

Diseño de una estrategia de control difuso vs PID en sistemas multivariables lineales acoplados

Design of a fuzzy control strategy vs PID in multivariable linear coupled systems

^aJulio Ernesto Gomez-Hernandez, ^bAldo Pardo-Garcia, ^cOscar Manuel Duque-Suárez, ^dJorge Luis Díaz-Rodríguez

 a. Magíster en Controles Industriales, juegom2883@hotmail.es, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

 b. Posdoctor en Ingeniería Eléctrica, apardo13@hotmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

 c. Magíster en Controles Industriales, omduke@hotmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

 d. Maestría en Automática, jdiazcu@gmail.com, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.

Recibido: Mayo 18 de 2021 **Aceptado:** Septiembre 15 de 2021

Forma de citar: J.R. Gomez-Hernandez, A. Pardo-Garcia, O.S. Duque-Suarez, J.L. Díaz-Rodríguez, "Diseño de una estrategia de control difuso vs PID en sistemas multivariables lineales acoplados", *Mundo Fesc*, vol 11, no. S6 pp. 93-109, 2021.

Resumen

Este artículo trata sobre el desarrollo y comprobación de una metodología que permita al usuario final, sintonizar un controlador difuso para sistemas multivariables (MIMO). La estrategia se realizó por medio de la simulación del modelo de una columna de destilación metano-agua Wood-Berry. Mediante una serie de pasos descritos en este documento en donde se realiza desde la identificación de cada una de las funciones contenidas en un sistema multivariable. El cálculo de la malla de desacople que permite eliminar el efecto de una variable sobre la otra. La sintonización del controlador clásico el cual se utiliza para el desarrollo de un controlador difuso a partir de las señales del error, delta error y salida de controlador. Finalmente se realiza una comparación entre los controladores diseñados mediante un análisis de robustez y un análisis del rendimiento.

Palabras clave: Estrategia de control, lógica difusa, PID, MIMO, sintonía.

Autor para correspondencia:

*Correo electrónico: apardo13@hotmail.com



Abstract

This paper deals with the development and testing of a methodology that allows the end user to tune a fuzzy controller for multivariable systems (MIMO). The strategy was carried out by simulating a Wood-Berry methane-water distillation column model. By means of a series of steps described in this document where it is carried out from the identification of each one of the functions contained in a multivariable system. The calculation of the decoupling mesh that allows to eliminate the effect of one variable on the other. The tuning of the classic controller which will be used for the development of a fuzzy controller from the error signals, delta error and controller output. Finally, a comparison is made between the controllers designed by means of a robustness analysis and a performance analysis.

Keywords: Control strategy, fuzzy logic, PID, MIMO, tuning.

Introducción

Cuando que se presenta una interdependencia entre dos variables que influyen en un mismo proceso, es decir acople en cualquiera de las variables se considera como una perturbación [1]. Para lo que se hace necesario llevar a cabo un proceso de desacople que permita independizar y tratar el proceso multivariable como un proceso de única entrada única salida. Por ejemplo, en [2] (pp. 72.) *se define que “cuando el número de entradas y número de salidas es superior a la unidad”* es un sistema de Múltiples Entradas Múltiples Salida (MIMO).

Actualmente existe una ausencia de procedimientos que faciliten la implementación de control para procesos multivariables desde nuevos puntos de vista. En la literatura revisada [3-8] se puede verificar que investigaciones en sistemas MIMO abordando diferentes técnicas de control complejas que eliminan la interacción entre los sistemas, esta complejidad puede predisponer a quienes les interese implementar un control multivariable. El enfoque principal de las estrategias utilizadas en estos sistemas se enfoca en el desarrollo de controladores clásicos. Cuando se logra que el sistema MIMO implementado consiga el desacople, el sistema resultante se comporta como varios sistemas Simple Entrada Simple Salida (SISO).

La metodología desarrollada se realiza tomando como ejemplo de un sistema MIMO. Teniendo como punto de partida el modelo experimental obtenido de la columna de destilación metano-agua [9]. Este trabajo es un caso de estudio ampliamente utilizado en investigaciones referentes a sistemas multivariables. Para este caso en particular se toma como punto de referencia para que se entienda la manera de abordar este tipo de sistemas MIMO. Desde la descripción de los componentes, su funcionamiento, la identificación de los procesos de la planta con sus respectivas interacciones, cálculo de malla de desacople, sintonización de controlador clásico además se diseña un controlador difuso que se rige por la lógica difuso [10] y su respectiva comparación.

Un sistema MIMO es la integración de varios sistemas SISO con acople. Es decir, la unión de diferentes procesos que presentan una interacción con otros procesos de una planta. Teniendo como principales características la direccionalidad y el acoplamiento; características que lo diferencian de un sistema SISO. Siendo un sistema multivariable como se representa en la figura 1.

Las configuraciones de control en [11] nos presenta que *“en cualquier sistema multivariable se puede clasificar principalmente 3 tipos de configuración: configuración con un grado de libertad,*

configuración con dos grados de libertad y configuración general". Esquemas que son representado en la siguiente fig. 1 [12], [13].

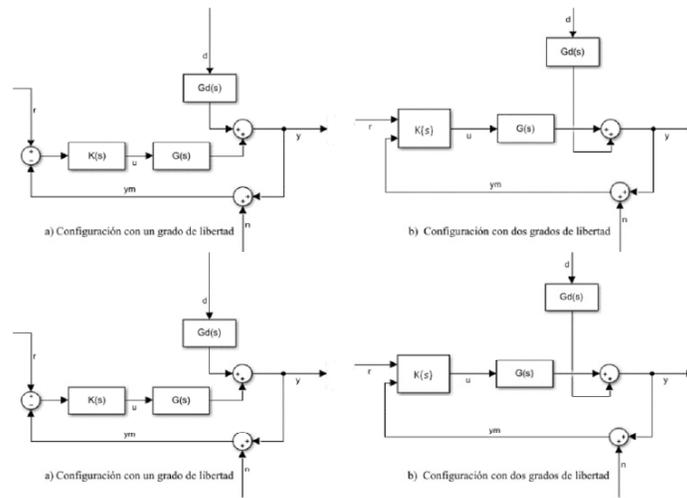


Figura 1. Configuraciones de control

Donde:

- $K(s)$ es la matriz de funciones de transferencia del controlador multivariable, ya sea descentralizado o centralizado.
- $G(s)$ es el modelo del proceso.
- $G_d(s)$ es el modelo de las perturbaciones,
- El vector de variables controladas.
- r es el vector de señales de referencia.
- d es el conjunto de perturbaciones.
- n es el conjunto de señales de ruido sobre las variables controladas.
- y_m es el vector de medida de las variables controladas.
- u es el vector de variables manipuladas.
- $P(s)$ es un modelo de planta generalizado que incluye a $G(s)$, $G_d(s)$ y la estructura de conexiones entre el proceso y el controlador.
- w es el conjunto de entradas externas al proceso (perturbaciones y ruidos).
- z es el conjunto de señales que se sacan al exterior con diversos fines (supervisión, optimización, etc.).
- v son las entradas al controlador en la configuración general.

Interacción en sistemas multivariables

Se asume la existencia como se muestra en

la figura 2 usada por [14].

