso, para lo cual se recomienda continuar la investigación del desempeño de tales controladores variando la granulación de los universos de discurso, así como el tipo de función de pertenencia en los extremos del universo de discurso de las variables difusas de entrada del sistema de inferencia difuso.

Finalmente se recomienda el empleo del controlador difuso con desacoplamiento difuso para el control de las temperaturas de las zonas de calentamiento de extrusoras de un solo tornillo.

ÍNDICE

Introducción	6
Capítulo 1	15
Control de extrusoras	15
1.1 Funcionamiento de extrusoras	15
1.1.1 Breve descripción del funcionamiento de las extrusoras	15
1.1.2 Relaciones entre las variables de las extrusoras simples.....	17
1.2 Análisis de los modelos matemáticos publicados de las extrusoras.....	17
1.3 El control de extrusoras de plástico	25
1.3.1 Modelo matemático seleccionado para representar la extrusora	25
Capítulo 2	28
Diseño de los controladores multivariables de extrusoras simples	28
2.1 Determinación de los objetivos del control para una extrusora simple	28
2.1.1 Arreglo RGA.....	30
2.1.2 Valores singulares en estado estacionario.....	31
2.1.3 Número de condición.....	31
2.1.4 Análisis de los ceros del sistema MIMO.....	32
2.1.5 Índices de interacción	33
2.1.6 Diseño de los controladores para el control de las temperaturas de las zonas 3 y 4 y la velocidad del tornillo sin fin.	34
2.2 Diseño del controlador difuso multivariable	39
2.2.1 Metodología de ajuste del controlador difuso para el sistema de una entrada una salida SISO	44
2.3 Diseño del controlador difuso adaptativo	57
Capítulo 3	64
Comparación de los desempeños de los controladores diseñados	64
3.1 Diseño de las perturbaciones en la referencia de los sistemas controlados	64
3.2 Diseño de las perturbaciones sobre los procesos de temperatura y velocidad del tornillo sin fin	64
3.3 Verificación del desempeño de los controladores diseñados ante las perturbaciones	65
3.3.1 Análisis del desempeño de las diferentes estrategias de control ante una perturbación de carga	70
3.3.2 Análisis del desempeño de las diferentes estrategias de control ante incertidumbres en el modelo de la planta	75
3.4 Análisis de los resultados	80
Conclusiones	83
Cumplimiento de los objetivos.....	83
Bibliografía	87

Introducción

La producción mundial de material plástico está aumentando. En los últimos 20 años, la tasa de crecimiento ha sido del 5% por año (Cipet, 2012), (Plastics Europe, 2012). La producción total de plástico alcanzó los 265 millones de toneladas en 2010. Según la misma fuente, se espera que el crecimiento continúe en el futuro, ya que la producción de materiales plásticos requiere al menos un 46% menos de consumo de energía y proporciona menos emisiones de CO₂ que otros materiales alternativos. Los productos hechos de materiales plásticos son en su mayoría fabricados por extrusoras de plástico. La extrusión es una parte importante de muchas operaciones de procesamiento de polímeros. El control de las extrusoras es, por tanto, indispensable en el logro de productos con calidad y minimizar las afectaciones al medio ambiente en concordancia con las políticas establecidas en la República del Ecuador y que atañe a la extrusión de plásticos, mediante el Acuerdo Ministerial 19, Registro Oficial 218 de 03-abr.-2014 en vigencia¹ que exige velar por el fomento de una producción más limpia, aumentando la eficiencia energética (las zonas de calentamiento Emplean resistencias eléctricas de gran consumo de energía eléctrica, mismo que debe ser más efectivo) y en la etapa de producción reducir los residuos e incrementar la producción de materiales con la reutilización de residuos y reciclar aquellos materiales que al menos reduzcan su incidencia y permanencia en el entorno natural.

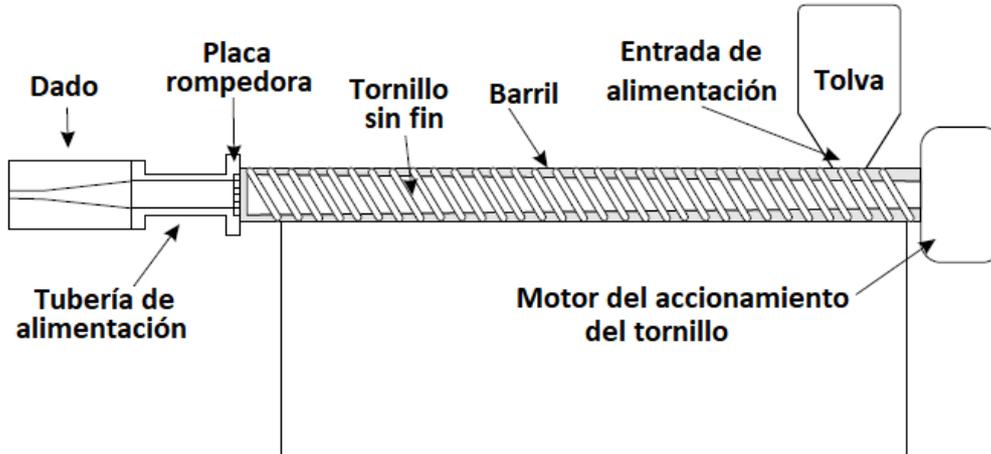


Figura 1.1. Esquema simplificado de la extrusora (Stanko & Juricic, 2013).

¹ Acuerdo Ministerial 19. Políticas para la Gestión Integral de Plásticos en el Ecuador. En su Título I del Objeto y Ámbito de Aplicación, artículo No. 1 establece:

“El presente Acuerdo Ministerial tiene como objeto introducir cambios fundamentales en la forma de consumir de las ecuatorianas y los ecuatorianos y en las formas de producción del sector plástico del país, mediante el fomento de: producción más limpia, eficiencia energética, responsabilidad social; bajo el principio de prevención y responsabilidad extendida.

Instar en sus diferentes etapas de producción y consumo, a la reducción de los residuos, al incremento en la producción de materiales con la reutilización de residuos y el reciclaje de materiales que no dañen el ambiente o que al menos reduzcan su incidencia y permanencia en el entorno natural”.

La extrusión se puede definir como el proceso de formar un nuevo material, mediante la compresión de la materia prima fusionada por calor, en este caso plástico, contra el molde, “troquel” o “dado” en condiciones controladas. Para ejercer la compresión se emplea un tornillo giratorio bajo altas temperaturas (ver figura 1.1).

Uno de los problemas más interesantes en el control de procesos es el control de la temperatura de una extrusora. Por un lado, los altos requerimientos con respecto a la desviación permitida de la temperatura respecto del perfil nominal y por otro lado el exigente control debido a las fuertes interacciones entre las zonas de calentamiento/enfriamiento y la dependencia del proceso de la tasa de producción, la composición del material plástico, las variaciones ambientales, etc. definiendo estas últimas las perturbaciones al proceso de extrusión.

Las extrusoras proporcionan una mezcla y agitación extensas que provocan la desagregación de partículas suspendidas en el polímero fundido dando como resultado una dispersión uniforme. La mayoría de los extrusores constan de tres partes (Issa & Spalding, 1972, p.365): un sistema de transporte para el transporte y la mezcla del material, un sistema de calentamiento en la extrusora y un equipo suplementario aguas abajo para enfriar, cortar o recoger los productos.

El comportamiento de las variables de proceso en función de la velocidad del tornillo y de las perturbaciones antes mencionado es estudiado sistemáticamente, de manera que existen varios estudios e investigaciones donde se han determinado diferentes modelos matemáticos (Smith, 1969), (Tadmor, *et al.*, 1974, p.112) desde los más simples del tipo ARMA y MIMO en el espacio de estados (Bezanson & Harris, 1986), etc.

En base a tales modelos se han propuesto un conjunto de controladores con fundamento en los del tipo Reguladores de Autoajuste (STR) (Bezanson & Harris, 1986), PID y PID adaptativos (Strmcnik & Juricic, 2013), inteligentes empleando la lógica difusa (Tad, *et al.*, 1995), (Ching, *et al.*, 2011), (Yusuf, *et al.*, 2010) y (Abeykoon, *et al.*, 2011), controladores óptimos (Subramanian, 2016), etc.

El problema que resuelven diferentes artículos publicados en la bibliografía consultada en revistas indexadas desde 1986 hasta la fecha es aumentar la calidad de los productos obtenidos por extrusión de plástico mejorando el control del perfil de temperatura a lo largo del barril de la extrusora mediante el control local de las zonas de calentamiento, lo que incide en la homogeneidad del material extruido.

Para asegurar el aumento de la calidad en Cipet (2012), Plastics Europe (2012), Issa & Spalding (1972), Smith (1969), Tadmor *et al.* (1974) y Bezanson & Harris (1986) se plantea que se debe controlar las temperaturas en las diferentes zonas de la extrusora, así como la presión y la temperatura en el molde o dado de la misma. Se asegura, además, en las mismas fuentes, que hay cierta dependencia de tales variables de proceso de la velocidad del tornillo sin fin, la misma que debe establecerse mediante el control de la velocidad del motor, mecánicamente unido con el tornillo sin fin.

Así, el problema actual a resolver es el diseño de un controlador multivariable que garantice mantener los valores de las variables, temperatura en las zonas de precalentamiento y fusión del plástico y la presión y temperatura en el molde independientemente del valor de velocidad del tornillo, las variaciones del material a fundir y extrusar y la interacción entre las temperaturas de las primeras zonas de calentamiento de la extrusora.

Se esperan obtener los resultados siguientes: el rango de funcionamiento adecuado en el control de las variables temperatura, y velocidad; el control difuso multivariable con desacoplamiento difuso utilizando el modelo simple de la extrusora; el control difuso multivariable adaptativo utilizando el modelo simple de la extrusora; y, las pruebas por simulación y el análisis comparativo de los controladores diseñados.

Por lo tanto, se ha planteado como objetivo general: Diseñar un controlador difuso multivariable adaptativo para el control de la temperatura y la velocidad considerando los efectos de perturbaciones no medibles en la velocidad del tornillo de la extrusora empleando el ayudante de Simulink para programar los sistemas de inferencias difusos.

Así mismo, los siguientes objetivos específicos: Diseñar un controlador difuso multivariable para el control de las temperaturas de una extrusora modelo simple con tres zonas de calentamiento y una zona independiente en el dado o molde de la extrusora para seleccionar aquel que presente publicada la mayor cantidad de información sobre el modelo matemático de la extrusora; Diseñar la base de reglas para el controlador difuso adaptativo del modelo de extrusora simple anteriormente mencionado; Comparar los resultados entre los controladores diseñados para elegir el de mejores prestaciones; y, Aumentar la calidad de los productos obtenidos por extrusión de plástico mejorando el control del perfil de temperatura a lo largo del barril de la extrusora mediante el control local de las zonas de calentamiento, lo que incide en la homogeneidad del material extruido y controlar la velocidad del tornillo sin fin bajo las influencias de los lazos de control de las temperaturas.

Para llevar a cabo el estudio del comportamiento de los procesos de calentamiento/enfriamiento en las extrusoras en general, se aplican varios métodos de la Metodología de la Investigación como son:

El Método cuantitativo que emplea los datos detallados obtenidos mediante pruebas simuladas (investigación participativa) y los principios teóricos,

El Método cualitativo: mismo que se implementa mediante la observación e interpretación de resultados obtenidos mediante la simulación del proceso de extrusión, empleando modelos matemáticos y teorías relacionadas al control de las zonas de calentamiento en extrusoras.

Así, el diseño del control de las temperaturas en la extrusora de plástico es un desafío de interés actual que requiere investigar los principios del control moderno, analizar el problema mediante simulación digital y adaptar los enfoques de control teóricos a las soluciones de control estándar.

Las soluciones de control estándar son más sencillas de implementar, lo suficientemente simples como para ser entendidas por los ingenieros de control y observables por los diseñadores.

El diseño del control de temperatura para una extrusora es un desafío de interés que requiere investigar los principios de la Teoría del Control Moderno, analizar el problema mediante simulación digital y adaptar los enfoques de Control Teóricos a las soluciones de Control Estándar.

Algunos de los desafíos que debe encarar el control de extrusoras se numeran a continuación como problemas y requisitos de más interés (Costin, *et al.*, 1982).

- El perfil de temperatura ajustado a lo largo del “barril” es importante para obtener una calidad constante del material plástico, misma que está referenciada con el cuarto objetivo específico. Las desviaciones de temperatura durante el proceso de extrusión no deben exceder unos pocos grados centígrados, de lo contrario la calidad del polímero podría disminuir.
- Normalmente hay al menos 10 y un máximo de 30 zonas de calentamiento que interactúan entre sí por conducción térmica sobre el tornillo extrusor y los componentes de su cuerpo. La interacción es fuerte también debido al flujo de masa fundida a través de las zonas de calentamiento. La interacción está contemplada en el primer objetivo específico al diseñar controladores para modelos matemáticos que constituyen sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO).
- La velocidad del tornillo extrusor tiene una fuerte influencia en la temperatura de la fusión del plástico la cual está controlada mediante un lazo de control independiente que rechace las perturbaciones de los lazos de control de temperatura.
- Los parámetros del controlador deben ajustarse continuamente, ya que las características en la zona de calentamiento cambian con la tasa de producción, con la composición del material plástico, con los cambios del voltaje de alimentación, y con otras variaciones del medio ambiente. Así, el requerimiento de un sistema de control adaptativo para este tipo de máquina es una verdadera necesidad.
- Algunos lazos de control no solo necesitan calefacción por calentadores eléctricos, sino también enfriamiento mediante algún fluido de trabajo, como son el agua, aceite o flujo de aire. La conmutación entre la calefacción y el enfriamiento es una tarea sofisticada que, si no se hace de manera óptima, puede causar una alta pérdida de energía al cambiar entre uno y otro modo de operación.

Con base en el listado anterior de posibles requerimientos, las principales exigencias al sistema de control de temperatura se resumen a continuación:

- Generalmente el sistema de control debe controlar hasta 30 zonas de temperaturas, considerando que cada zona incluye un calentador, un enfriador (aire o líquido) y un sensor de temperatura.
- Cada zona de temperatura debe ser controlada por su propio controlador PID, que deben ajustarse en la primera puesta en marcha de la extrusora de plástico.
- Debe implementarse la adaptación continua de los parámetros del controlador PID durante el funcionamiento normal de la extrusora.

Ha habido muchos intentos en la literatura, para construir modelos dinámicos que reflejen la dependencia entre la variable controlada “presión de fusión” y la variable manipulada “velocidad del tornillo sin fin”. Sin embargo, pocos de los autores han probado sus modelos o sus esquemas de control al intentar regular una extrusora real.

En los dos artículos que se ha considerado de mayor influencia en el desarrollo de esta investigación (Costin, *et al.*, 1982; Dastych, *et al.*, 1988), se proporcionan diferentes estructuras para modelar matemáticamente los procesos que ocurren en una extrusora y la relación entre la temperatura en las zonas de calefacción y la velocidad del tornillo sin fin.

A continuación, se exponen de manera simple dos de las metodologías de diseño de controladores que se han propuesto para el control de la temperatura y la velocidad del tornillo sin fin de una extrusora.

Estrategia de control proporcional-integral-derivativo al control de la extrusora de plástico

El perfil de temperatura a lo largo del “barril” calentado tiene una gran influencia en los perfiles de presión y temperatura a lo largo del tornillo del extrusor y en el “dado” de salida. La temperatura en el “dado” de salida es importante en la fabricación de plásticos.

El modelo matemático que se ha escogido para desarrollar el controlador difuso adaptativo se presenta en Dastych *et al.* (1988). En este artículo se trata de controlar una extrusora que presenta 7 zonas de calentamiento, pero para las aplicaciones industriales estándares solo se controlan 4 empleando controladores PI.

En dicho artículo se llevó a cabo una identificación de las dinámicas presentadas por las temperaturas en las cuatro zonas de calentamiento y en la velocidad del tornillo sin fin mediante el uso del Método de Máxima Verosimilitud.

El modelo final presentado fue un modelo MIMO reducido a 3 entradas: las tres variables de los actuadores y 3 salidas que son las temperaturas en las zonas 3 y 4 por ser las zonas dominantes de la temperatura de la matriz y la velocidad del tornillo sin fin de la extrusora.

Así, se tendrá que emplear el método de diseño de controladores PID para los sistemas de múltiples entradas y múltiples salidas.

El problema de diseño del controlador del tipo PID para los sistemas MIMO fue tratado por Jin, *et al.* (2013). El método que se expone es el siguiente:

Para la función de transferencia de un sistema TITO:

$$G(s) = \begin{pmatrix} g_{11}(s) & g_{12}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) \end{pmatrix} \quad (1.1)$$

Se diseña un controlador como desacoplador estático combinado con un controlador PID descentralizado con ponderación del punto de operación.

La ley de control se puede escribir como sigue:

$$\begin{pmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \bar{c}_1(s)Y_{r1}(s) - c_1(s)Y_1(s) \\ \bar{c}_2(s)Y_{r2}(s) - c_2(s)Y_2(s) \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

Siendo U la señal de control, Y la salida del proceso y Yr la referencia. El desacoplador

$$D = \begin{pmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

Es una matriz constante. El controlador PID $\bar{c}_i(s)$ es diferente del controlador $c_i(s)$ para permitir la ponderación del punto de operación (Jin, *et al.*, 2013). Estos controles son de la forma siguiente:

$$c_i(s) = k_{Pi} + \frac{k_{Ii}}{s} + k_{Di}s \quad (1.4)$$

$$\bar{c}_i(s) = b_i k_{Pi} + \frac{k_{Ii}}{s} \quad (1.5)$$

Siendo b_i la ponderación del punto de operación la cual en la práctica es generalmente cero.

Si se supone que $k_{Di} = 0$ entonces el control es realizado con un controlador PI.

El desacoplador estático se calcula como sigue:

$$D = G^{-1}(0) = \frac{1}{\det G(0)} \begin{pmatrix} g_{22}(0) & -g_{12}(0) \\ -g_{21}(0) & g_{11}(0) \end{pmatrix} \quad (1.6)$$

Se supone que $G(0)$ es no-singular. Entonces la función de transferencia del sistema desacoplado es $Q(s) = G(s)D$ donde las entradas de la matriz Q son:

$$\begin{aligned} q_{11}(s) &= \frac{g_{11}(s)g_{22}(0) - g_{12}(s)g_{21}(0)}{\det G(0)} \\ q_{12}(s) &= \frac{g_{12}(s)g_{11}(0) - g_{11}(s)g_{12}(0)}{\det G(0)} \\ q_{21}(s) &= \frac{g_{21}(s)g_{22}(0) - g_{22}(s)g_{21}(0)}{\det G(0)} \\ q_{22}(s) &= \frac{g_{22}(s)g_{11}(0) - g_{21}(s)g_{12}(0)}{\det G(0)} \end{aligned} \quad (1.7)$$

En Jin *et al.* (2013) se demuestra que para pequeños valores de la variable s el sistema desacoplado puede aproximarse como sigue:

$$Q(s) \approx \begin{pmatrix} 1 & k_{12}s \\ k_{21}s & 1 \end{pmatrix} \quad (1.8)$$

Siendo k_{12} y k_{21} ciertas constantes fácilmente definidas en los casos concretos. Entonces para las bajas frecuencias las entradas en la diagonal secundaria, son proporcionales a la frecuencia

$j\omega$, y si el ancho de banda de los controladores PID descentralizados es pequeño entonces los términos fuera de la diagonal principal son muy pequeños y el sistema queda desacoplado.

El sistema a lazo cerrado se puede describir como sigue (Jin, *et al.*, 2013):

$$Y(s) = \begin{pmatrix} h_{11}(s) & h_{12}(s) \\ h_{21}(s) & h_{22}(s) \end{pmatrix} Y_r(s) \quad (1.9)$$

Finalmente en la misma fuente se llega a la conclusión que la matriz $\bar{H}(s)$ puede expresarse como:

$$\bar{H}(s) = \begin{pmatrix} \frac{q_{11}(s)\bar{c}_1(s)}{1+q_{11}(s)\bar{c}_1(s)} & \frac{q_{12}(s)\bar{c}_2(s)}{(1+q_{11}(s)\bar{c}_1(s))(1+q_{22}(s)\bar{c}_2(s))} \\ \frac{q_{21}(s)\bar{c}_1(s)}{(1+q_{11}(s)\bar{c}_1(s))(1+q_{22}(s)\bar{c}_2(s))} & \frac{q_{22}(s)\bar{c}_2(s)}{1+q_{22}(s)\bar{c}_2(s)} \end{pmatrix} \quad (1.10)$$

Como se observa los elementos en la diagonal principal son los sistemas a lazo cerrado desacoplado SISO y los que se encuentran fuera de la diagonal principal de \bar{H} dicen a qué interacción conducirán los diseños SISO.

Estrategia de control difuso en el control multivariable de la temperatura y la velocidad de la extrusión de plástico

Debido a que la extrusión de plástico presenta algunas variables, tales como la temperatura en las diferentes zonas de calentamiento, la variación de la presión que ejerce el tornillo sin fin sobre el “dado”, la calidad del material empleado a extrudir, etc., así como que el cambio de carga por la demanda de la producción, el sistema de extrusión es en realidad un sistema complejo, multivariable, con fluctuaciones y muestra acoplamientos entre las variables a controlar, con diferentes escalas de tiempo, con parámetros que presentan incertidumbre en sus valores, la extrusora es un proceso difícil de controlar.

Como se sabe, los controladores clásicos requieren de un modelo matemático mediante el cual ajustar sus ganancias de control proporcional, derivativo e integral. Sin embargo, obtener un modelo matemático por los primeros principios es una tarea difícil.

Es por esto que el control PID tradicional no puede cumplir con la precisión del control y los requisitos de rapidez correspondientes. En auxilio de los diseñadores de controladores viene la teoría de control PID adaptable difusa como una nueva teoría que combina el control PID tradicional y la lógica difusa (Abeykoon, 2016), que no requiere, en principio, del modelo matemático exacto del objeto controlado y proporciona la adaptación.

Este es entonces el método de control adecuado para el sistema de control de las temperaturas en las zonas de mayor influencia en las extrusoras y de la velocidad del tornillo sin fin.

El controlador PID autoajutable difuso está compuesto por un controlador PID cuyas ganancias pueden ser ajustadas y un controlador difuso. El núcleo es el controlador difuso.

Contiene la difusificación (convertir los datos ciertos en difusos), la inferencia difusa, la desdifusificación y la cuantificación de la salida.

La lógica difusa se compone de reglas que pueden asignar una entrada a los universos de discurso de valores puntuales dentro de subconjuntos difusos a otro espacio de salida de la variable designada.

En la aplicación de ingeniería, la lógica difusa tiene los siguientes caracteres:

1. La lógica difusa es flexible;
2. La lógica difusa se basa en un lenguaje natural, y el requisito para la lectura intensiva de datos no es muy alto;
3. La lógica difusa puede aprovechar al máximo la información de los expertos;
4. La lógica difusa es fácil de combinar con la técnica de control tradicional (Jin, *et al.*, 2013).

El controlador PID autoajustable difuso, toma las variables e (el error del lazo de control) y Δe (la tasa de error) como entradas. Usando el método de razonamiento difuso, ajusta los parámetros PID (K_p , K_i , K_d) que pueden cumplir los requisitos estipulados para e y Δe y autoajustar los parámetros del PID en diferentes momentos. Entonces el cambio de los parámetros PID en línea, usando las reglas difusas, es función que cumple el controlador PID difuso con reconfiguración automática.

La estructura principal del controlador difuso adaptativo se muestra en la figura 1.2, donde se tiene:

- a. El sistema a lazo cerrado característico para un sistema SISO
- b. El sistema de inferencia difusa que ajusta las ganancias del controlador PID.

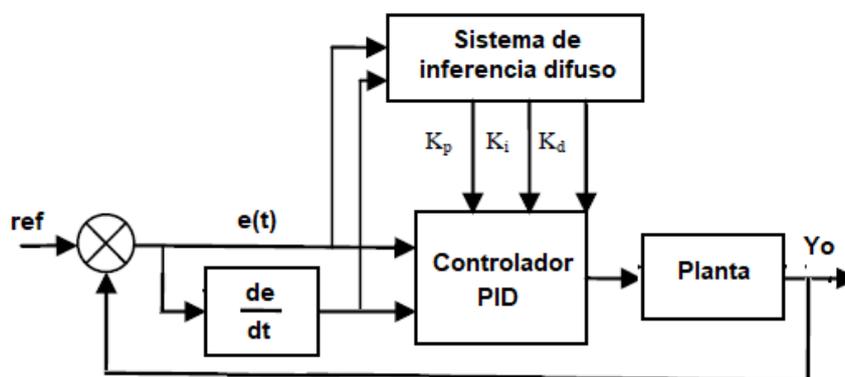


Figura 1.2. Composición del controlador PID difuso adaptativo (Jin, *et al.*, 2013).

La teoría del funcionamiento de un sistema de inferencia difusa, así como la manera de seleccionar los universos de discurso, los conjuntos difusos, la dimensión de la base de tales conjuntos, los valores lingüísticos, el solapamiento entre las funciones de pertenencia, etc. se

encuentran desarrollados en las tesis de maestría (Abeykoon, 2016; Skogestad & Postlethwite, 2001; Espinoza, 2018), por lo que en esta metodología no se exponen. Las mismas son también fundamentos a seguir en el desarrollo de esta investigación.

Se utilizará la técnica de simulación computacional y análisis de los resultados utilizando el software Matlab. Se comparan técnicas de control tales como el control multivariable del tipo PID y el controlador difuso multivariable adaptativo con su posterior análisis de resultados. El soporte programático para la solución de las estrategias de control se compone del programa MATLAB y su herramienta de simulación SIMULINK.

En esta investigación se propone el diseño de varios controladores difusos entre los cuales se tienen el controlador difuso multivariable con desacoplamiento analítico, el controlador difuso con desacoplamiento difuso y el controlador adaptativo el cual ajusta los valores de las ganancias del controlador PID “on line”, de manera que proporcione una dinámica que satisfaga los requerimientos de diseño en presencia de perturbaciones no medibles debido al cambio de materia prima y a la incertidumbre de los parámetros de la planta.

El proyecto a desarrollar en esta investigación prevé el alcance siguiente:

- Identificar por simulación el rango de funcionamiento adecuado en el control de las variables de temperatura de las zonas 3 y 4 considerando variaciones de los parámetros de la planta dentro de los límites $K_{nom} - 50, K_{nom} + 100$ y $T_{nom} - 100, T_{nom} + 70$.
- Demostrar el desempeño adecuado de los controladores difusos multivariados por simulación utilizando el modelo simple 3x3 de la extrusora reducido a 2x2 para las zonas de temperatura.
- Presentar los resultados obtenidos de las pruebas por simulación y el análisis comparativo del desempeño de los controladores diseñados.

En la presente investigación no se podrán implementar los controladores diseñados. Se toman como referencias las extrusoras de plástico simples cuyos modelos matemáticos se obtuvieron de Dastych *et al.* (1988) y Astrom *et al.* (2001).

Capítulo 1

Control de extrusoras

En las últimas décadas se han publicado muchos artículos sobre la aplicación del control de procesos a las extrusoras de plastificación. Muchos productos comerciales son extruidos, y los plásticos encuentran constantemente nuevas aplicaciones.

Con especificaciones a los productos más exigentes y el aumento constante del precio de los polímeros basados en el petróleo, la necesidad de minimizar las fluctuaciones en las condiciones de operación de la extrusora se vuelve crucial. Además, para ciertos polímeros, la extrusora debe operarse en condiciones controladas con precisión para evitar la degradación del plástico.

Esa realidad orienta hacia el empleo de controladores inteligentes adaptativos para obtener mejores prestaciones en la extrusora de un solo tornillo sin fin. Se comienza por estudio del funcionamiento de una extrusora de ese tipo, las relaciones entre las variables del proceso. Sigue el análisis de algunos de los modelos presentados en la bibliografía y por último se hace una revisión de la actualidad del control de las extrusoras por artículos publicados.

1.1 Funcionamiento de extrusoras

Los primeros extrusores aparecieron en Alemania e Italia en 1935. Hoy hay muchos productores diferentes de extrusoras de plástico en el mercado (Espinoza, 2018). Algunos de ellos se desarrollan sus propias soluciones de control, mientras que otras emplean sistemas de control llave en mano de diferentes empresas. Hoy en día, los sistemas de control llave en mano más conocidos para extrusoras de plástico son producidos por Invensys Eurotherm (Barber-Colman, 2012), Siemens (2012), Rockwell Automation (2012) y Moog (2012).

1.1.1 Breve descripción del funcionamiento de las extrusoras

Se explica el funcionamiento tomando como base el esquema mostrado en la figura 1.3. La composición de la extrusora es: barril de la extrusora, dentro del barril se tiene el tornillo sin fin cuya forma es especial, la matriz o dado al final del barril, el accionamiento de motor principal y el motor, un baño para el enfriamiento de la manguera extruida, aire a chorro y el mecanismo de recogida para el enrollamiento de la manguera. A lo largo del barril se tienen distribuidos los medios técnicos de automatización de la extrusora, como son los sensores-transmisores de temperatura y presión, los controladores de temperatura, de presión y de velocidad.

