



# Diseño y simulación de un control pid para una planta lab-volt ltd de flujo y temperatura (mimo)

Fabian Betancur , Fabian Valenzuela

**Resumen**—El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema de control PID multivariable para la instalación Lab-Volt de Festo Didactic, mediante el análisis del desempeño de las técnicas de separación, teniendo en cuenta su influencia en el funcionamiento del sistema total y el desempeño del sistema de control.

El modelo de aproximación de tiempo muerto de primer orden multivariable (2x2) se presenta como un caso de estudio. Investigar el desempeño de la técnica de descomposición de errores en el modelo paramétrico: ganancia (K), constante de tiempo ( $\tau$ ) y tiempo muerto ( $\theta$ ). Las técnicas de descomposición se evaluaron usando gráficas de control proporcional, integral y diferencial (PID) para probar la robustez del sistema de control contra errores de modelado con cambios en el valor del parámetro del sistema de control.

Se encuentra que para las variaciones de la ganancia (K) y la constante de tiempo ( $\tau$ ), el divisor produce un mejor desempeño del sistema multivariable, con base en el índice basado en la integral absoluta del error (AEI). El efecto de las variaciones en el tiempo muerto ( $\theta$ ) insignificante, lo que indica que los cambios en IAE por cambios en los valores de referencia.

**Index Terms**—Control, desacoplamiento, interacción, multivariable.

## I. INTRODUCCIÓN

EN la actualidad, los procesos industriales han venido siendo mejorados por los avances tecnológicos, los sistemas de control y los instrumentos asociados a estos. Es por eso que tiene relevancia incluir los nuevos desarrollos en este campo dentro del plan de estudios del programa de ingeniería electrónica.

En el curso de investigación pregradual CIP, se profundizó en los temas actuales de la automatización de los procesos industriales, usando herramientas de gran potencialidad como es el caso de Matlab, con él se puede simular una buena parte de este tipo de sistemas, incluyendo los sistemas multivariados acoplados y desacoplados. En el presente trabajo se diseña y se realiza la simulación de un control del

tipo PID para una planta Festo del laboratorio virtual Lab-Volt, cuyas entradas son la temperatura y el flujo de agua, la cual tiene dos salidas. Este tipo de sistemas se denominan MIMO por su sigla de inglés (Multiple-input Multiple-output), es decir que se tiene varias entradas y a la vez varias salidas.

Otra parte que es de gran relevancia del presente trabajo, es el hecho de que se busca tener un sistema desacoplado, ya que, en estos sistemas, existe la posibilidad de que una entrada afecte en cierta proporción a cada una de las salidas del sistema. También, es importante estudiar los diferentes tipos de desacopladores para comprar y escoger el que más se adecue al presente. A continuación, se muestra el resultado de los conocimientos aprendidos en el curso de profundización aplicados en una planta Festo de dos variables de entrada con dos salidas, diseñando un control PID sintonizado manualmente, usando la herramienta Matlab, buscando reducir la interferencia de las entradas en la salida usando desacopladores y escogiendo el mejor de ellos, para lograr un control estable de dicha planta.

## II. ESTADO DEL ARTE

### II-A. Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor

Un caso de estudio son los sistemas de control MIMO multivariable lineal con desacoples, un caso particular en la facultad de ingeniería electrónica de la Universidad Pontificia Bolivariana, donde se realizó un diseño de un control multivariable lineal en un intercambiador de calor bajo ambiente virtual usando Hysys, se muestra la validación de los diseños, mostrando las respuestas del sistema MIMO cuando se realiza el control con y sin desacopladores. También se estudian tres desacopladores (Simplificado de Estado Estacionario, Simplificado y Generalizado), encontrando que, para este caso, el simplificado es el mejor, ya que se pudo disminuir el efecto del acoplamiento. [1]

## II-B. Diseño óptimo de controladores PID para sistemas multivariable

En este trabajo se presenta un método óptimo de diseño de controladores PID para estrategias de control centralizado y descentralizado en un sistema multivariable 2x2. En la práctica industrial, a menudo se encuentra necesario controlar procesos multivariados (MIMO). Los sistemas de control más comunes para tales procesos se pueden dividir en dos grandes categorías: control centralizado y control descentralizado. Por otro lado, los controladores PID se utilizan en la mayoría de las aplicaciones industriales debido a su robustez, relación intuitiva entre parámetros y respuesta del sistema y flexibilidad. [2]