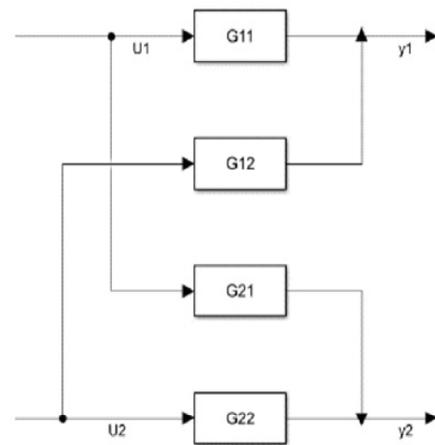


Figura 2. Sistema multivariable de 2 entradas 2 salidas. Fuente: [15].

Salidas las cuales se representan como se observa en las ecuaciones 1 y 2.

$$y_1 = G_{11} u_1 + G_{12} u_2 \quad (1)$$

$$y_2 = G_{21} u_1 + G_{22} u_2 \quad (2)$$

Entonces si existe interacción si la respuesta de una variable controlada frente al cambio de una variable manipulada cambia al cerrar otro de los lazos presentes en el sistema [12].

Desacoplamiento en sistemas multivariables

Con la intención de eliminar o reducir las interacciones entre las variables del proceso se pretende descomponer en varios sistemas mono variable por medio del desacoplamiento donde se elimine el acoplamiento de las variables deseadas y las salidas. En la figura 3 podemos ver un sistema MIMO compuesto por varios subsistemas.

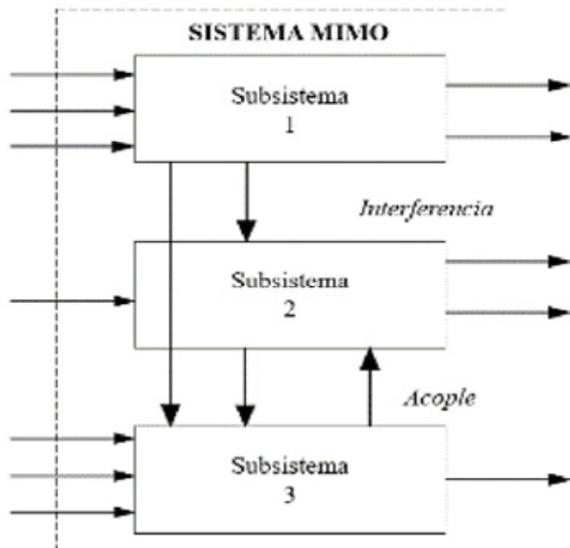


Figura 3. Representación de un sistema mimo descompuesto en un conjunto de sistemas acoplados. Fuente: [16].

En el trabajo [17] los autores plantean que “El desempeño del desacoplamiento depende de algunas características del sistema como

no linealidades, elevados tiempos muertos, entre otras, que en algunos casos no permiten la implementación del mismo. Algunas veces se emplean técnicas de desacoplamiento que consideran los valores de estado estacionario basándose en la ganancia estática, despreciando el efecto de las características dinámicas”.

En [18] al realizar su trabajo: Análisis de estrategias de desacoplamiento en sistemas interactuantes de control de procesos encuentran que el uso de des acopladores presenta limitaciones en “Que un sistema de control por modelo, lo que requiere el conocimiento del mismo y, dado que los parámetros pueden variar con el tiempo, será necesario un sistema de identificación en línea de los parámetros o bien realizar la actualización periódicamente; así como también requiere la inversión de funciones, lo que limita la aplicación a los sistemas invertibles; cuando no es posible, por ejemplo cuando existen retardos puros como en el caso de destilación, deben usarse aproximaciones con las consiguientes restricciones en cuanto a validez”. En la figura 8 observamos el diagrama de bloques de un sistema MIMO con red de desacoplamiento controlador descentralizado.

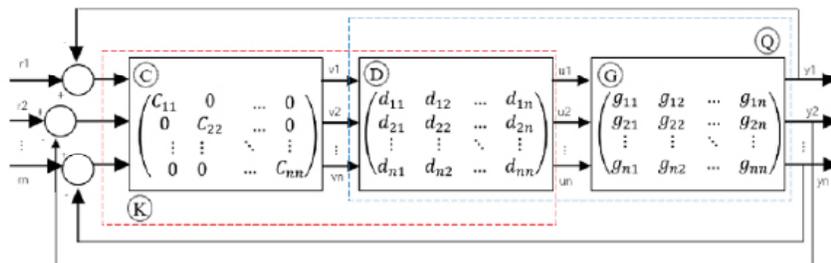


Figura 4. Sistema de control combinando red de desacoplamiento y controlador descentralizado. Fuente: [11] p 23.

Estrategia en sistemas MIMO - caso de estudio

En [19] se describe que las columnas (fig. 5) en los procesos se utilizan para la separar los componentes líquidos de una mezcla mediante la destilación. El principio básico para la

separación de los líquidos es la volatilidad de cada componente y dependiendo del peso entre más liviano sea este se desplazará más hacia la parte superior de la columna cuando se caliente. Las bandejas de la columna se utilizan para separar la mezcla del metanol-agua que tienen un punto de ebullición de 100°C y 64.7 °C respectivamente. Por lo general esta columna en el proceso consume más del 50% de la energía suministrada a la planta que es utilizada para la calefacción como refrigeración, el consumo energético se puede optimizar mediante un control eficaz.

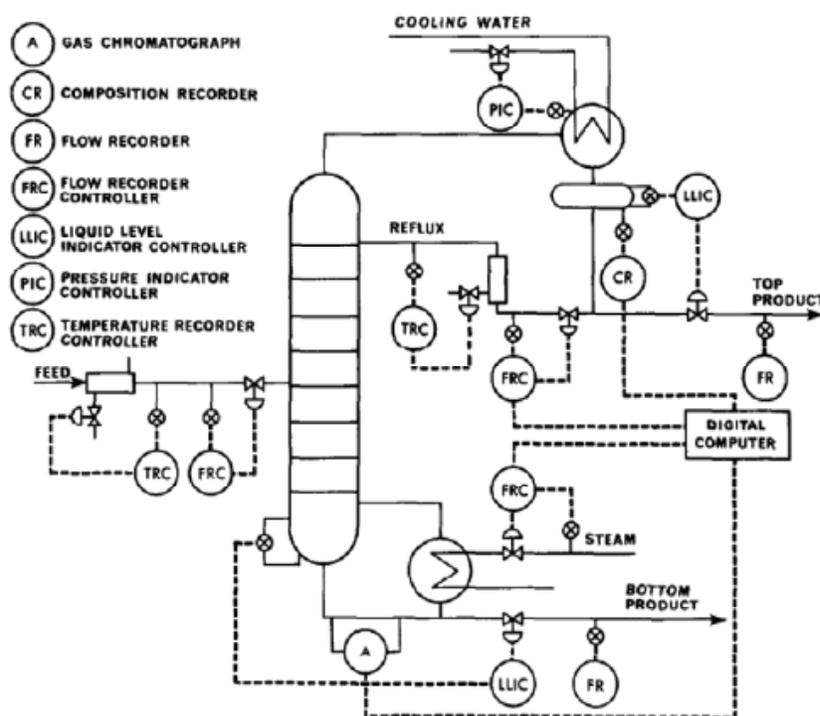


Figura 5. Diagrama esquemático de la columna. -Fuente: [9].

Función de los componentes internos de la columna:

Las bandejas se utilizan para mejorar la separación de los componentes.

Un re-hervidor se utiliza para proporcionar calor para la vaporización necesaria desde el fondo de la columna.

