

Controlador PID para el horno de craqueo R-401 de dicloroetano de una planta de monocloruro de vinilo

PID controller for the R-401 dichloroethane cracking furnace of a vinyl monochloride plant

Elianna V. Albarrán-González

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo-Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0000-3785-9589> | Correo electrónico: eliannalbarran@gmail.com

D anny J. Perozo-Rincón

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo-Venezuela.

 <https://orcid.org/0009-0003-7971-411X> | Correo electrónico: dperozo87@gmail.com

Gladys A. Quevedo-Contreras

Universidad Rafael Urdaneta, Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Química. Maracaibo-Venezuela.

 <https://orcid.org/0000-0001-8656-0655> | Correo electrónico: gladxdx@gmail.com

Recibido: 26/01/2025 Admitido: 25/02/2025 Aceptado: 08/06/2025

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal analizar el sistema de control del horno de craqueo R-401 de una planta de monocloruro de vinilo, con la finalidad de construir un controlador PID a través de la determinación del modelo matemático mediante una data experimental extraída del autor Senior (2010), la selección de dicho modelo y la construcción de los controladores P, PI y PID los cuales pasaron por un proceso de selección y validación. Se busca incentivar la aplicación y uso de los diferentes programas computarizados para obtener simulaciones del proceso y obtener ajustes e identificación del sistema de una forma más precisa. En la actualidad las empresas en Venezuela aplican frecuentemente el método de entonación de ensayo y error pudiendo encontrar problemas de producción, seguridad, mantenimiento y de calidad del producto objetivo. Como resultado, se obtuvo un modelo matemático con un 70,44% de ajuste con respecto a la data experimental y un controlador PID que responde de forma acorde, rápida y precisa ante las perturbaciones inducidas.

Palabras clave: Sistemas de control, modelo matemático, horno de craqueo, controlador PID.

Abstract

The main objective of this research was to analyze the control system of the R-401 cracking furnace at a vinyl monochloride plant. The goal was to construct a PID controller by determining the mathematical model using experimental data extracted from Senior (2010), selecting the model, and constructing the P, PI, and PID controllers, which then underwent a selection and validation process. The objective is to encourage the application and use of various computer programs to obtain process simulations and obtain more precise system adjustments and identification. Currently, companies in Venezuela frequently apply the trial-and-error tuning method, which can lead to problems with production, safety, maintenance, and the quality of the target product. The result was a mathematical model with a 70.44% fit with respect to the experimental data and a PID controller that responds accordingly, quickly, and accurately to induced disturbances.

Keywords: Control systems, mathematical model, cracking furnace, PID controller.

Introducción

El control automático de procesos ha desempeñado un papel indispensable en el avance de la ingeniería y la industria. Los sistemas de control poco a poco se han convertido en una parte importante y fundamental en los procesos químicos modernos de fabricación, cualquier operación industrial requiere el control de variables como temperatura, presión, humedad, flujo, entre otras [1]. Es decir, que en la actualidad se hace indispensable

el uso de controladores que mantengan al margen las variables del proceso y las perturbaciones externas e internas que puedan afectar la eficiencia y seguridad de los procesos de producción. Para Smith y Corripio [2, p. 20] “el objetivo del sistema de control automático de procesos es utilizar la variable manipulada para mantener a la variable controlada en el punto de control a pesar de las perturbaciones”.

Kassem y Urdaneta [3] en su trabajo de investigación titulado: “Propuesta de mejora del sistema de control básico del horno de craqueo de diclorometano R-401” identificaron variables del proceso del horno de craqueo y obtuvieron modelos matemáticos del sistema que se evaluaron a través de un software matemático. Como resultado se generaron cuatro modelos que representa los cuatro lazos de control asociados al horno de craqueo, además de observar que los lazos de control de la empresa no estuvieron entonados correctamente, dado que no lograron estabilizar el sistema.

Por su parte, Senior [4] en su investigación titulada: “Desarrollo de un sistema de control PID para un reactor de diclorotano para la empresa COPLAN C.A” obtuvieron una función de transferencia sencilla que permite un control rápido y eficiente del sistema, tomando datos del lazo control M2FC403 y de la alimentación del monocloruro de vinilo al reactor EDC R-401 de la planta Vinilos II para el modelo matemático y para el diseño eficaz del controlador PID.

La entonación de los sistemas de control permite optimizar la respuesta del sistema, reducir el error, mejorar la estabilidad y evitar las oscilaciones. En la actualidad este protocolo de ajuste se realiza en diversas plantas de manera aleatoria por medio del tanteo en las variables del controlador, derivando en problemas para el proceso que van desde pérdida de efectividad por no sacar el máximo provecho del proceso, hasta aumentos de costos de producción. Por lo tanto, el uso las diferentes herramientas o métodos que pueden presentar los distintos programas computarizados modernos, pueden proporcionar resultados mejores si se conoce por completo la dinámica de la planta en la cual se esté trabajando.

En el presente trabajo se expone el proceso de construcción de un controlador PID para el horno de craqueo R-401 de dicloroetano de una planta que produce monocloruro de vinilo. En las plantas químicas y petroquímicas, los hornos suministran aproximadamente la totalidad de la energía requerida para los procesos de separación y conversión química de los productos, en este caso el horno R-401 es fundamental para la producción debido a que es el responsable de la obtención de dicloroetano, ácido clorhídrico y monocloruro de vinilo, a través del craqueo de dicloroetano puro. Por lo tanto, es necesario la implementación de un sistema de control óptimo para que todas las variables relacionadas al sistema se encuentren en orden y el funcionamiento de los equipos sea el adecuado.