## II-C. Diseño y construcción de una planta de procesos lazos de temperatura, flujo y nivel

Este trabajo muestra los pasos para diseñar, construir y montar los diferentes elementos que constituyen la planta de control de procesos, con bucle de temperatura, flujo y nivel. Los bucles están diseñados con los parámetros y condiciones siguientes: Dimensiones de los diferentes elementos, tipos de materiales, equipos y accesorios, costos y tiempo. El objetivo principal de este trabajo es que la planta sea usada por la universidad como un elemento para la aplicación de sistemas de control e instrumentación como si fuera una real. [3]

## II-D. Diseño y construcción de un sistema de péndulo invertido.

Las universidades deben contar con las herramientas necesarias para poder realizar prácticas en el área de control. La corporación universitaria autónoma de Nariño no es la excepción, ya que cuenta en su plan de estudios un buen número de espacios académicos en este campo además de una línea de profundización. Se vio entonces, la necesidad de diseñar y construir un sistema de péndulo invertido de bajo costo, con el fin de mejorar el proceso enseñanza aprendizaje. En este trabajo se implementa un control PID para dos plantas experimentales de sistema dinámicos. [4]

## III. OBJETIVOS

### III-A. Objetivo general

Identificar una planta de flujo y temperatura (MIMO) para aplicar un control PID y simular los procesos.

### III-B. Objetivos específicos

1. Identificación de la planta de flujo y temperatura.
2. Diseño de un control PID adecuado para la planta.
3. Simular el control PID dirigido a la planta.

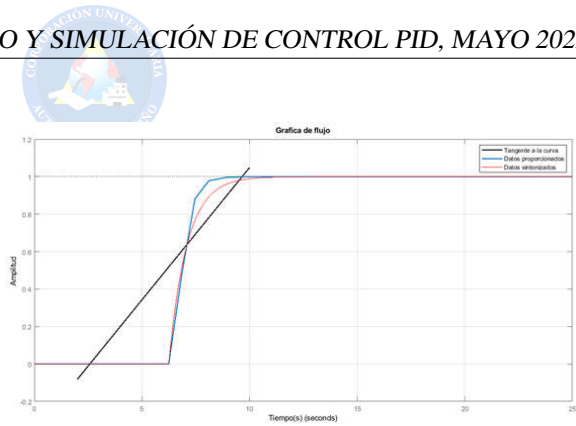


Figura 1: Gráfica de flujo

4. Eliminación de la interacción de las variables con desacopladores.
5. Evaluar las interacciones del controlador PID y las variables de la planta.

## IV. DISEÑO Y SIMULACIÓN DEL CONTROL PID

Para iniciar con la abstracción de datos de la planta Lab-Volt LTD, a partir de los vectores de datos de la variable flujo y la variable temperatura obtenidos experimentalmente de la planta, se procede a graficar los datos de los vectores versus el tiempo como se observa en la gráficas de las figuras 1 y 2 como datos proporcionados. En la ecuación 1 se presenta la función de transferencia normalizada de un sistema de primer orden.

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau_s + 1} e^{-\theta_s} \quad (1)$$

Donde:

- K= Ganancia del sistema.
- $(\tau)$ = Constante de tiempo.
- $(\theta)$ = Retardo de tiempo del sistema
- La pendiente se determina como:  $1/T$ , donde T es el tiempo en que la función alcanza el 62.3 % de su cambio total.
- El retardo de tiempo del sistema o tiempo muerto se lo extrae del vector proporcionado, donde transcurrido el tiempo muerto por la dinámica del sistema la variable empieza a proporcionar datos.

Entonces:

$$\tau = T - \theta \quad (2)$$

Una vez graficados los datos proporcionados por los vectores y apoyándonos de las ecuaciones 1 y 2 se construye la función de transferencia de las gráficas.

En la Figura 1 se observa la ganancia del sistema  $k = 1$ , el tiempo en que la respuesta llega al 62,3 % es  $T = 7,08$  y el tiempo muerto extraído del vector proporcionado es  $\theta=6.24246279483238$  del cual se toman todos los decimales para una mayor precisión.