El condensador se utiliza para enfriar y condensar el vapor de la parte superior de la columna de destilación.

El tambor de reflujo se utiliza para retener el vapor condensado de manera que el reflujo líquido pueda ser reciclado desde la parte superior de la columna.

La columna de destilación contiene una corriente de alimentación y dos corrientes de producto.

La alimentación contiene un porcentaje molar del componente llamado X_F .

La corriente del producto en la parte superior tiene una composición denominada X_D .

La corriente del producto que sale de la parte inferior contiene una composición de X^B del componente ligero.

En [20] "Modelling and control of distillation column" describe el tratamiento matemático de la planta de Wood and Berry y se simplifica el diagrama de la figura 5 con los 2 procesos

a controlar. De manera experimental [9] obtuvieron el siguiente modelo:

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{12.8e^{-s}}{16.7s + 1} & \frac{-18.6e^{-3s}}{21s + 1} \\ \frac{6.6e^{-7s}}{10.9s + 1} & \frac{-19.4e^{-3s}}{14.4s + 1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{3.8e^{-8s}}{14.9s + 1} \\ \frac{4.9e^{-3.4s}}{13.2 + 1} \end{bmatrix} d \quad (3)$$

Donde

- y_1 Metanol destilado [mol%].
- y_2 Agua [mol%].
- u_1 Caudal de reflujo [lb/min].
- u_2 Caudal de vapor [lb/min].
- d Caudal no medido [lb/min].

Las señales u_1 y u_2 son las variables de entrada, y_1 y y_2 son señales de salida. El caudal no medido d es una perturbación en el sistema.

Para aplicar esta metodología debemos de conocer el funcionamiento del proceso, que vamos a controlar y por medio de que actuadores haremos el control. Esta metodología no requiere conocer la matemática del proceso. El diagrama

de bloques de la figura 6 muestra la representación de la columna de (Wood and Berry,1973) en el que se toman para el estudio un sistema de 2x2 donde se realizaran las estrategias de control.

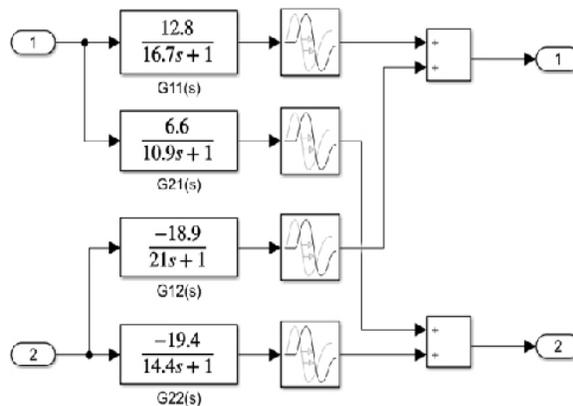


Figura 6. Diagrama de bloques de modelo de columna de destilación 2x2 de [9].

Esta metodología se estructura:

Primero: identificar las funciones de transferencia de los procesos y sus interacciones, para ello debe aplicarse un primer escalón hasta que ambos procesos se hayan estabilizado, posteriormente aplicar un segundo escalón en la entrada 1. Lo anteriormente mencionado se muestra en la fig. 7.

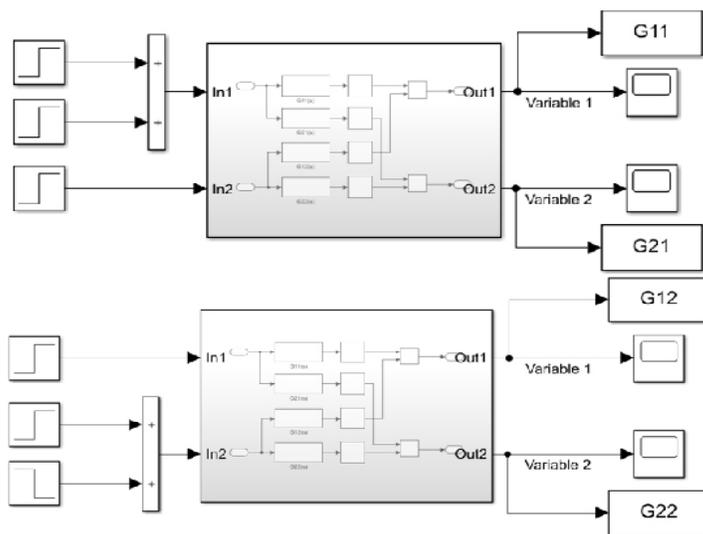


Figura 7. Diagrama en bloques para la identificación de G_{11} , G_{21} , G_{12} y G_{22} .

Los datos de las entradas y los tiempos de aplicación se muestran en las tabla I y II.

Tabla I. Datos para la identificación de G_{11} y G_{21} .

Entrada 1		Entrada 2		Tiempo de aplicación del segundo escalón
Escalón 1	4	Escalón 1	-1	150
Escalón 2	0.4			

Tabla II. Datos para la identificación de G_{22} y G_{12} .

Entrada 1		Entrada 2		Tiempo de aplicación del segundo escalón
Escalón 1	4	Escalón 1	-1	150
		Escalón 2	-0.1	

Al aplicar los escalones de la tabla I se obtuvieron las respuestas de la figura 8 y de la tabla II resultando en la figura 9.

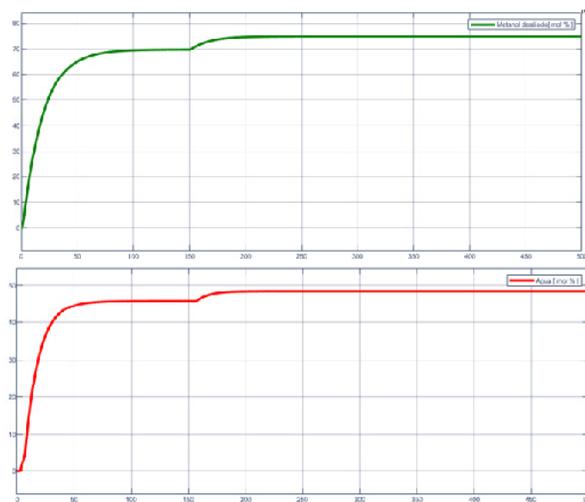


Figura 8. Respuesta de la columna al aplicarle una entrada doble escalón al proceso que controla el Metanol destilado en la entrada del caudal de reflujo de vapor.

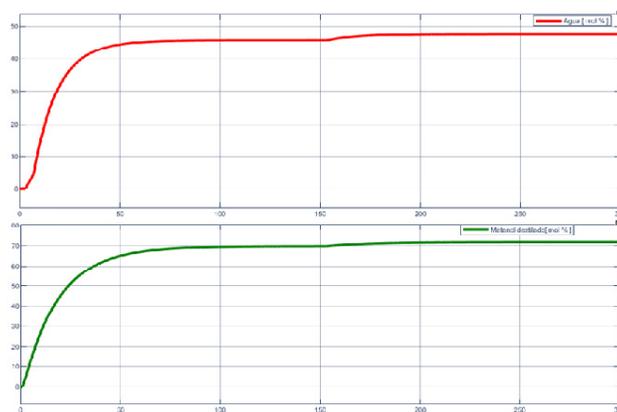


Figura 9. Respuesta en el tiempo de la variable 2 ante doble escalón aplicado en la entrada 2.