El objetivo de esta investigación consistió en construir un controlador PID mediante la identificación, selección y diseño usando las herramientas computacionales MATLAB y SIMULINK, empleando como criterio la sencillez del modelo matemático, el ajuste con respecto a la data experimental obtenida y el comportamiento del controlador frente al estímulo proporcionado por las diferentes entradas aplicadas.

Materiales y métodos

Se realizó una investigación de tipo descriptiva, proyectiva y comparativa, con un nivel comprensivo, aplicando un diseño experimental y cuantitativo, teniendo como unidad de análisis el lazo de control M2FC403.

El trabajo se condujo a través de las fases que se describen a continuación:

Fase 1. Determinación del modelo matemático que se aproxime al comportamiento del sistema a través del programa MATLAB.

Para la obtención del modelo matemático se extrajo la data experimental obtenida por el autor Senior [4]. La recolección de los datos de las pruebas a lazo abierto en el horno de craqueo R-401 se realizó en un periodo de cinco (5) minutos, tomando un total de 300 muestras. Posteriormente, se ejecutó la exportación de la información del programa ofimático EXCEL al programa MATLAB donde se empleó el toolbox “System identification” para la obtención de 84 modelos matemáticos, con los modelos paramétricos ARX, ARMAX,

OE y BJ. Seguidamente, se hizo la transformación de las funciones de transferencia de tiempo discreto a tiempo continuo para efectuar la selección del modelo matemático más adecuado, tomando en consideración la simplicidad, análisis de comportamiento ante una función impulso y el comportamiento de ceros y polos.

Fase 2: Diseño de un controlador PID para el horno de craqueo R-401 mediante el programa MATLAB.

Para esta fase se eligió el método de Ziegler-Nichols el cual consiste en determinar, L , K y τ , para aplicar las fórmulas otorgadas por los creadores del método, siguiendo los pasos que se mencionan:

1. Establecer la tangente al punto de inflexión para determinar L , K y τ .
2. Obtener los parámetros K .
3. Analizar las gráficas obtenidas y comprobar la estabilidad del sistema.

Fase 3: Selección del controlador PID más adecuado para el horno de craqueo R-401 mediante el programa MATLAB y SIMULINK.

A través de los parámetros obtenidos de las pruebas realizadas en cada uno de los controladores, se procedió a simular el comportamiento del modelo matemático seleccionado en un controlador P, PI y PID, a través del software computarizado MATLAB con la herramienta SIMULINK. Se comprobó la estabilidad del sistema con el controlador mediante las funciones “step” en el programa. Luego, se validó el controlador con la data experimental, utilizando las entradas de todo el comportamiento del sistema real, el rango seleccionado del segundo impulso encontrado en el comportamiento real y la función impulso escalón inducida al sistema. Para la selección del controlador se tomaron en consideración los siguientes parámetros:

1. Tiempo de subida/Rise time.
2. Tiempo de asentamiento/Settling time.
3. Sobre impulso/Overshoot.
4. Tiempo de pico/ Peak time.
5. IAE (integral absoluta del error).

Fase 4: Comparación del rendimiento de controlador diseñado con el controlador construido en una investigación previa.

Una de las tareas más importantes en el diseño de un controlador es la evaluación de su desempeño. Para ello, se comparó el controlador realizado con el del trabajo de Senior [4] para identificar las ventajas y desventajas del controlador construido, así como las posibles mejoras que se puedan implementar.

Resultados

1. Establecimiento del modelo matemático más aproximado al comportamiento del sistema.

Los datos empleados en el modelo matemático provinieron de los datos experimentales de entrada y salida a lazo abierto, en el lazo de control M2FC403, que corresponde a la alimentación del monocloruro de vinilo al horno de craqueo R-401 de la planta Vinilos II [4]. En la tabla 1 se describen las variables manipuladas y controladas seleccionadas para el proceso.

Tabla 1. Variables seleccionadas del proceso [4].

	Variable Manipulada	Variable Controlada
Descripción	% de apertura de válvula	Flujo de producto
Unidades	Porcentaje (%)	Toneladas/Horas (Ton/h)

Al importar la data desde el programa ofimático EXCEL hasta el programa computarizado MATLAB, en la variable tipo “table” se tuvo que hacer una conversión de “table a array” (vector) para poder manipular la

data correctamente, y una vez obtenidos los vectores se procedió a graficar el comportamiento real del sistema con respecto a cada variable, observándose la relación de estas dos variables del sistema, como se muestra en la Figura 1.

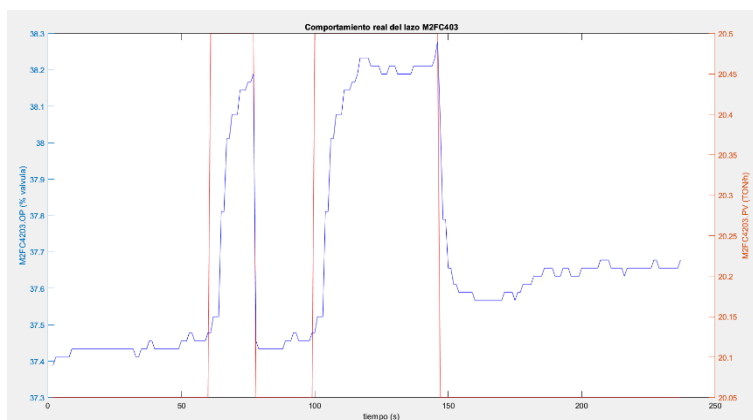


Figura 1. Comportamiento real del lazo M2FC403 del horno de craqueo R-401

A su vez, se tienen las funciones impulso escalón representativas del sistema, útiles para confirmar la relación que existe entre el flujo y la apertura de la válvula, pudiendo observar en las Figuras 2 y 3 que, a medida que la apertura de la válvula es mayor el flujo aumenta, por lo que se puede inferir que éstas son directamente proporcionales, comportamiento correspondiente a la respuesta de la entrada (% apertura de válvula) y salida (flujo). La apertura de la válvula está representada por el color rojo mientras que el flujo es representado por el color azul. En la Figura 3, se aprecia en conjunto este comportamiento, notándose que siguen la misma tendencia.