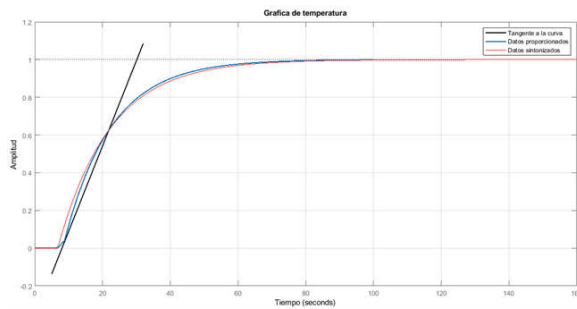


Figura 2: Gráfica de temperatura

Aplicando la ecuación 2 se obtiene el para el denominador de la función de transferencia.

$$\tau = 7,08 - 6,24246279483238 = 0,8375 \quad (3)$$

Ya obtenidos los términos necesarios para la ecuación 1 se procede a construir la función de transferencia de flujo:

$$G_{(s)11} = \frac{1}{0,8375 s + 1} e^{-6,24246279483238 s} \quad (4)$$

Para obtener la función de transferencia de temperatura se realiza el mismo procedimiento anterior, donde en este caso se observa en la figura 2 la ganancia del sistema  $k = 1$ , el tiempo en que la respuesta llega al 62,3% es  $T = 22,1$  y el tiempo muerto extraído del vector proporcionado es  $\theta = 6,78491427211811$  del cual se toman todos los decimales para una mayor precisión.

Aplicando la ecuación 2 se obtiene el para el denominador de la función de transferencia.

$$\tau = 22,1 - 6,78491427211811 = 15,3151 \quad (5)$$

Ya obtenidos los términos necesarios para la ecuación 1 se procede a construir la función de transferencia de temperatura:

$$G_{(s)22} = \frac{1}{15,3151 s + 1} e^{-6,78491427211811 s} \quad (6)$$

Para implementar un controlador se debe de saber si el sistema es estable, este proceso se realiza en lazo abierto, en la figura 3 se muestra el diagrama de una planta en lazo abierto.

En la figura 4 se muestra las señales de salida de la planta en lazo abierto, donde se puede observar la inestabilidad del sistema, salida de flujo oscilante y señal de temperatura no llega a la señal de referencia, con estos resultados se procede a el análisis para el

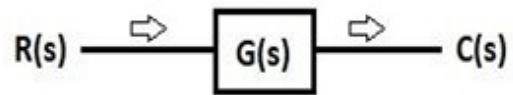


Figura 3: Diagrama lazo abierto

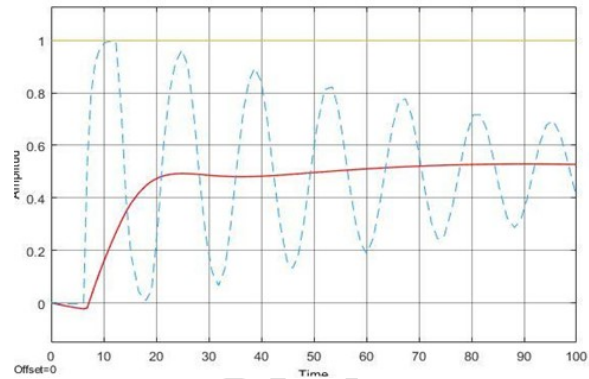


Figura 4: Gráfica en lazo abierto

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{K_L}{\tau}$	$\infty$	0
PI	$0,9 \frac{\tau}{K_L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{\tau}{K_L}$	$2L$	$0,5L$

Cuadro I: Parámetros para el diseño del controlador PID, primer método de Ziegler Nichols

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	2,25723	$\infty$	0
PI	2,0315	22,6163	0
PID	2,70866	13,5698	3,3925

Cuadro II: Valores para el diseño del controlador PID variable de temperatura, primer método de Ziegler Nichols

diseño de un controlador que se adapte a la planta y se capaz de estabilizar las señales de salida con la señal de referencia, sin importar las distorsiones que se puedan presentar.

Para el diseño del controlador PI se utilizó el primer método de Ziegler nichols, método de curva tipo S sin sobrepaso, además se tuvo en cuenta el tiempo muerto para el caso de las dos gráficas de salida de la planta, en la Figura 6 se presenta la manera de calcular las constantes del controlador PID.

Con el cuadro I y con las constantes  $\tau$  y  $L$  calculadas se obtuvo las constantes  $K_p$ ,  $T_i$  y  $T_d$  para el lazo de temperatura.

Con los resultados de las constantes se lleva a diseñar en controlador que más se ajuste a nuestra planta, para esto se utiliza la ecuación 7

Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	0,134168	$\infty$	0
PI	0,120751	20,8082	0
PID	0,1610042	12,484924	3,121231

Cuadro III: Valores para el diseño del controlador *PID* variable de flujo, primer método de Ziegler Nichols

$$Kp \left( 1 + \frac{1}{TiS} + TdS \right) \tag{7}$$

Los valores de nuestro controlador *PI* para el lazo de temperatura

$$2,03315 + \frac{0,089825}{S} \tag{8}$$

En el cuadro III se presenta los valores de las constantes para el lazo de flujo.