Modelo obtenido al aplicar el método de identificación de dos puntos de la referencia [21] en las respuestas obtenidas:

$$G_{11}(s) = \frac{12.75}{16s+1} e^{-1.3s}, G_{21}(s) = \frac{6.6}{10.5s+1} e^{-7.2s},$$

$$G_{22}(s) = \frac{-19.5}{15.1s+1} e^{-2.8s}, G_{12}(s) = \frac{-19}{21s+1} e^{-3.1s}$$
(4)

Segundo: se debe tener identificadas las funciones de transferencia del proceso y sus interacciones se procede a realizar el paso 2 en donde se calcula la malla de desacople.

Una característica de las funciones de transferencia identificadas es el tiempo muerto que estas poseen, para efectos de control y cálculo de la malla de desacople se aplica la aproximación de Taylor para el tiempo muerto como un sistema de primer orden con ganancia estática unitaria y constante de tiempo igual al tiempo muerto, es decir:

$$t_0 = \frac{1}{t_m s + 1} \tag{5}$$

Aplicando la aproximación de Taylor las funciones de transferencia de las ecuaciones desde la (6), (7), (8) y (9) resultan:

$$G_{11}(s) = \left(\frac{12.75}{16s+1}\right) \left(\frac{1}{1.3s+1}\right) = \frac{12.75}{20.8s^2 + 17.3s + 1} \tag{6}$$

$$G_{12}(s) = \left(\frac{-19}{21s+1}\right) \left(\frac{1}{3.1s+1}\right) = \frac{-19}{65.1s^2 + 24.1 + 1} \tag{7}$$

$$G_{22}(s) = \left(\frac{-19.5}{15.1s+1}\right) \left(\frac{1}{2.8s+1}\right) = \frac{-19.5}{42.28s^2 + 17.9s + 1} \tag{8}$$

$$G_{21}(s) = \left(\frac{6.6}{10.5s+1}\right) \left(\frac{1}{7.2s+1}\right) = \frac{6.6}{75.6s^2 + 17.7s + 1} \tag{9}$$

Tener en cuenta que la malla de desacople se compone de $D_{12}(s)$ y $D_{21}(s)$.

$$D_{12} = \frac{-19}{\frac{65.1s^2 + 24.1 + 1}{12.75}} = \left(\frac{19}{12.75}\right) \left(\frac{20.8s^2 + 17.3s + 1}{65.1s^2 + 24.1 + 1}\right) \tag{10}$$

$$D_{21} = \frac{6.6}{\frac{75.6s^2 + 17.7s + 1}{-19.5}} = \left(\frac{6.6}{19.5}\right) \left(\frac{42.28s^2 + 17.9s + 1}{75.6s^2 + 17.7s + 1}\right) \tag{11}$$

Al encontrar las funciones de transferencia de la malla de desacople se debe de verificar que los sistemas se comporten como dos sistemas SISO, es decir el comportamiento de las interacciones es prácticamente nulo.

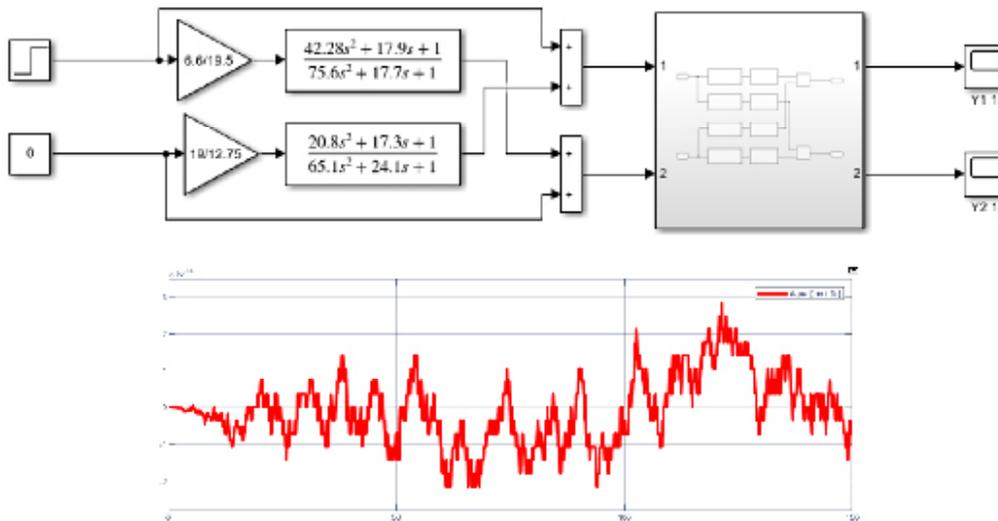


Figura 10. Diagrama de bloques para probar el funcionamiento de la malla en el proceso 1.

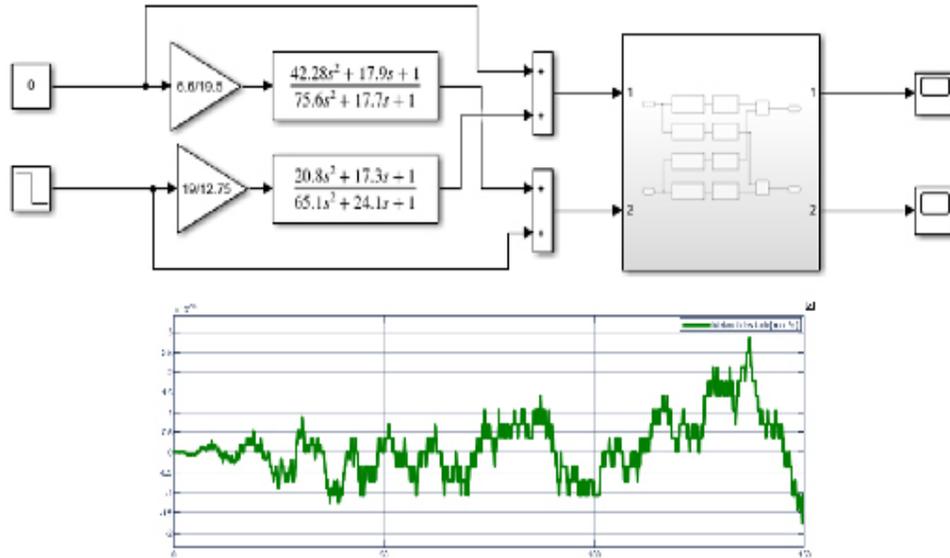


Figura 11. Diagrama de bloques para probar el funcionamiento de la malla en el proceso 2.

Al implementar el desacople en la columna identificada podemos ver que el comportamiento de las interacciones (fig. 10 y 11) se aproximan a cero, es decir que la columna que tiene un comportamiento de un sistema MIMO al aplicar la malla de desacople se convirtió en dos sistemas SISO.

$$K_C = 0.158, K_i = 0.01, K_D = 0 \quad (13)$$

El controlador obtenido para el proceso del porcentaje de agua después de ajuste manual:

$$K_C = -0.09, K_i = -0.006, K_D = -0.12 \quad (14)$$

Tercero: la sintonización de los controladores a partir de las ecuaciones del método de Ziegler - Nichols [22].

$$K_c = \frac{1.2}{K} \left(\frac{t_0}{\tau} \right)^{-1}, \tau_i = 2t_0, \tau_d = \frac{1}{2} t_0 \quad (12)$$

El controlador obtenido para el proceso del porcentaje de metano después de ajuste manual:

En la figura 12 se tienen las respuestas de los procesos al implementar los controladores clásicos ajustados de la planta, el segundo proceso tiene componentes negativas en la señal de control debido a la naturaleza del fenómeno a controlar y si estos tomaran un valor positivo harían imposible el control del sistema.