Acompañan a la extrusora dos sistemas: el primero el sistema de cómputo y el segundo que sirve de interface entre la instrumentación instalada y el sistema de cómputo y la aplicación del algoritmo de control secuencial.

El material termoplástico en forma de perlas en bruto se alimenta por una tolva montada en la parte superior del barril de la extrusora ver figura. El material plástico se transporta a través del barril mediante un tornillo sin fin. El barril se divide en varias zonas de calentamiento (típicamente 10 o más). Las temperaturas de referencia a lo largo del barril (tornillo) aumenta gradualmente (desde la tolva hasta el final) para lograr la fusión gradual de las perlas de plástico. El control de temperatura asegura un material plástico de mayor calidad (Spalding & Hyun, 2003).

Además de los calentadores, el material plástico se calienta indirectamente por fricción y la presión producida por el tornillo. A veces se debe proporcionar un enfriamiento uniforme para proteger al material plástico contra el sobrecalentamiento.

Las temperaturas de referencia típicas dentro del barril, durante la producción están entre 200°C y 275°C. Los productos plásticos moldeados dependen principalmente del diámetro de la boquilla (Strmcnik & Juricic, 2013).

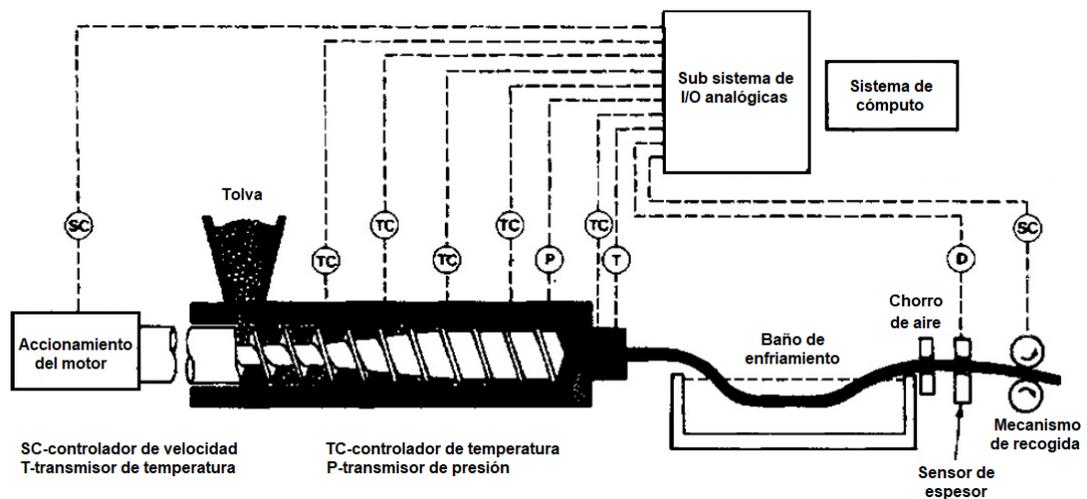


Figura 1.3. Esquema de la extrusora simple (un solo tornillo).

El uso de controladores lógicos programables modulares estándar (PLC) proporciona una solución de bajo costo. La calidad y la disponibilidad de los PLC producidos en masa son mayores que los de los sistemas de control dedicados. Estas soluciones basadas en PLC proporcionan una gran flexibilidad para los usuarios, especialmente para los desarrolladores que pretenden hacer máquinas no estándar con características no estándares (Costin, 1982).

Otras de las ventajas del empleo de los PLC son: los algoritmos se pueden transferir a diferentes plataformas, según la programación en lenguaje C, que son capaces de descargar y ejecutar programas, de este modo el usuario final no depende de un solo proveedor. El hardware puede ser seleccionado para satisfacer las necesidades técnicas a un costo aceptable y para el

control industrial de uso general. La solución basada en PLC también hace atractiva la actualización de máquinas antiguas donde se exige flexibilidad incluso más que para las máquinas nuevas.

1.1.2 Relaciones entre las variables de las extrusoras simples

Las extrusoras continuas de un solo tornillo son las más utilizadas en la industria del plástico. En Spalding & Hyun (2003) se afirma que varios investigadores intentaron controlar la temperatura de fusión y la presión como una manera indirecta de controlar la viscosidad del fundido, debido a las dificultades encontradas en el monitoreo de la viscosidad en tiempo real. El control de temperatura del fundido ayuda a evitar las fluctuaciones de la viscosidad y la degradación térmica del material.

Costin *et al.* (1982) obtuvo resultados que indican que la función de transferencia que relaciona la entrada de velocidad del tornillo y la presión sobre el material fundido muestra una constante de tiempo muy pequeña, alrededor de 0.2 segundos en un rango de velocidad alrededor de 50 rpm para el polietileno de baja densidad LDPE DNDY 2530.

La tendencia de la industria es operar líneas de fabricación a tasas cada vez más altas. La operación de un tornillo de una sola pieza convencional a velocidades relativamente altas causará que algunos sólidos se descarguen con el producto extruido y, por lo tanto, mal mezclado.

Los polímeros fundidos se mezclaron muy bien a velocidades de tornillo de hasta alrededor de 120 rpm (Parnaby, *et al.*, 1975), pero los procesos que operan a altas velocidades siempre deben considerar un diseño de alto rendimiento para mitigar los problemas de mezcla debido a una fusión deficiente.

Finalmente, en Parnaby *et al.* (1975) se plantea que las variaciones en la presión y, por lo tanto, en la producción se producen constantemente debido a las variaciones en la materia prima y en el proceso, afirma, además que, la velocidad del tornillo es generalmente la única variable que puede ser manipulada que tiene una respuesta rápida y que, por lo tanto, puede utilizarse para controlar continuamente los cambios a corto plazo en las condiciones del proceso.

El método más efectivo para controlar las fluctuaciones de la presión a corto y largo plazo es implementar un sistema de realimentación a lazo cerrado que ajuste la velocidad del tornillo para mantener una presión constante sobre el molde de la extrusora.

1.2 Análisis de los modelos matemáticos publicados de las extrusoras

Los modelos matemáticos publicados relacionan la interacción existentes entre las variables principales de una extrusora (flujo de salida Q , calidad del producto, temperatura de la mezcla T_m , presión de la mezcla P_m , velocidad del tornillo ω , temperaturas del barril y del tornillo, perturbaciones y variaciones del molde) independientemente del tipo de polímero empleado, de

la variación de los polímeros usados durante el proceso de producción, de la relación largo/diámetro del tornillo sin fin de la extrusora, etc. las variables medibles y no medibles de una extrusora se pueden relacionar funcionalmente de la figura 1.4.

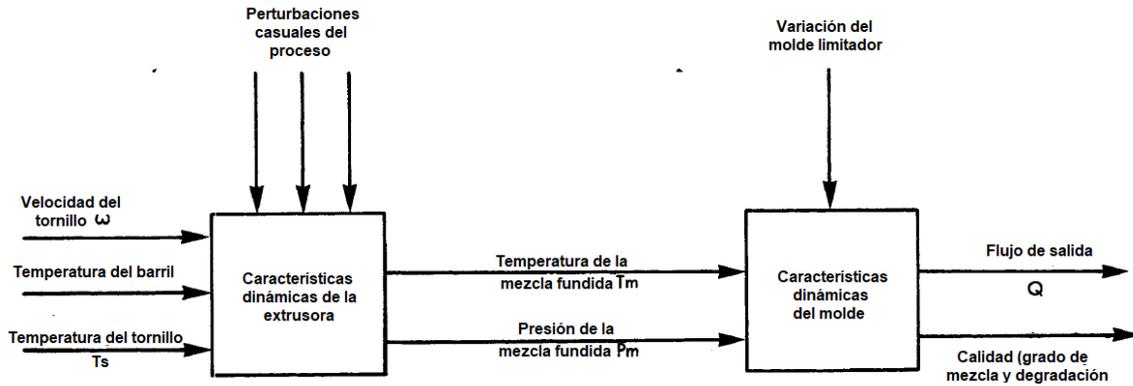


Figura 1.4. Diagrama en bloques del proceso de extrusión.

En Parnaby *et al.* (1975) y Kochhar & Parnaby (1977), se proporciona un modelo matemático en función de transferencia discreta para la señal de velocidad del tornillo como entrada señal de prueba y como señales de salida la temperatura del flujo fundido a medio camino entre las paredes del barril y la presión, misma que se reproduce en esta investigación.

$$T_d(k) = \frac{b_{0T} + b_{1T}z^{-1}}{1 + a_{1T}z^{-1} + a_{2T}z^{-2}} \omega(k - K_T) + \frac{c_{1T}z^{-1} + c_{2T}z^{-2}}{1 + d_{1T}z^{-1} + d_{2T}z^{-2}} \xi(k) \quad (2.1)$$

Dónde:

PARÁMETROS DE LA F.T. VELOCIDAD	PARÁMETROS DE LA F.T. RUIDOS
$a_{1T} = 0.4398 \pm 0.0418$	$d_{1T} = -0.5540 \pm 0.0015$
$a_{2T} = -0.2155 \pm 0.0876$	$d_{2T} = 0.4499 \pm 0.0024$
$b_{0T} = 0.3248 \pm 0.01225$	$c_{1T} = 0.3343 \pm 0.0088$
$b_{1T} = 0.1078 \pm 0.005995$	$c_{2T} = -0.2949 \pm 0.0023$
$b_{2T} = -0.0937 \pm 0.00532$	$K_T = 1$

De manera similar se determinaron los modelos en función de transferencia para la relación dinámica entre la velocidad y la presión de fusión, la principal diferencia está en la respuesta más rápida de la presión de fusión que la temperatura de fusión a los cambios en la velocidad del tornillo sin fin.

$$P_d(k) = \frac{b_{0P} + b_{1P}z^{-1}}{1 + a_{1P}z^{-1} + a_{2P}z^{-2}} \omega(k - K_P) + \frac{1 + c_{1P}z^{-1}}{1 + d_{1P}z^{-1}} \xi(k) \quad (2.2)$$

PARÁMETROS DE LA F.T. VELOCIDAD	PARÁMETROS DE LA F.T. RUIDOS
$a_{1P} = -0.5286 + 0.0038$	$d_{1P} = -0.5879 + 0.0016$
$a_{2P} = 0.5198 + 0.0062$	$c_{1P} = 0.2876 + 0.0013$
$b_{0P} = 0.1072 + 0.0271$	$0 < K_P < 1$
$b_{1P} = -0.0093 + 0.0032$	

El análisis de estas funciones de transferencia (modelo entrada-salida) proporciona la información siguiente:

Para la presión ejercida sobre la matriz de salida del barril:

Sea $H(z)$ la función de transferencia que relaciona la velocidad del tornillo sin fin con la presión del polímero fundido y $N(z)$ la función de transferencia que relaciona el ruido con la presión, como se muestra en la figura 1.5.

Supóngase que la ganancia proporcional K_P en el lazo cerrado de control de la presión tenga las unidades $\left[\frac{rad/s}{kPa}\right]$, entonces, para un error de presión, la entrada a la planta viene expresada en unidades de velocidad. Considerando ruido nulo:

$$P(z) = \frac{H(z)K_P}{1+H(z)K_P} ref_p(z) \quad (2.3)$$

Con

$$G_{lcz}(z) = \frac{H(z)K_P}{1+H(z)K_P} \quad (2.4)$$

Siendo (1.6) la función de transferencia a lazo cerrado o la llamada función de sensibilidad complementaria.

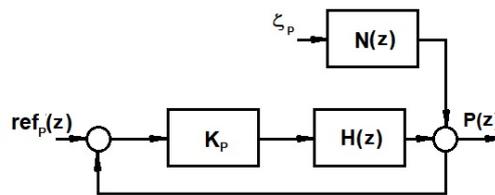


Figura 1.5. Diagrama en bloques del lazo cerrado para la presión con perturbación.

Análisis en el dominio del tiempo:

La respuesta a lazo cerrado para una variación de la presión, con una ganancia de controlador proporcional igual a $K_P = 210 \left[\frac{rad/s}{kPa}\right]$ se proporciona en la figura 1.6.

En la figura 1.6 se muestran dos respuestas al paso escalón unitario, la primera, en color negro, se corresponde con la respuesta del sistema a lazo cerrado considerándolo continuo y la segunda,

en color azul, es la misma respuesta, pero considerando el sistema discreto. Es evidente que para este valor de ganancia aún existe un error de establecimiento de 0.046 unidades de presión.

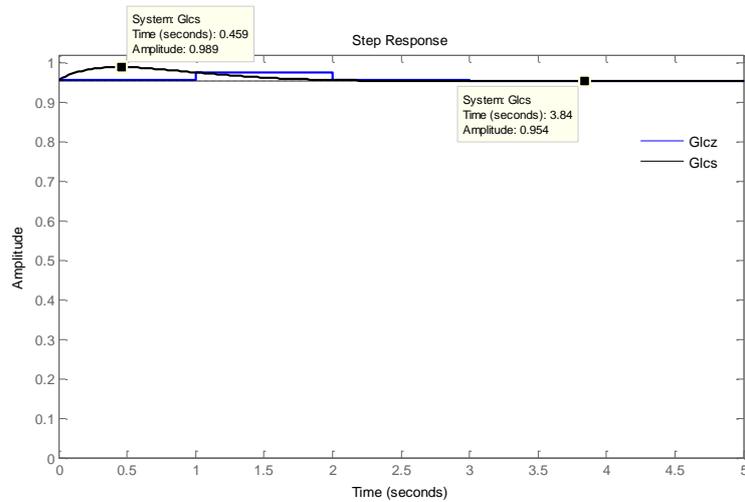


Figura 1.6. Respuestas al paso escalón unitario del lazo de control de la presión.

El análisis en el dominio de la frecuencia de un sistema de control digital es muy antiguo y completo para sistemas continuos, pero sus métodos de análisis son aplicables a los sistemas digitales o discretos. El estudio en el dominio de la frecuencia se basa en el diagrama de Bode (amplitud-fase) y los polos y ceros.

1- Diagrama de Bode

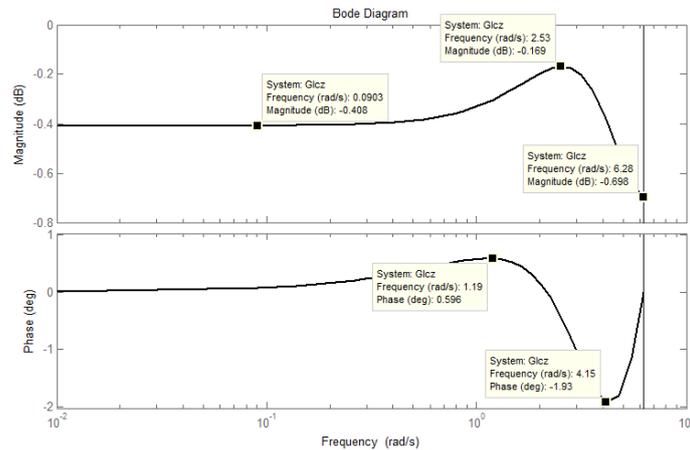


Figura 1.7. Diagrama de Bode a lazo cerrado para la presión.

2- Determinación de los polos y los ceros.

Para determinar los polos y los ceros de la función de transferencia discreta se acudió a la programación en MATLAB®

$$zsys = zp(h)$$

$$z_{\text{sys}} = \frac{0.1072 z (z - 0.08675)}{(z^2 - 0.5286z + 0.5198)}$$

```
p=[1 -0.5286 0.5198];
roots(p)
ans = 0.2643 + 0.6708i
      0.2643 - 0.6708i
```

Teniendo dos ceros: $z_{c1} = 0$; $z_{c2} = 0.08675$ y un polo complejo conjugado $z_p = 0.2643 \pm j0.6708$, todos dentro del círculo unitario.

Para la temperatura del polímero.

Análisis en el dominio del tiempo:

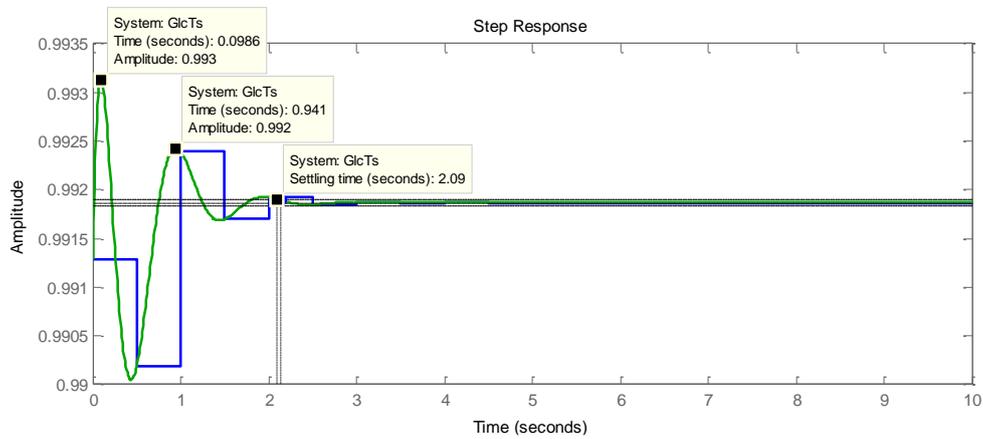


Figura 1.8. Respuestas en el dominio del tiempo continuo y discreto para el lazo cerrado de control de la temperatura con $K=350$.

El estudio en el dominio de la frecuencia se basa en el diagrama de Bode (amplitud-fase) y los polos y ceros.

1- Diagrama de Bode

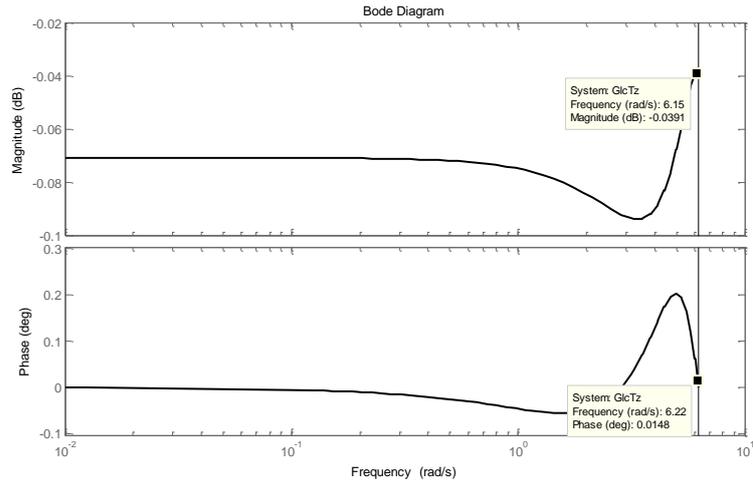


Figura 1.9. Diagrama de Bode a lazo cerrado para la temperatura.

1- Determinación de los polos y los ceros.

zsysT =

$$\frac{0.3248 z (z+0.3134)}{(z+0.7336) (z-0.2938)}$$

Sample time: 0.5 seconds

Como se observa, la planta (función de transferencia para la temperatura) tiene dos ceros: $z_{c1} = 0$; $z_{c2} = -0.3134$ y dos polos $z_{p1} = -0.7336$, $z_{p2} = 0.2938$ todos dentro del círculo unitario.

Del análisis presentado para el modelo matemático dado por (2.1) y (2.2) las funciones de transferencia discretas son estables y sin dificultad los valores de referencia para la presión y la temperatura pueden ser controlados.

Se pone de manifiesto que a pesar de indicarse cierto grado de interacción entre la presión y la temperatura el modelo matemático presentado no refleja la influencia entre los canales.

En Costin *et al.* (1982) se proporcionan otros modelos, para el proceso dinámico que ocurre en la extrusora. Con el fin de estimar la constante de tiempo del proceso y determinar la linealidad del sistema, se realizaron por los autores numerosas pruebas de pasos en la extrusora.

Las pruebas involucraron cambios en la velocidad del tornillo del extrusor, la variable manipulada real fue la señal enviada desde la computadora al controlador del motor del extrusor correspondiendo al rango de operación de 0 a 100 rpm, para el polímero DNDY.

Se detectó que hay una respuesta rápida de la presión, la cual parece completarse en un intervalo de muestreo.

Las constantes de tiempo estimadas fueron de 0.2 s para la presión y de 20 s para la temperatura. Las ganancias, promediadas para el estado estacionario para la presión y la temperatura fueron de 110 kPa/M.P.² y 0.28°C/M.P., respectivamente.

Las funciones de transferencia se presentan en las ecuaciones 2.3 y 2.4 y corresponden a modelos de primer orden con ganancia, un polo, sin retardo de transporte.

$$T(s) = \frac{0.28}{20s+1} U(s) \quad (2.3)$$

$$P(s) = \frac{110}{0.2s+1} U(s) \quad (2.4)$$

Se informa la realización de otros experimentos a diferentes velocidades del tornillo sin fin y se llega a la conclusión que los procesos de la temperatura y la presión son lineales por tramos, lo cual requiere el reajuste de las ganancias del controlador o un controlador adaptativo.

Por otro lado, con el fin de caracterizar el proceso ante pequeñas perturbaciones en la calidad del polímero se realizaron cambios del tipo de polímero durante el funcionamiento de la extrusora utilizado en la extrusora. Este cambio provocó un proceso transitorio de segundo orden en las respuestas de la presión y la temperatura.

Se usaron tres tipos de polímeros cuyas características se dan en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 *Características de los polímeros en experimentación*

Polímero	Índice de fundición	Gravedad específica
DFDQ 4400	20.0	0.9175
DNDY 2530	1.7	0.920
DFDY 6600	0.22	0.920

En Dastych *et al.* (1988) se presenta otro modelo matemático, mismo que proporciona las respuestas presentadas en la figura 1.10. Como se observa este modelo matemático es un modelo de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) y es el modelo base de esta investigación. El análisis del mismo se realizará en 1.3.1.

² M.P. (motor power) referenciada así en el artículo como “la salida del computador”.

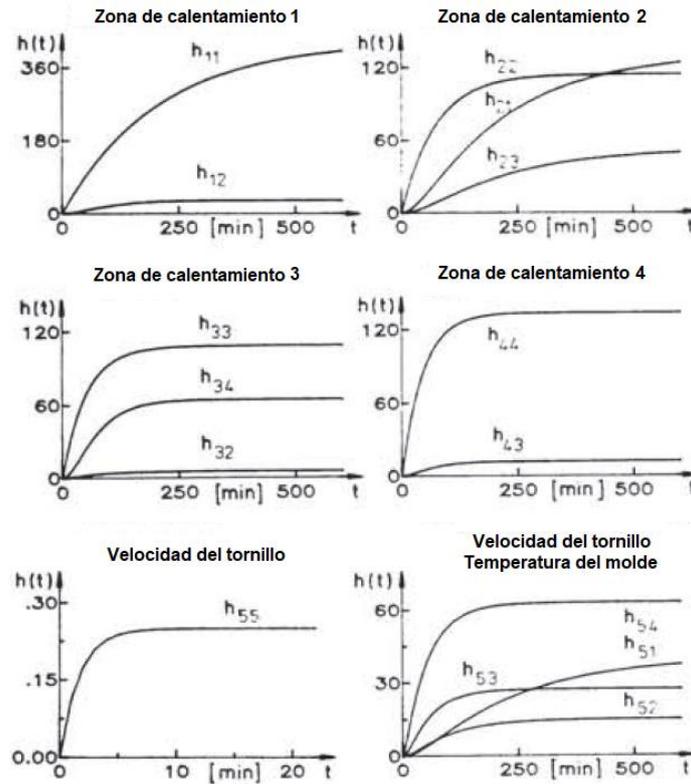


Figura 1.10. Resultados principales de la extrusora identificadas en Dastych *et al.* (1988).

Los resultados obtenidos en el dominio de la frecuencia se proporcionan en la figura 1.11.

En Rodríguez *et al.* (2004) se presenta un modelo matemático MIMO dado como matriz de funciones de transferencia en tiempo continuo, mismo que se da a continuación. Este modelo se obtuvo mediante identificación de una extrusora cuyas características no son proporcionadas en el artículo.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{0.05299}{s^2+0.2s+0.05383} & \frac{0.492s}{10s^2+2.5s+0.4} \\ \frac{1.3s}{20s^2+6s+0.2} & \frac{0.7988}{22s^2+4s+0.8057} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Hasta aquí, se ha analizado algunos modelos matemáticos de extrusoras publicados en artículos de revistas de relevancia. En estos se pone de evidencia que es de suma importancia el control de la temperatura del polímero fundido, así como el control de la presión sobre la matriz ejercida mediante el tornillo sin fin.

Se pone de manifiesto además que mediante la regulación de la velocidad del tornillo es posible controlar la presión antes mencionada.

En lo que sigue se tratará de reflejar como se han desarrollado diferentes tipos de controladores para la regulación de las variables de interés en las extrusoras.

1.3 El control de extrusoras de plástico

En Subramanian *et al.* (2016) se plantea que en investigaciones recientes se han estudiado las aplicaciones de técnicas de identificación estocástica para construir los modelos entrada-salida o del tipo “función de transferencia” para la extrusora. En ellos se ha estudiado la relación entre la velocidad del tornillo y la presión y temperatura del dado, o sea se han relacionado como variable manipulada la velocidad del tornillo de la extrusora con la presión y con la temperatura en el dado.

Por otro lado, informa que los problemas de control más significativos resultaron debido al ruido de medición, mismo que apareció en el valor de frecuencia de la velocidad de rotación del tornillo.

En la actualidad, constantemente, los plásticos encuentran nuevas aplicaciones y por lo que muchos productos comerciales se extruden. Sin embargo, el precio de los polímeros a base de petróleo está en constante aumento, por lo que se vuelve crucial la necesidad de minimizar las fluctuaciones en las condiciones de operación de la extrusora, más aún con especificaciones del producto mucho más precisas.

La literatura sobre dinámica y control de extrusoras de plastificación ha sido revisada críticamente por Costin *et al.* (1982) y Parnaby *et al.* (1975), identificaron dos funciones de transferencia considerando; primero, la velocidad del tornillo como entrada y la presión del troquel como salida; y, segundo; la velocidad del tornillo como entrada y la temperatura de fusión como salida. En estos artículos se utilizaron las pruebas de paso escalón y con PRBS para obtener los modelos matemáticos mediante experimentación de la dinámica del proceso de la extrusora. Se informa que se compararon los controladores estándar proporcional-integral (PI) con un controlador adaptativo en línea: el regulador de autoajuste. Se estudiaron, finalmente, las variaciones en la calidad del plástico de alimentación introduciendo cambios del tipo pulso y paso escalón simulando cambios bruscos en la composición del polímero de entrada.

1.3.1 Modelo matemático seleccionado para representar la extrusora

El modelo matemático que se seleccionó para desarrollar este trabajo es el modelo expuesto en Jin *et al.* (2013), el cual se presenta a continuación.

$$G(s) = \begin{pmatrix} \frac{100}{125s+1} & \frac{60}{200s+1} & 0 \\ \frac{20}{110s+1} & \frac{130}{110s+1} & 0 \\ \frac{25}{120s+1} & \frac{70}{120s+1} & \frac{0.25}{2s+1} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

La primera columna de esta matriz pertenece a la primera entrada o variable manipulada que se denota como u_1 . La segunda columna tiene como entrada la segunda variable manipulada, que se denota como u_2 , y la tercera y última columna es gobernada por la última variable manipulada denotada como u_3 .

Por otro lado, la primera fila se corresponde con la variable controlada “Temperatura en la tercera zona de calentamiento” que se denota como T_{z3} , la segunda fila se corresponde con la variable controlada “Temperatura en la cuarta zona de calentamiento” que se denota como T_{z4} , y la tercera fila se corresponde con la variable controlada “velocidad del tornillo sin fin” que se denota como V_{TF} .

De tal manera que la matriz de funciones de transferencias expresa la siguiente relación: la variable manipulada u_1 incide sobre la variable manipulada T_{z3} , mediante la función de transferencia

$$g_{11}(s) = \frac{100}{125s+1} \quad (2.7)$$

La variable manipulada u_2 también incide sobre la variable manipulada T_{z3} , mediante la función de transferencia

$$g_{12}(s) = \frac{60}{200s+1} \quad (2.8)$$

De manera que la variable controlada T_{z3} se relaciona con ambas variables de control. Queda por determinar cuál de ellas influye más sobre esta variable controlada.

Por otro lado, la variable manipulada u_1 incide sobre la variable manipulada T_{z4} , mediante la función de transferencia:

$$g_{21}(s) = \frac{60}{200s+1} \quad (2.9)$$

La variable manipulada u_2 también incide sobre la variable manipulada T_{z4} , mediante la función de transferencia:

$$g_{22}(s) = \frac{130}{110s+1} \quad (2.10)$$

De igual manera la variable controlada T_{z4} se relaciona con ambas variables de control. Queda por determinar cuál de ellas influye más sobre la variable controlada T_{z4} .

Y por último de la matriz de funciones de transferencia (2.6) se observa que la variable V_{TF} recibe la influencia de todas las variables manipuladas, a saber, u_1 , u_2 y u_3 .

$$V_{TF}(s) = \frac{25}{120s+1} u_1(s) + \frac{70}{120s+1} u_2(s) + \frac{0.25}{2s+1} u_3(s) \quad (2.11)$$

Como antes, queda por determinar que variable tendrá la mayor influencia sobre la velocidad del tornillo sin fin.