Los valores de nuestro controlador *PI* para el lazo de flujo

$$0,120751 + \frac{0,005803}{S} \tag{9}$$

En la figura 5 se observa las gráficas de salida de la planta al aplicar un controlador *PI*, con las constantes proporcional e integral encontradas ya implementadas dentro de la simulación, por lo cual se contempla un sobrepaso en la señal de salida de la variable de flujo además de unas oscilaciones que pueden llegar afectar el funcionamiento del sistema, respecto a la variable de temperatura se puede apreciar un tiempo de establecimiento muy amplio pero sin sobrepaso u oscilaciones que pueden llegar afectar el proceso dentro de la planta.

Dado que el diseño del controlador *PI* aplicado sobre la planta MIMO presenta sobre impulso en la variable de flujo, fue necesario realizar un ajuste sobre la variable proporcional e integral por medio del comando “PID Controller Tuning” de Matlab que permita una respuesta más suave a la entrada, evitando dinámicas no deseadas sobre los lazos internos. el resultado se presenta en la figura 6

En la figura 7 se muestra el resultado del controlador *PI* tuneado, donde se ingresa una perturbación externa al sistema a la señal de flujo, en este caso un *step* de amplitud de 6, este se ve en el sobrepaso de la señal de flujo que sube hasta 6, se observa que

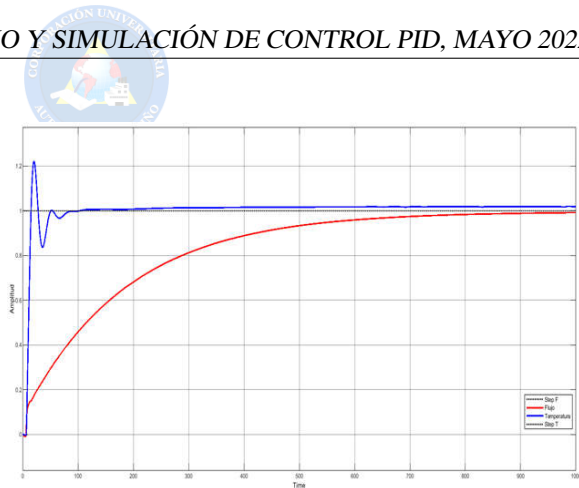


Figura 5: Gráfica *PI* calculado (Sin tunear)

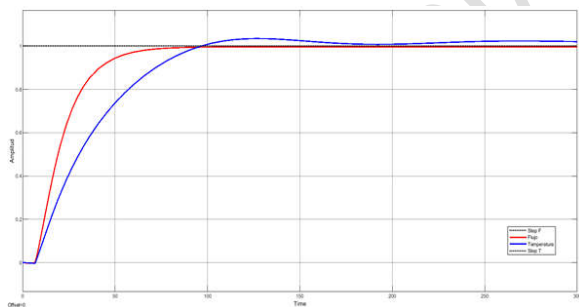


Figura 6: Gráfica *PI* calculado tuneado

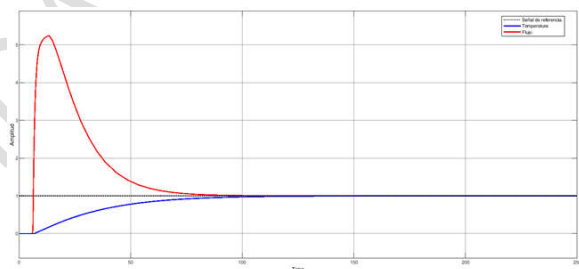


Figura 7: Gráfica *PI* calculado tuneado con perturbación externa

el controlador efectúa el control adecuado ante la perturbación llevando a las señales de salida a la señal de referencia con una amplitud de 1, la configuración de sintonizar el *PI* es conveniente para mantener la señal estable y en perfecta sintonización con la señal de referencia.