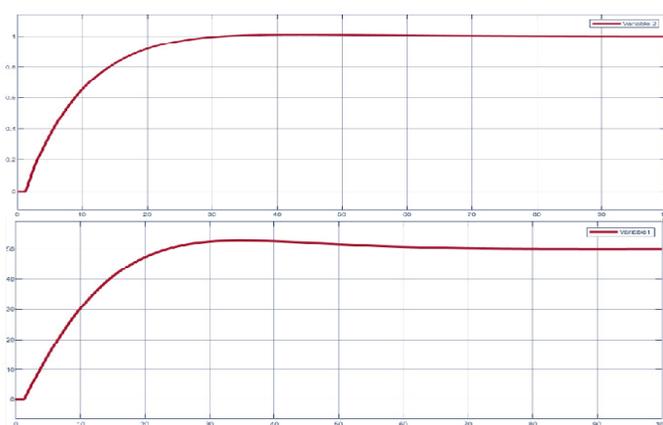


Figura 12. Respuesta del lazo cerrado para la variable 2.

Cuarto: se hace el lazo de control multivariable al tener los controladores sintonizados y ajustados, se procede a construir el lazo de control multivariable. En la figura 13 se plasma el lazo de control.

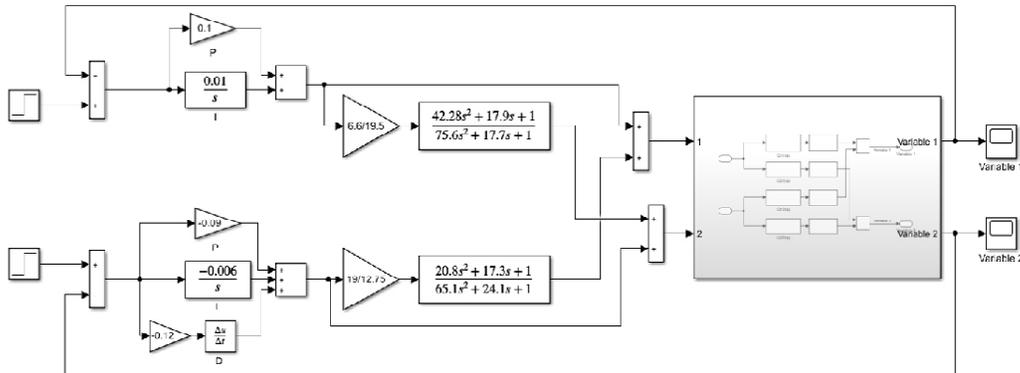


Figura 13. Diagrama en bloques del lazo de control multivariable.

Quinto: se visualiza la segunda proyección, en las simulaciones realizadas anteriormente a simple vista se puede notar el efecto de la malla de desacople, donde las variaciones del *setpoint* de una variable no influyen en la otra variable controlada.

En la figura 14 se muestran las variaciones de la variable 2 en el tiempo debido a cambio de *setpoint* de la variable 1, donde las variaciones se muestran en el orden de las micras.

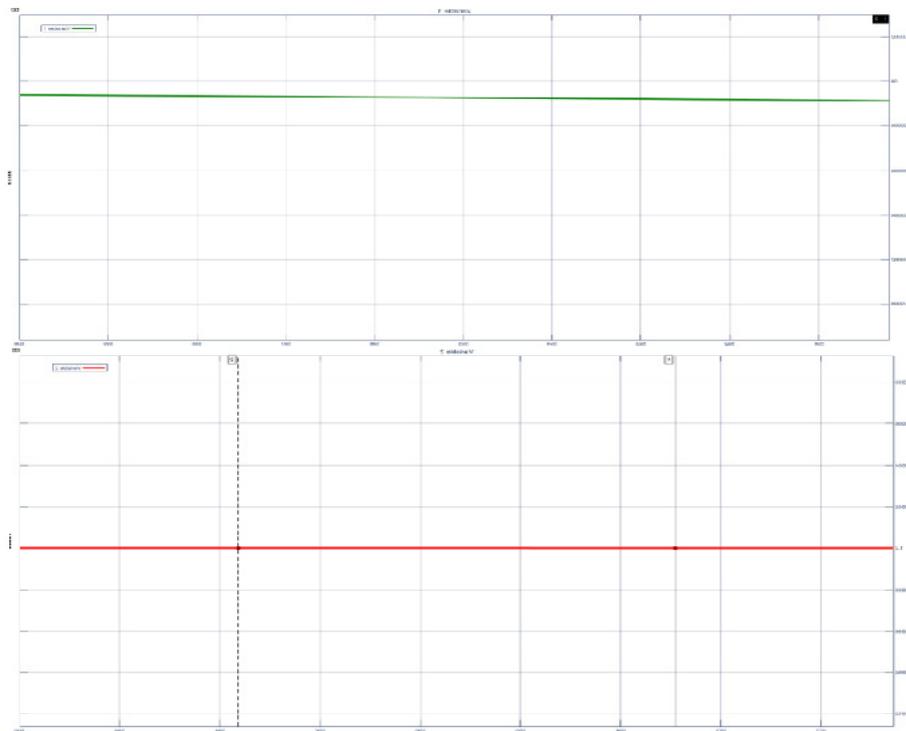


Figura 14. Influencia de la variable 1 sobre la variable 2 y de la variable 2 sobre la variable 1.

Sexto: se sintoniza los controladores con lógica difusa, para simplificar este paso es el diseño del controlador difuso a partir de señales del controlador clásico (Figura 15) en donde

se busca un mejor controlador con la lógica difuso (Figura 15 y 16), para las reglas de este se utilizó una FAM dada en [23].

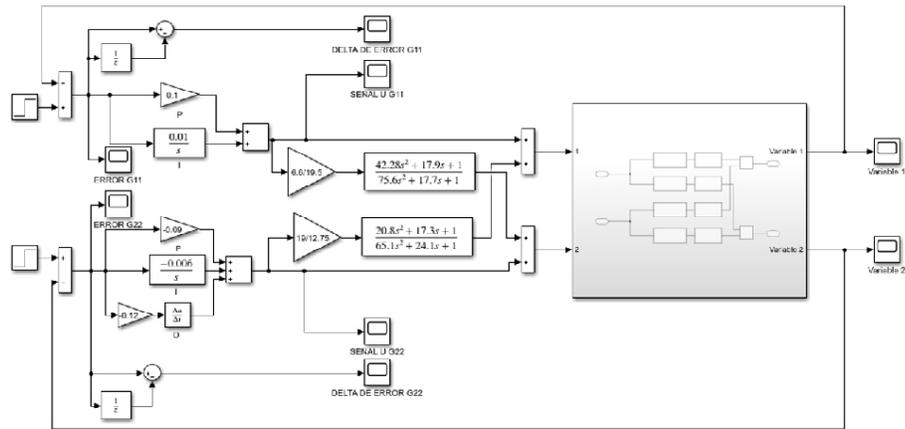


Figura 15. Lazo del proceso instrumentado contemplando el error, delta error y señal de control U de G11 y G22.

Séptimo: reemplace en el lazo de control multivariable los controladores PID por los controladores lógicos creados.