Sin embargo, es evidente que en esta matriz existe una matriz interna de dimensión 2x2 que puede ser tratada como independiente de la variable manipulada u_3 y de la variable controlada V_{TF} por lo tanto hay un subsistema que se denota como $\tilde{G}(s)$ que se expresa como un subsistema MIMO interno, o sea:

$$\tilde{G}(s) = \left(\begin{array}{c|c} \frac{100}{125s+1} & \frac{60}{200s+1} \\ \hline \frac{60}{200s+1} & \frac{130}{110s+1} \end{array} \right) \quad (2.12)$$

Las variables manipuladas u_1 y u_2 actuarán entonces como perturbaciones sobre la velocidad del tornillo sin fin mediante las funciones de transferencias expresadas en (2.) y que actuarán como filtros pasa bajo dadas sus grandes constantes de tiempo.

En la figura 1.11 se muestran los diagramas de Bode de las tres funciones de transferencias actuando como filtros. Para las gráficas se han renombrado como sigue:

$$f_1(s) = \frac{25}{120s+1}$$

$$f_2(s) = \frac{70}{120s+1}$$

$$f_3(s) = \frac{0.25}{2s+1}$$

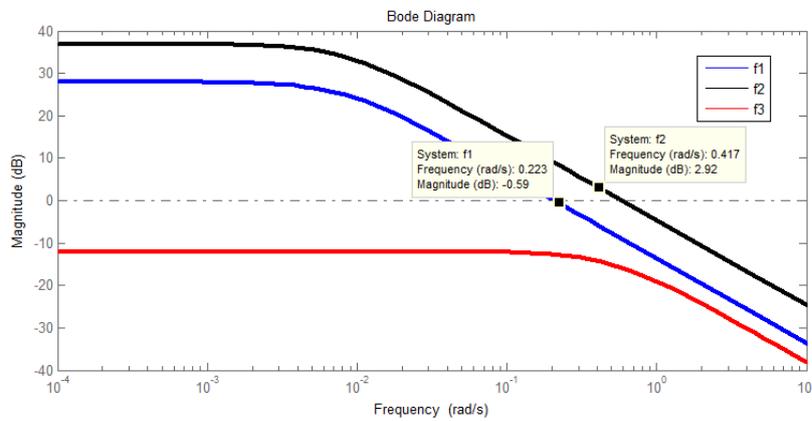


Figura 1.11. Diagramas de Bode para el canal de control de la velocidad del tornillo sin fin de la extrusora.

Capítulo 2

Diseño de los controladores multivariables de extrusoras simples

2.1 Determinación de los objetivos del control para una extrusora simple

En general, la función principal de un extrusor es entregar una masa fundida de polímero homogénea y bien mezclada a una temperatura y presión uniformes especificadas.

El principal parámetro de calidad del proceso de extrusión, el perfil de temperatura a lo largo del barril calentado, tiene una gran influencia en los perfiles de presión y temperatura a lo largo del canal del tornillo del extrusor y en la salida del dado (troquel).

Por ejemplo, lograr una buena estabilidad térmica es clave para formar productos extruidos de alta calidad, ya que las fluctuaciones térmicas pueden causar problemas en las propiedades físicas y mecánicas de los productos. Por lo tanto, el monitoreo continuo y preciso de las principales variables de proceso y también el uso de estrategias avanzadas de control de procesos son altamente invaluable para obtener resultados de fusión de buena calidad (Skogestad & Postlethwite, 2001).

Para cumplir con este requisito, las extrusoras están generalmente equipadas con una unidad eficiente y un sistema de alimentación, un tornillo diseñado para fundir y transportar el polímero y dispositivos tales como sensores de temperatura, de presión y de velocidad que son necesarios para monitorear el sistema y darle solución al problema de control.

Los estudios de simulación en Astrom & Johansson (2001) indicaron que la extrusora puede ser representada por las zonas de calor dominantes y la velocidad del tornillo sin fin.

La idea básica de control es desacoplar las zonas de calor dominantes con un sub controlador de 2 entradas 2 salidas. La estrategia de diseño para el sistema completo se basa en un modelo desacoplado.

Tanto la velocidad del tornillo como la temperatura de fusión están influenciadas por las perturbaciones principales que son: flujo no ideal, enfriamiento desigual y variación volumétrica del caudal.

Las respuestas en el dominio del tiempo del sistema MIMO (2.12) que caracteriza a la extrusora se muestran en la figura 2.1

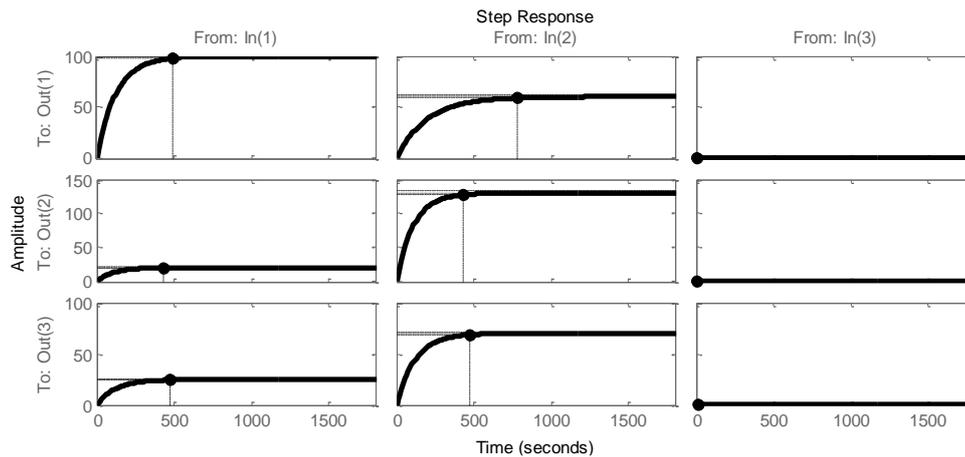


Figura 2.1. Respuestas en el dominio del tiempo del sistema MIMO extrusora.

El gráfico de la entrada 33 se muestra con más detalle en la figura 2.2. Como se observa la respuesta se desarrolla en valores muy pequeños, mismos que no pudieron ser mostrados en la figura 2.1 por tener, en las ordenadas, una escala general. Los gráficos de las entradas 13 y 23 se corresponden con la acción nula de la variable manipulada sobre las temperaturas de las zonas 3 y 4.

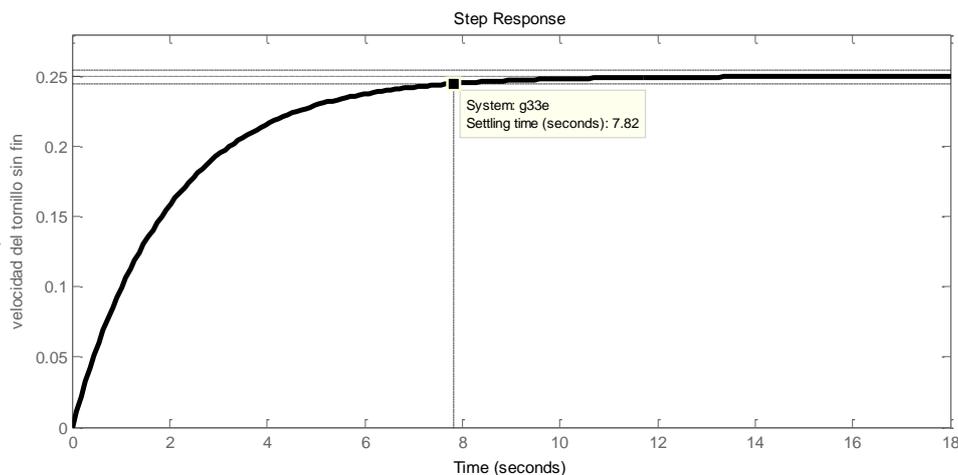


Figura 2.2. Respuestas de la velocidad del tornillo sin fin de la extrusora ante un salto escalón unitario en la entrada u_3 .

En lo que sigue se realiza un análisis minucioso del sistema 2x2 (2.bb) y el lazo de control de la velocidad del tornillo con el objetivo de tener unas pistas para el diseño del control desacoplado del tipo PI del proceso de extrusión.

Para ellos se plantean las siguientes tareas de análisis y diseño:

Analizar:

A) La matriz de funciones de transferencia,

➤ El arreglo RGA,

- los valores singulares,
- el número de condición,
- los ceros,
- el grado de influencia entre los canales.

B) Obtener:

- ✓ el pareo de variables
- ✓ el diseño del controlador PI desacoplador
- ✓ el diseño del lazo de control de velocidad

2.1.1 Arreglo RGA.

Proporciona dos tipos de información útil:

1. Medida de interacciones del proceso.
2. Recomendación sobre el mejor apareamiento de variables controladas y manipuladas.

Requiere conocimiento de ganancias en estado estacionario, pero no de la dinámica del proceso.

Empleando los comandos de MATLAB® proporcionados en el Anexo 1 para el sistema (2.bb) se calcula:

$$\text{lamda} = \begin{bmatrix} 1.1017 & -0.1017 & 0 \\ -0.1017 & 1.1017 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 \end{bmatrix}$$

La matriz de ganancias relativas debe cumplir dos condiciones importantes:

La suma de los elementos de cada columna de la matriz Λ tiene que ser igual a la unidad, lo mismo ocurre para cada fila. Lo antes expresado puede ser fácilmente comprobado.

El apareamiento recomendado para manipular las variables de control se realiza escogiendo los pares para los cuales el elemento de la matriz tiene el mayor valor positivo cercano a la unidad.

En Espinoza (2018) se recomienda valores no mayores a 5 y demuestra que en la mayoría de los casos el apareamiento empleando los elementos negativos cercanos a -1 conlleva a posibles inestabilidades en lazo cerrado, por lo tanto, los apareamientos que correspondan a valores negativos deben ser evitados. Observando la matriz Λ es recomendable controlar la temperatura de la zona 3 con la variable manipulada u_1 , la temperatura de la zona 4 con la variable manipulada u_2 y por último la velocidad del tornillo sin fin con la variable manipulada u_3 .

Como los elementos de la RGA son pequeños es de esperar que la planta tenga poca sensibilidad a las incertidumbres del modelo. Esto puede ser confirmado si se conoce el número de condición.

2.1.2 Valores singulares en estado estacionario

Cualquier matriz real G de orden $m \times n$ puede ser factorizada como sigue:

$$G = U\Sigma V^T$$

Donde la matriz Σ es una matriz diagonal cuyos elementos son los valores singulares dispuestos de mayor a menor en la diagonal principal:

$$\Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_r)$$

Los valores singulares son las raíces cuadradas positivas de los valores propios de $G^T G$ siendo $r =$ el rango de $G^T G$.

Las columnas de matrices U y V son ortonormales, de manera que los productos $UU^T = I$ y $VV^T = I$

Para calcular las matrices mencionadas MATLAB® proporciona el comando `svd(argumento matriz)`.

En el Anexo1 se encuentra programado este comando el cual proporciona para (G) los siguientes valores:

$$U = \begin{pmatrix} -0.7071 & 0 & 0.7071 \\ 0.7071 & 0 & 0.7071 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\Sigma = \begin{pmatrix} 1.2034 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$V = \begin{pmatrix} -0.7071 & 0 & 0.7071 \\ 0.7071 & 0 & 0.7071 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

2.1.3 Número de condición

El número de condición es una medida de la sensibilidad de las propiedades de la matriz de funciones de transferencia para valores dados de la frecuencia ω a las variaciones en los elementos individuales. Se calcula como la relación que existe entre el máximo valor singular y el mínimo, o sea:

$$cn = \frac{\bar{\sigma}}{\underline{\sigma}} \tag{3.1}$$

Donde

$\bar{\sigma}$ – Máximo valor singular

$\underline{\sigma}$ – Mínimo valor singular

Para calcular el número de condición se emplea el comando de MATLAB®:

```
c_n=cond(lamda)
```

```
c_n = 1.2034
```

En conjunto el arreglo RGA y la descomposición en valores singulares pueden indicar cuando el proceso está mal condicionado o cuando no, lo que indica la dificultad o facilidad de controlar el proceso respectivamente.

En este caso está bien condicionado ya que el número de condición es menor estricto que 10. Cuando el número de condición es muy grande un pequeño cambio en los valores de algún elemento de la matriz función de transferencia (en los parámetros de las funciones de transferencia de cada canal) hace que el proceso sea muy difícil de controlar (dicha matriz puede hacerse singular).

2.1.4 Análisis de los ceros del sistema MIMO

Como se indicó con anterioridad el sistema de 3x3 MIMO puede ser reducido a un sistema 2x2 y un sistema independiente donde las temperaturas de las zonas 3 y 4 influyen como perturbaciones al control de la velocidad del tornillo sin fin.

Para analizar los ceros del sistema 2x2 se recurre a la fórmula dada en Jin *et al.* (2013) y Espinoza (2018) que no es más que encontrar el valor de $s = z_c$ para el cual el determinante de la matriz de funciones de transferencia (1.1) se hace cero (la matriz de funciones de transferencia es una matriz singular), o sea:

$$\det(G(s)) = g_{11}(s)g_{22}(s) - g_{12}(s)g_{21}(s) = 0 \quad (3.2)$$

Considerando (2.7), (2.8), (2.9) y (2.10) y sustituyendo en (3.2) y resolviendo se tiene que:

$$\frac{100}{125s+1} \frac{130}{110s+1} - \frac{60}{200s+1} \frac{20}{110s+1} = 0$$

$$\frac{100}{125s+1} \frac{130}{110s+1} - \frac{60}{200s+1} \frac{20}{110s+1} = 0$$

$$\frac{13000}{(125s+1)(110s+1)} - \frac{1200}{(200s+1)(110s+1)} = 0$$

$$\frac{13000(200s+1) - 1200(125s+1)}{(110s+1)(125s+1)(200s+1)} = 0$$

$$\frac{2450000s + 11800}{(110s+1)(125s+1)(200s+1)} = 0$$

El subsistema MIMO de las zonas de calentamiento presenta un cero en el plano complejo s dado por:

$$s = -\frac{11800}{2450000} = -0.0048$$

Como se observa, el cero está en el semiplano izquierdo (LHP) lo cual indica que no hay respuestas inversas.

Los polos del subsistema quedan determinados como:

$$(110s + 1)(125s + 1)(200s + 1) = 0$$

$$s_{p1} = -\frac{1}{110} = -0.0091, s_{p2} = -\frac{1}{125} = -0.008, s_{p3} = -\frac{1}{200} = -0.005$$

Mismos que se encuentran, también, en el semiplano izquierdo del plano complejo y el modelo del proceso de calentamiento en las zonas 3 y 4 no será difícil de controlar.

2.1.5 Índices de interacción

Una medida del grado de interacción debiera indicar lo efectivo que puede ser emplear controladores independientes en cada canal y proporcionar alguna pista de como aparear las variables manipuladas con su correspondiente variable controlada.

Del subsistema para las zonas 3 y 4 se obtiene la submatriz:

$$H(s) = \begin{pmatrix} \frac{100}{125s+1} & \frac{60}{200s+1} \\ \frac{20}{110s+1} & \frac{130}{110s+1} \end{pmatrix}$$

De donde se puede obtener la matriz $H(0)$

$$H(s) = \begin{pmatrix} \frac{100}{125s+1} & \frac{60}{200s+1} \\ \frac{20}{110s+1} & \frac{130}{110s+1} \end{pmatrix}; H(0) = \begin{pmatrix} 100 & 60 \\ 20 & 130 \end{pmatrix}$$

El arreglo de ganancias relativas proporciona la siguiente matriz $\square \square$

$$\Lambda = \begin{pmatrix} 1.1017 & -0.1017 \\ -0.1017 & 1.1017 \end{pmatrix}$$

Indicando que la variable manipulada u_1 debe controlar la variable temperatura de la zona 3 y que la variable manipulada u_2 debe controlar la variable temperatura de la zona 4.

La descomposición en valores singulares proporciona las matrices:

$$U = \begin{pmatrix} -0.7071 & 0.7071 \\ 0.7071 & 0.7071 \end{pmatrix}; \Sigma = \begin{pmatrix} 1.2034 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}; V = \begin{pmatrix} -0.7071 & 0.7071 \\ 0.7071 & 0.7071 \end{pmatrix}$$

Siguiendo a Plastics injection molding machine manufacturers (s.f.), se encuentra las matrices de rotación y el ángulo θ , para ello se determina las matrices de rotación como sigue:

$$W_1 = u_1 v_1^T = \begin{pmatrix} -0.7071 \\ 0.7071 \end{pmatrix} (-0.7071 \quad 0.7071) = \begin{pmatrix} 0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

$$W_2 = u_2 v_2^T = \begin{pmatrix} 0.7071 \\ 0.7071 \end{pmatrix} (0.7071 \quad 0.7071) = \begin{pmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{pmatrix}$$

Ya que en un sistema desacoplado las matrices de rotación tienen todos sus elementos iguales a cero excepto uno de ellos y en estas matrices de rotación eso no se cumple, entonces el subsistema no está desacoplado.

Considerando que:

$$(w_{11})_1 = (w_{22})_2 = 0.5$$

Se tiene que:

$$\cos \theta_1 = (w_{11})_1 = 0.5$$

$$\cos \theta_2 = (w_{22})_2 = 0.5$$

Empleando la fórmula dada en *Plastics injection molding machine manufacturers (s.f.)* para el cálculo del ángulo θ

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^r (\sigma_i \cos \theta_i)^2}{\sum_{i=1}^r \sigma_i^2}} \quad (3.3)$$

Sustituyendo y resolviendo se tiene:

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{(1.2034 \cos 60)^2 + (\cos 60)^2}{(1.2034)^2 + 1}} = \frac{\sqrt{0.362 + 0.25}}{\sqrt{2.448}} = \frac{0.782}{1.565} = 0.4996$$

$$\cos \theta = 0.4996 \therefore \theta \approx 60^\circ$$

Ya que $\theta > 15^\circ$, como indica *Plastics injection molding machine manufacturers (s.f.)* estos resultados aconsejan la utilización de desacopladores.

2.1.6 Diseño de los controladores para el control de las temperaturas de las zonas 3 y 4 y la velocidad del tornillo sin fin.

Considerando lo anteriormente indicado se procede a diseñar el controlador por desacople, el mismo que puede ser obtenido a partir de Herrera (2018).

Para ello se presenta el desarrollo del controlador por desacoplamiento, el cual se diseña considerando las conexiones mostradas en la figura 3.3 donde por $d_{12}(s)$ y $d_{21}(s)$ se denota las funciones de transferencias del desacoplador a diseñar.

Entonces para tal notación de Herrera (2018) se tiene:

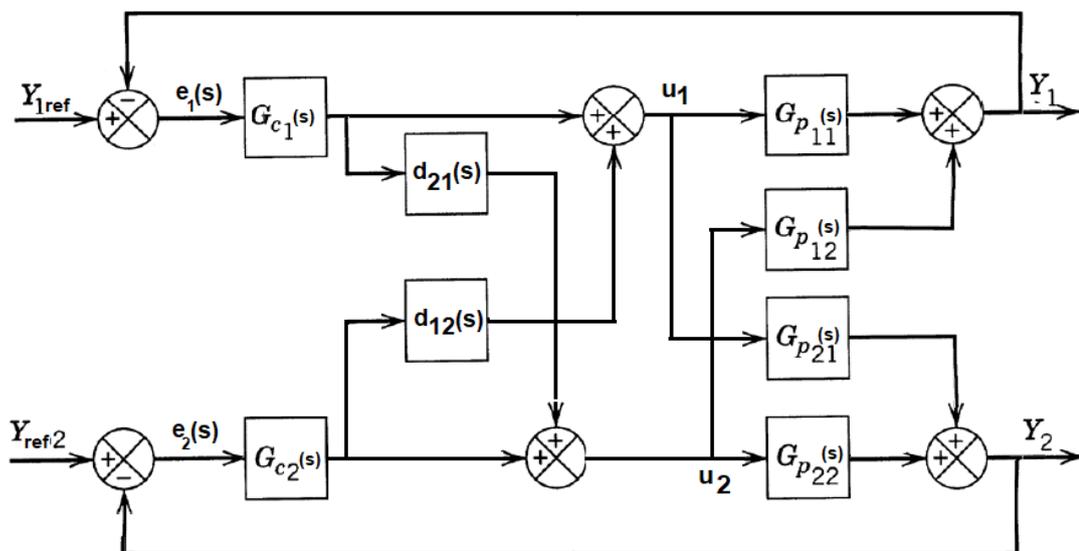


Figura 2.3. Estructura del control por desacoplamiento.

$$d_{12}(s) = -\frac{G_{p12}(s)}{G_{p11}(s)} \quad (3.4)$$

$$d_{21}(s) = -\frac{G_{p21}(s)}{G_{p22}(s)} \quad (3.5)$$

Considerando (2.7), (2.8), (2.9) y (2.10) sustituyendo en (3.4) y (3.5)

$$d_{12}(s) = -\frac{\frac{60}{200s+1}}{\frac{125s+1}{125s+1}} = -0.6 \frac{125s+1}{200s+1} \quad (3.6)$$

$$d_{21}(s) = -\frac{\frac{20}{110s+1}}{\frac{130}{110s+1}} = -\frac{2}{13} \quad (3.7)$$

El diagrama Simulink empleado para verificar el desempeño del sistema de Múltiples Entradas y Múltiples Salidas se proporciona en la figura 2.4.

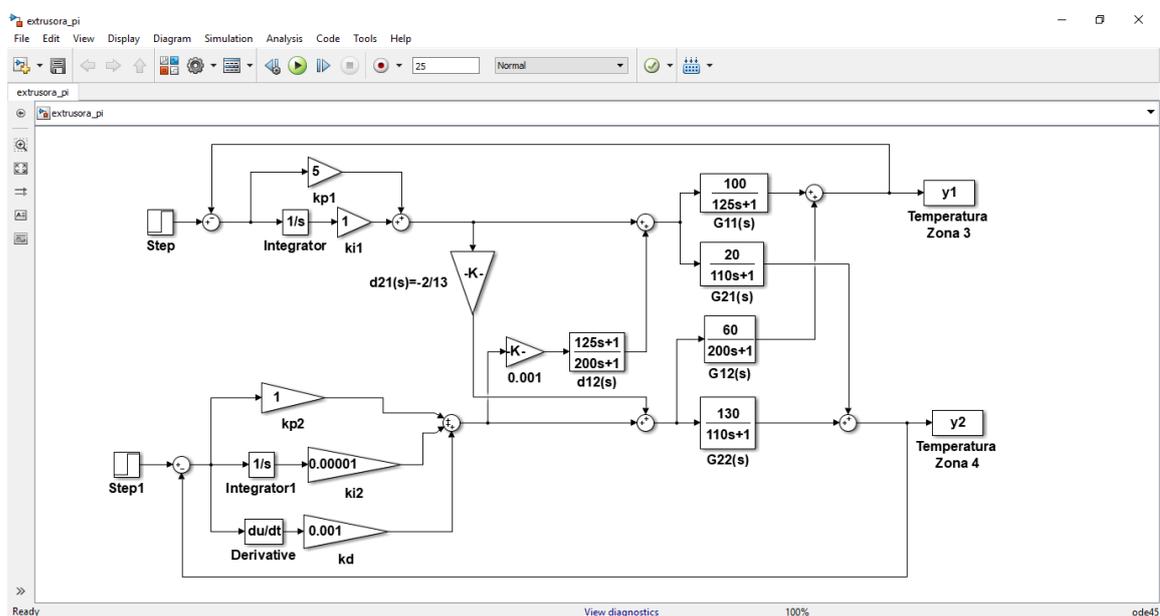


Figura 2.4. Diagrama Simulink para el control con desacoplador y controladores del tipo PID.

Los gráficos que muestran el desempeño con el desacoplador se muestran a continuación en las figuras 2.5 y 2.6.

Es de destacar que los valores iniciales calculados de $-\frac{2}{13}$ fue reajustado de manera que se obtuviera un mejor desempeño del desacople parcial en el sistema MIMO controlado. De igual manera fue reajustado

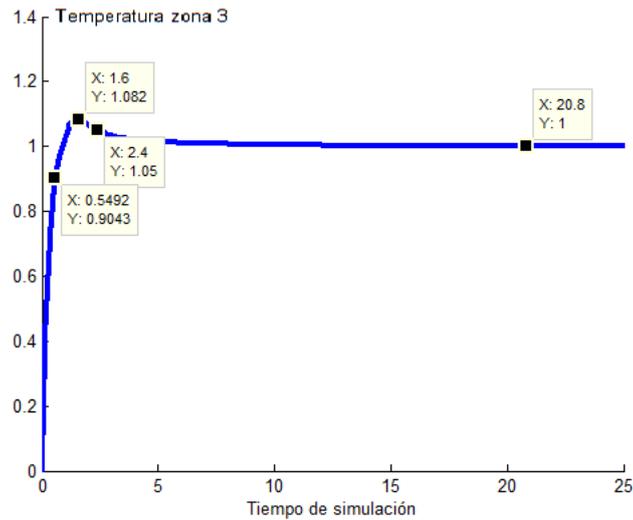


Figura 2.5. Respuesta en el tiempo del lazo de control de la temperatura en la zona 3.

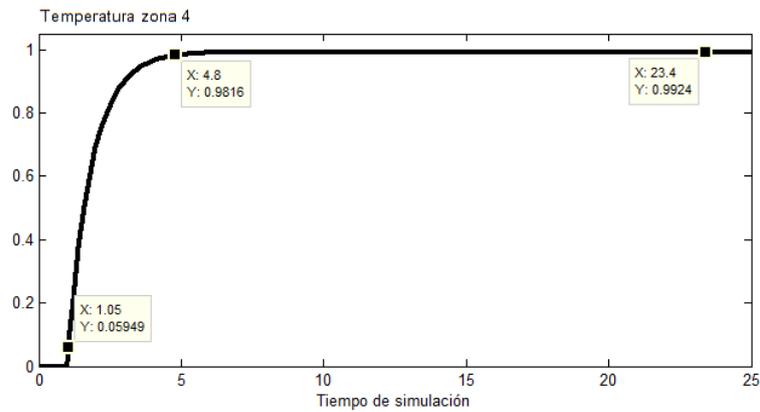


Figura 2.6. Respuesta en el tiempo del lazo de control de la temperatura en la zona 4.

Para diseñar el regulador de velocidad del tornillo sin fin, se procede a investigar la posibilidad de diseño del regulador por ubicación de polos.

Para ello se revisa el Teorema de Sylvester, aplicado a la planta (2.11), considerando como perturbaciones las variables $u_1(s)$ y $u_2(s)$. Entonces la planta nominal es:

$$G_{nom}(s) = \frac{A(s)}{B(s)} = \frac{0.25}{2s+1} \quad (3.8)$$

Siendo los polinomios:

$$A(s) = a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0 = a_1 s + a_0 = 2s + 1 \quad (3.9)$$

$$B(s) = b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_0 = b_0 = 0.25 \quad (3.10)$$

Se dice que $A(s)$ y $B(s)$ son coprimos, es decir, que no tienen factores en común o raíces, si y solo si

$$\det(M_e) \neq 0$$

Considerar la matriz M_e [30] formada como sigue:

$$M_e = \begin{pmatrix} a_n & 0 & \dots & 0 & b_n & 0 & \dots & 0 \\ a_{n-1} & a_n & \dots & 0 & b_{n-1} & b_n & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_0 & a_1 & \dots & a_n & b_0 & b & \dots & b_n \\ 0 & a_0 & \dots & a_{n-1} & 0 & b_0 & \dots & b_{n-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & a_0 & 0 & 0 & \dots & b_0 \end{pmatrix} \quad (3.11)$$

La asignación de polos es generalmente posible, si se cumplen los requerimientos mínimos:

Sea un lazo de realimentación de un grado de libertad con un controlador $C(s)$ tal que

$$C(s) = \frac{P(s)}{L(s)} \quad (3.12)$$

y un modelo nominal $G_0(s)$ dado por (3.8) con $A(s)$ y $B(s)$ polinomios coprimos, con grados n y $n-1$ respectivamente. Entonces es posible diseñar el controlador por ubicación de polos a partir del polinomio característico a lazo cerrado $A_{lc}(s)$ arbitrario y $n_A = 2n$. El grado de $L(s)$ es $n_l = n$ y de $P(s)$ es $n_p = n_l - 1$

Así,

$$A(s)L(s) + B(s)P(s) = A_{lc}(s) \quad (3.13)$$

Siendo (3.13) la ecuación para la asignación de polos. Resolviendo esta ecuación, se determinan las ganancias del controlador PI.