La figura 8 presenta un diagrama de bloques del esquema de control el cual se subdivide en tres etapas que son la etapa de control, etapa de desacople y la planta. La etapa de la planta corresponde a las funciones de transferencia de flujo y temperatura obtenidas anteriormente y a las interacciones de estas mismas, las cuales fueron proporcionadas por la planta Lab-Volt LTD al igual que los vectores obtenidos experimentalmente, la etapa de control

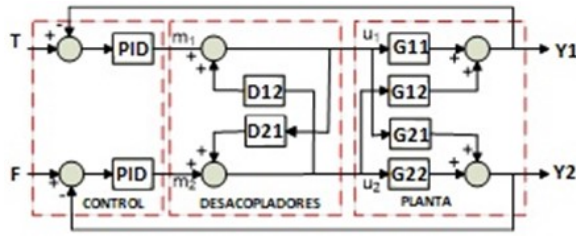


Figura 8: Diagrama de bloques de esquema de control

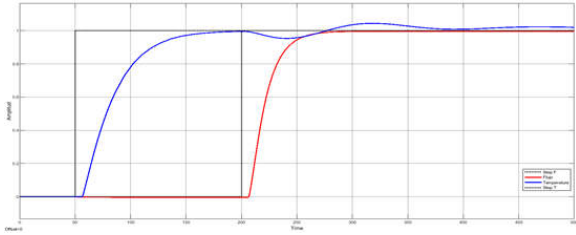


Figura 9: Diagrama de bloques de esquema de control

corresponde a los controladores *PID* diseñados según las funciones de transferencia de cada variable sin los desacopladores y la etapa de desacople es la que elimina las interacciones para que la salida de cada respuesta no tenga perturbaciones la una sobre la otra.

En la figura 9 y figura 10, se tiene dos escenarios, en el primero se envía un escalón a la variable de temperatura dando un tiempo de 200s para que se estabilice y así, enviar un escalón a la variable de flujo, todo esto con el fin de observar la influencia que tiene una variable sobre la otra, por tanto, en la Figura 9 se evidencia la perturbación que genera sobre la temperatura al realizar un incremento en la variable de flujo, esto se debe a que la planta contiene un tubo de Venturi y al encontrarse la dinámica de las dos variables en este, se genera una disminución de temperatura en el calentador, lo cual no sucederá en el segundo escenario, el cual sería el caso contrario al mencionado, es decir, se enviaría un escalón al flujo y en el tiempo en el que él esté estable se haría una excitación sobre la variable de temperatura, como se puede observar en la figura 10, el flujo no se desvía de la referencia dado que esta es una variable con una respuesta rápida ante cambios en su dinámica.

#### IV-A. Desacopladores

Los desacopladores funcionan como controladores adicionales que se ubican a las salidas de otro controlador, en nuestro caso el controlador *PI*, el objetivo de los desacopladores es eliminar la interacción entre las señales de entrada, para que las salidas siempre mantengan estables sin importar la variación en alguna de ellas, eventualmente el implementar desacopladores en un sistema trae beneficios, algunos de ellos:

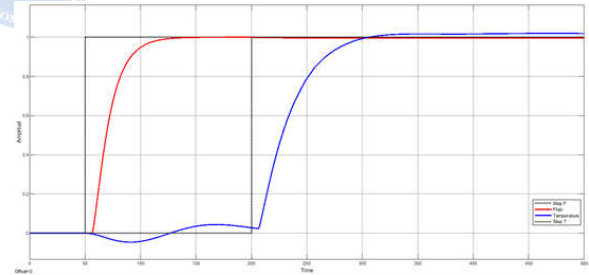


Figura 10: Diagrama de bloques de esquema de control

- Se elimina la interacción de los lazos cerrados dentro de un sistema realimentado, esto conlleva a que el sistema se estable por las características de los lazos individuales.
- Siempre se mantendrá un valor deseable independientemente de los valores de las otras constantes.

Para el diseño de los desacopladores enfocados en nuestro sistema multivariable se hizo a través de desacopladores dinámicos los cuales parten desde una matriz de las funciones de transferencia de la planta, en la matriz se presenta la matriz de transferencia de la planta; y en las ecuaciones 10, 11 se presenta el arreglo para los desacopladores dinámicos

$$D(s) \frac{C(s)}{M(s)} = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$D(s) = \begin{bmatrix} 1 & D_{12}(s) \\ D_{21}(s) & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Donde

$$D_{12}(s) = -\frac{G_{12}(s)}{G_{11}(s)} \quad D_{21}(s) = -\frac{G_{21}(s)}{G_{22}(s)} \quad (12)$$

Dentro del proceso del cálculo de desacopladores dinámicos se hace necesario crear la matriz de ganancias relativas (*MGR*) la cual se obtiene de la matriz de ganancias estática (*MGE*) que dependen de la matriz de transferencia. En Matlab se ingresa el comando  $MGE = \text{degain}(\text{matrizde transferencia})$  para calcular la matriz de ganancias estáticas.