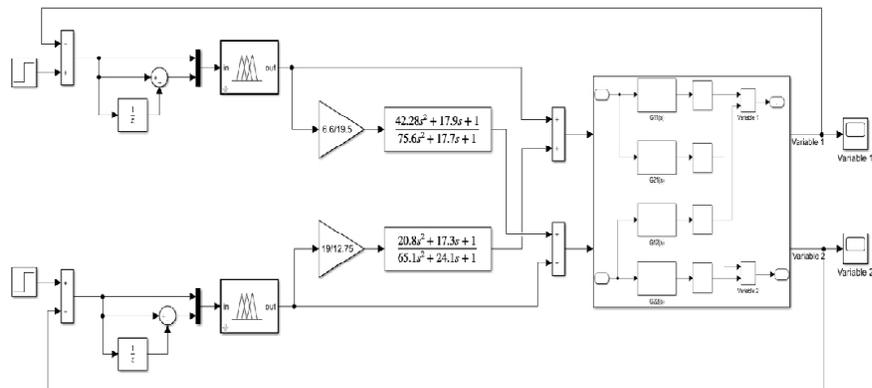


Figura 16. Diagrama de bloques de bloques del lazo de control multivariable con controladores lógicos difusos.

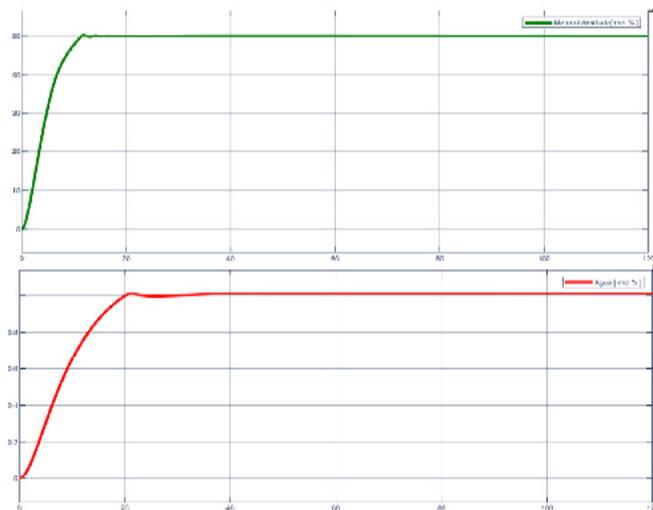


Figura 17. Respuesta de la columna de destilación ante a entrada de un escalón de 50 y de 1

Octavo: se hace el lazo de control multivariable con controladores lógicos difusos con rango amplio fig. 17 y para poner a funcionar en rango amplio, es decir en diferentes setpoint al de diseño, se debe encontrar una serie de ganancias que al multiplicarse con la salida se logre estabilizar en el setpoint indicado. En la figura. 18 al lado del controlador difuso se encuentra un bloque de producto, en una de las entradas está la contante para encontrar las ganancias.

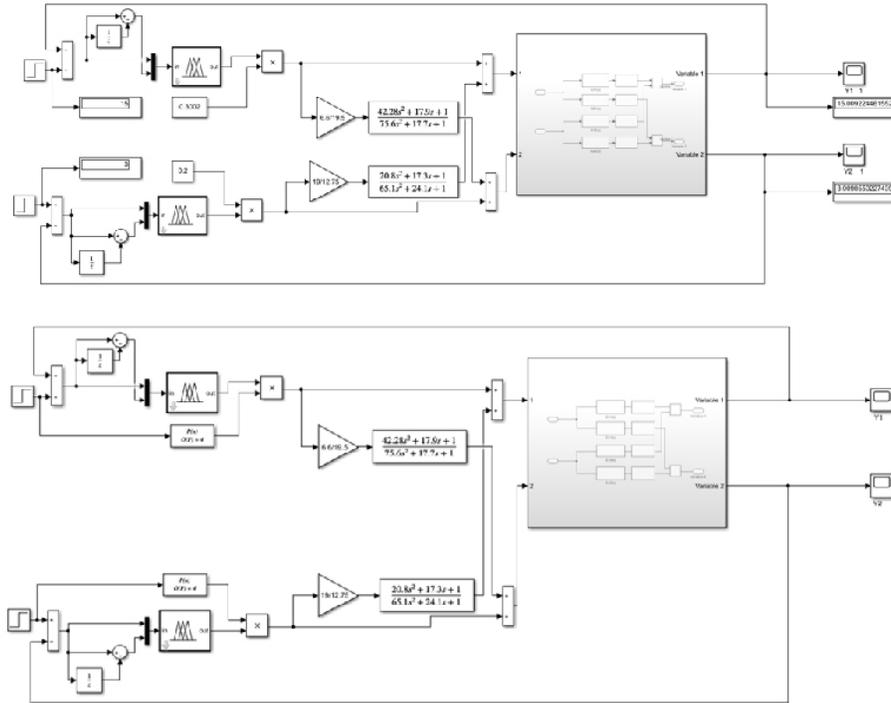


Figura 18. Diagrama de bloques para encontrar las ganancias.

Noveno: se evalúa la robustez de los controladores, agregando los parámetros de ruido, perturbación y variando el setpoint 20%.

Análisis de robustez

Con el fin de evaluar la robustez de los controladores del lazo de control multivariable ante aspectos como variación del setpoint, ruido y posibles perturbaciones, se realiza el diagrama de bloques en la fig. 19. El ruido y la perturbación en cada uno de los lazos tienen un valor del 10% del *setpoint*.

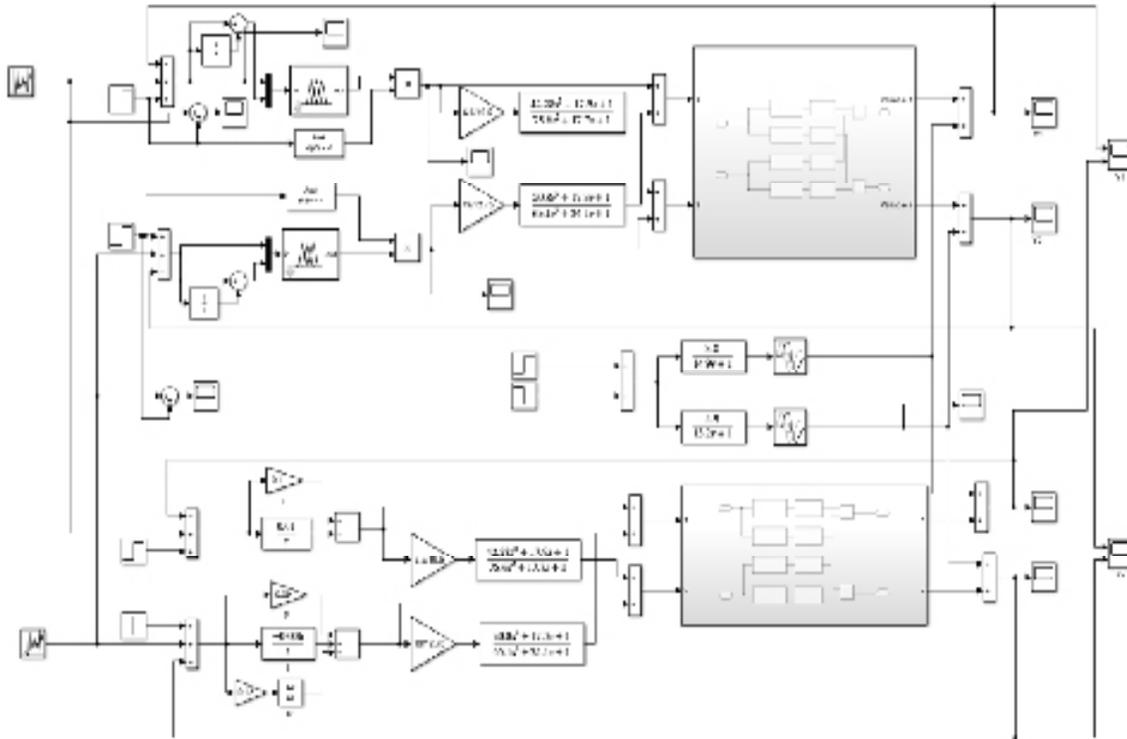


Figura 19. Lazo de control multivariable con controladores clásicos sometido a ruido y perturbaciones.