De (3.13), considerando (3.9), (3.10) y $n = 1$

$$M_e = \begin{pmatrix} a_1 & 0 & b_1 & 0 \\ a_0 & a_1 & b_0 & b_1 \\ 0 & a_0 & 0 & b_0 \\ 0 & 0 & 0 & b_0 \end{pmatrix}$$

Resolviendo por menores el determinante:

$$\begin{aligned} \det(M_e) &= a_1 \begin{vmatrix} a_1 & b_0 & b_1 \\ a_0 & 0 & b_0 \\ 0 & 0 & b_0 \end{vmatrix} - a_0 \begin{vmatrix} 0 & b_1 & 0 \\ a_0 & 0 & b_0 \\ 0 & 0 & b_0 \end{vmatrix} \\ &= a_1 b_0 \begin{vmatrix} a_1 & b_0 \\ a_0 & 0 \end{vmatrix} + a_0^2 \begin{vmatrix} b_1 & 0 \\ 0 & b_0 \end{vmatrix} \end{aligned}$$

Con

$$a_1 = 2, a_0 = 1, b_0 = 0.25, b_1 = 0$$

$$\det(M_e) = 2 * 0.25 * (-1 * 0.25) + 4(0 * 0.25) = -\frac{1}{8}$$

$$\det(M_e) \neq 0$$

Así las cosas, como $A(s)$ y $B(s)$ son coprimos entonces (3.8) admite el diseño del controlador por asignación de polos. Resolviendo la ecuación (3.13), considerando el controlador PI

$$C(s) = \frac{P(s)}{L(s)} = \frac{p_1 s + p_0}{l_1 s + l_0} = \frac{k_p s + k_i}{s}$$

$$\text{Con } l_1 = 1; l_0 = 0, B(s) = 0.25$$

$$A(s)L(s) + B(s)P(s) = A_{lc}(s)$$

$$(2s + 1)(l_1s + l_0) + 0.25(k_p s + k_i) = A_{lc}(s) \quad (3.14)$$

En el miembro izquierdo de (3.14) se tiene el polinomio característico:

$$s^2 + \frac{(1+0.25k_p)}{2}s + \frac{0.25}{2}k_i = 0$$

El polinomio deseado se elige de tal manera que se tengan dos polos reales negativos p_1 y p_2 , de manera que $|p_1| \geq 4|p_2|$ para que la dinámica dominante sea la del polo más lento (el más alejado del origen).

Sea el polinomio deseado:

$$A_{lc}(s) = (s + 2.946111)(s + 0.6789) = s^2 + 3.625s + 2$$

$$\text{Con } \left| \frac{p_1}{p_2} \right| = \frac{2.9461}{0.6789} = 4.34 \geq 4$$

Replanteando la igualdad (3.14)

$$s^2 + \frac{(1+0.25k_p)}{2}s + \frac{0.25}{2}k_i = s^2 + 3.625s + 2$$

Resolviendo el sistema de dos ecuaciones algebraicas con dos incógnitas, se tiene:

$$\frac{(1+0.25k_p)}{2} = 3.625$$

$$\frac{0.25}{2}k_i = 2$$

$$k_p = 4 * (2 * 3.625 - 1) = 25$$

$$k_i = \frac{2*2}{0.25} = 16$$

Se prueba el diseño por asignación de polos empleando el diagrama Simulink mostrado en la figura 2.7.

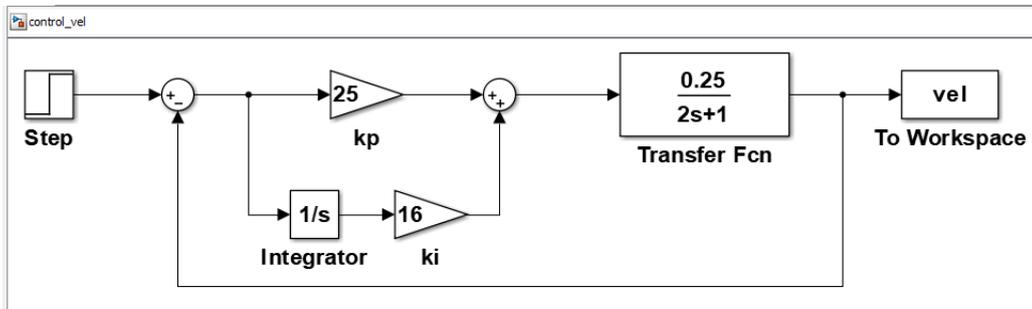


Figura 2.7. Diagrama Simulink para el control de la velocidad del tornillo sin fin.

Una simulación se presenta en la figura 2.8 como la respuesta del sistema a lazo cerrado al paso escalón unitario que comienza a los 0.5 unidades de tiempo. Como se observa la respuesta es casi inmediata y entra en el sector $1 \pm 3\%$ aproximadamente a los 0.8 segundos de aplicarse al paso escalón.

Las características del proceso de tránsito del estado inicial al final se pueden determinar por las mediciones indicadas en la misma figura. Por ejemplo, el valor máximo 1.018 unidades se

alcanza a los 1.8 segundos de aplicarse el paso. El valor de M% es de 1.8% y el tiempo de establecimiento es de 0.8 segundos después de aplicarse el paso.

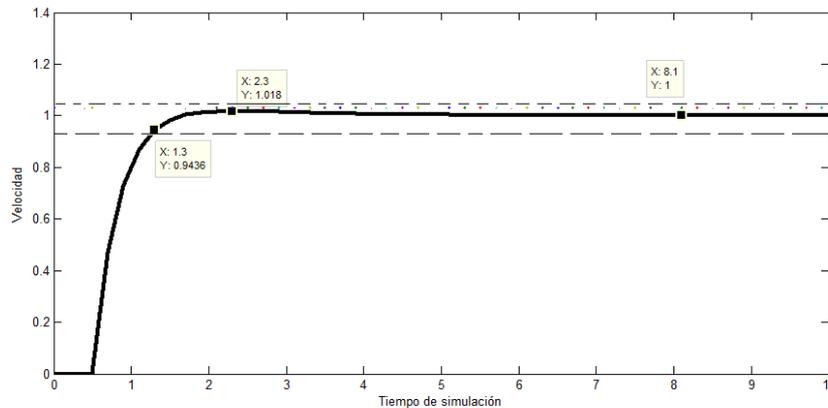


Figura 2.8. Respuesta al cambio en la referencia como un paso unitario.

2.2 Diseño del controlador difuso multivariable

Los sistemas de múltiple entrada y múltiple salida (MIMO) generalmente poseen características de acoplamiento dinámico, pudiendo ser este acoplamiento lineal o no lineal.

La dificultad del control de los sistemas MIMO está en determinar cómo superar los efectos de acoplamiento entre cada lazo de control.

El enfoque de desacoplamiento basado en modelos (Herrera, 2018) no es práctico para el control en tiempo real debido a la carga computacional inherente y a la incertidumbre dinámica intrínseca a los modelos matemáticos obtenidos, ya sea por primeros principios o por identificación experimental de los parámetros de los modelos candidatos MIMO.

La teoría de los conjuntos difusos ha sido empleada con éxitos en un número considerable de aplicaciones, ver por ejemplo Luo *et al.* (2015) y Danapalasingam *et al.* (2014) en base a los puntos de vista de los sistemas de una entrada una salida (SISO) sin considerar el modelo del sistema.

Para resolver este problema y mejorar el desempeño del control se considera la propuesta de Lian & Huang (2001) donde se diseña un controlador difuso desacoplador de las interacciones del modelo MIMO. Según la metodología expuesta en Lian & Huang (2001), en primer lugar, se diseña un controlador difuso tradicional (TFC) en base a los puntos de vista de los sistemas SISO, para controlar cada variable de proceso del sistema MIMO.

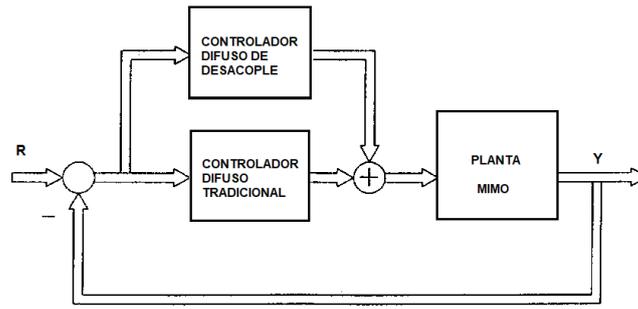


Figura 2.9. Estructura del Controlador Difuso Mixto.

En segundo lugar, según las características del acoplamiento dinámico del sistema, se incorpora un controlador difuso de desacoplamiento apropiado para compensar los efectos de la interacción entre los lazos de control.

Lo antes expuesto se evidencia en la figura 2.9 donde la línea tradicional de enlace entre bloques queda sustituida por las flechas indicando que las señales son ahora vectoriales, como se corresponde con los sistemas MIMO.

Para el diseño del controlador difuso SISO se empleará los resultados obtenidos en los diferentes Trabajos de Titulación presentados en la Maestría en Automatización y Control Industrial de la Escuela Superior Politécnica del Ecuador, ESPOL, como son: Saigua & Vargas (2016), Bustos & Ramírez (2016), Mosquera (2018) y Almeida & Mora (2018).

Las funciones de pertenencia que se emplean en la presente investigación se escogen triangulares, lo cual está fundamentado en las conclusiones de Pedrycz (1994).

El ancho de los soportes de dichas funciones se selecciona considerando que las mediciones realizadas en las extrusoras presentan degradación debido al ruido provocado por la frecuencia de rotación del tornillo sin fin y la ruptura sistemática de sólidos en el polímero fundido. Según se informa en Costin *et al.* (1982), un valor aceptable para la desviación estándar de las mediciones realizadas en la extrusora es $\sigma=0.3$ unidades. Así, el ancho del soporte de las funciones de pertenencia se selecciona aproximadamente de $3.5\sigma=1.05$ unidades.

En Colina (1994) se afirma que generalmente el número de subconjuntos difusos empleados con éxito es de siete. En primera instancia se seleccionan conjuntos normales o sea con altura igual a la unidad. El solapamiento de las funciones triangulares se realiza en la mitad de su altura, o sea al nivel 0.5.

Para poder definir la base de reglas del controlador difuso se requiere especificar:

- Las variables de entrada al controlador difuso,
- Los universos de discurso de cada variable de entrada,
- Las etiquetas lingüísticas de las siete funciones de pertenencia correspondientes a los subconjuntos difusos ya seleccionados,
- La operación entre las variables lingüísticas del antecedente

- La implicación de cada regla
- El nivel de disparo de cada regla
- La agregación de los resultados de las reglas disparadas

Para aplicar la decisión al proceso se necesita un valor ordinario, un número, por lo que será menester convertir los resultados de la agregación a números para que puedan ser aplicados al controlador. Esta operación es la desfusificación (Passino & Yurkovich, 1998).

El método de desfusificación de COG o promedio del centro (Hung, *et al.*, 2003) realiza la agregación de las conclusiones de todas las reglas representadas por los conjuntos difusos implicados.

Finalmente, la construcción de la base de reglas comienza definiendo los universos de discurso de las variables difusas “error” y “cambio en el error” que se denota como “c_error”.

Ya fue señalado que las funciones de pertenencia elegidas serán las triangulares, pero las ubicadas en los extremos de los universos de discurso de las variables de entrada serán trapezoidales lo cual garantiza que existan conclusiones para cada posible valor de entrada del controlador difuso y por tanto cumplir con la característica de “base de regla completa” de la lógica difusa (Hung, *et al.*, 2003).

Un gráfico que refleja la distribución de las funciones de pertenencia en el universo de discurso de las variables de entrada se muestra a continuación en la figura 2.10.

En la figura 2.11 se muestra la distribución de las funciones de pertenencia en el universo de discurso de la salida de control. Se ha elegido la misma cantidad de funciones de pertenencia; siete para el control.

Como se observa de 3.12 las funciones de pertenencia de los extremos son truncadas de manera que hay una correspondencia con el rango de valores de entrada de los actuadores, los cuales, para la extrusora de estudio es de $\pm 10V$.

Para formar la base de reglas se parte de los conceptos expuestos en Mosquera (2018) y considerando que los lazos cerrados de control de las temperaturas de las zonas 3 y 4 tienen un comportamiento similar al de segundo orden sobre amortiguado, con pocas oscilaciones, como se muestra en la figura 2.6, se elige inicialmente la base de reglas dada en Mosquera (2018), que es muy similar a las proporcionadas en diferentes fuentes, tales como en (Lian & Huang, 2001), (Hung, *et al.*, 2003), (Zhang & Zhao, 2012).

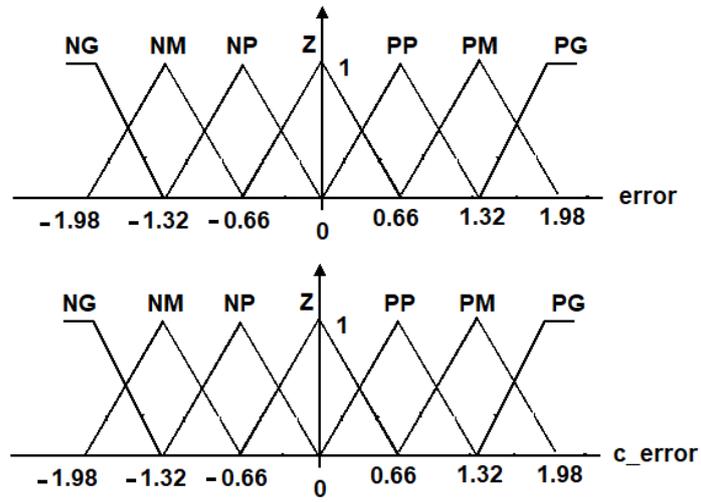


Figura 2.10. Distribución de las funciones de pertenencia en los universos de discurso de las variables difusas de entradas.

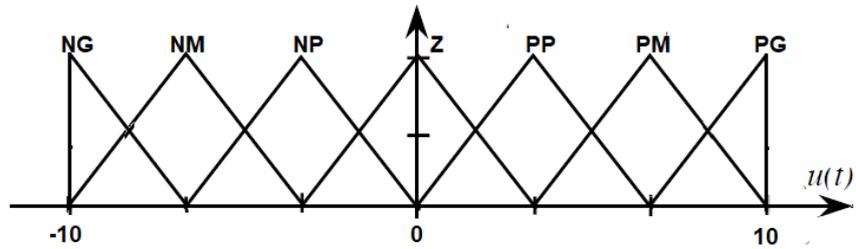


Figura 2.11. Distribución de las funciones de pertenencia en el universo de discurso de la variable difusa de salida.

Tabla 2.1 Base de reglas inicial

U	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG	ERROR
PG	Z	PP	PM	PG	PG	PG	PG	
PM	NP	Z	PP	PM	PM	PG	PG	
PP	NM	NP	Z	PP	PM	PG	PG	
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG	
NP	NG	NG	NM	NP	Z	PP	PM	
NM	NG	NG	NG	NM	NP	Z	PP	
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	Z	
C_E								

Esta Base de Reglas se introduce en el Sistema de Inferencias Difuso y como resultado pueden observarse las reglas mostradas en la figura 2.12 y la superficie de control que proporciona el controlador difuso diseñado, mostrada en la figura 2.13.

1. If (e is NG) and (ce is PG) then (V3 is Z) (1)	17. If (e is NP) and (ce is PP) then (V3 is Z) (1)	33. If (e is PP) and (ce is NP) then (V3 is Z) (1)
2. If (e is NG) and (ce is PM) then (V3 is NP) (1)	18. If (e is NP) and (ce is Z) then (V3 is NP) (1)	34. If (e is PP) and (ce is NM) then (V3 is NP) (1)
3. If (e is NG) and (ce is PP) then (V3 is NM) (1)	19. If (e is NP) and (ce is NP) then (V3 is NM) (1)	35. If (e is PP) and (ce is NG) then (V3 is NM) (1)
4. If (e is NG) and (ce is Z) then (V3 is NG) (1)	20. If (e is NP) and (ce is NM) then (V3 is NG) (1)	36. If (e is PM) and (ce is PG) then (V3 is PG) (1)
5. If (e is NG) and (ce is NP) then (V3 is NG) (1)	21. If (e is NP) and (ce is NG) then (V3 is NG) (1)	37. If (e is PM) and (ce is PM) then (V3 is PG) (1)
6. If (e is NG) and (ce is NM) then (V3 is NG) (1)	22. If (e is Z) and (ce is PG) then (V3 is PG) (1)	38. If (e is PM) and (ce is PP) then (V3 is PG) (1)
7. If (e is NG) and (ce is NG) then (V3 is NG) (1)	23. If (e is Z) and (ce is PM) then (V3 is PG) (1)	39. If (e is PM) and (ce is Z) then (V3 is PM) (1)
8. If (e is NM) and (ce is PG) then (V3 is PP) (1)	24. If (e is Z) and (ce is PP) then (V3 is PP) (1)	40. If (e is PM) and (ce is NP) then (V3 is PP) (1)
9. If (e is NM) and (ce is PM) then (V3 is NP) (1)	25. If (e is Z) and (ce is Z) then (V3 is Z) (1)	41. If (e is PM) and (ce is NM) then (V3 is Z) (1)
10. If (e is NM) and (ce is PP) then (V3 is NM) (1)	26. If (e is Z) and (ce is NP) then (V3 is NP) (1)	42. If (e is PM) and (ce is NG) then (V3 is NP) (1)
11. If (e is NM) and (ce is Z) then (V3 is NM) (1)	27. If (e is Z) and (ce is NM) then (V3 is NM) (1)	43. If (e is PG) and (ce is PG) then (V3 is PG) (1)
12. If (e is NM) and (ce is NP) then (V3 is NG) (1)	28. If (e is Z) and (ce is NG) then (V3 is NG) (1)	44. If (e is PG) and (ce is PM) then (V3 is PG) (1)
13. If (e is NM) and (ce is NM) then (V3 is NG) (1)	29. If (e is PP) and (ce is PG) then (V3 is PG) (1)	45. If (e is PG) and (ce is PP) then (V3 is PG) (1)
14. If (e is NM) and (ce is NG) then (V3 is NG) (1)	30. If (e is PP) and (ce is PM) then (V3 is PM) (1)	46. If (e is PG) and (ce is Z) then (V3 is PG) (1)
15. If (e is NP) and (ce is PG) then (V3 is PM) (1)	31. If (e is PP) and (ce is PP) then (V3 is PM) (1)	47. If (e is PG) and (ce is NP) then (V3 is PM) (1)
16. If (e is NP) and (ce is PM) then (V3 is PP) (1)	32. If (e is PP) and (ce is Z) then (V3 is PP) (1)	48. If (e is PG) and (ce is NM) then (V3 is PP) (1)
		49. If (e is PG) and (ce is NG) then (V3 is Z) (1)

Figura 2.12. Base de Reglas introducida en el Sistema de Inferencias Difuso (FIS).

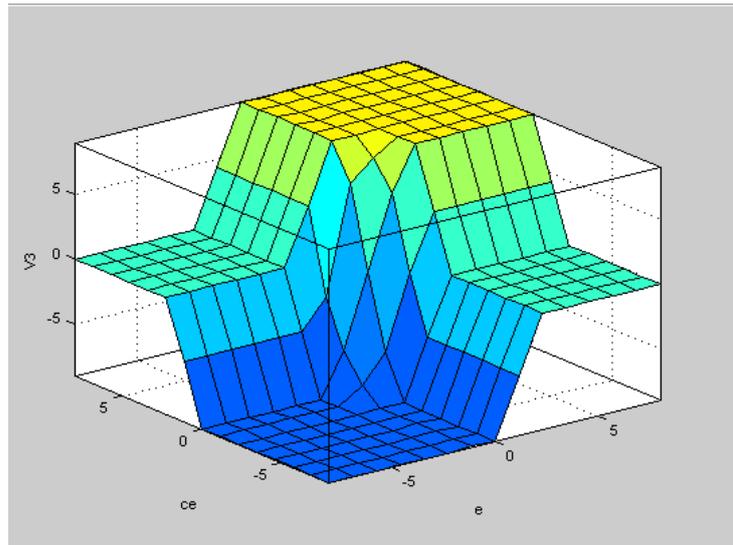


Figura 2.13. Superficie de control del controlador difuso diseñado.

2.2.1 Metodología de ajuste del controlador difuso para el sistema de una entrada una salida SISO

Para ajustar los sistemas de control a lazo cerrado de las zonas 3 y 4, se comienza por aislar los lazos de control, o sea, se supone que no existe interacción entre los lazos de control y en lugar del controlador PI para la zona 3 y PID para la zona 4, se conectan los bloques Simulink del controlador difuso en cada uno de los lazos mostrados en la figura 2.5.

Como se ha supuesto, las variables de entrada al controlador difuso son dos, a saber, el error y el cambio del error. Para obtener el cambio en el error se adecua la señal de error mediante la derivada de la señal de error. Para aplicar estas señales al controlador difuso ambas se multiplican por sendos coeficientes. Estos coeficientes (Hung, *et al.*, 2003) son g_0 y g_1 los cuales se ubican como se muestra en el dibujo de las figuras 2.14 y 2.15.

Un tercer coeficiente puede ser empleado en la configuración externa del controlador difuso, el cual según Hung *et al.* (2003) lo se denominará h .

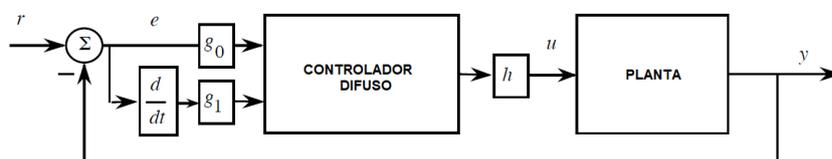


Figura 2.14. Configuración externa del controlador difuso con dinámica de derivación.

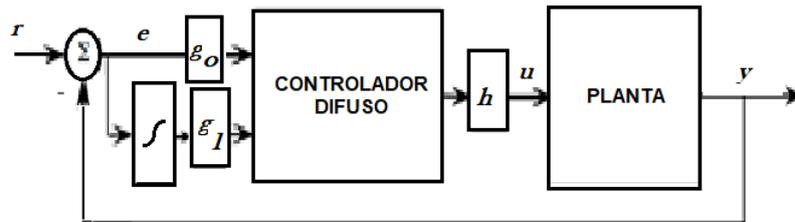


Figura 2.15. Configuración externa del controlador difuso con dinámica de integración.

Al ajustar los valores de g_0 y g_1 se deben considerar los rangos declarados para las variables de entrada en los universos de discurso del sistema de inferencia difusa (FIS), de manera que todas las variaciones que puedan ocurrir del error y del cambio del error estén contenidas en dichos rangos.

Si esta indicación no se observara aquellos valores de las variables que caigan fuera de los rangos de entrada proporcionarán valores cero del control puesto que no habrá funciones de pertenencia definidas.

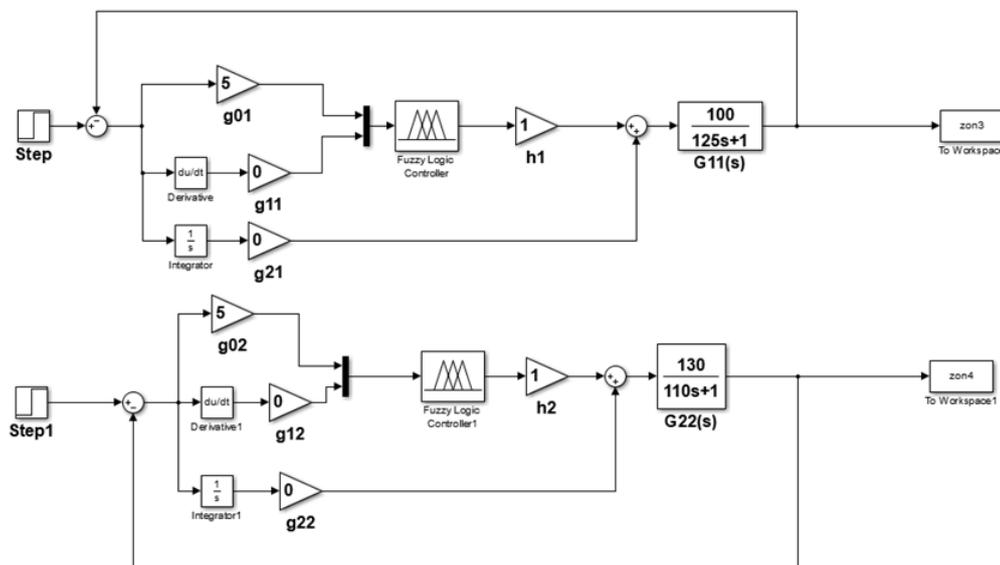


Figura 2.16. Diagrama Simulink para el ajuste de los coeficientes g_0 , g_1 , g_2 y h

En la figura 2.16 se muestra el diagrama Simulink empleado para el ajuste sistemático de los coeficientes de la configuración con error y cambio del error como entradas del sistema FIS. En lo que sigue se selecciona el tipo de sistema de inferencia del tipo Mamdani para establecer las reglas de control difuso.

Un primer ajuste se logra empleando los valores mostrados para los coeficientes en la figura 2.16. El resultado de simular los lazos de control con referencias desplazadas en una unidad de tiempo se muestra en la figura 2.17.

Como se observa, las respuestas son rápidas pero los valores de establecimiento no logran el valor de la unidad. Así, se tendrá que introducir la integración de los errores para eliminar el offset.

En el canal de regulación de la temperatura de la zona 3 se introduce un ajuste por prueba y error de $g_{21} = 0.15$ el cual proporciona una regulación rápida a 1, con un tiempo de establecimiento de 0.1967 segundos, como se muestra en la figura 2.18.

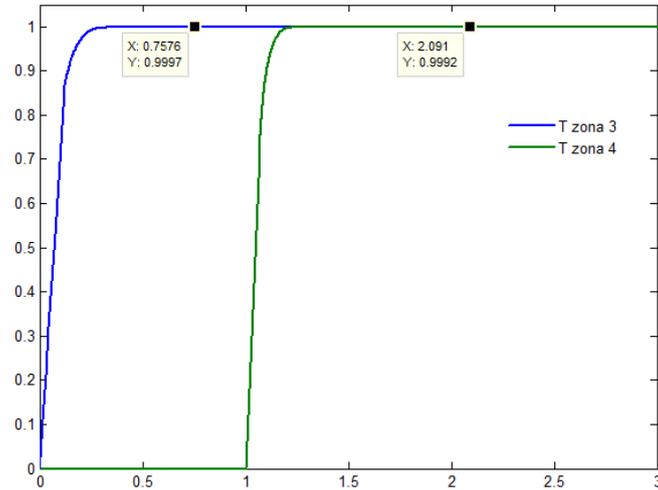


Figura 2.17. Respuestas en el dominio del tiempo de los lazos de control de temperatura de las zonas 3 y 4.

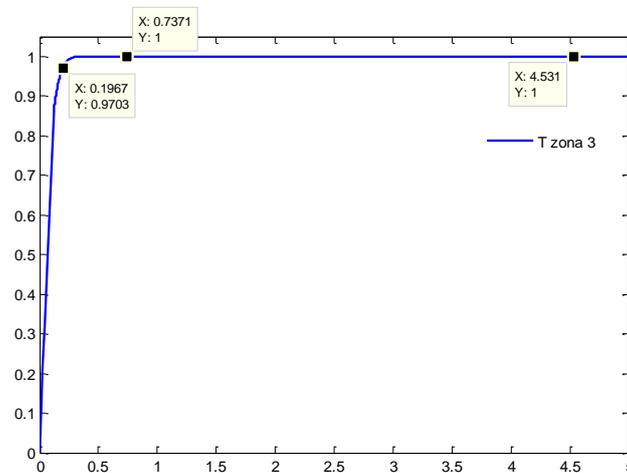


Figura 2.18. Respuesta en el dominio del tiempo para un cambio en la referencia de la temperatura de la zona 3 de 1° C.

Para la regulación de la temperatura en la zona 4 se ajusta el valor de $g_{22} = 0.15$, y la respuesta al cambio en la referencia de 1°C presenta un valor pico de 1.057 a los 1.118 segundos, lo que representa un valor de $M=5.7\%$. La figura 2.19 muestra el resultado en el dominio del tiempo.

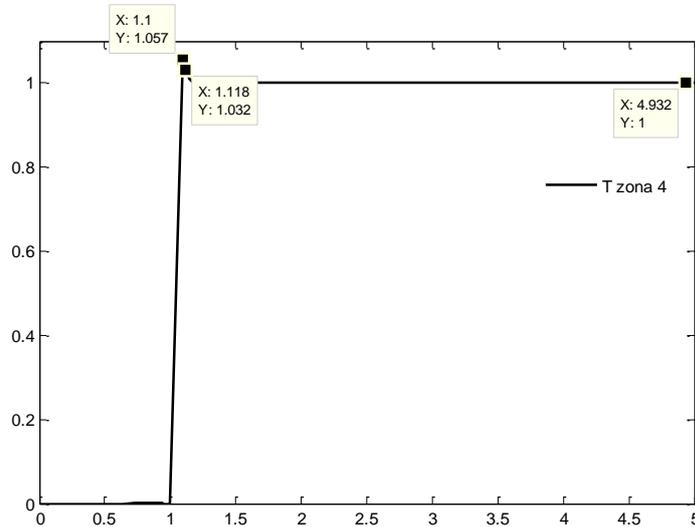


Figura 2.19. Respuesta en el dominio del tiempo para un cambio en la referencia de la temperatura de la zona 4 de 1°C .

En la figura 2.20 se muestra la estructura de la configuración requerida y el ajuste final de los coeficientes del controlador difuso. A este resultado se llegó por múltiples pruebas y errores. Las respuestas al cambio en las referencias de temperatura de cada zona se muestran en las figuras 2.21 y 2.22.