$$MGE = \begin{bmatrix} 1 & 0,018 \\ -0,0033 & 0,1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

La matriz de ganancia relativa se calcula con la ecuación 14:

$$MGR = [MGE] * ([MGE]^T)^{-1} \quad (14)$$

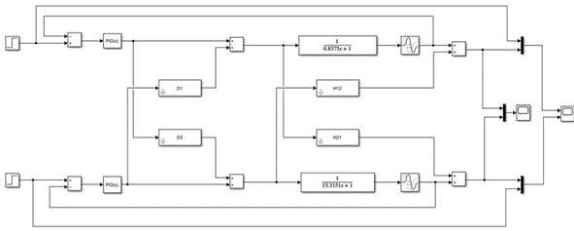


Figura 11: Diagrama de bloques en simulink

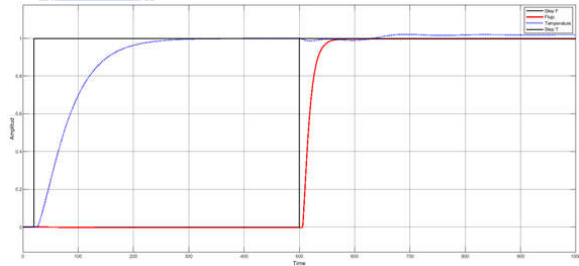


Figura 13: Diagrama de bloques en simulink

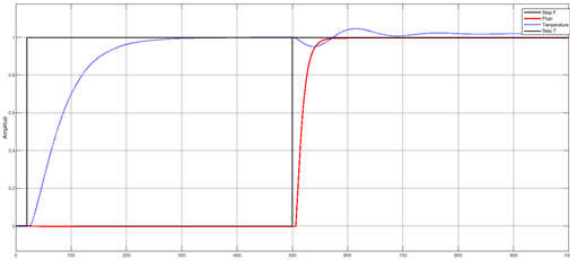


Figura 12: Diagrama de bloques en simulink

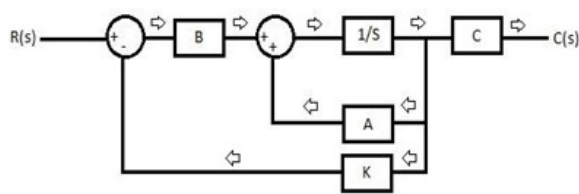


Figura 14: Diagrama de controlador por realimentador de estados

$$MGR = \begin{bmatrix} 0,9994 & 0,0006 \\ -0,0006 & 0,9994 \end{bmatrix} \quad (15)$$

Donde los valores de los desacopladores son:

$$D_{12}(s) = -\frac{0,0006}{0,9994} \rightarrow -600,36 * 10^{-6} \quad (16)$$

$$D_{21}(s) = -\frac{-0,0006}{0,9994} \rightarrow 600,36 * 10^{-6} \quad (17)$$

En el entorno de Simulink se realiza el diagrama de bloques del esquema de control donde se configura cada etapa anteriormente descrita, se ingresan los valores de cada controlador *PID*, los valores de cada desacoplador y las funciones de transferencia de flujo, temperatura, interacción de flujo a temperatura e interacción de temperatura a flujo. Para observar el comportamiento de la planta se ingresa un escalón a cada entrada y se visualiza por medio del scope en la figura 12 observa la respuesta sin desacopladores y en la figura 13 la respuesta con desacopladores.

#### IV-B. Controlador por realimentación de estados

La realimentación de estados es un método que utiliza el proceso de la planta en ecuaciones de estado, este método es muy utilizado ya que se puede aplicar

a sistemas SISO y MIMO.

Para empezar el desarrollo de un realimentador de estados hay que tener las matrices que definen a la planta, estas matrices se pueden calcular con las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento del sistema, si el sistema se tiene en funciones de transferencia existe un método para pasar de funciones de transferencia a ecuaciones diferenciales, como también se encuentra un comando en Matlab que ayuda con este proceso.

Al presentarse ecuaciones de transferencia con tiempo muerto en nuestro sistema se usó el método de aproximaciones de Pade, para transformar las ecuaciones a un sistema de segundo orden, y así poder obtener las matrices de nuestra planta.