En la figura 20, se observa la confrontación del controlador difuso contra el controlador clásico para la variable 1 y 2.

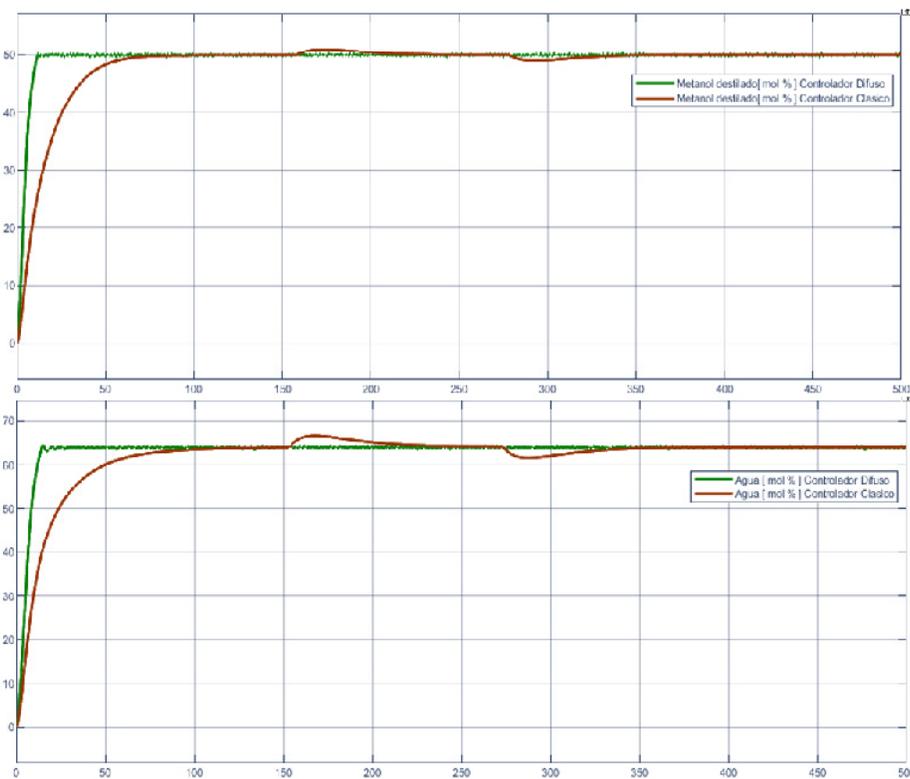


Figura 20. Confrontación del controlador difuso contra el clásico en la variable 1 y 2 frente a ruido y perturbación.

Como se puede observar en la fig. 20 los controladores difusos logran atenuar la perturbación, en el minuto 150 cuando se aplica la perturbación el controlador reacciona a esta. Reduciendo la acción de control manteniéndola en un rango de error que no se alcanza a percibir por el ruido que el controlador no puede eliminar. El controlador clásico en comparación de controlador difuso es todo lo opuesto referente a la perturbación en donde se ve afectado su *setpoint* un 3.85 – 6.13 porcientos, el ruido no lo afecta.

Se varia el setpoint un 20% por arriba y por debajo del anterior setpoint (figura 20 y 21), donde se busca que el controlador funcione correctamente en cualquier *setpoint* que le indiquemos además del que fue diseñado.

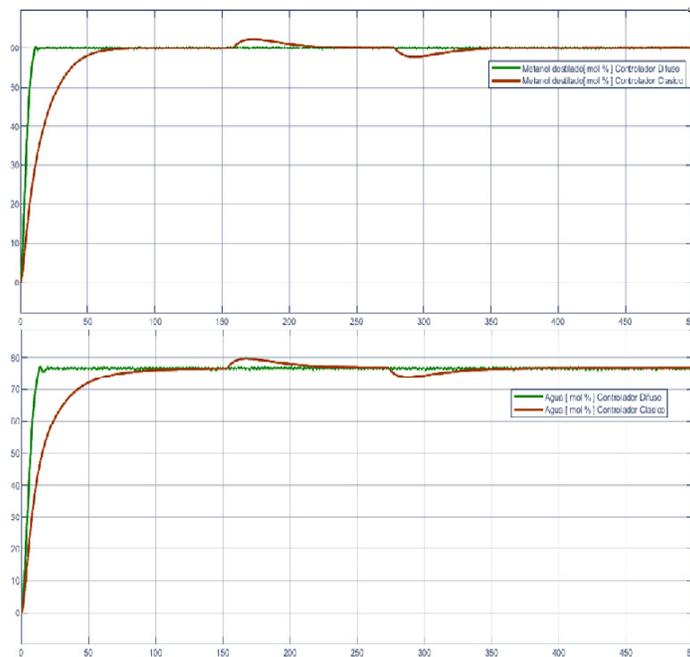


Figura 21. Variando el setpoint 20 % arriba del setpoint comparado variable 1 y 2.

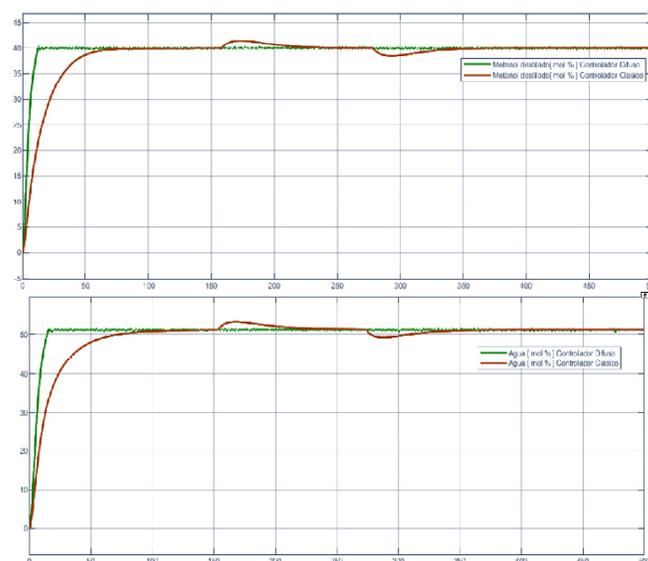


Figura 22. Variando el setpoint 20 % por debajo del setpoint comparado variable 1 y 2.

Análisis del rendimiento

Para el análisis de rendimiento se utilizaron los métodos ISE, IAE, ISU y TVU. Según [24] los índices y entidades básicas de desempeño han sido usados extensamente en la sintonización de controladores. Por ejemplo, la integral del cuadrado del error. Es conocido que los índices de desempeño basados en la integral del cuadrado del error son antagonistas de los índices de desempeño basados en la integral del cuadrado del control.