En cada figura se muestran las referencias, las respuestas en el dominio del tiempo y la dinámica del tipo de regulador que lo caracteriza. En el lazo cerrado de la zona 3 se ha empleado un controlador de dos grados de libertad, con lo cual se ha evitado la reacción no deseable de la derivación sobre el salto inicial del escalón en la referencia.

La curva de color rojo es la reacción de la derivada, que como se ve no alcanza valores extremadamente grandes los cuales no estarían nunca dentro de los rangos de los universos de discurso para el cambio en el error que generalmente se estipulan para este tipo de regulador difuso.

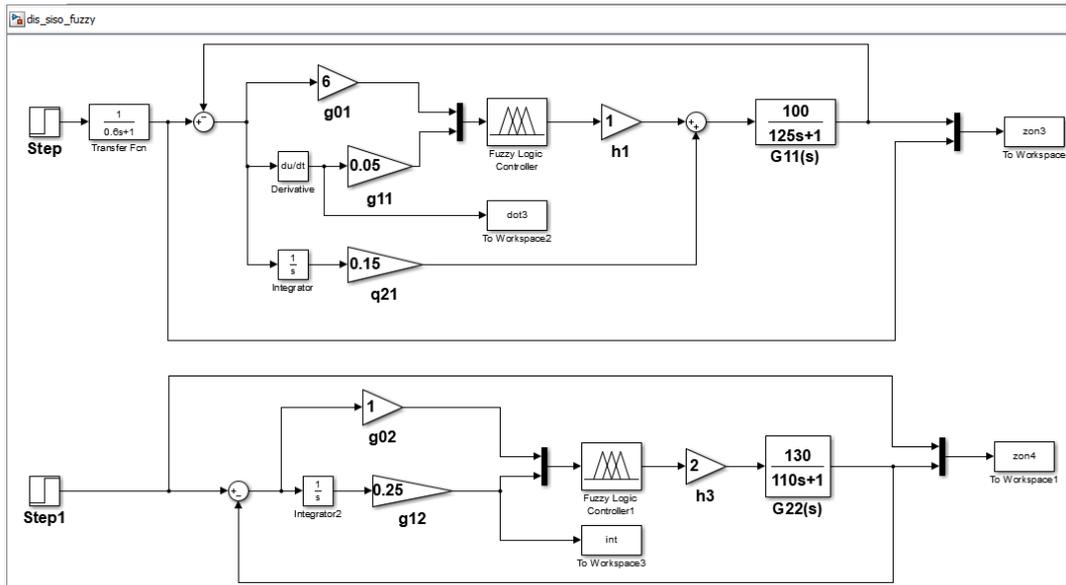


Figura 2.20. Estructura de la configuración requerida y el ajuste final de los coeficientes del controlador difuso.

En el lazo cerrado de control de la zona 4 se ha empleado un controlador de un grado de libertad, ya que es adecuado emplear la dinámica de integración como entrada al controlador difuso. Se ha llegado a esta conclusión por prueba y error.

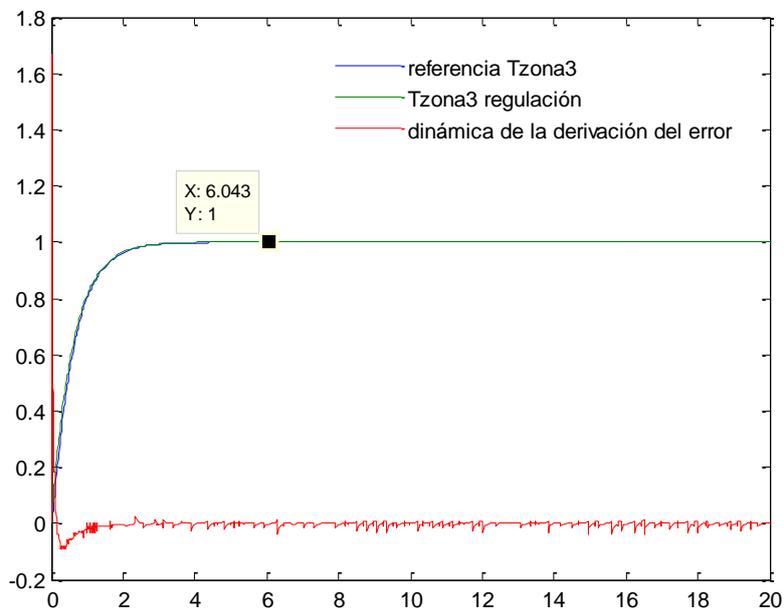


Figura 2.21. Respuesta en el dominio del tiempo para un cambio en la referencia de la temperatura de la zona 3 de 1° C con regulación difusa sin interacción.

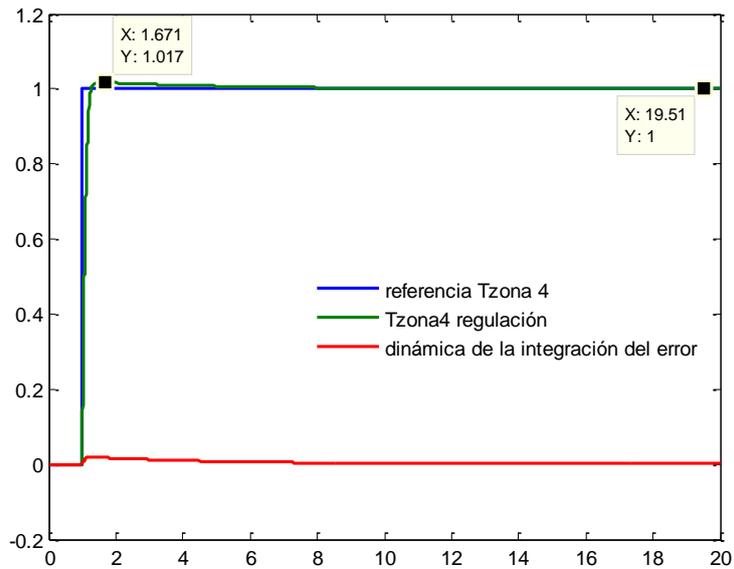


Figura 2.22. Respuesta en el dominio del tiempo para un cambio en la referencia de la temperatura de la zona 4 de 1° C con regulación difusa sin interacción.

Al analizar el sistema multivariable en su conjunto se observan la interacción entre los lazos de control de las temperaturas en las zonas 3 y 4. Lo anteriormente expuesto se puede observar en la figura 2.23, donde se muestra un detalle de la respuesta del control en la zona 3.

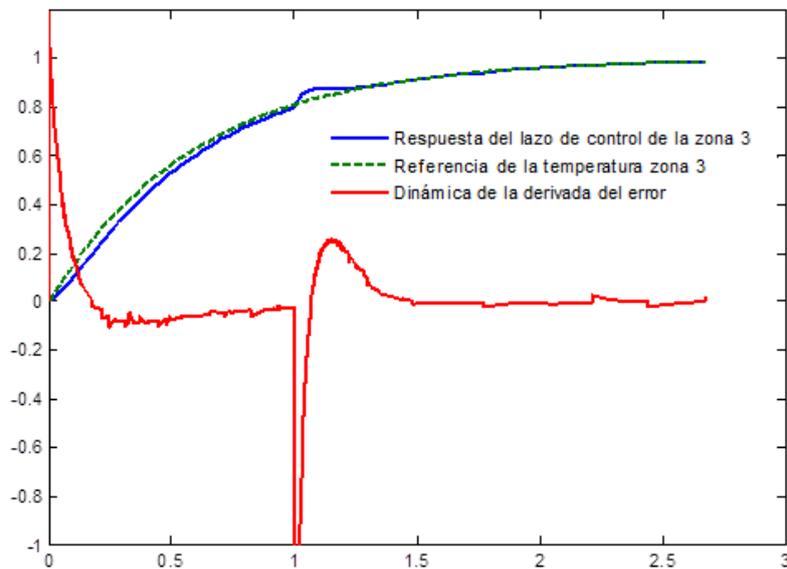


Figura 2.23. Evidencia de la interacción entre los lazos de control.

La respuesta al cambio de referencia en la zona de calentamiento 3 muestra cómo, inicialmente, la misma trata de seguir la variación de la referencia en color verde, sin embargo, en el instante 1 segundo (cuando ocurre el cambio de referencia para la temperatura de la zona 4) la curva en color azul refleja la interacción del lazo de control de la zona 4 sobre el desempeño

del lazo de control de la temperatura de la zona 3. Esta interacción se manifiesta como una perturbación.

En la figura 2.24 se observa al inicio (de 0 a 1 segundo) la influencia del lazo de control de la zona 3 sobre la respuesta de la temperatura de la zona de calentamiento 4.

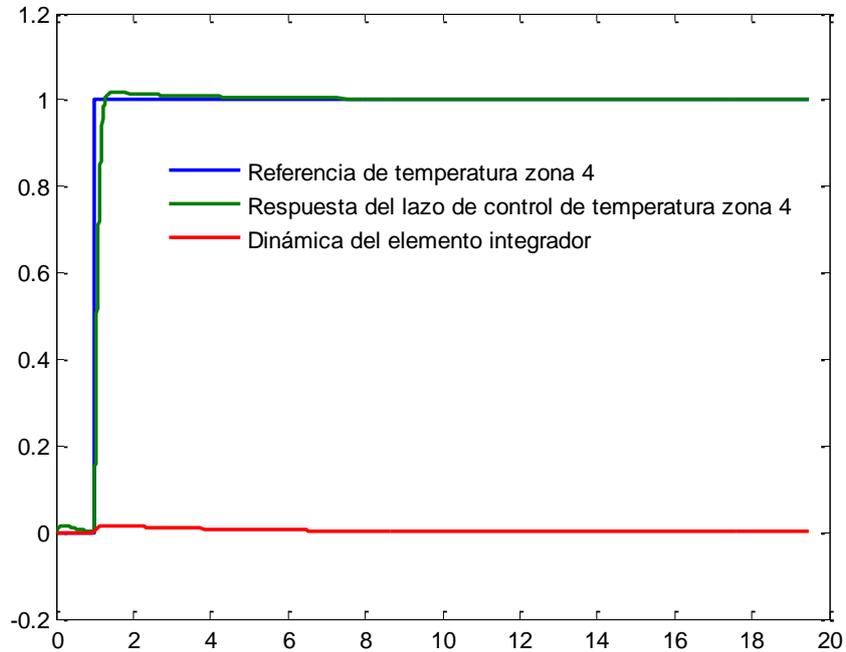


Figura 2.24. Evidencia de la interacción entre los lazos de control.

En la figura 2.25 se muestra el Diagrama Simulink de control de las zonas de calentamiento 3 y 4 empleado para verificar la interacción entre las temperaturas controladas en las zonas 3 y 4. Se observan los controladores difusos, así como las configuraciones empleadas para introducir las dinámicas para el control de las plantas.

Considerando que existe fuerte interacción, del lazo de control de la zona 4 sobre el comportamiento del lazo de control de la temperatura en la zona 3 se procede a diseñar la compensación de la interacción entre los lazos.

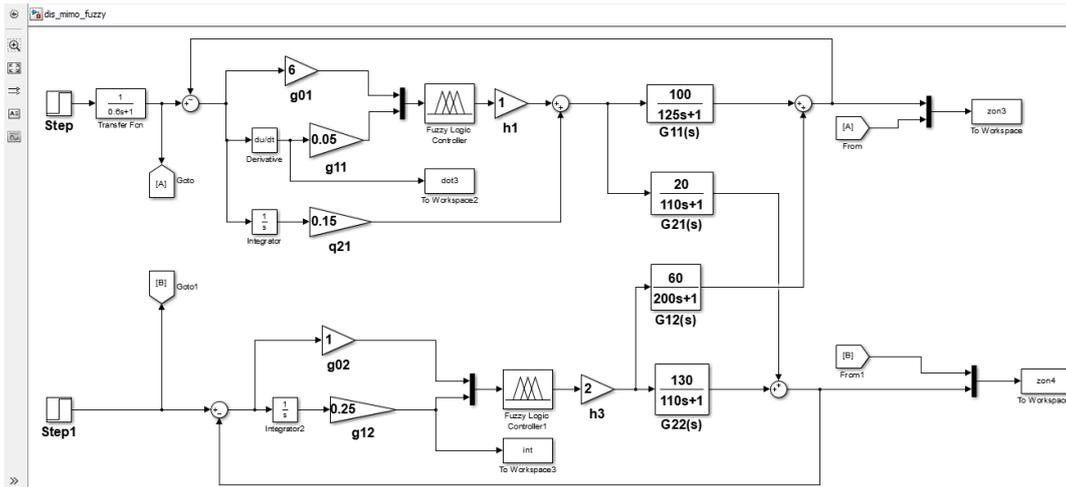


Figura 2.25. Diagrama Simulink del control de las zonas de calentamiento 3 y 4.

Las expresiones 3.6 y 3.7 proporcionan las ideas principales que se manejan en esta investigación para realizar el desacople de los lazos de control de la temperatura de las zonas 3 y 4.

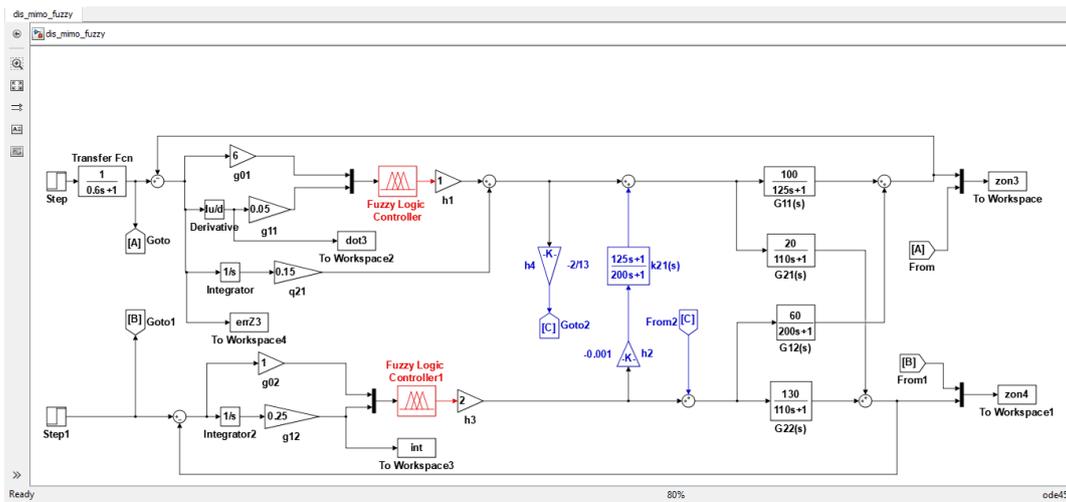


Figura 2.26. Diagrama Simulink diseñado para verificar el desempeño del desacoplamiento analítico entre los lazos de control de la temperatura.

Aplicando esas expresiones se ha diseñado el diagrama Simulink mostrado en la figura 2.26, diseñado para verificar el desempeño de los controladores difusos con desacoplamiento analítico de los lazos de control. Se han obtenido las respuestas mostradas en la figura 2.27.

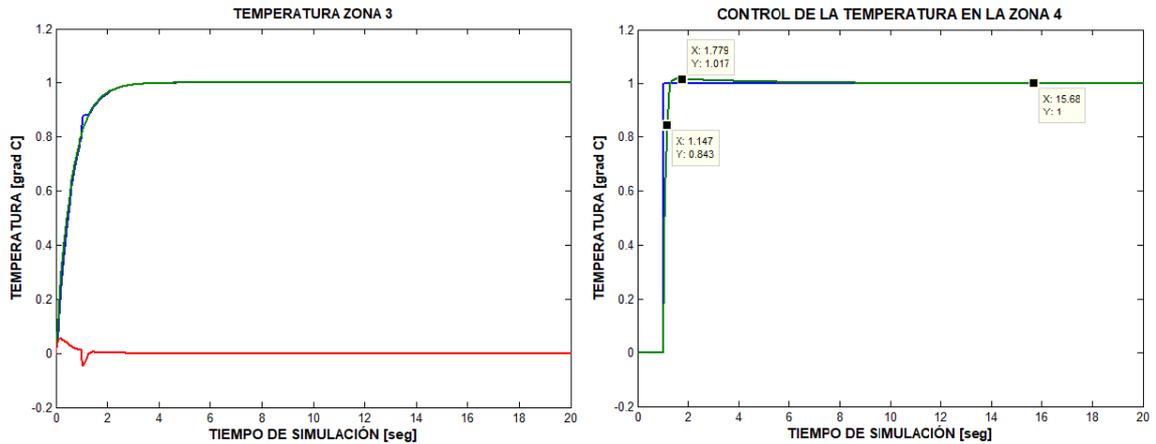


Figura 2.27. Respuestas de los lazos de control de las temperaturas en las zonas 3 y 4 con desacople analítico.

Como se observa, las respuestas en el dominio del tiempo son similares a las obtenidas en las figuras 2.23 y 2.24 obtenidas sin interacción entre los lazos de control.

En el próximo capítulo se hará un análisis más detallado de los resultados por simulación.

Para desacoplar los lazos de control de las variables “Temperatura de las zonas tres y cuatro” empleando lógica difusa se emplea el esquema de funcionamiento propuesto en la figura 2.28. En ella se muestran los controladores difusos principales y los controladores difusos de desacople o secundarios.

Los controladores difusos principales se diseñan a partir de las mismas exigencias planteadas en el diseño expuesto en 3.2 de esta investigación. Sin embargo, para diseñar el desacoplamiento de los lazos de control de las temperaturas en las zonas 3 y 4 seguimos las recomendaciones formuladas en Lian & Huang (2001).

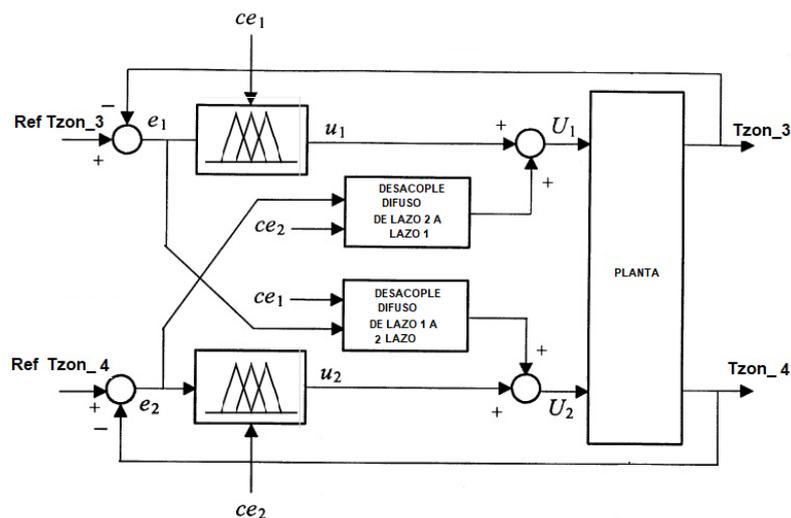


Figura 2.28. Estructura del controlador difuso con desacople empleando la misma lógica.

Para desacoplar los lazos de control de las variables “Temperatura de las zonas tres y cuatro” empleando lógica difusa se emplea el esquema propuesto en la figura 2.28. En ella se muestran los controladores difusos principales y los controladores difusos de desacople o secundarios.

Según Lian & Huang (2001) las reglas iniciales de los controladores difusos de desacoplos pueden ser extraídas de la tabla mostrada en la figura 2.29.

Como se observa, esta tabla presenta una gran reducción de la granulación en los universos de discurso de las variables difusas de entrada a los sistemas de inferencias difusos. Las entradas difusas se han seleccionado como el error y el cambio en el error, de manera que se pueda tener información respecto de la influencia de las interacciones entre los lazos mediante la magnitud del error y de su velocidad de cambio.

REGLAS DE CONTROL DIFUSAS DEL CONTROLADOR DE DESACOPLE

$\tilde{U}_{i \rightarrow l} \backslash \tilde{E}_i$	$\tilde{C}\tilde{E}_i$		
	NB	ZO	PB
PB	ZO	PB	PB
ZO	NB	ZO	
NB			NB

Figura 2.29. Tabla de las reglas difusas iniciales de desacople.

La selección de las funciones de pertenencia se ha hecho considerando las funciones de pertenencia del tipo gaussiana en un número de 3 en cada variable de entrada, de manera que siempre se tengan inferencias para los valores de entrada no esperados. Las funciones de pertenencia para las entradas se muestran en las figuras 2.30, 2.31.

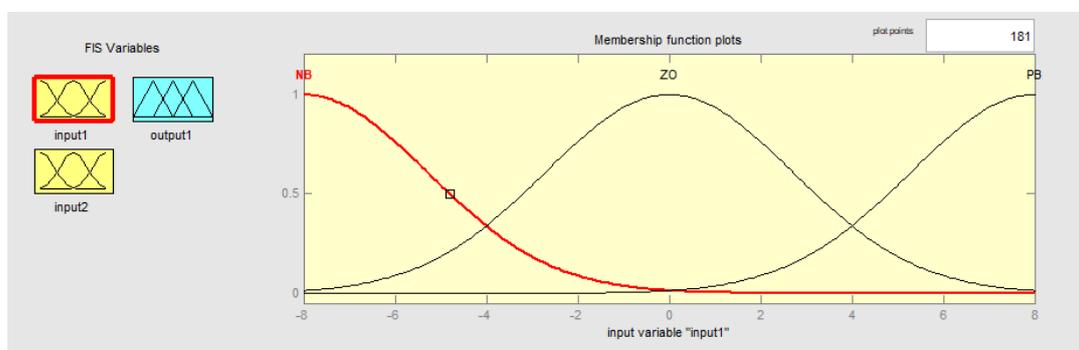


Figura 2.30. Funciones de pertenencia gaussianas para la entrada difusa “error”.

Por otro lado, se han seleccionado calculadores del cambio (bloques derivativos d/dt) a la entrada de los controladores de desacople con una mayor rapidez respecto de los empleados en los controladores difusos principales.

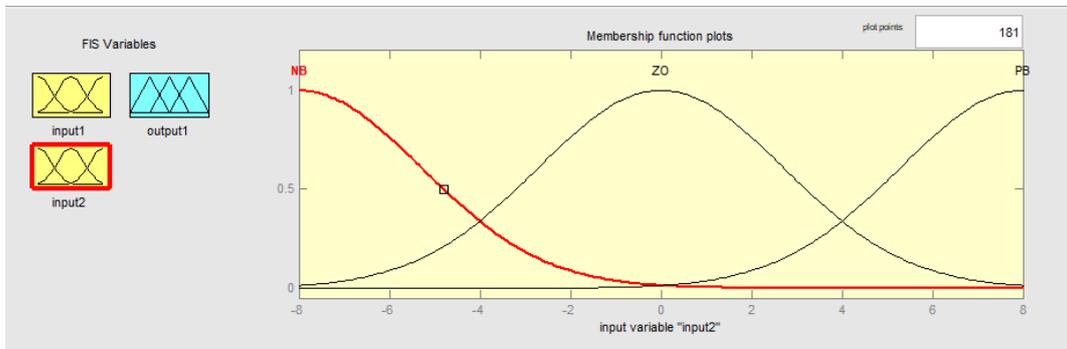


Figura 2.31. Funciones de pertenencia gaussianas para la entrada difusa “cambio_error”.

La granulación del universo de discurso de la salida de cada uno de los sistemas de inferencia empleados en el desacoplamiento de los lazos de control se ha escogido con tres soportes de funciones de pertenencia triangulares.

Los límites de la magnitud de salida que se han establecido, son las fronteras del intervalo cerrado $[-1,1]$ considerando que esta señal se aplicará a convertidores de corriente para la corrección de la influencia de la interacción entre los lazos de control y no debe exceder los límites de corriente permisibles para las resistencias eléctricas indicados en Astrom *et al.* (2001).

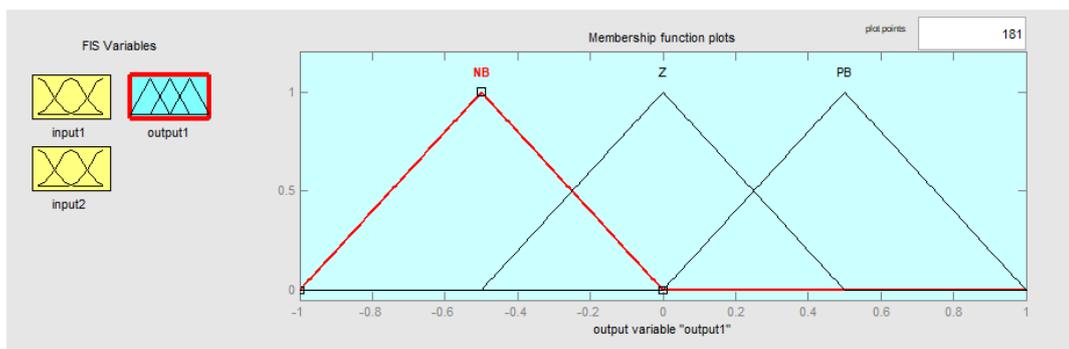


Figura 2.32. Funciones de pertenencia triangulares para las salidas de los sistemas de inferencia del desacople.

En la figura 2.33 se muestra el diagrama Simulink programado para la simulación del funcionamiento de los desacopladores difusos.

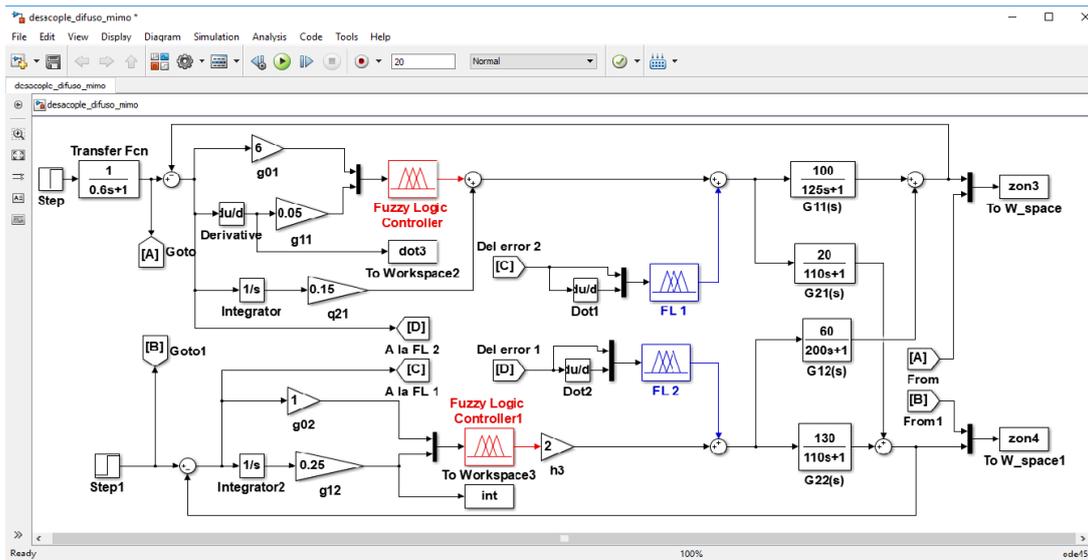


Figura 2.33. Diagrama Simulink programado para la simulación del funcionamiento de los desacopladores difusos.

En la figura 2.33 se muestran los controladores difusos principales, en color rojo, y en color azul los sistemas de inferencias empleados para reducir la influencia entre los lazos de control de las zonas 3 y 4 de calentamiento del polímero en el interior de la extrusora.

En esta figura se pone de manifiesto que en las entradas de los sistemas de inferencia FL1 y FL2 no se emplean atenuadores de los cambios del error con lo cual se logra una mayor influencia en la disminución de la interacción entre los lazos de control.

Los resultados de emplear, en el dominio del tiempo, tales sistemas de inferencia se muestran por simulación del desempeño en la figura 2.34.

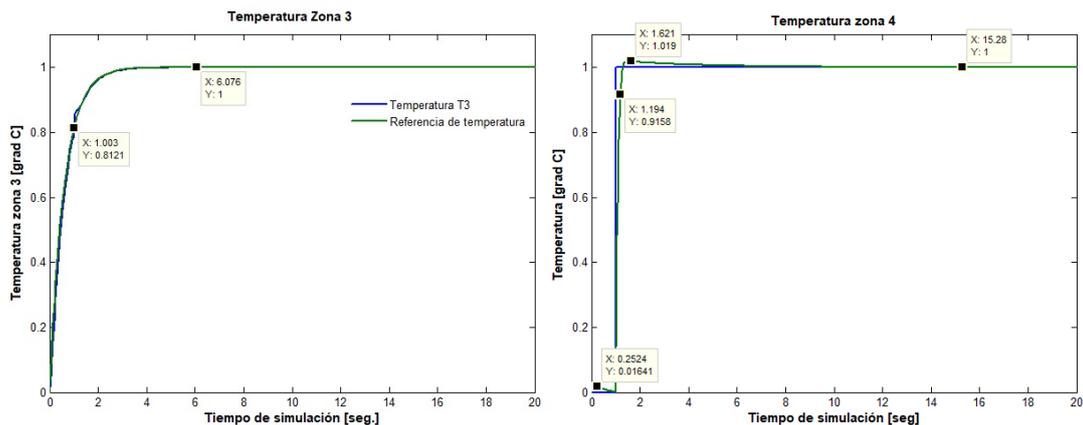


Figura 2.34. Respuestas en el dominio del tiempo del control MIMO difuso con desacoplamiento difuso entre los lazos de control.