La ecuación 18 se utilizan para el cálculo de la matriz de ganancia del sistema.

$$\det([\lambda I - [A - BK]]) \quad (18)$$

Donde:

- A = Matriz del sistema
- B = Matriz de entradas del sistema
- C = Matriz de salidas del sistema
- $\lambda I$  = Matriz identidad de ; esta depende de las dimensiones [A]
- K = Matriz de ganancias; depende del tamaño de [B]

También se calcula una ganancia de referencia para el control por realimentación de estados con la ecuación 19.

$$K_{ref} = -\frac{1}{[C[A - [A - BK]]^{-1}B]} \quad (19)$$

Donde

- K=ganancias del control por realimentación de estados

Para el caso de la función de flujo se utilizó el método de aproximaciones de Pade se obtuvo la ecuación 20, y de esta se extrajeron las matrices.

$$G_{11}(s) = \frac{-S + 0,3024}{0,8375S^2 + 1,2685S + 0,3204} \quad (20)$$

$$A = \begin{bmatrix} -1,5146 & -0,3826 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$C = [-1,194 \quad 0,3826] \quad (23)$$

$$D = [0] \quad (24)$$

Resolviendo con la ecuación 18 se obtuvo el siguiente resultado

$$\lambda^2 + \lambda(2,5146 + K_1) + K_2 + 0,3826 \quad (25)$$

Se hace uso de un polinomio característico para obtener la matriz de ganancia, el objetivo del polinomio es alejar lo más posibles los polos y ceros de la ecuación de transferencia del sistema.

El polinomio característico utilizado es el siguiente:

$$100S^2 + 80S + 30 \quad (26)$$

Los polos del polinomio son:

$$(-0,4 + 0,37417i) \quad (-0,4 - 0,37417i) \quad (27)$$

Igualando el determinante y el polinomio característico

$$(S - 0,4 + 0,37417i) * (S - 0,4 - 0,37417i) =$$

$$\lambda^2 + \lambda(1,5146 + K_1) + K_2 + 0,3826(28)$$

$$(S^2 - 0,8S + 0,16) =$$

$$\lambda^2 + \lambda(1,5146 + K_1) + K_2 + 0,3826(29)$$

Despejando  $K_1$  y  $K_2$

$$1,5146 + K_1 = -0,8 \quad (30)$$

$$K_2 + 0,3826 = 0,16 \quad (31)$$

$$K_1 = -2,3146 \quad (32)$$

$$K_2 = -0,5426 \quad (33)$$

Para el caso de la función de temperatura se utilizó el método de aproximaciones de Pade se obtuvo la ecuación 34, y de esta se extrajeron las matrices 35, 36, 37, 38,

$$G_{22}(s) = \frac{-S + 0,2948}{15,32S^2 + 5,514S + 0,2948} \quad (34)$$

$$A = \begin{bmatrix} -0,3599 & -0,0192 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$C = [-0,0653 \quad 0,0192] \quad (37)$$

$$D = [0] \quad (38)$$

Resolviendo con la ecuación 18 se obtuvo el siguiente resultado

$$\lambda^2 + \lambda(0,3599 + K_1) + K_2 + 0,0192 \quad (39)$$

Igualando el determinante y el polinomio característico 26

$$(S - 0,4 + 0,37417i) * (S - 0,4 - 0,37417i) =$$

$$\lambda^2 + \lambda(0,3599 + K_1) + K_2 + 0,0192(40)$$

$$(S^2 - 0,8S + 0,16) =$$

$$\lambda^2 + \lambda(0,3599 + K_1) + K_2 + 0,0192(41)$$

Despejando  $K_1$  y  $K_2$

$$0,3599 + K_1 = -0,8 \quad (42)$$

$$K_2 + 0,0192 = 0,16 \quad (43)$$

$$K_1 = -1,1599 \quad (44)$$

$$K_2 = -0,1792 \quad (45)$$

En la figura 15 se muestra las salidas por realimentación de estados, donde se puede observar que este tipo de controladores no son adecuados para el sistema de la planta, ya que no estabiliza las señales de salidas de la planta, se puede intuir que al momento de realizar las aproximaciones de Pade se pierde valores importantes que llevan a que el control por realimentación de estados no funcione perfectamente.