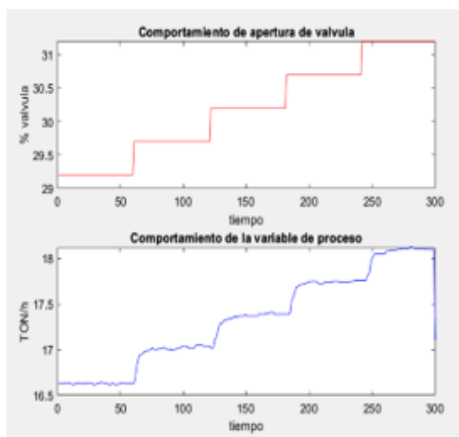


Figura 2. Función impulso escalón del horno de craqueo R-401

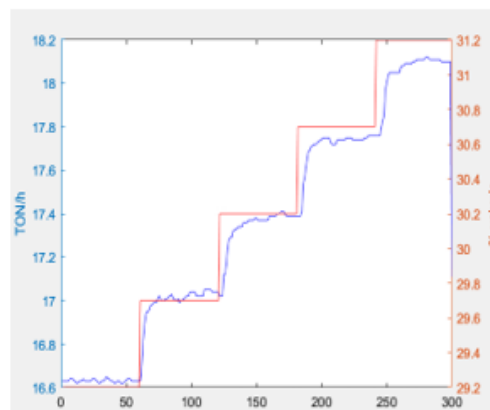


Figura 3. Comparación de la función impulso escalón

Teniendo la data cargada en el programa MATLAB se procedió al manejo y utilización del toolbox "System Identification" el cual permitió obtener modelos matemáticos a través de los datos experimentales. Para efectos de esta investigación, se seleccionó un rango para la obtención de los modelos matemáticos, con el propósito de trabajar solamente con los cambios generados, sin incluir el comportamiento constante que tiene la apertura y cierre de la válvula. En la Figura 4, se visualiza el rango mencionado, siendo la línea de color azul el comportamiento de la data y la de color verde el rango seleccionado.

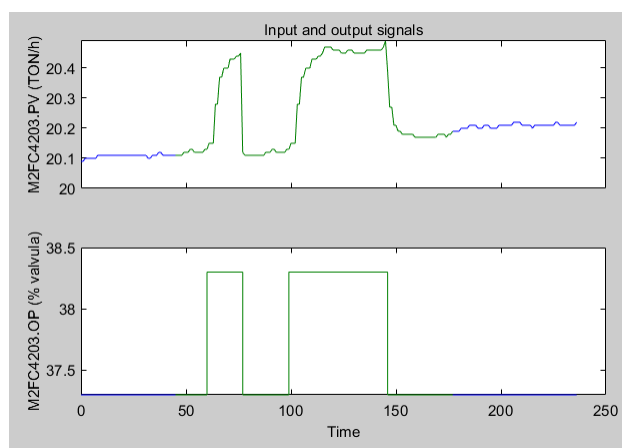


Figura 4. Selección del rango de la entrada y salida del lazo M2FC403

Mediante el uso de la herramienta se logró el despliegue de 21 modelos matemáticos (84 modelos en total) para cada uno de los modelos polinomiales ARX, ARMAX, OE y BJ. Es importante destacar que para la obtención de estos modelos matemáticos se realizó un proceso iterativo, intercambiando los valores de los polos, ceros, tiempo muerto y ruido. Posteriormente, se realizó la selección del modelo matemático, acortando inicialmente a una cifra de cuatro modelos, hasta llegar a la selección definitiva del modelo matemático con el que se trabajó, que fue el que exhibió el mejor ajuste.

A modo de resumen, la Tabla 2 contiene los cuatro modelos matemáticos que pasaron la preselección, siendo el criterio de selección el ajuste del modelo matemático. Es importante mencionar que, para la selección del modelo matemático, se evaluaron las funciones de transferencia resultantes, el comportamiento de sus polos y ceros, el comportamiento del sistema ante la función escalón y el porcentaje de ajuste que tiene el modelo con respecto a la data experimental.

Tabla 2. Modelos con mayor ajuste para el lazo M2FC403

Modelo	Ajuste %
ARX530	56,98
AMX6660	69,65
OE450	68,48
BJ33320	70,44

Tras los análisis realizados se seleccionó 1 modelo matemático BJ33320 por presentar un 70,44% de ajuste, exhibir la función de transferencia más simple, un comportamiento totalmente estable con respecto a sus polos y ceros, y ser el sistema más rápido ante la respuesta de un escalón. Su función de transferencia en tiempo continuo y discreto, comportamiento de polos y ceros y su respuesta ante la función escalón, se reflejan en las siguientes ecuaciones

$$\frac{0,117s^2+0,04254s+0,03114}{s^2+0,4992s+0,1124} \quad (\text{Ec.1})$$

$$\frac{0,1145-0,1713z^{-1}+0,08121z^{-2}}{1-1,521z^{-1}+0,6093z^{-2}} \quad (\text{Ec.2})$$

Las ecuaciones 1 y 2 reflejan la función de transferencia del modelo seleccionado en tiempo continuo y discreto, respectivamente.