Un control óptimo robusto es el resultado de una optimización multi-objetivo que balancea los índices antagonistas. Al minimizar los índices de modera la acción de control y evita que el estado del proceso salga de los límites de validez del modelo. Adicionalmente el error acumulativo que penaliza la acción de seguimiento, viene dado por la integral del valor absoluto del error (*integral absolute error* (Ie) se minimiza el error del control (desempeño), pero al minimizar los índices de control (Iu) aumenta la tolerancia del

desempeño ante errores de modelación pues, IAE por sus siglas en inglés). Una medida que determina la energía empleada por el controlador (esfuerzo de control), viene representada por la integral del cuadrado de las desviaciones de la señal de control en el estado estacionario (*Integral Square signal control deviation*, ISU por sus siglas en inglés).

La evolución a la salida del controlador está expresada por el valor absoluto de las variaciones totales TVU (equivalente al IADU). Y finalmente, otro indicador en un sistema de control es el tiempo de asentamiento a un correspondiente ancho de banda (T_s).

Para el análisis de rendimiento el mejor control es definido por aquel con un menor tiempo de asentamiento, menor error acumulativo, menor esfuerzo de control y una energía mínima de seguimiento. En la siguiente tabla se realiza el análisis que determina el rendimiento de cada uno de los lazos cerrados en la tabla III.

Tabla III. Resultados de la evaluación de rendimiento.

	Índice de rendimiento	MIMO CLÁSICO	MIMO DIFUSO	Porcentaje de cambio Difuso Vs PID	Efecto del cambio
Variable 1	ISE	20.914e3	7.468e3	64.29%	Positivo
	IAE	791.23	230.42	70.87%	Positivo
	ISU	51.81	314	506.06%	Negativo
	TVU	0.9373	8.0915	763.27%	Negativo
Variable 2	ISE	34.483e3	16.889e3	51.02%	Positivo
	IAE	1.103e3	391.563	64.5%	Positivo
	ISU	23.803	1.131e3	4.6e3%	Negativo
	TVU	0.7614	381.27	5e3%	Negativo

Denotando de la tabla anterior que a enfrentar la estrategia de control de multivariable con la estrategia de control multivariable difusa desarrollada se obtiene efectos positivos en los índices de error y al minimizar los dichos índices (Ie) se minimiza el error del control y se mejora por ende el desempeño. En cuanto a los cambios negativos en los índices de control

(Iu) estos hacen elocuencia a un mayor gasto energético en los actuadores que manipulan las variables y a su vez un aumento de dichos índices da correspondencia a una menor tolerancia del control, lo que lo hace menos robusto. El cambio negativo en los índices de control se debe al diseño de los controladores difusos en el que se priorizo el contrarrestar la perturbación haciendo

un control de acción rápida que mantiene la salida de la columna en el *setpoint* con un pequeño porcentaje de error.

Conclusiones

Las constantes negativas del proceso de la variable 2 del caso de estudio se debe a la naturaleza de la dinámica, el modelo obtenido en la identificación es un modelo que relaciona la entrada y la salida por lo que no se conoce a detalle lo que ocurre internamente. Al obtener la ganancia del sistema negativa las variables de control también serán negativas porque dependen de esta constante.

El comportamiento del sistema al tener estas señales de control negativas en el proceso de la variable 2 permitirá realizar un correcto funcionamiento del controlador porque estarían equilibrando el lazo cerrado al no permitir que este valor sufra un incremento o decremento infinitamente (este caso ocurriría si los signos de la ganancia K y los de la señal de control fueran diferentes causarían que la planta sea imposible de controlar debido a su inestabilidad).

La potencialidad y funcionalidad del controlador multivariable al ser un método basado en el modelo matemático del sistema a controlar, depende del nivel de precisión que se tenga al realizar el paso de identificación de las funciones de transferencia. En conclusión, la malla de control será tan buena como tan bueno sea el modelado del sistema.

Referencias

- [1] J. Calderón, “Control De Procesos Multivariables Mediante”, Universidad Nacional de Colombia, 2009, p. 35
- [2] L. A. Fariñas, “Sintonía de reguladores PID en sistemas multivariable”, 2006

- [3] V. D. Yurkevich, “MIMO tracking PI/PID controller design for nonlinear systems based on singular perturbation technique”, 2015
- [4] J. I. Fuentes, “Análisis y diseño de un sistema de control multivariable para el dispositivo Twin Rotor MIMO System”, 2003, p. 13
- [5] E. C. Goud, A. S. Rao and M. Chidambaram, “Improved decentralized PID controller design for MIMO processes”. *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, N. 1, 2020
- [6] C. Chen et al., “Adaptive fuzzy asymptotic control of MIMO systems with unknown input coefficients via a robust nussbaum gain based approach”, *IEEE*, 2016
- [7] D. Kalpana, T. Thyagarajan and N. Venkatachalam, “Design of fractional order pi controller for MIMO system using relay feedback”, *IEEE*, 2017
- [8] A. Margun, I. Furtat, and A. Kremlev. “Robust control of twin rotor MIMO system with quantized output”, 2017
- [9] R. Wood, M. Berry, "Terminal composition control of a binary distillation column", *Chemical Engineering Science*, vol. 28, no. 9, pp. 1707-1717, 1973
- [10] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets", *Information Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965
- [11] J. G. Jurado, “Diseño de sistemas de control multivariable por desacoplo con controladores PID”, 2012
- [12] H. A. López Ortiz y L. E. García Jaimes, “Automatización del proceso de secado de producto húmedo, usando un método de control multivariable no paramétrico”, *Revista Politécnica*, vol. 15, 28 jun, 2019

- [13] J. F. Ricardo Barrera y E. Barrios Uruña. “Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor”, *Revista Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17, no. 1, pp. 17–25, 2017
- [14] J. Espinosa, Control lineal de sistemas multivariables, Springer Reference, 2003
- [15] J. J. Oviedo, Control lineal de sistemas multivariable, 2003
- [16] P. A. Garrán, “Desacoples aproximado y por descomposición en valores singulares de sistemas de control MIMO”, 2009
- [17] R. O. Prato, M. Coronel Méndez y R. Rojas Sulbaran, “Efecto de las técnicas de desacoplamiento en sistemas multivariable”, 2017
- [18] V. Koppel y M. Segal. “Análisis de Estrategias de desacoplamiento en sistemas interactuantes de control de procesos”, 2004
- [19] R. Kumar, S. Anand, A. Khulbey and A. Nath Jha, "Design of Fractional Order Controller for Wood-Berry distillation column," 2020. *IEEE 17th India Council International Conference (INDICON)*, 2020, pp. 1-6
- [20] P. Acharya, G. Dumpa & T. K. Dan. “Modelling and control of distillation column”, 2016. *International Conference on Computation of Power, Energy Information and Communication (ICCPEIC)*, 2016
- [21] C. L. Smith, “Digital Computer Process Control”, Scranton, Pa., EUA, International Textbook Co., 1972
- [22] J. G. Ziegler and N. B. Nichols. “Optimum Settings for Automatic Controllers”, *Transactions of the ASME*, 64, 1942
- [23] P. Ponce Cruz. Inteligencia con aplicaciones a la ingeniería, 2010
- [24] A. Rodríguez Mariano et al. “Análisis del desempeño de controladores lineales sintonizados en diferentes estados estacionarios del biorreactor de Cholette mediante técnicas de decisión multicriterio”, *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, vol. 14, no. 3, pp. 167–204. 2015