Se estudian diferentes casos, los cuales consideran varias plantas con igual estructura de la matriz de funciones de transferencia (4x4), pero con una variación del 36% al 48% en las

ganancias de las funciones de transferencias $g_{11}(s), g_{12}(s), g_{21}(s), g_{22}(s)$ y del 28% al 39% en las constantes de tiempo de las mismas.

En la tabla 2.2 se muestran las funciones de transferencia empleadas para el estudio del desempeño de los controladores y de la capacidad de adaptación del controlador difuso, en general y en particular del controlador difuso adaptativo.

Tabla 2.2. *Funciones de transferencia empleadas para el estudio del desempeño de los controladores.*

	Planta I	Planta II	Planta nominal	Planta III	Planta IV
$g_{11}(s)$	$\frac{80}{175s + 1}$	$\frac{90}{150s + 1}$	$\frac{100}{125s + 1}$	$\frac{150}{100s + 1}$	$\frac{200}{75s + 1}$
$g_{12}(s)$	$\frac{40}{220s + 1}$	$\frac{50}{210s + 1}$	$\frac{60}{200s + 1}$	$\frac{80}{150s + 1}$	$\frac{100}{100s + 1}$
$g_{21}(s)$	$\frac{10}{180s + 1}$	$\frac{15}{150s + 1}$	$\frac{20}{110s + 1}$	$\frac{30}{100s + 1}$	$\frac{40}{80s + 1}$
$g_{22}(s)$	$\frac{80}{180s + 1}$	$\frac{100}{150s + 1}$	$\frac{130}{110s + 1}$	$\frac{150}{100s + 1}$	$\frac{180}{80s + 1}$

Tabla 2.3. *Índices medidos durante la simulación de la variante I (primera columna)*

FT	Valores	Índice medido
$g_{11}(s)$	$\frac{80}{175s + 1}$	$t(T_{zon3} = 1) = 9.289$
$g_{12}(s)$	$\frac{40}{220s + 1}$	—
$g_{21}(s)$	$\frac{10}{180s + 1}$	$T_{pico}(t = 0.4453) = 0.01803$
$g_{22}(s)$	$\frac{80}{180s + 1}$	$T_{pico}(t = 2.089) = 1.041$

Tabla 2.4. *Índices medidos durante la simulación de la variante II (segunda columna)*

FT	Valores	Índice medido
$g_{11}(s)$	$\frac{90}{150s + 1}$	$t(T_{zon3} = 1) = 7.034$
$g_{12}(s)$	$\frac{50}{210s + 1}$	—
$g_{21}(s)$	$\frac{15}{150s + 1}$	$T_{pico}(t = 0.3486) = 0.01882$
$g_{22}(s)$	$\frac{100}{150s + 1}$	$T_{pico}(t = 1.724) = 1.031$

Tabla 2.5. *Índices medidos durante la simulación de la variante III (tercera columna)*

FT	Valores	Índice medido
----	---------	---------------

$g_{11}(s)$	$\frac{150}{100s + 1}$	$t(T_{zon3} = 1) = 5.185$
$g_{12}(s)$	$\frac{80}{150s + 1}$	—
$g_{21}(s)$	$\frac{30}{100s + 1}$	$T_{pico}(t = 0.233) = 0.01196$
$g_{22}(s)$	$\frac{150}{100s + 1}$	$T_{pico}(t = 1.342) = 1.014$

Tabla 2.6. Índices medidos durante la simulación de la variante IV (cuarta columna)

FT	Valores	Índice medido
$g_{11}(s)$	$\frac{200}{75s + 1}$	$t(T_{zon3} = 1) = 3.821$
$g_{12}(s)$	$\frac{100}{100s + 1}$	—
$g_{21}(s)$	$\frac{40}{80s + 1}$	$T_{pico} = 0$
$g_{22}(s)$	$\frac{180}{80s + 1}$	$T_{pico}(t = 1.248) = 1.011$

Tabla 2.7. Resumen de los índices medidos por simulación.

Índice medido variante 1	Índice medido variante 2	Índice medido variante 3	Índice medido variante 4
$t(T_{zon3} = 1) = 9.289$	$t(T_{zon3} = 1) = 7.034$	$t(T_{zon3} = 1) = 5.185$	$t(T_{zon3} = 1) = 3.821$
$T_{pico}(t = 0.4453) = 0.01803$	$T_{pico}(t = 0.3486) = 0.01882$	$T_{pico}(t = 0.233) = 0.01196$	$T_{pico} = 0$
$T_{pico}(t = 2.089) = 1.041$	$T_{pico}(t = 1.724) = 1.031$	$T_{pico}(t = 1.342) = 1.014$	$T_{pico}(t = 1.248) = 1.011$

2.3 Diseño del controlador difuso adaptativo

Independientemente de los diseños hasta aquí presentados empleando los sistemas de inferencias difusos, con diferentes estructuras, los mismos que permiten realizar el control difuso y el desacople de los lazos de control mediante lógica difusa se plantea investigar el comportamiento de sistemas de control difusos para modelos de procesos MIMO que consideren la adaptación on-line de los parámetros del controlador del tipo PID.

Jin *et al.* (2013), han propuesto un esquema de ajuste adaptativo de los valores de las ganancias del controlador del tipo PID para un sistema modelado como sistema SISO.

En lo adelante se trata de aplicar estas ideas para el diseño de controladores difusos adaptativos para modelos de sistemas MIMO.

Debido a que varios factores, tales como la densidad del polímero y las fluctuaciones de la velocidad del tornillo sin fin, el sistema de extrusión de mangueras plásticas es no lineal y variable con el tiempo, es en realidad un sistema complejo que muestra un acoplamiento, gran inercia en

la regulación de la temperatura y la velocidad e incertidumbres en los parámetros del modelo. Por lo tanto, es muy difícil establecer un modelo matemático preciso.

El control PID tradicional no puede cumplir con la precisión del control y los requisitos de velocidad correspondientes ante perturbaciones. La teoría de control PID adaptativo difuso es una teoría que combina el control PID tradicional y la lógica difusa, que no requiere de un modelo matemático exacto de control y puede adaptarse rápidamente. Este método de control según Jin *et al.* (2013) es adecuado para el sistema de control de nivel de agua del tambor de una caldera alimentada con combustible tipo biomasa.

En lo que sigue se diseña un controlador difuso adaptativo para controlar un modelo MIMO de extrusora y verificar su desempeño en sistemas MIMO.

La composición de este regulador es como sigue: dos controladores del tipo PID, uno para cada lazo de control de temperatura, dos sistemas de inferencia difusa que ajustan los valores de las ganancias de la estructura de los PID.

El controlador PID autoajutable difuso, toma la señal de error e y calcula el cambio en el error \dot{e} y lo aplica como entrada al sistema de inferencias difusas.

Usando el método de razonamiento difuso, ajusta los parámetros del PID (K_p , K_i , K_d) de tal manera que se cumplan los requisitos de mínimo valor del error “ e ” en cada instante de tiempo. La arquitectura del sistema de control se muestra en la Figura 2.35.

El sistema de inferencia difusa debe ser capaz de variar los valores de las ganancias dentro de los rangos de valores permisibles que garanticen la estabilidad del sistema y el error mínimo, a pesar de que ocurran cambios en los parámetros del proceso de extrusión.

Los rangos de valores permisibles de las ganancias del controlador de las temperaturas de las zonas 3 y 4 que mantienen ante todo la estabilidad del proceso a lazo cerrado se seleccionan empleando las variantes de plantas de la Tabla 2.2.

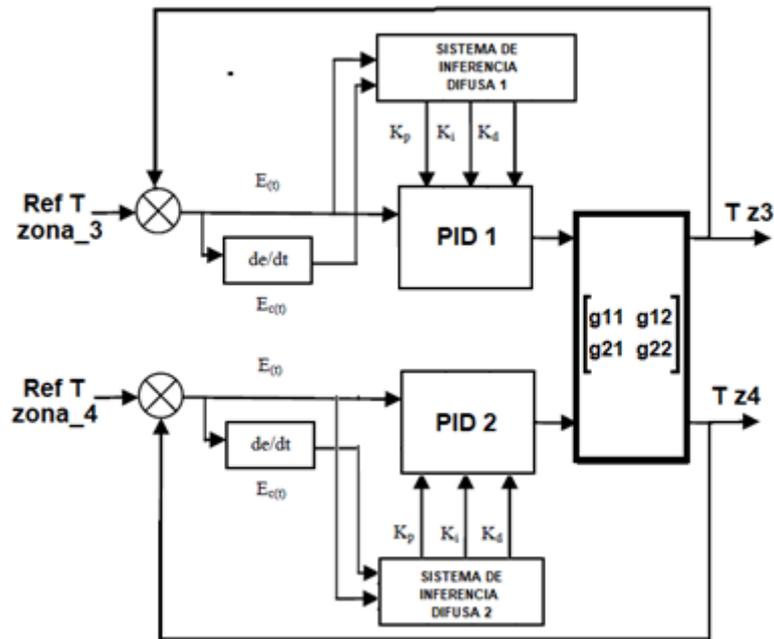


Figura 2.35.

Las reglas difusas se estructuran siguiendo las recomendaciones dadas en Jin *et al.* (2013), las cuales se exponen a continuación:

- 1) Si el error es muy pequeño, los valores de K_p y K_i deberían ser más grandes para obtener una mejor estabilidad en el sistema. Además, para evitar las oscilaciones cerca del valor de establecimiento y mejorar la inmunidad al ruido del sistema, el valor de K_p debería ser menor cuando el cambio del error es mayor y el valor de K_d debería ser mayor cuando el cambio del error es menor.
- 2) Si el error es el medio, el valor de K_p debería ser muy pequeño para obtener un sobreimpulso más pequeño en el sistema. El valor de K_d tiene una gran influencia en el sistema, que debería ser más pequeño. El valor de K_i debería ser apropiado.
- 3) Si el error es más grande, el valor de K_p debería ser más grande y el valor de K_d debería ser más pequeño para obtener una mejor propiedad de seguimiento de la referencia del sistema. Además, para evitar un sobreimpulso mayor en la salida del sistema, el valor de K_i generalmente debería ser igual a cero.

A continuación, se proporcionan las reglas a manera de Tablas del Sistema de Inferencia Difuso para cada una de las ganancias del controlador PID.

K_p						K_i						K_d					
cambioe	error					cambioe	error					cambioe	error				
	NB	NM	ZO	PM	PB		NB	NM	ZO	PM	PB		NB	NM	ZO	PM	PB
NB	PB	PB	PM	ZO	ZO	NB	NB	NB	NM	ZO	ZO	NB	PM	PM	ZO	PM	ZO
NM	PB	PB	PM	ZO	ZO	NM	NB	NB	NM	ZO	ZO	NM	NB	NB	NM	ZO	PM
ZO	PM	PM	ZO	NM	NM	ZO	NM	NM	ZO	PM	PM	ZO	NB	NM	ZO	PM	PB
PM	ZO	ZO	NM	NM	NB	PM	ZO	ZO	PM	PB	PB	PM	NM	ZO	NM	PM	PB
PB	ZO	ZO	NM	NB	NB	PB	ZO	ZO	PM	PB	PB	PB	ZO	ZO	ZO	PM	PB

Figura 2.36. Base de reglas propuestas por Zhang & Zhao (2012) para un controlador difuso adaptativo.

Luego de introducir las reglas según la figura 2.36 se obtienen las superficies que mapean de las entradas (error y cambio del error) en los valores de las variaciones de las ganancias del controlador del tipo PID. Estas superficies se muestran en las figuras 2.37, 2.38 y 2.39.

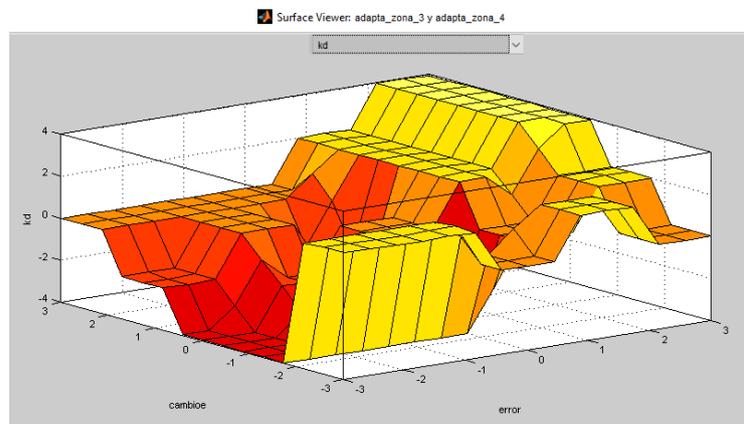


Figura 2.37. Superficie de los valores de la variación de la ganancia proporcional.

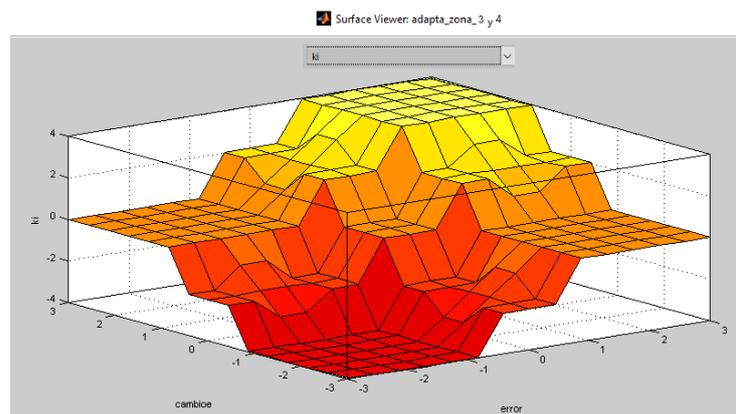


Figura 2.38. Superficie de los valores de la variación de la ganancia de integración.

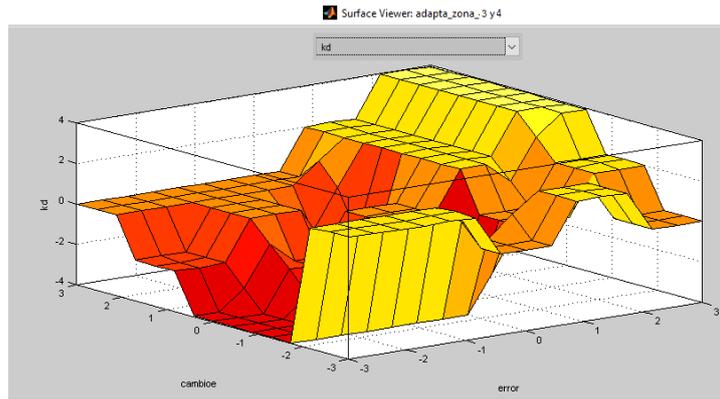


Figura 2.39. Superficie de los valores de la variación de la ganancia de derivación.

El desempeño del controlador difuso diseñado se muestra a continuación con la secuencia de gráficas desde las respuestas de las temperaturas en cada zona a cambios en las referencias hasta el trabajo realizado del control autoajustable difuso por cada ganancia de los controladores PID.

Las gráficas del desempeño de los controladores difusos adaptativos se han obtenido empleando el diagrama Simulink mostrado en la figura 2.40.

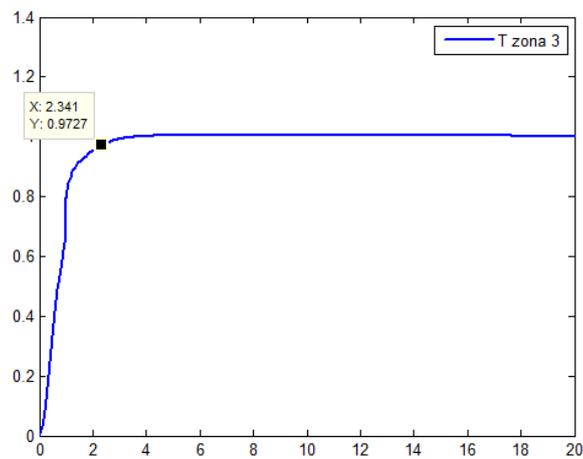


Figura 2.40. Control difuso a lazo cerrado de la temperatura en la zona 3.

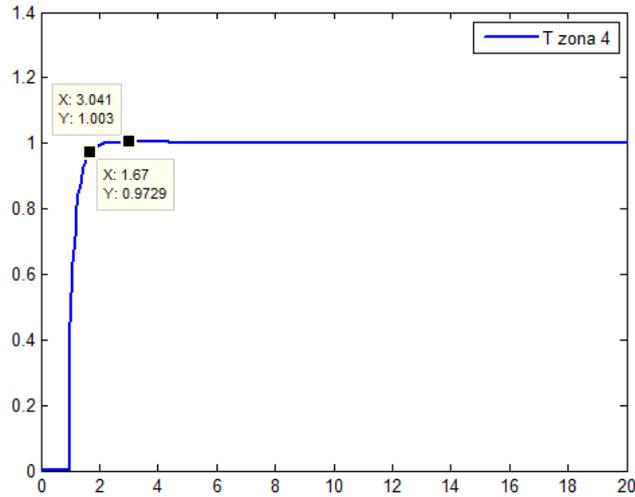


Figura 2.41. Control difuso a lazo cerrado de la temperatura en la zona 4.

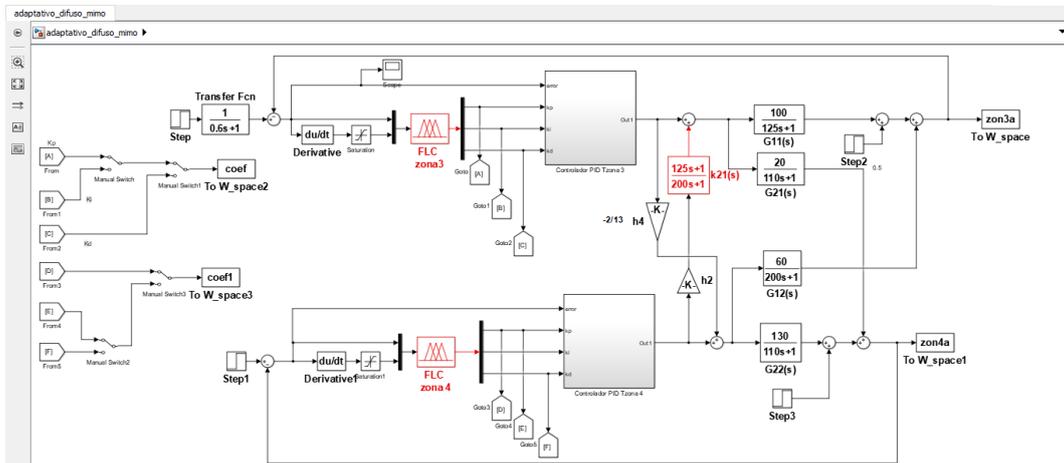


Figura 2.42. Diagrama Simulink empleado para simular el controlador adaptativo difuso diseñado.

En el diagrama se muestra a la izquierda la conexión que permite observar el desempeño de cada sistema de inferencia difuso calculador del incremento o decremento de la ganancia respectiva. Estas observaciones son las mostradas en las figuras 2.43 para el control adaptativo de la temperatura de la zona 3.

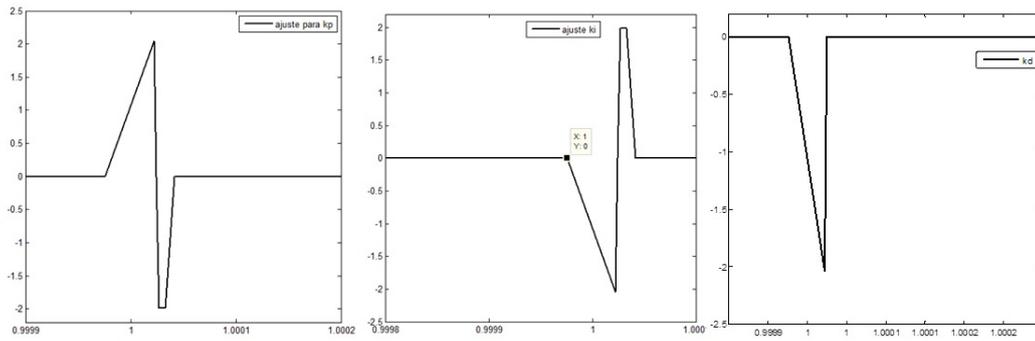


Figura 2.43. Ajustes adaptativos de las ganancias k_p , k_i y k_d para la temperatura de la zona

3.

En el próximo capítulo se mostrarán las correspondientes al control adaptativo de la temperatura de la zona 4 y se discutirán los resultados. Solo se indica que el ajuste de las ganancias ocurre en los entornos de la unidad de tiempo.

Capítulo 3

Comparación de los desempeños de los controladores diseñados

3.1 Diseño de las perturbaciones en la referencia de los sistemas controlados

Los sistemas que se desean controlar son los lazos de control de las temperaturas de las zonas de calentamiento 3 y 4 y el lazo de control de la velocidad del tornillo sin fin de la extrusora.

El perfil de temperatura de una extrusora viene dado según el fabricante, de manera que a lo largo del tornillo sin fin es dado el perfil, mismo que debe ser regulado ante las perturbaciones, logrando con esto que los valores de temperatura tengan muy poco rango de variación alrededor de la temperatura prefijada por el fabricante.

En Dastych *et al.* (1988) se dan los valores seleccionados para los experimentos realizados durante la investigación.

En este trabajo se fijan los valores de referencia a $T_{zon\ 3} = 112^{\circ}C$ y $T_{zon\ 4} = 124^{\circ}C$ y para la velocidad se ha prefijado el valor de $v_{tornillo} = 63\ rpm$ según los datos proporcionados por Dastych *et al.* (1988).

Para tener una idea de los tiempos de rechazo que proporcionarán los lazos de control ante alguna perturbación se suponen variaciones en la temperatura de la zona 4 en 5 grados Celsius (Dastych, *et al.*, 1988).

3.2 Diseño de las perturbaciones sobre los procesos de temperatura y velocidad del tornillo sin fin

Si bien el sub modelo de la variación de temperatura de las 4 zonas se controla mediante el calentamiento correspondiente de cada una de ellas, la temperatura de fusión del polímero, según Dastych *et al.* (1988) puede ser manipulada también por la velocidad del tornillo.

Tanto la velocidad del tornillo como la temperatura de fusión están influenciadas por las perturbaciones principales que son: flujo no ideal del polímero dentro del tambor de la extrusora, enfriamiento desigual del polímero y la variación del caudal volumétrico.

Según la misma fuente, la perturbación principal creada durante los experimentos fue la perturbación de carga en la zona 4. Esta perturbación actúa sobre la temperatura de la zona 3 creando una desviación de la misma respecto de la referencia de temperatura de la zona $T_{ref}=112^{\circ}C$.

A su vez, ambas perturbaciones influyen en la velocidad del tornillo sin fin a través del enfriamiento desigual del polímero y de la variación del caudal volumétrico. Debido a esto en

Dastych *et al.* (1988) no se proporciona un valor específico para la perturbación sobre la velocidad del tornillo sin fin.

Se diseña así la perturbación de carga sobre la temperatura de las zonas 3 y 4 como un salto escalón de amplitud 1° C.

3.3 Verificación del desempeño de los controladores diseñados ante las perturbaciones

En lo que sigue se unirán todos los sistemas de control diseñados (los lazos de control de temperatura y el de velocidad) y se verificará el desempeño de los mismos en presencia de interacciones entre ellos.

Con esto se verificará el comportamiento del sistema MIMO desacoplado normalmente, del sistema MIMO desacoplado difuso y del sistema MIMO desacoplado adaptativo y su influencia sobre la velocidad del tornillo sin fin, desarrollado en los ítems (A, B y C).

En segundo lugar, se aplicará la perturbación de carga a la salida de la zona 4 y se analizará el desempeño de las diferentes estrategias de control en el rechazo a la perturbación.

En tercer lugar, aplicar las variaciones de planta a todos los sistemas y verificar el desempeño robusto de los controladores diseñados, lo cual se desarrolla en el ítem 3.3.2 como último test.

- A) Empleando el diagrama Simulink mostrado en la figura 3.1 se hace una corrida con las mismas referencias utilizadas en las simulaciones del capítulo 2. El resultado de esta simulación se muestra en la figura 3.2.

Como se observa la influencia de los lazos de control de temperatura es grande, lo cual se evidencia en la gran amplitud de la respuesta (1.782 unidades de velocidad) en el instante de aplicación del escalón unitario (1 segundo) al lazo de control de la temperatura de la zona 4. La duración de este salto no deseado es de 1.405 segundos hasta el valor esperado de establecimiento de la respuesta. Así, el regulador del tipo PI que fue diseñado en 3.1.6, sin considerar la influencia de los lazos de control de la temperatura, no nos sirve. Se requiere un nuevo desarrollo para rechazar la perturbación.

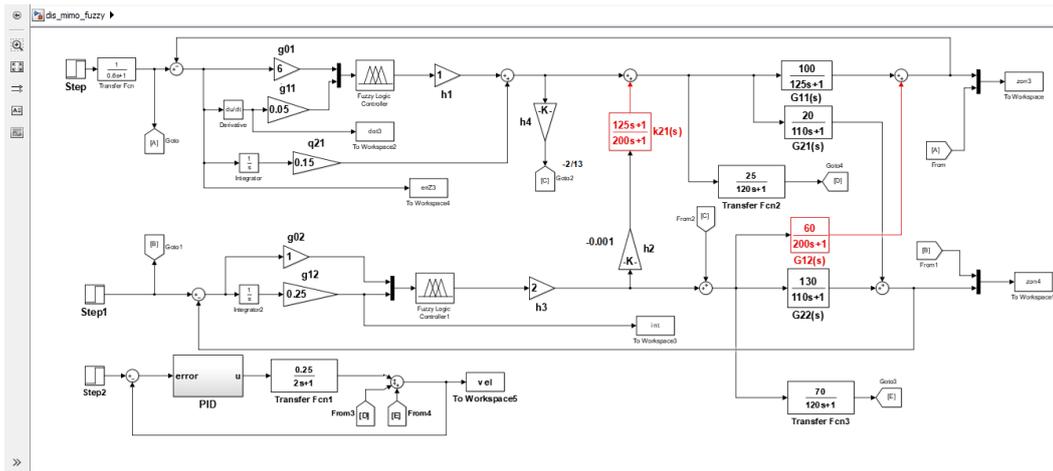


Figura 3.1. Diagrama Simulink para verificar influencia de los lazos de control de temperatura sobre el lazo de control de la velocidad del tornillo sin fin.

Como se muestra en la figura 3.1 en este diagrama se ha diseñado el lazo de control de la velocidad del tornillo sin fin que simula el funcionamiento de la tercera fila de la matriz de funciones de transferencia (2.6)

$$G(s) = \begin{pmatrix} g_1(s) \\ g_2(s) \\ g_3(s) \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

$$g_3(s) = \left(\frac{25}{120s+1} \quad \frac{70}{120s+1} \quad \frac{0.25}{2s+1} \right) \quad (4.2)$$

En esta fila de funciones de transferencia las dos primeras entradas se corresponden con la influencia del control de los lazos de temperatura de las zonas 3 y 4. La última entrada se corresponde con el control de velocidad del tornillo sin fin. Esas dos primeras entradas se consideran como perturbaciones a la velocidad del tornillo.

El empleo del controlador diseñado en 3.1.6 proporciona la respuesta en el dominio del tiempo mostrada en la figura 3.2. Como se observa, la influencia en el instante de tiempo de un segundo del salto en la referencia es notable. Para atenuar esta influencia se ha reajustado el controlador PID, primero agregando la parte derivativa y segundo sintonizando por prueba y error las ganancias del controlador.

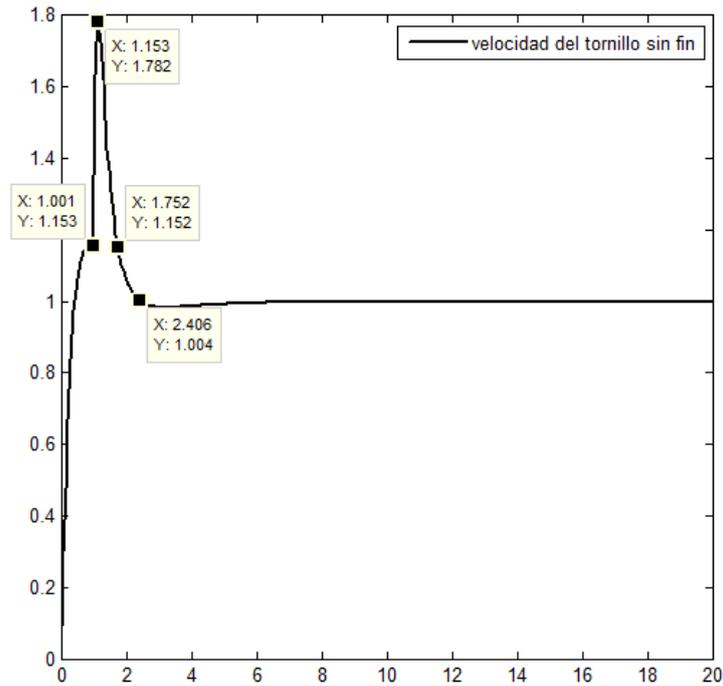


Figura 3.2. Influencia de los lazos de control de temperatura sobre el lazo de control de velocidad.