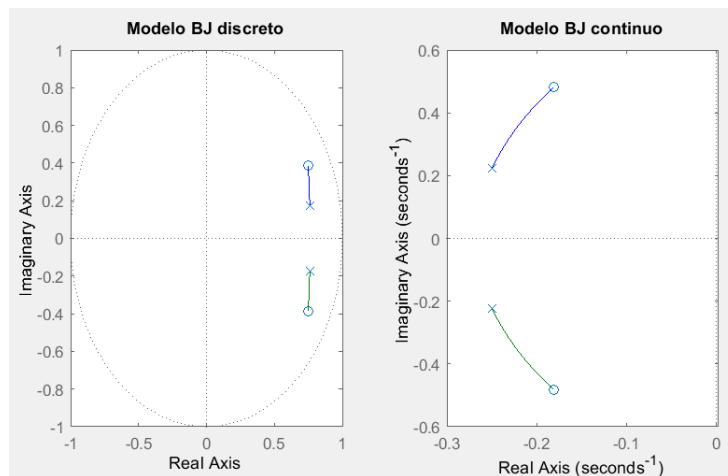


Figura 5. Gráfica de la ubicación de polos y ceros para BJ33320 en tiempo continuo y discreto

En la Figura 5 se muestra el comportamiento de los polos y ceros en tiempo discreto y continuo. Para el tiempo discreto se aprecia que estos polos y ceros se encuentran dentro del círculo unitario, indicando que el sistema es estable y las oscilaciones serán atenuadas con el tiempo. Para el tiempo continuo se reafirma lo enunciado anteriormente, el sistema es sin lugar a dudas estable debido a que todos sus polos y ceros se encuentran en la parte imaginaria negativa, con una respuesta oscilatoria con amortiguamiento. En la Figura 6 se representa gráficamente la respuesta del sistema ante un escalón unitario.

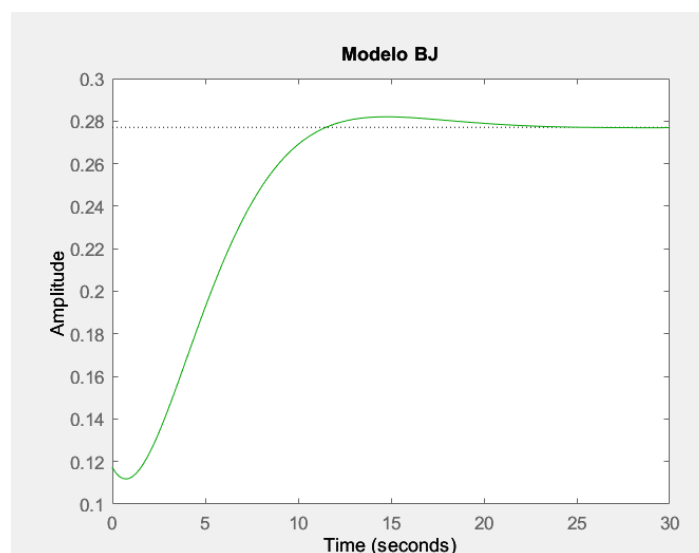


Figura 6. Gráficas de comportamiento de la función escalón para el modelo BJ en tiempo continuo

2. Diseño de un controlador PID para el horno de craqueo R-401.

Con el modelo matemático seleccionado se procedió a aplicar el método Ziegler-Nichols (Z-N) mediante el programa MATLAB. Se prosiguió a determinar el retardo del sistema (L), la constante de tiempo (τ) y la frecuencia a la que se estabilizó el sistema (K), estos parámetros se localizaron en la respuesta del modelo ante la función escalón, pudiendo trazar una línea tangente al punto de inflexión y visualizar L , K y τ .

Es importante mencionar que el método Z-N se aplica a sistemas que no contengan integradores ni polos dominantes complejos conjugados [1]; es decir, en sistemas de primer orden que tengan como respuesta

una curva en forma de S. Para efectos de esta investigación se contó con un modelo de segundo orden, pero con el comportamiento de una curva en forma de S ante la respuesta de un escalón; sin embargo, se tuvo un pequeño porcentaje de overshoot (1,795%) el cual no es lo suficientemente representativo como para descartar esta metodología. Por los motivos planteados, se decidió aplicar el método al sistema de segundo orden y a su vez, realizar una reducción de orden en la función de transferencia, aplicar el método Z-N y demostrar el escenario donde responde mejor el método.

$$\begin{aligned} L &= 1,41 \\ \tau &= 8,34 - L = 6,9300 \\ K &= 0,277 \end{aligned} \quad (\text{Ec.3})$$

Con esos parámetros se pudo calcular el factor de incontrolabilidad, donde Smith & Corripio [2] enuncian que las ecuaciones de sintonía para el método Z-N arrojan buenos resultados cuando este factor está dentro del rango entre 0,1 y 0,3.

$$\frac{L}{\tau} = \frac{1,41}{6,9300} \quad (\text{Ec.4})$$

Se observó que el factor de incontrolabilidad se encontró dentro del rango. De la Tabla 3 se extrajeron las ecuaciones para la obtención de K_p , T_i y T_d dotando de resultados a la tabla 4, que recopila los valores de K_p , K_i y K_d obtenidos de las ecuaciones 5a, 5b y 5c.