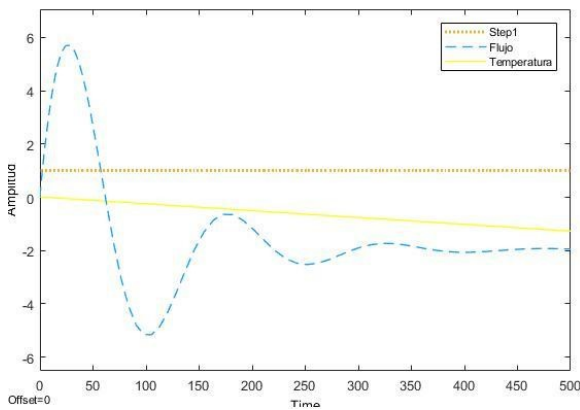


Figura 15: Gráfica controlador por realimentador de estados

## V. CONCLUSIONES

Para establecer los términos de las funciones de transferencia se aplicaron conocimientos previos de control y con base en el libro de Ogata, así como apoyados en el motor de Matlab, la respuesta dada y la respuesta El rendimiento de la función de transferencia será graficado para su propio análisis.

A pesar de que un controlador por realimentación de estados se puede aplicar a distintos sistemas, en nuestro caso este tipo de controladores es muy deficiente para ejercer un control en la planta debido a que los datos obtenidos en las salidas que nos ayudan al momento de calcular las matrices y las ecuaciones diferenciales son limitados y esto conlleva a el cálculo de las ganancias no sea exacto, por esta razón el controlador por la alimentación de estados no cumple la función que se espera.

La eficiencia de un control PID es muy alta en el momento de realizar o mantener la estabilidad, por esta razón son uno de los sistemas más utilizados dentro de la automatización, por otra parte, estos controladores funcionan muy bien en sistemas de una entrada y una salida, pero para los casos de sistemas multivariantes tienden a tener una pequeña deficiencia en el momento de realizar el control, ya que no pueden mantener el aislamiento de las interacciones en las salidas por esta razón se ve necesario en implementar otro método de control que ayude a los controladores PID.

En general, el desacoplamiento en un sistema ayuda a tener el control total de un proceso porque mantendríamos una salida estable sin importar el número de interacciones que se pueda tener dentro de éste.



## RECOMENDACIONES

Uno de los aspectos importantes de este trabajo es que hay muchas entradas y muchas salidas, sistemas que a menudo son más complejos que los típicos sistemas de una sola entrada. Es por eso que puede esperar que alguien pruebe y aplique nuevas técnicas como redes neuronales, un tipo de sistema que simula cómo funciona el cerebro humano. Este tipo de red es MIMO y además cuenta con el historial del sistema, lo que puede hacerlo más eficiente a la hora de tomar las mejores decisiones.

Las principales ventajas de estas redes son: Los modelos de última generación capturan de manera óptima y eficiente características complejas, obteniendo resultados con alta precisión. Además, los pesos se ajustan según la experiencia, lo que significa que la red debe aprender lo que necesita saber antes de que funcione. Por todo esto, será un buen comienzo para otro trabajo.

Otra mejora y posibilidad de continuar con el presente trabajo, es hacer uso del control lineal cuadrático gaussiano LQG, es fundamental en lo llamado control óptimo. Se trata de sistemas lineales inciertos perturbados por ruido gaussiano blanco aditivo, cuya información de estado es incompleta (es decir, no todas las variables de estado se miden y están disponibles para la reconstrucción) y está sujeta a un control de costos cuadrático. Además, esta solución es única y constituye una ley dinámica lineal que es computacionalmente simple y fácil de implementar. Finalmente, el controlador LQG también es la base para un control óptimo de sistemas no lineales ruidosos.

Finalmente, una situación para recordar, la optimización de LQG no garantiza automáticamente buenas propiedades de durabilidad. La robusta estabilidad del sistema de circuito cerrado debe verificarse por separado después de diseñar el controlador LQG. Para promover la robustez, se puede suponer que algunos parámetros del sistema son aleatorios en lugar de deterministas. El problema de control más difícil implica un controlador óptimo analógico que tiene diferentes parámetros de controlador únicos.

## REFERENCIAS

- [1] J. F. Ricardo-Barrera and E. Barrios-Urueña, "Control multivariable lineal con desacoples en un intercambiador de calor," *Ingeniería Investigación y Desarrollo*, vol. 17, no. 1, pp. 17–25, 2017.
- [2] D. C. Morales and F. M. García, "DISEÑO ÓPTIMO DE CONTROLADORES PID PARA SISTEMAS MULTIVARIABLE," p. 10.





- [3] E. M. Mera Vásquez *et al.*, "Diseño y construcción de una planta de procesos lazos de temperatura, flujo y nivel," 2018.
- [4] "Diseño y construcción de un sistema de péndulo invertido y una plataforma aerodinámica de un eje de bajo costo para prácticas de laboratorio de control en la corporación universitaria autónoma de nariño. san juan de pasto.,"

PROHIBIDA SU COPIA