Luego de varios ajustes, la respuesta de mejor desempeño en lo que respecta al valor del pico y al tiempo de establecimiento es la que se muestra en la figura 3.3.

El valor del pico obtenido es de 1.052 lo que representa un 5.2%, muy inferior al valor mínimo requerido de 13%, de igual manera el tiempo de rechazo a la perturbación es de 0.459 segundos medido con ayuda del Data Cursor de la figura.

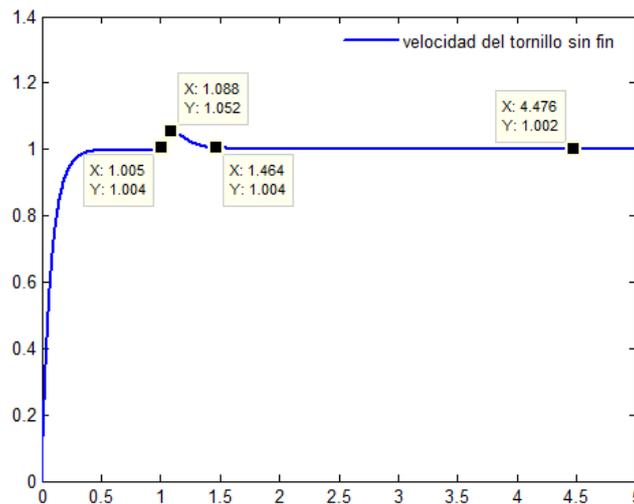


Figura 3.3. Respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de velocidad ajustado para el rechazo a la perturbación de los lazos de control de temperatura.

B) Empleando el diagrama Simulink mostrado en la figura 3.4, con desacoplamiento difuso, se hace una corrida con las mismas referencias utilizadas en las simulaciones del capítulo 2. El resultado de esta simulación se muestra en la figura 3.5.

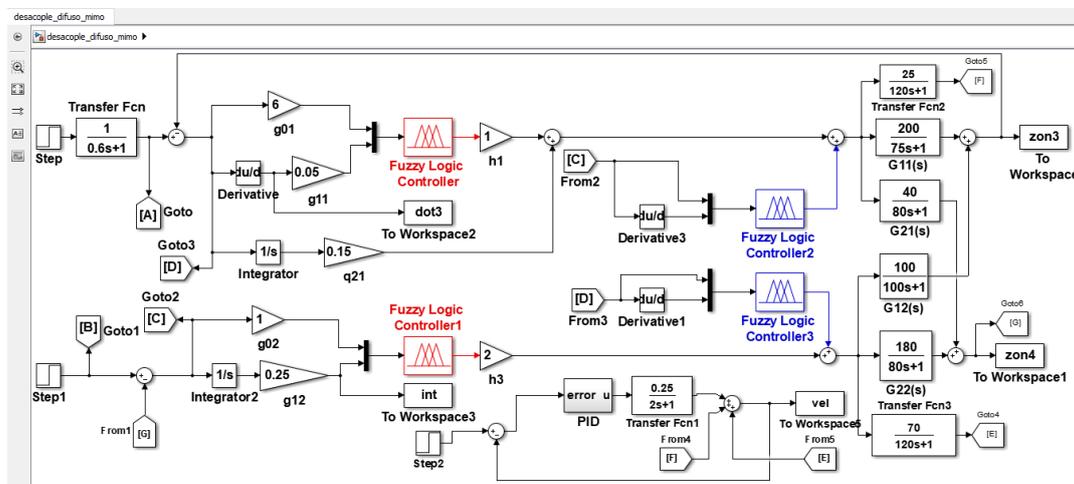


Figura 3.4. Diagrama Simulink con controladores difusos y desacoplamiento difuso con rechazo a la perturbación en el lazo de control de velocidad.

El valor del pico obtenido es de 1.065 lo que representa un 6.5%, muy inferior al valor mínimo requerido de 13%, y el tiempo de rechazo a la perturbación es de 0.277 segundos medido con ayuda del Data Cursor de la figura.

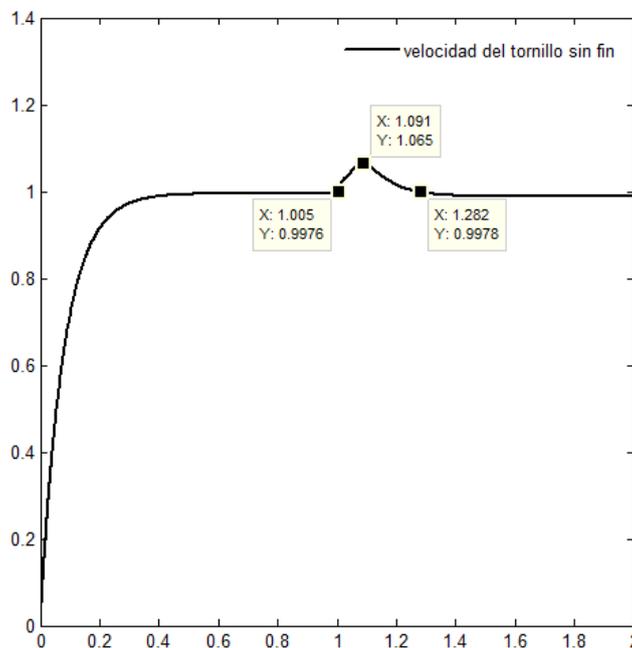


Figura 3.5. Respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de velocidad con rechazo a la perturbación de los lazos de control difusos de temperatura con desacoplamiento difuso.

C) La última prueba realizada para determinar la influencia de los lazos de control de temperatura sobre el lazo de control de velocidad se lleva a cabo con el diagrama Simulink de la figura 3.6 que contiene al controlador PID de la velocidad mostrado en la figura 3.7 para el sistema MIMO de la extrusora.

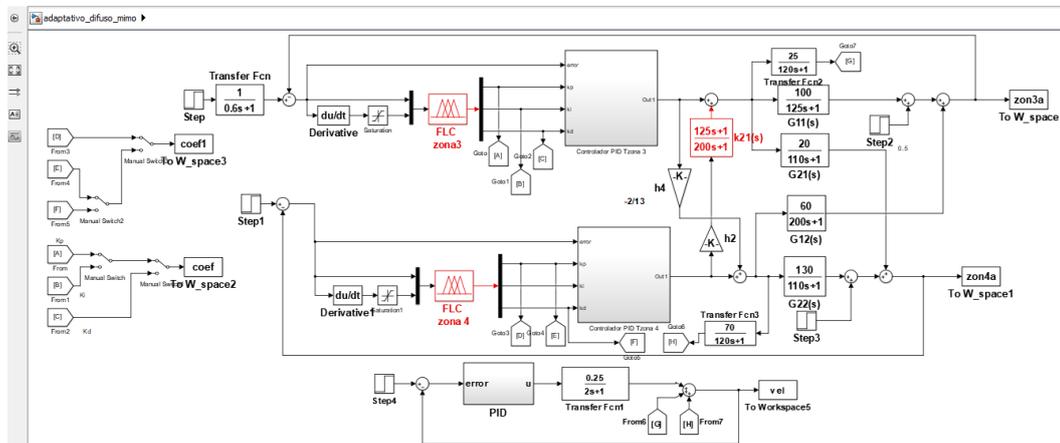


Figura 3.6. Diagrama Simulink con controladores difusos adaptativos con rechazo a la perturbación en el lazo de control de velocidad.

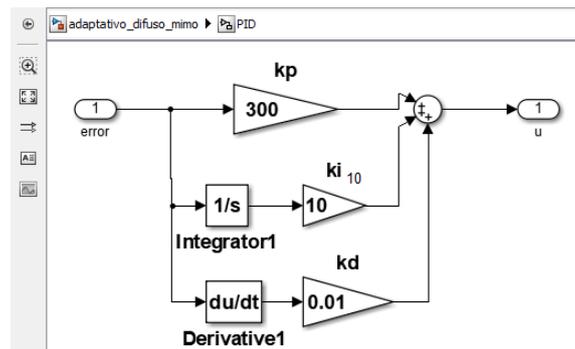


Figura 3.7. Diagrama Simulink del control PID de velocidad ajustado por prueba y error para rechazar las perturbaciones de los lazos de temperatura.

El ajuste realizado, que permite rechazar más rápido la perturbación introducida por los lazos de control de temperatura es la disminución de la ganancia del derivativo, anteriormente para los diagramas difuso con desacoplamiento normal y difuso con desacoplamiento difuso se ajustaba en $kd=10$.

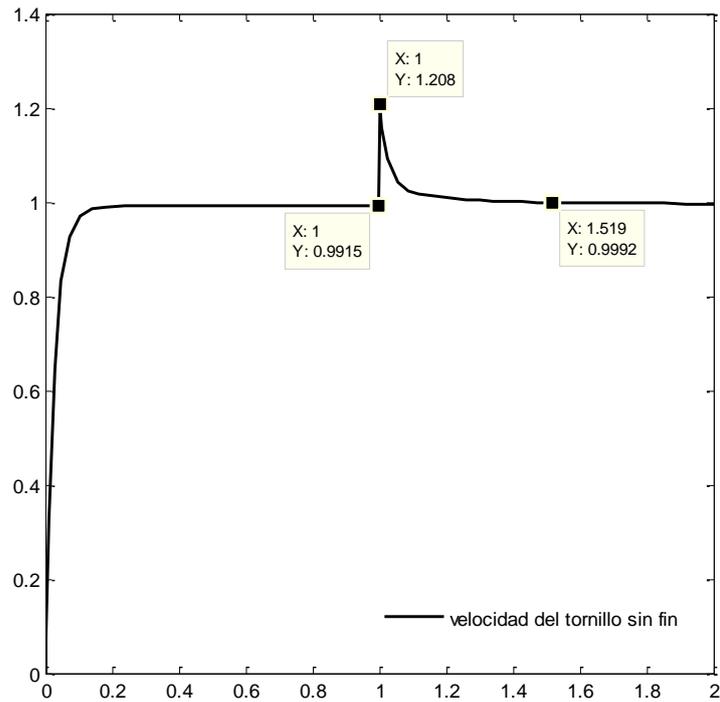


Figura 3.7. Respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de velocidad del tornillo rechazando la perturbación de los lazos de temperatura.

3.3.1 Análisis del desempeño de las diferentes estrategias de control ante una perturbación de carga

En lo que sigue se exponen los resultados del rechazo a una perturbación de carga aplicada en las zonas 3 y 4 de calentamiento.

3.3.1.1 Estrategia de control con controladores difusos con desacoples clásicos

Para poder diferenciar las respuestas en cada lazo de control se eligió una amplitud de 1.1°C en la zona 3 y de 0.9° C en la zona 4.

Lazo de control de temperatura de la zona 3

Como se observa de la figura 3.8, la perturbación de carga se refleja íntegramente en el valor de la temperatura controlada pero la misma es rechazada por el sistema a lazo cerrado MIMO en un tiempo no mayor de 0.32 segundos, que en comparación con la constante de tiempo estimada $\tau = 0.5$ segundos representa el 64% lo que demuestra una gran rapidez de reacción de todo el sistema para rechazar (disminuir) los efectos de la perturbación de carga.

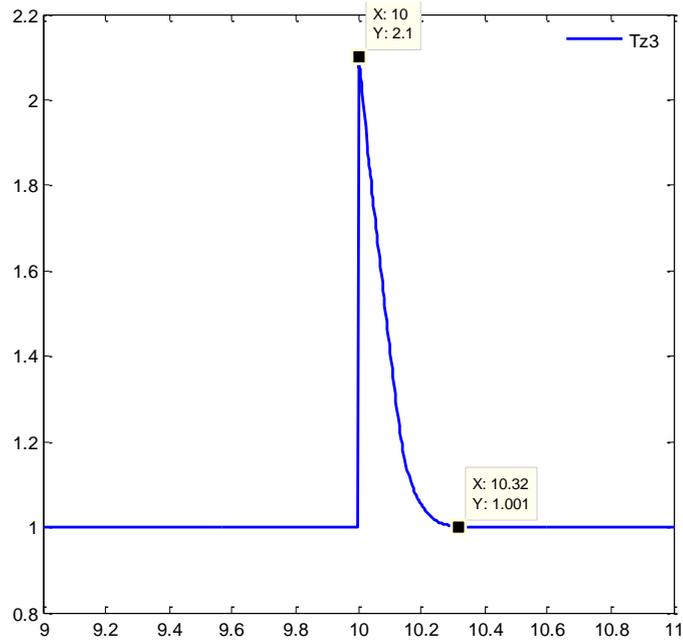


Figura 3.8. Respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de temperatura en la zona 3 rechazando la perturbación de carga.

Lazo de control de temperatura de la zona 4

Como se observa de la figura 3.9, la perturbación de carga se refleja íntegramente en el valor de la temperatura controlada pero la misma es rechazada por el sistema a lazo cerrado MIMO en un tiempo no mayor de 0.471 segundos, lo que es 3.6 veces mayor que la constante de tiempo estimada ($\tau = 0.132$ segundos) lo que demuestra rapidez de reacción de todo el sistema para rechazar (disminuir) los efectos de la perturbación de carga.

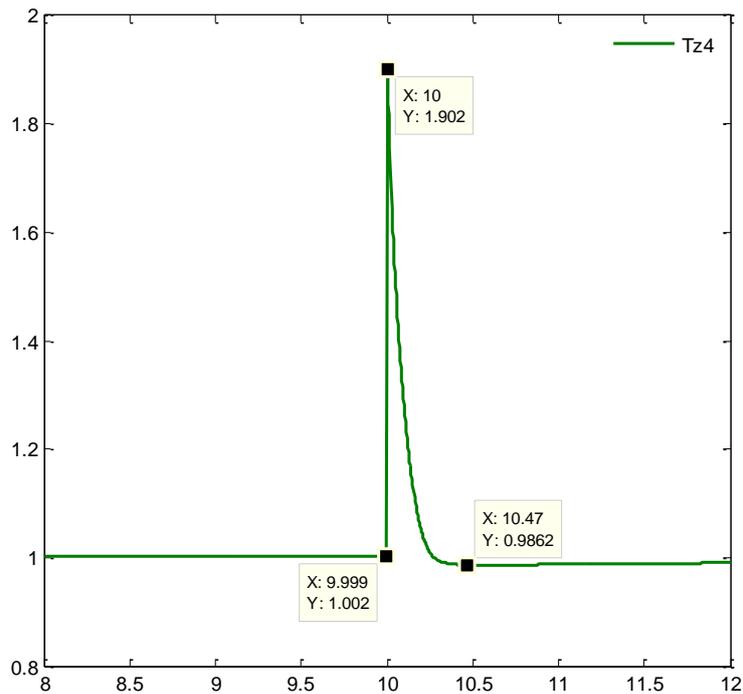


Figura 3.9. Respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de temperatura en la zona 4 rechazando la perturbación de carga.

Lazo de control de velocidad

En la figura 3.10 se muestra la respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de velocidad rechazando las perturbaciones de carga introducidas en los lazos de temperatura en diferentes instantes de tiempo. Se observa claramente los efectos del rechazo atenuando considerablemente por amplitud y apagando rápidamente las perturbaciones.

3.3.1.2 Estrategia de control con controladores difusos con desacoplamientos difusos

Lazo de control de temperatura de la zona 3

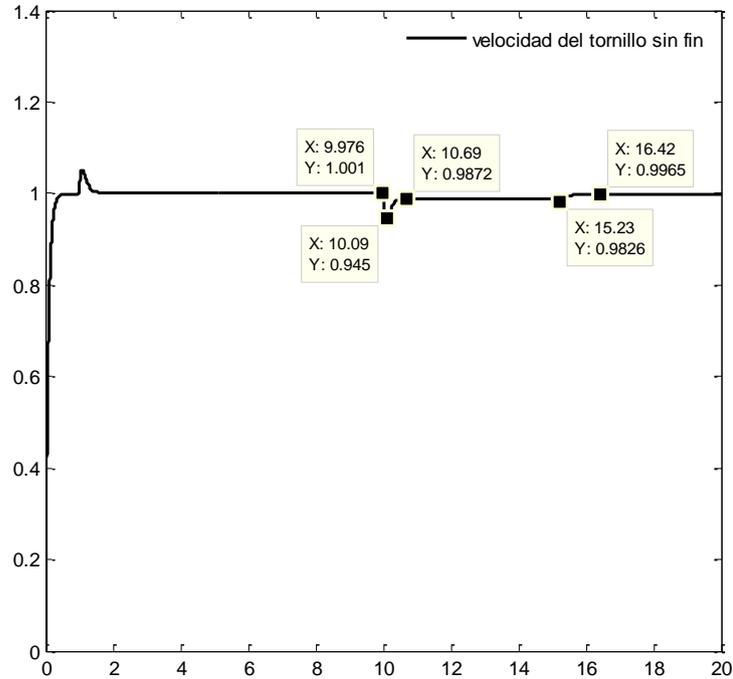


Figura 3.10. Respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de velocidad del tornillo sin fin rechazando las perturbaciones de carga.

En la figura 3.10 se muestra la respuesta del lazo de control difuso con desacoplamiento difuso rechazando la perturbación de carga en la zona 3. El diagrama Simulink empleado para la simulación es el mismo que se muestra en la figura 3.4.

En la figura 3.11 se destaca sólo la medición de la perturbación de carga en el instante 15 segundos, ya que se ha considerado que la perturbación de carga en la zona 4, en el instante 10 segundos prácticamente no afecta al desempeño del lazo de control. La evaluación del desempeño de los lazos de control de las zonas 3 y 4 se realizará en 4.4.

Lazo de control de temperatura de la zona 4

En la figura 3.12 se muestra la respuesta del lazo de control difuso con desacoplamiento difuso rechazando la perturbación de carga en la zona 4. El diagrama Simulink empleado para la simulación es el mismo que se muestra en la figura 3.4.

En la figura 3.12 se ha destacado solo la medición de la perturbación de carga en el instante 10 segundos, ya que se ha considerado que la perturbación de carga en la zona 3, en el instante 15 segundos prácticamente no afecta al desempeño del lazo de control.

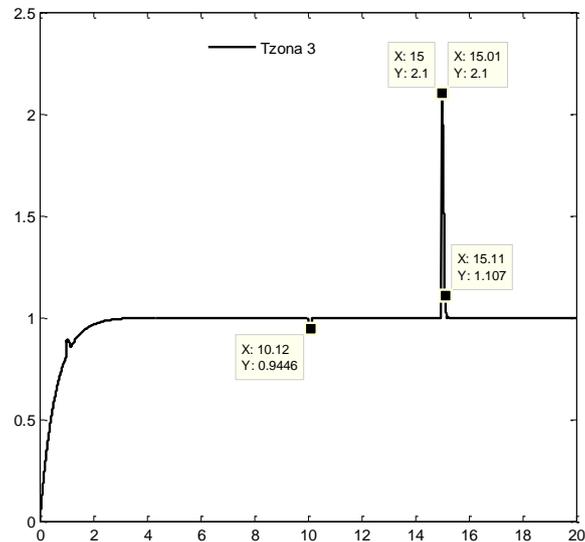


Figura 3.11. Respuesta del lazo de control difuso con desacoplamiento difuso rechazando la perturbación de carga en la zona 3.

En la figura 3.13 se muestra la respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de la velocidad del tornillo sin fin rechazando las perturbaciones que ejercen las perturbaciones de carga sobre los lazos de control de temperatura de las zonas 3 y 4.

Como se observa estas perturbaciones son fuertemente rechazadas, desde el punto de vista de la amplitud, así como también de la duración del rechazo.

La evaluación del desempeño del lazo de control de la velocidad del tornillo sin fin se realizará en 4.4.

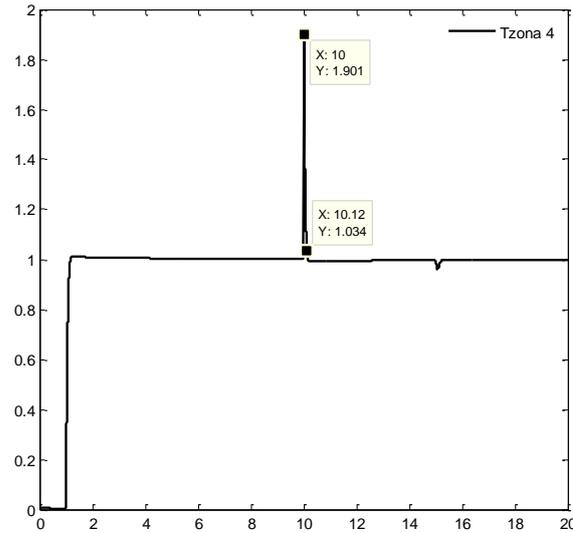


Figura 3.12. Respuesta del lazo de control difuso con desacoplamiento difuso rechazando la perturbación de carga en la zona 4.

3.3.2 Análisis del desempeño de las diferentes estrategias de control ante incertidumbres en el modelo de la planta

En lo adelante, al referirse a las especificaciones de respuesta transitoria se emplearán los conceptos y términos empleados en [43]

En la figura 2.5 se mostró el diagrama Simulink con el cual se obtuvieron las respuestas dadas en las figuras 2.6 y 2.7 que reflejan el comportamiento del sistema MIMO con planta nominal y controladores con desacoplos dinámicos. Estos resultados serán tomados como referencias para realizar la comparación del desempeño de las diferentes estrategias de control difuso, implementadas por simulación en capítulos anteriores.

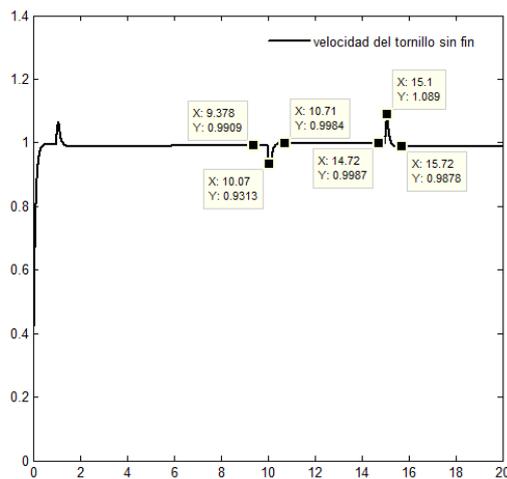


Figura 3.13. Respuesta en el dominio del tiempo del lazo de control de la velocidad del tornillo sin fin rechazando las perturbaciones de carga.

El análisis se llevará a cabo empleando la Tabla 3.1 y los diagramas de control mostrados en la figura 2.27 denominado controlador *difuso con desacoplamiento analítico*, en la figura 2.34 denominado controlador *difuso con desacoplamiento difuso* y el mostrado en la figura 2.43 denominado controlador *difuso adaptativo*. En todos los casos ya se tienen los resultados para la planta nominal.

Análisis del desempeño del controlador *difuso con desacoplamiento analítico*.

Se muestran solo los resultados de las corridas con las plantas I, II, III Y IV.

En la figura 3.14 se observa que el comportamiento del controlador difuso con desacoplamiento analítico es robusto ya que en los primeros instantes del tránsito del estado inicial al estado final las curvas de respuesta se desarrollan muy cercas una de

las otras. Por otro lado el estado final sigue siendo el mismo para las cuatro plantas experimentadas por simulación y todas las respuestas coinciden a partir del instante 1.681 segundos.

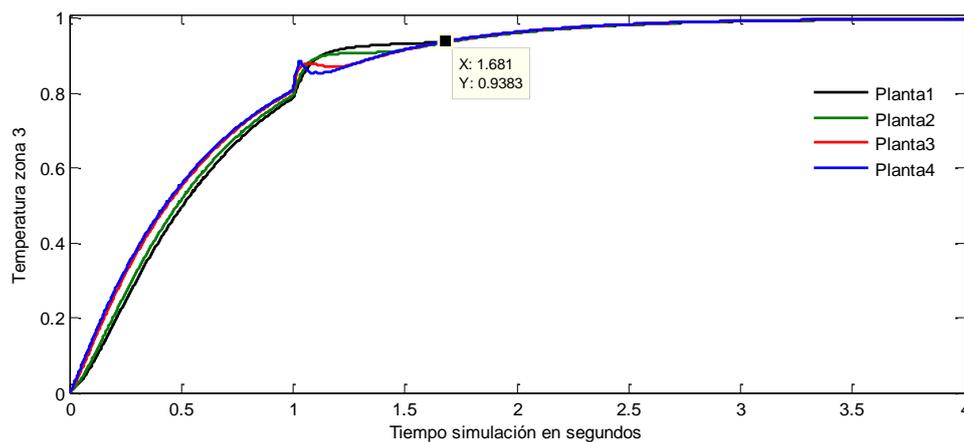


Figura 3.14. Comportamiento del controlador difuso con desacoplamiento analítico en presencia de incertidumbre en los parámetros de la planta para el lazo de control de temperatura de la zona 3.

En la figura 3.15 se observa que el comportamiento del controlador difuso con desacoplamiento analítico para el control de la temperatura de la zona 4 es robusto ya que el controlador puede regular la temperatura al valor prefijado en un tiempo finito lo que indica que se mantiene la estabilidad Entradas Acotadas-Salidas Acotadas (BIBO stability) ante incertidumbres en la planta.

En la misma figura se muestran solo los primeros 4 segundos de regulación de manera que se vea con más claridad las trayectorias de las respuestas.

Es evidente que las plantas uno y dos presentan un comportamiento más lento lo cual se debe a que ellas tienen un mayor valor de la constante de tiempo en sus funciones de transferencia. Por otro lado, el tiempo de asentamiento³ mayor, considerando un rango alrededor del valor final del tamaño del 2% se alcanza a los 5.194 segundos.

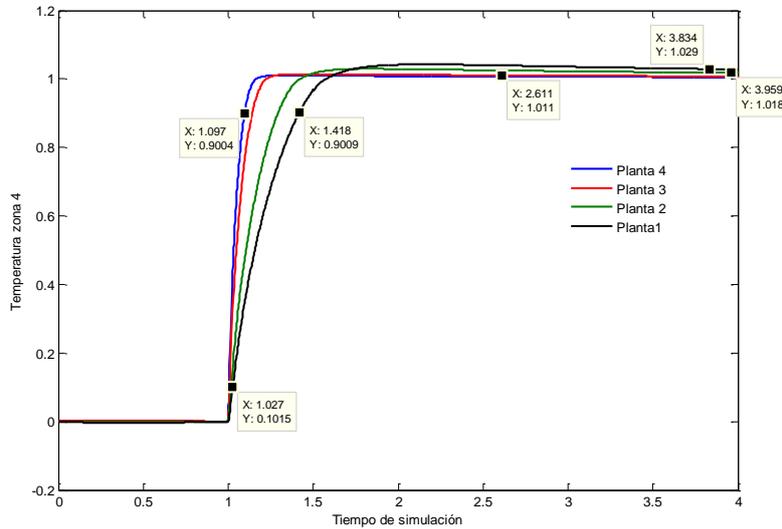


Figura 3.15. Desempeño del controlador ante incertidumbre de la planta.

Análisis del desempeño del controlador *difuso con desacoplamiento difuso*

Nuevamente se muestran solo los resultados de las corridas con las plantas I, II, III y IV. En la figura 3.16 se observa que el comportamiento del controlador difuso con desacoplamiento difuso para el control de la temperatura de la zona 3, ante incertidumbre en la planta evidencia estabilidad BIBO del sistema multivariable.

³ Tiempo de asentamiento, t_s : el tiempo de asentamiento es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 o 5%).

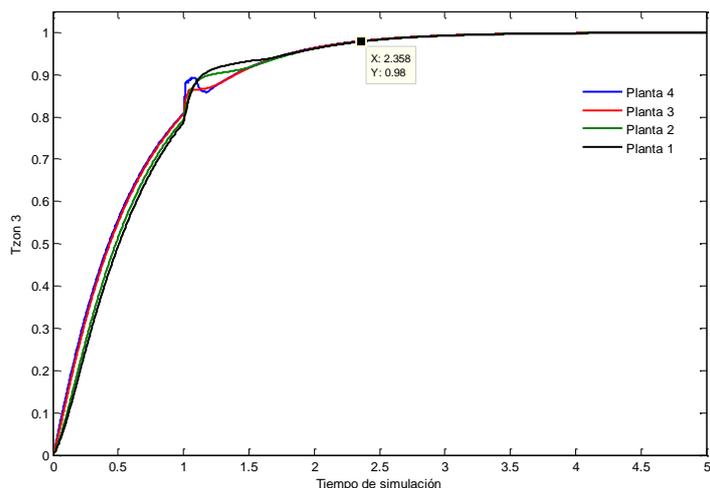


Figura 3.16. Desempeño del controlador ante incertidumbre de la planta zona 3.

A pesar de las variaciones de los parámetros de la planta multivariable se observa que el controlador mantiene las respuestas muy cercanas unas a otras. Se pone de manifiesto que el rechazo a la perturbación del lazo de control de la zona 4 sobre la temperatura de la zona 3 es más rápido para las plantas 3 y 4 lo cual se debe a menores valores de las constantes de tiempo.

El tiempo de asentamiento promedio, considerando un rango alrededor del valor final del tamaño del 2% se alcanza a los 2.358 segundos.

El desempeño del controlador para la zona 4 se evalúa empleando las respuestas mostradas en la figura 3.17.