Tabla 3. Regla de sintonía de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método) [1]

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0,5L$

Tabla 4. Tabla de ganancias para el ajuste del controlador PID mediante Z-N con un sistema de segundo orden

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	4,9149	-	-
PI	4,4234	0,94115	-
PID	5,8979	2,0914	4,158

$$K_p \quad (\text{Ec.5a})$$

$$K_i \frac{K_p}{K_i} \quad (\text{Ec.5b})$$

$$K_i = K_p * T_d \quad (\text{Ec.5c})$$

Posteriormente, se redujo el sistema mediante el método del polo dominante, el cual consistió en identificar el polo con mayor influencia en el sistema y obviar los demás que tuvieron una menor relevancia en el comportamiento del sistema. La nueva función de transferencia se muestra en la ecuación 6; mientras que, en la tabla 5 se presentan las ganancias obtenidas para esta nueva función de transferencia.

$$\frac{0,277}{s+0,3353}$$

Tabla 5. Tabla de ganancias para el ajuste del controlador PID mediante Z-N con un sistema de primer orden

Tipo de controlador	Kp	Ti	Td
P	10,8148	-	-
PI	9,7333	10,815	-
PID	12,978	24,033	1,752

3. Selección del controlador PID más adecuado para el horno de craqueo R-401.

Tras obtener las ganancias correspondientes para un controlador P, PI y PID para el sistema determinado BJ3330 y para el sistema reducido; se procedió a trabajar con la herramienta SIMULINK creando un diagrama de bloques con los modelos ya mencionados. En las Figuras 7 y 8 se observan los diagramas de bloques creados para los sistemas de segundo y primer orden. De izquierda a derecha se observa en primera instancia, que se induce al sistema una perturbación que sería la función escalón, seguidamente se aprecian cuatro bifurcaciones de esta señal, para luego introducirse en un punto suma, dado por la sumatoria de la perturbación menos la retroalimentación del sistema, debido a que se está trabajando en un lazo cerrado. Seguidamente, se tiene el controlador proporcional, proporcional integral y proporcional integral derivativo; el siguiente bloque corresponde a la función de transferencia en tiempo continuo, mostrado en la ecuación 1 y 6. Para finalizar, se observa un “mux” que combina todas las señales en una señal dirigida al “scope” u osciloscopio, donde se pueden visualizar las respuestas del proceso.

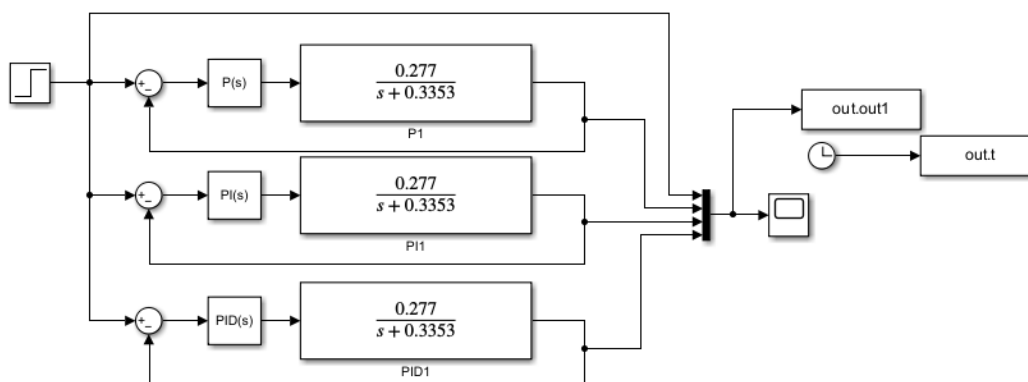


Figura 8. Diagrama de bloques del sistema de primer orden con controladores P, PI y PID

De las figuras 9 y 10 se destaca que, para el controlador proporcional ilustrado con la línea azul para ambos casos, que se estabiliza, pero no llega a la referencia que es 1, puesto que se le indujo una perturbación del tipo escalón unitario, por lo que este controlador queda descartado para la aplicabilidad y estudio

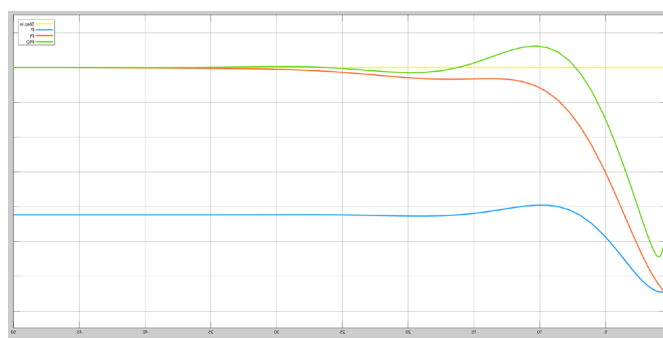


Figura 9. Comportamiento de los controladores P, PI y PID en el sistema de segundo orden

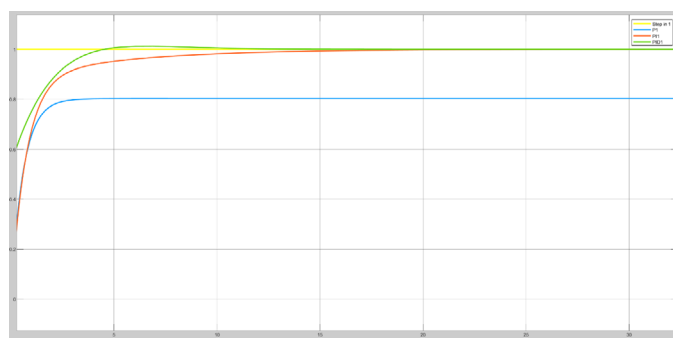


Figura 10. Comportamiento de los controladores P, PI y PID en el sistema de primer orden

Luego de analizar los controladores ante una función impulso, se seleccionó el controlador PI y PID, los cuales pasan por un proceso de validación creando un nuevo diagrama de bloques, tal como se muestra en la figura 11, donde se incluye a ambos sistemas.

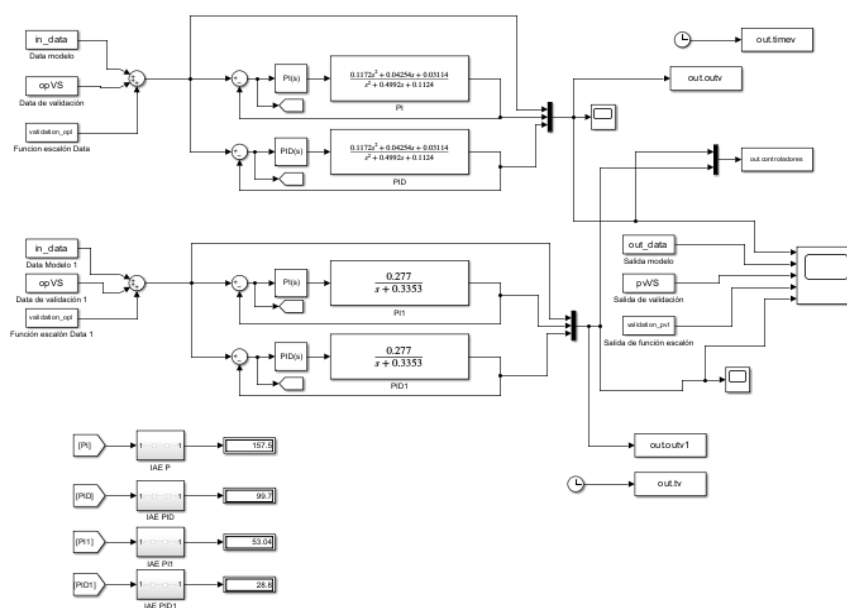


Figura 11. Diagrama de bloques utilizado para la validación del controlador

El diagrama mostrado sigue la misma estructura presentada en las Figuras 7 y 8, con la diferencia de que para este caso se unieron los dos sistemas, y que las perturbaciones al sistema ya no corresponden a

una función escalón sino a la data experimental, siendo “in_data” y “out_data” la entrada o la apertura de la válvula, y la salida o flujo de vapor en la data utilizada para la determinación del modelo matemático, cuyo comportamiento se puede observar en la Figura 1. Los parámetros opvS y pvS corresponden a la entrada y salida de un rango correspondiente al segundo impulso reflejado en la Figura 1, el cual es el más grande, y su comportamiento se visualiza en la Figura 12. Para finalizar, se tiene “validation_opl” y “validation_pvl” que corresponden a las entradas y salidas de la función impulso escalón, ilustrada en la Figura 2. El arreglo que se tiene en el diagrama de los “scopes” tiene como finalidad visualizar por separado la respuesta de los controladores en los sistemas de primer y segundo orden, respectivamente, con respecto a la entrada; así como también, para observar el comportamiento en conjunto de todos los controladores, teniendo como referencias las salidas ya descritas. Además, se incorporaron algunas operaciones algebraicas a la señal entrante del controlador, con el propósito de calcular la integral absoluta del error.

Para la validación, se introdujeron tres perturbaciones diferentes de la data real experimental, siendo estas entradas las siguientes: el comportamiento real del sistema ilustrado en la Figura 1, el rango del segundo impulso inducido al sistema y la función impulso escalón exhibido en las Figuras 2 y 3, y el rango del segundo impulso ilustrado en la Figura 12; pudiéndose observar que el comportamiento de los controladores se ajustó al comportamiento del sistema de forma efectiva. Se construyeron las siguientes tablas con las respuestas en estado transitorio de los controladores PI y PID, para los sistemas de primer y segundo orden, respectivamente.