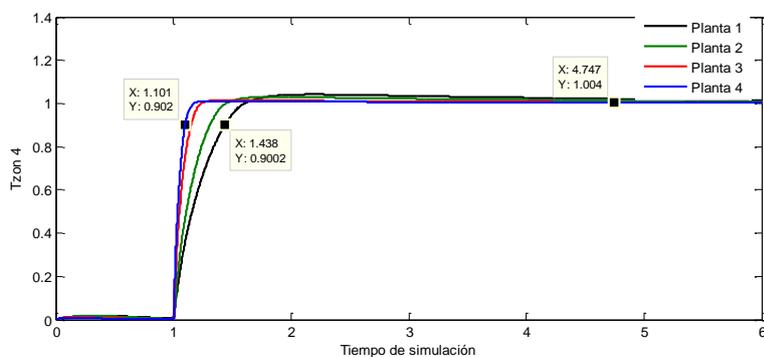


Figura 3.17. Desempeño del controlador ante incertidumbre de la planta para la zona 4.

Se observa que el comportamiento del controlador difuso con desacoplamiento difuso para el control de la temperatura de la zona 4 es estable ya que el controlador puede regular la temperatura al valor prefijado en un tiempo finito lo que indica que se mantiene la estabilidad BIBO ante incertidumbres en la planta controlada para la zona 4. A partir del instante 4.747 segundos todas las respuestas entran en el rango de 2% del valor final.

Análisis del desempeño del controlador *difuso adaptativo*

En la figura 3.18 se muestran los resultados de las corridas con las plantas I, II y III para el control de temperatura de la zona 3.

Se observa que el comportamiento del controlador difuso adaptativo para el control de esta zona, ante incertidumbres, mantiene la estabilidad BIBO del sistema multivariable sólo para las plantas I, II y III. Para la planta IV el lazo de control presentó un comportamiento inestable.

La perturbación de la zona 4 sobre la zona 3 es rechazada como máximo a los 0.529 segundos.

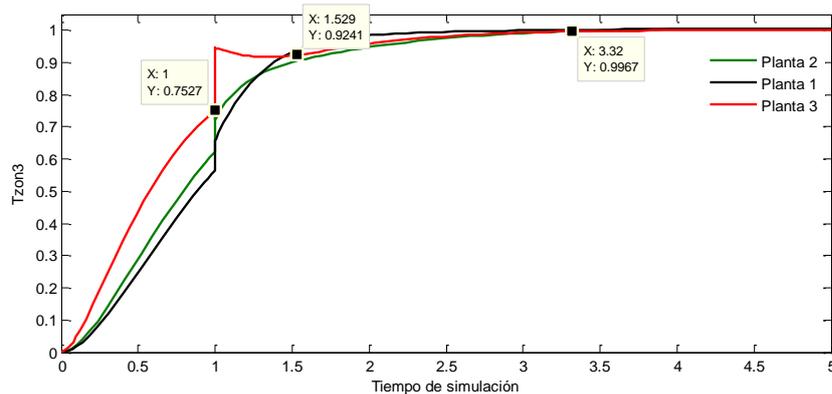


Figura 3.18. Desempeño del controlador difuso adaptativo ante incertidumbres de la planta zona 3.

El tiempo de asentamiento promedio, considerando un rango alrededor del valor final del tamaño del 2% se alcanza a los 3.32 segundos.

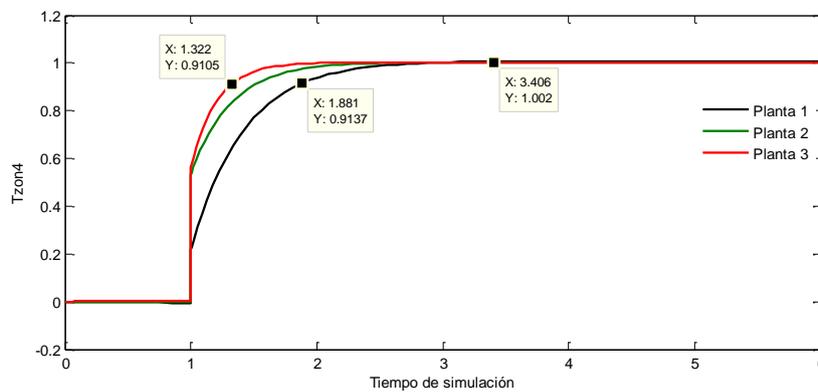


Figura 3.19. Desempeño del controlador difuso adaptativo ante incertidumbres de la planta Tzon4.

La figura 3.19 muestra el comportamiento del controlador difuso adaptativo regulando la temperatura de la zona 4. Se realizan las corridas con las plantas I, II, III y IV, lo cual simula la posible incertidumbre al estimar los parámetros de los modelos del calentamiento de la extrusora.

La estabilidad BIBO del sistema multivariable se mantiene sólo para las plantas I, II y III. Para la planta IV el lazo de control es inestable.

El tiempo de asentamiento promedio, considerando un rango alrededor del valor final del tamaño del 2% se alcanza a los 2.85 segundos.

3.4 Análisis de los resultados

Los resultados se presentan tabulados en cuatro Tablas en las cuales se analizarán la calidad de la regulación a cambios en la referencia, el rechazo a la perturbación de carga y la robustez del controlador.

En las tablas se encuentran numerados los controladores de manera que el (1) es el controlador del tipo PID con desacoplamiento analítico simulado por el diagrama mostrado en la figura 2.5; el número (2) el controlador difuso con desacoplamiento analítico cuyo diagrama es mostrado en la figura 2.27; el tercero (3) es el controlador difuso con desacoplamiento difuso mostrado en la figura 2.34 y el cuarto (4) es el controlador difuso adaptativo, mostrado en la figura 2.43.

Tabla 3.1. *Calidad de la regulación a cambios en la referencia*

Esquem a	t de subida (s)		t de pico (s)		t asentamiento		M%	
	Zona 3	Zona 4	Zona 3	Zon a 4	Zona 3	Zon a 4	Zona 3	Zona 4
1	0.268 1	1.85	1.338	---	2.138	3.73 8	3.9%	---
2	0.969	0.40	----	1.12 6	2.389	4.19 6	---	4.3%
3	1.400	0.17	---	0.50 6	2.382	0.24 7	---	1.18 %
4	1.061	0.38	---	---	2.530	0.73 0	---	---

Como se observa de la tabla 3.1 la estrategia que mejores prestaciones presenta en general es la que emplea cuatro sistemas de inferencias, o sea la de los controladores difusos con desacoples difusos correspondiente a la fila que contiene cuatro entradas menores por columna (**en negritas**).

Se propone emplear un criterio de bondad del rechazo a la perturbación considerando cierta similitud del impulso con un triángulo rectángulo.

Para ello se supondrá que el “área” del impulso, formado durante el rechazo, puede ser evaluada como “bondad del rechazo de la estrategia”. La estrategia que presente el menor valor del área será la de mejor rechazo. Aproximando el decremento por una función exponencial, el “área bajo la curva positiva” se podrá calcular como sigue:

$$B_r = \int_{t_0}^{t_f} h_0 e^{-\alpha t} dt = h_0 \int_{t_0}^{t_f} e^{-\alpha t} dt = \frac{h_0}{\alpha} (e^{-\alpha t_0} - e^{-\alpha t_f})$$

Donde

B_r – Bondad del rechazo

h_0 – Valor del salto

α – Parámetro que caracteriza la rapidez del decremento del exponencial, mismo que depende de la estructura del sistema MIMO para el rechazo a la perturbación.

Una cota superior para esta integral se puede obtener con el área de un triángulo rectángulo que tenga como base el intervalo $\Delta t = t_1 - t_0$ y como altura el valor h_0 lo cual hace más práctico el cálculo aproximado. Entonces:

$$B_r = \frac{1}{2} h_0 \Delta t$$

Δt – Base del impulso

La base del impulso se medirá al nivel 1% de h_0

Tabla 3.2. *Bondad del rechazo*

Esquema	B_r	
	Zona 3	Zona 4
1	0.2484	1.7533
2	0.1870	0.4300
3	0.1490	0.1200
4	0.5238	0.1186

Observando los resultados tabulados en la Tabla 3.2 se observa que en general el mejor rechazo es aportado por la estrategia de control difuso con acoplamiento difuso.

Por último, para el análisis de la robustez de los controladores se analiza comparando las figuras 3.14, 3.16 y 3.18 entre sí. Por otro lado, para el control de la temperatura de la zona 4, se comparan las figuras 3.15, 3.17 y 3.19.

Tabla 3.3. *Tiempo de asentamiento*

Esquema	t asentamiento	
	Zona 3	Zona 4
1	0.7556	13.82
2	5.194	3.959
3	2.358	4.747
4	3.32	2.85

Analizando los resultados mostrados en la tabla 3.3 y se observa que el controlador con desacoplamiento analítico y el clásico PID presenta el menor tiempo de asentamiento para la zona 3 y para la zona 4 el de mejor tiempo es el controlador difuso adaptativo.

Si se analiza considerando la dispersión de las trayectorias es notable el comportamiento del controlador difuso con desacoplamiento analítico y en segundo lugar la planta MIMO controlada con controlador difuso y desacoplamiento difuso.

La tabla 3.4 muestra las mediciones del ancho de la dispersión de las trayectorias de la regulación den la zona 4 de temperatura.

Tabla 3.4. *Dispersión de las trayectorias*

Esquema	Zona
	4
	□
1	4.229
2	0.321
3	0.337
4	0.559

Conclusiones

Del capítulo anterior se desprende que el controlador que mejor desempeño ha mostrado ante las pruebas por simulación es el controlador difuso con acoplamiento difuso.

Sin embargo, el controlador difuso adaptativo ha mostrado también desempeños adecuados, mostrándose como una propuesta en perspectiva para el control de las temperaturas de las zonas de calentamiento en extrusoras de un solo tornillo.

Los estudios de simulación de un modelo de extrusora de plástico de un solo tornillo indican que las técnicas de control modernas, como el control difuso y el adaptativo, son herramientas poderosas para el ingeniero de control en la industria química.

Los controladores diseñados pueden manejar las incertidumbres en los parámetros de la planta que varían según el tiempo o la carga. Esta técnica es una mejora significativa sobre el controlador PID clásico empleado en las industrias clásicas, es decir, en el desempeño del control, la calidad del producto y la continuidad de la producción.

Cumplimiento de los objetivos

- Se diseñó un controlador difuso multivariable adaptativo para el control de la temperatura y la velocidad considerando los efectos de perturbaciones no medibles en la velocidad del tornillo de la extrusora empleando el ayudante de Simulink para programar los sistemas de inferencias difusos.
- Se seleccionó el modelo que presentó la mayor cantidad de información sobre el modelo matemático de la extrusora,
- Se diseñó un controlador difuso multivariable para el control de las temperaturas de una extrusora modelo simple con tres zonas de calentamiento y una zona independiente en el dado o molde de la extrusora.
- Se diseñaron las bases de reglas para todos los controladores difusos el difuso clásico, el difuso para desacoplamiento y el adaptativo difuso,
- Se llevó a cabo la comparación de los resultados entre los controladores diseñados y se eligió el de mejores prestaciones.
- Se mejora la calidad de los productos obtenidos por extrusión de plástico al aumentar el rechazo a las perturbaciones respecto del controlador clásico PID con acoplamiento analítico, evaluadas con la propuesta de estimación de la Bondad del rechazo (B_r), así como obtener controladores difusos con inmunidad a las incertidumbres de la planta, lo que incide en la homogeneidad del material extruido.

En el caso de la estrategia de control adaptativo difuso se recomienda continuar su estudio de manera que pueda alcanzar las mismas prestaciones que se alcanzaron con el controlador difuso con acoplamiento difuso.

En particular debe investigarse el empleo de otros rangos y funciones de pertenencia, así como su distribución en los universos de discurso en los sistemas de inferencia difusos empleados para procesar la información requerida para ajustar las ganancias del controlador PID y mejorar el rechazo a la perturbación.

Todavía hay una brecha entre las investigaciones teóricas y las prácticas y la aceptación del control adaptativo en el proceso industrial. Se deben realizar la implementación de los controladores diseñados en una extrusora real.

Glosario

Extrusión: es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada. Las dos ventajas principales de este proceso por encima de procesos manufacturados son la habilidad para crear secciones transversales muy complejas con materiales que son quebradizos, porque el material solamente encuentra fuerzas de compresión y de cizallamiento. Además, las piezas finales se forman con una terminación superficial excelente.

Tornillo sin fin: en ingeniería mecánica se denomina tornillo sin fin a un dispositivo que transmite el movimiento entre ejes que son perpendiculares entre sí, mediante un sistema de dos piezas: el «tornillo» (con dentado helicoidal), y un engranaje circular denominado «corona».

Sistema multivariable: son sistemas con varias entradas y salidas, en los que una entrada afecta a varias salidas y recíprocamente una salida es afectada por varias entradas.

Simulink: es un entorno de programación visual, que funciona sobre el entorno de programación Matlab. Es un entorno de programación de más alto nivel de abstracción que el lenguaje interpretado Matlab (archivos con extensión .m). Simulink genera archivos con extensión mdl (de "model").

La conductividad térmica: es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor. En otras palabras, la conductividad térmica es también la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras adyacentes o a sustancias con las que está en contacto.

Husillo de extrusión: es básicamente un tornillo de Arquímedes fijado por un extremo a un motor que lo hace girar a una velocidad angular previamente decidida en los procesos de Moldeo por inyección y extrusión. Este husillo tiene un canal separado por álabes que sirven para cortar y empujar el flujo. Sus formas y diseños son muy diferentes, dependiendo del polímero que se desee procesar. En ingeniería de polímeros no es común hablar de las características matemáticas de estos modelos, sino que se habla de un husillo de tipo Nylon o de Polietileno o de PVC, etc.

Calefacción: (del lat. *calefactio*, *-onis*, derivado de *calofacere*, calentar, compuesto de *calere* y *facere* hacer), desde un punto de vista genérico, es el método o sistema mediante el cual se aporta calor a alguien o algo con el fin de mantener o elevar su temperatura.

Enfriamiento: disminución de la temperatura de un cuerpo o de un lugar.

Estática: es la rama de la física que analiza los cuerpos en reposo: fuerza, par / momento y estudia el equilibrio de fuerzas en los sistemas físicos en equilibrio estático, es decir, en un estado en el que las posiciones relativas de los subsistemas no varían con el tiempo. La primera ley de Newton implica que la fuerza neta y el par neto (también conocido como momento de fuerza) de cada organismo en el sistema es igual a cero. De esta limitación pueden derivarse cantidades como la carga o la presión. La red de fuerzas de *igual a cero se conoce como la primera condición de equilibrio*, y el par neto igual a cero se conoce como *la segunda condición de equilibrio*. Un cuerpo está en reposo cuando su velocidad es igual a cero y está en equilibrio cuando la aceleración es igual a cero.

Defuzzificación: es el proceso de obtener un valor cuantificable en Lógica clásica, dados conjuntos difusos y sus correspondientes grados de membresía. Es el proceso que transforma un conjunto difuso a un conjunto clásico. Por lo general es necesario en sistemas de control difuso; estos poseen una serie de reglas que transforman un número de variables en un resultado difuso, es decir, el resultado se describe en términos de membresía en conjuntos difusos.

Termoplástico: es un material que, a temperaturas relativamente altas, se vuelve deformable o flexible, se derrite cuando se calienta y se endurece en un estado de transición vítrea cuando se enfría lo suficiente. La mayor parte de los termoplásticos son polímeros de alto peso molecular, los cuales poseen cadenas asociadas por medio de fuerzas de Van der Waals débiles (polietileno); fuertes interacciones dipolo-dipolo y enlace hidrógeno, o incluso anillos aromáticos apilados (poliestireno). Los polímeros termoplásticos difieren de los polímeros termoestables o termofijos en que después de calentarse y moldearse pueden recalentarse y formar otros objetos.

Diagrama de Bode: es una representación gráfica que sirve para caracterizar la respuesta en frecuencia de un sistema. Normalmente consta de dos gráficas separadas, una que corresponde con la magnitud de dicha función y otra que corresponde con la fase.

Bibliografía

- Abeykoon, C., Li, K., McAfee, M., Martin, P. J. & Irwin, G.W. (2011). *Extruder Melt Temperature Control With Fuzzy Logic*. Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano (Italy).
- Abeykoon, C. (2016). Single Screw Extrusion Control: A Comprehensive Review and Directions for Improvements. *Control Engineering Practice*, 51, 69-80.
- Almeida, B. y Mora, F. (2018). *Diseño de un controlador difuso multivariable para el control de un intercambiador de calor en una planta didáctica*. (Tesis de posgrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- Astrom, K. J., Johansson, K. H., & Wang, Q.-G. (2001). "Design of decoupled PID controllers for MIMO systems" in Proc. *Amer. Control Conf.*, 3, 2015–2020.
- Barber-Colman (2012). *Invensys Eurotherm*. <http://www.barber-colman.com>
- Bezanson, L. W. & Harris, S. L. (1986). Identification and control of an extruder using multivariable algorithms. *IEE Proceedings*, 133(4).
- Bustos, S. & Ramírez, J. (2016). *Aplicación de la Inteligencia Artificial al control de los motores de inducción*. (Tesis de posgrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- CIPET. (2012). *Plastics industry—Statistics*. http://cipet.gov.in/plastics_statics.html
- Colina-Morles, E. (1994). *Controladores Lógicos Difusos*. Cuadernos de Control. Universidad de Los Andes.
- Costin, M. H., Taylor, P. A. & Wright, J. D. (1982). On the Dynamics and Control of a Plasticating Extruder. *Polymer Engineering and Science*, 22(17).
- Ching, C. T. & Chi, H. L. (2011). Fuzzy supervisory predictive PID control of a plastics extruder barrel. *Journal of the Chinese Institute of Engineers*.
- Danapalasingam, K. A. (2014). Robust Fuzzy Logic Stabilization with Disturbance Elimination. *The Scientific World Journal*.
- Dastyh, J., Wiemer, P. & Unbehauen, H. (1988). *Robust and Adaptive Control of a single screw plastics extruder*. IFAC Adaptive Control of Chemical Processes, Copenhagen, Denmark.
- Espinoza, R. C. (2018). *Apuntes Control Multivariable*. Plastics injection molding machine manufacturers. http://plastics.inwiki.org/Injection_molding_machine_manufacturers
- Herrera, E. V. (2018). *Control Multivariable*. MACI. ESPOL.
- Hung, N. T., Prasad, N. R., Walker, C. L. and Walker, E. A. (2003). *A First Course in Fuzzy and Neural Control*. Chapman & Hall/CRC.
- Issa, R. I., & Spalding, D. B. (1972). Un steady one-dimensional compressible flow with heat transfer, *J. Mech. Eng. Sci.*, 14, 365.

- Jin, J., Huang, H., Sun, S. & Pang, Y. (2013). Study on Fuzzy Self-Adaptive PID Control System of Biomass Boiler Drum Water. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 3, 93-98.
- Katsuhiko, O. (2010). *Ingeniería de Control Moderna*. Pearson Educación, S.A.
- Kochhar, A. K., & Parnaby, J. (1977). Dynamical Modelling and Control of Plastics Extrusion Processes. *Automatica*, 13, 177-183.
- Lian, R. J. & Huang S. J. (2001). A mixed fuzzy controller for MIMO systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 120, 73–93.
- Luo, Y., Wang, Z., Wei, G., Shen, B., He, X., Dong, H., & Hu, J. (2015). Fuzzy-Logic-Based Control, Filtering, and Fault Detection for Networked Systems: A Survey. *Mathematical Problems in Engineering*.
- Mazzone, V. (2002). *Controladores PID*. Universidad Nacional de Quilmes.
- Moog (2012). *The next level of plastics production*. <http://www.moog.com/literature/ICD/Moog-Plastics-BlowMolding-Overview-en.pdf>
- Mosquera, J. C. (2018). *Controladores difusos del tipo proporcional-integral-derivativo para el control de modelos de plantas con dinámicas complejas*. (Tesis de posgrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- Parnaby, J., Kochhar, A. K. & Wood, B. (1975). Development of Computer Control Strategies for Plastic Extruders. *Polymer Engineering and Science*, 15(8).
- Passino, K., & Yurkovich, S. (1998). *Fuzzy Control*. Addison Wesley Longman.
- Pedrycz, W. (1994). Why triangular membership functions? *Fuzzy Sets and Systems* 64, 21-30
- Plastics Europe. (2012). *Plastics—The facts 2011*. <http://www.plasticseurope.org/Document/plastics—the-facts-2011.aspx>
- Rockwell Automation (2012). <http://ab.rockwellautomation.com>
- Rodríguez, M. R., Perdomo, J. Strefezza, M., & Colmenares, W. (2004). Plastic extruder control using a fuzzy controller adapted with the prediction error model. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 25(1).
- Saigua, M. & Vargas, J. (2016). *Estudio teórico del comportamiento de controladores inteligentes en base a redes neuronales y lógica borrosa en el control de vibraciones del sistema no lineal de suspensión básica de un vehículo ligero*. (Tesis de posgrado). Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador.
- Siemens. (2012). *Blow molding machine technology: form meets precision*. <http://www.automation.siemens.com/mcms/mc/en/mechanical-engineering/plastic-machines/blow-molding-machine/Pages/blow-molding.aspx>
- Skogestad S. & Postlethwite, I. (2001). *Multivariable Feedback Control. Analysis and design*. John Wiley & Sons.
- Smith, R. A. (1969). *Dynamics of a Plasticating Extruder*. (Master Thesis). The University of Arizona.

- Spalding, M. A., & Hyun, K. S., (2003). Troubleshooting mixing problems in single-screw extruders. *SPE ANTEC Tech.*, 229–233.
- Strmcnik, S. & Juricic, D. (2013). *Case Studies in Control. Putting Theory to Work*. Springer-Verlag London.
- Subramanian, S. S., Durga, S., Loshni, K. R., & Kumar, V. D. (2016). A Review on Control of Plastic Extrusion Process. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, 5(1).
- Tadmor, Z., Lipshitz, S. D., & Lavie, R. (1974). Dynamic model of A plasticating extruder, *Polym. Eng. & Sci.*, 14, 112.
- Tad, J. S., Taoi, C.W. & Tsait, C. C. (1995). *Temperature Control of a Plastic Extrusion Barrel Using PID Fuzzy Controllers*. Proceedings IEEE Conference on Industrial Automation and Control Emerging Technology Applications.
- Yusuf, I., Iksan N. & Suryana, N. H. (2010). *A Temperature Control for Plastic Extruder Used Fuzzy Genetic Algorithms*. Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, Vol II, IMECS 2010, Hong Kong.
- Zhang, Y., & Zhao, S. (2012). The Fuzzy Self-Tuning PID Control for Boiler Drum Water Level. *Applied Mechanics and Materials*, 198-199, 1231-1234.

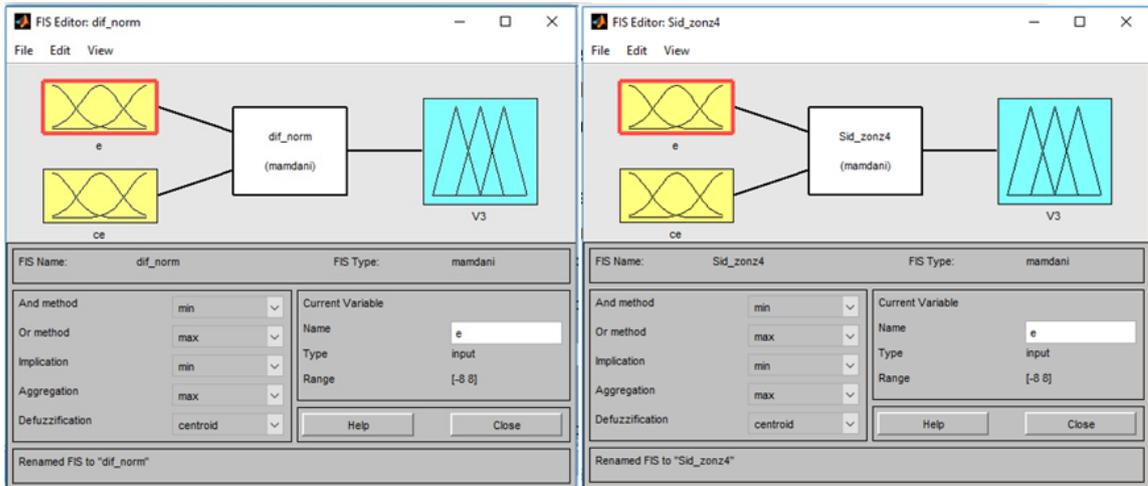
ANEXO 1

Programa para calcular la matriz de ganancias relativas de $G(s)$ de la extrusora.

```
A=[100 60 0;20 130 0;25 70 0.25];  
b=inv(A); %se calcula la inversa de A  
B=b';%se transpone el resultado  
%se calcula la matriz de ganancias relativas %mediante el producto  
%elemento por elemento (Hadamard or Schur product)  
lamda=A.*B;  
[U,S,V] = svd(lamda)  
c_n=cond(lamda)
```

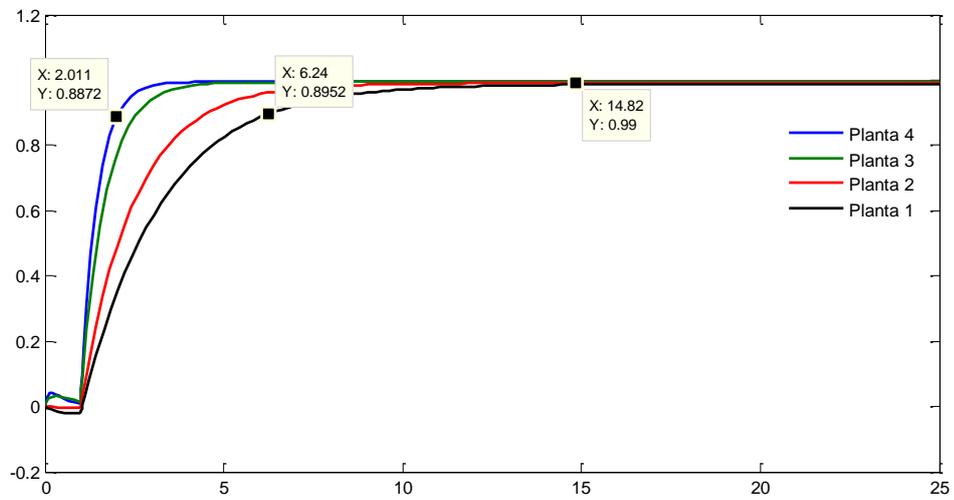
ANEXO 2

SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSO



ANEXO 3

RESPUESTAS DEL SISTEMA MIMO CON ACOPAMIENTO ANALÍTICO



Los autores

Luis Jacinto Mendoza Cuzme (Chone, Manabí, Ecuador, 1983). Ingeniero Eléctrico de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí desde 2010, Máster en Automatización y Control Industrial de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ha trabajado en industrias La Fabril S.A, Corporación Nacional de Telecomunicaciones CNT EP. Ha publicado el artículo científico: Algoritmo Genético para Evaluación de Ratones en un laberinto. Se ha desempeñado como profesor en el Instituto Superior Luis Arboleda Martínez y otras instituciones. Tiene experiencia como coaching en CNT EP para el manejo de infraestructura de redes de telecomunicaciones WFM, redes FTTH de GPON, experiencia en manejo de cartografía y arcGIS y geo-referenciación, curso de caracterización de Fibra Óptica, actividades de libre ejercicio en redes eléctricas, telecomunicaciones y Automatización. Correo electrónico: luis.mendoza@uleam.edu.ec - ljmendoz@espol.edu.ec

Danny Gerardo Ramírez Chávez (El Carmen, Manabí, Ecuador, 1984). Ingeniero Eléctrico de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí desde 2010, Máster en Automatización y Control Industrial de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Se ha desempeñado como docente de la Universidad Laica Eloy Alfaro, es analista de operación y mantenimiento de la Corporación Nacional de Telecomunicaciones. Ingeniero en el libre ejercicio de la profesión. Ha publicado el artículo científico: “Simulación de la transformación de un sistema asimétrico trifásico a un sistema retórico de dos ejes”, se encuentra en desarrollo del artículo científico denominado “Diseño de un controlador difuso multivariable adaptativo para el control de la temperatura y velocidad de una extrusora para fabricar mangueras”. Correo electrónico: dgramire@espol.edu.ec

Arístides Reyes Bacardí (Cuba, 1975). Se recibe de Ingeniero Radiotécnico en Ucrania. Es Máster en Ciencias desde el año 2000 en Modelación y Simulación Computacional y desde 2003 en Informática Industrial y Automatización. Ha laborado en instituciones tales como Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, en el Departamento de Automática y Computación. En la maestría MACI de FIEC, ESPOL como profesor invitado. En la actualidad es Profesor Auxiliar 2 de la UNEMI y profesor invitado de la maestría en Matemática Mención Modelación Matemática, también de UNEMI. Es Investigador Acreditado de la SENESCYT desde el año 2018. Correo electrónico: areyesb@unemi.edu.ec



Uleam
UNIVERSIDAD LACA
ELOY ALFARO DE MANABÍ

ISBN: 978-9942-827-68-5



9789942827685