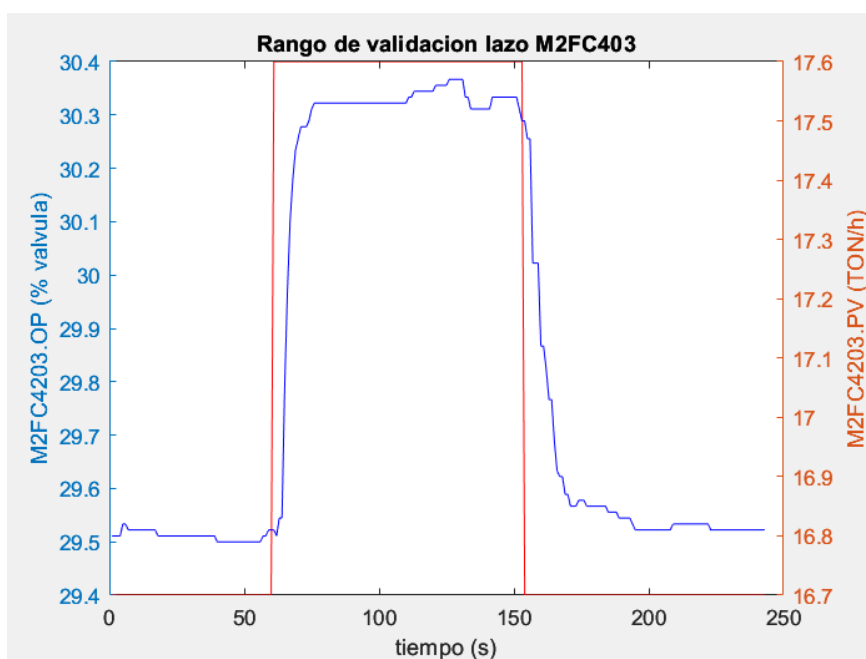


Figura 12. Diagrama de bloques utilizado para la validación del controlador

Para esta perturbación “in_data” se construyó la tabla 6, el controlador que se estabilizó en un menor tiempo fue el PID; sin embargo, obtuvo el mayor “overshoot” de 6,141 % con un valor de 39,591 a un tiempo de 10,073 s. En caso contrario, se tuvo el PID1 siendo este el segundo controlador con el tiempo de asentamiento más rápido con un 2,712 % de “overshoot” a un tiempo de 105,799 s. Para los demás controladores, se obtuvieron resultados similares; no obstante, se diferenciaron en la magnitud de la integral absoluta del error, la cual reflejó el valor acumulado de los errores absolutos entre la respuesta del sistema y el valor de referencia. El controlador que consiguió el menor valor de IAE fue el controlador PID en el sistema de primer orden.

Tabla 6. Criterios para la selección del controlador en el sistema de segundo y primer orden ante una entrada “in_data”

	RiseTime	SettlingTime	Overshoot	Undershoot	Peak	PeakTime	IAE
PI segundo orden	8,459	146,718	2,679	0	38,299	145,956	157,500
PID segundo orden	0	146,343	6,141	0	39,591	10,073	99,700
PI1 primer orden	2,521	146,735	2,681	0	38,300	145,956	53,040
PID1 primer orden	2,226	146,430	2,712	0	38,312	105,799	28,800

Para esta perturbación “opVS” se construyó la tabla 7, el controlador que se estabilizó en un menor tiempo fue el PID; sin embargo, fue el que obtuvo el mayor “overshoot” de 6,208 % con un valor de 31,225 a un tiempo de 10,371 s. Por otro lado, se obtuvo el PID1, siendo este el segundo controlador con el tiempo de asentamiento más rápido con un 3,499 % de “overshoot” a un tiempo de 65,892 s. Para el resto de los controladores se obtuvieron resultados similares, aunque con diferencias en la magnitud de la integral absoluta del error. El controlador que consiguió el menor valor de IAE fue el controlador PID en el sistema de primer orden.

Tabla 7. Criterios para la selección del controlador en el sistema de segundo y primer orden ante una entrada opVS

	RiseTime	SettlingTime	Overshoot	Undershoot	Peak	PeakTime	IAE
PI segundo orden	8,447	154,716	3,401	0	30,400	152,665	120,400
PID segundo orden	0	153,310	6,208	0	31,225	10,371	76,300
PI1 primer orden	2,510	153,670	3,401	0	30,400	152,660	40,390
PID1 primer orden	2,226	153,343	3,499	0	30,429	65,892	21,870

Para la perturbación “validation_opl” se elaboró la Tabla 8, el controlador que se estabilizó en un menor tiempo fue el PID; sin embargo, obtuvo el mayor overshoot de 0,099% con un valor de 31,231 a un tiempo de 251,717 s. Por otro lado, el controlador PID1 fue el segundo controlador con el tiempo de asentamiento más rápido con un 0,070 % de “overshoot” a un tiempo de 247,054 s; mientras, que los demás controladores no tuvieron un sobre pico. Estos valores están reflejados en la gráfica, puesto que al estabilizarse el sistema el controlador PID y PID1 no se asientan justamente en la referencia, sino levemente por encima de ésta. Los demás controladores presentaron resultados similares, pero con diferencia en la magnitud de la integral absoluta del error. El controlador que consiguió el menor valor de IAE fue el PID en el sistema de primer orden.

Tabla 8. Criterios para la selección del controlador en el sistema de segundo y primer orden ante una entrada validation_opl

	RiseTime	SettlingTime	Overshoot	Undershoot	Peak	PeakTime	IAE
PI segundo orden	11,539	186,871	0	0	31,200	350,000	119,700
PID segundo orden	0	185,110	0,099	0	31,231	251,717	75,810
PI1 primer orden	6,055	182,477	0,000	0	31,200	350,000	40,130
PID1 primer orden	3,210	182,146	0,070	0	31,222	247,054	21,750

Luego de haber realizado la selección y validación de los controladores se ratificó que el controlador PID diseñado para el sistema reducido de primer orden y segundo orden, respondió de forma efectiva ante la estimulación de la data real. Por lo que, el controlador seleccionado fue el PID, tanto para primer orden como para segundo orden.

4. Comparación del rendimiento del controlador diseñado con el controlador descrito previamente.

A forma de resumen se muestran las siguientes tablas que contienen los datos más relevantes del controlador seleccionado.

Tabla 9. Aspectos comparativos del controlador diseñado con respecto al construido previamente.

Autor	Misma data	Mismo lazo de control	Tipo de controlador	Método de entonamiento	Kp	Ki	Kd	Settlin Time	Rise Time	Overshoot	Peak
Senior, 2010 [4]	Si	Si	PID	Routh-Hurwitz	3,36	17,681	0,096	136	6,5	1	1,042
Albarrán, Perozo y Quevedo, 2025 (presente trabajo)	Si	Si	PID Sistema de Segundo orden	Ziegler-Nichols	5,9	2,091	4,16	14,5	0	6,18	1,06
Albarrán, Perozo y Quevedo, 2025 (presente trabajo)	Si	Si	PID Sistema de primer orden	Ziegler-Nichols	13	24,03	1,75	3,7	2,23	1,22	1,01

Se observa que, para los modelos utilizados en esta investigación, se obtuvieron las ganancias empleando un método de entonación diferente al empleado en el trabajo de Senior [4]. La comparación se realizó con respecto a la entrada de una perturbación del tipo escalón unitario, debido a que en la literatura no se encontró información sobre las respuestas en estado transitorio ante la estimulación del sistema con la data experimental real. La respuesta a estas entradas fue de tipo escalón, como se puede notar en las Figuras 13 y 14, respectivamente.

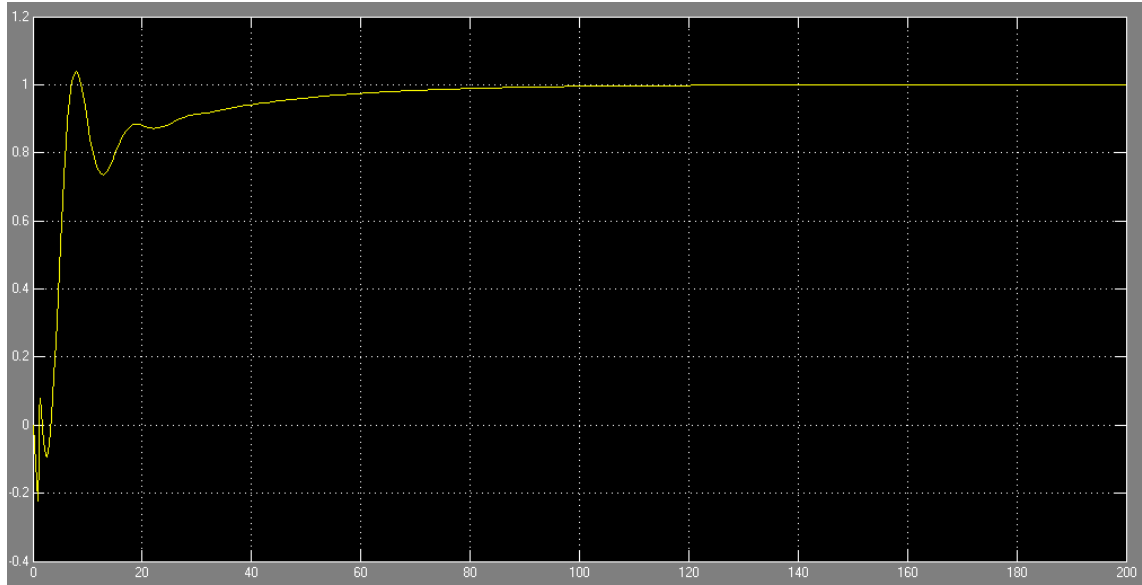


Figura 13. Comportamiento de controlador PID aplicado al modelo matemático seleccionado en tiempo continuo.

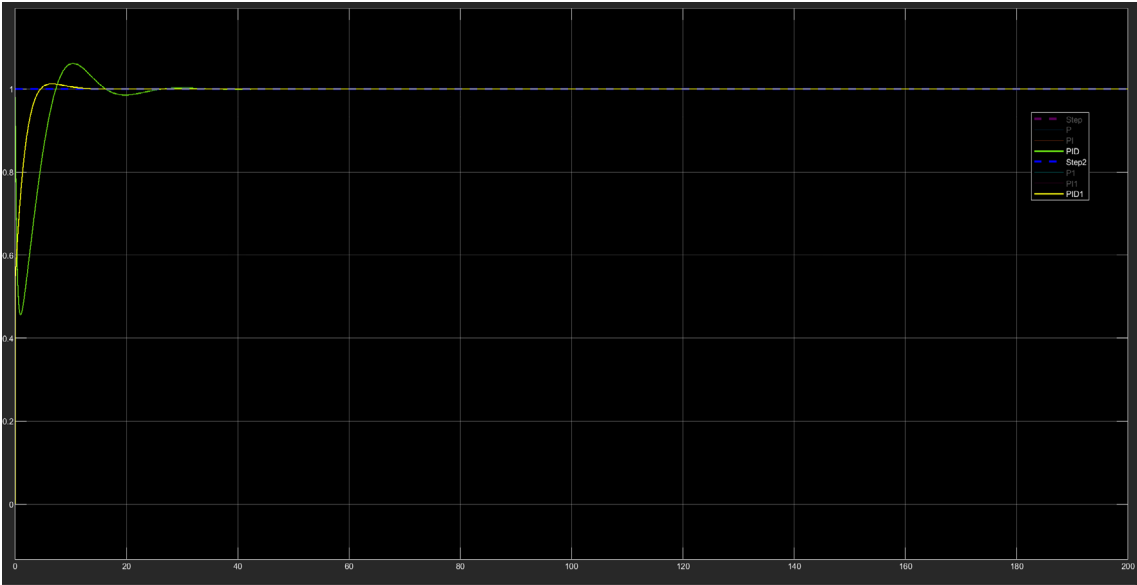


Figura 14. Comportamiento de los controladores PID en el sistema de segundo y primer orden

Tabla 10. Comparación de los modelos matemáticos obtenidos con respecto a los construidos previamente en trabajos de investigación en tiempo continuo

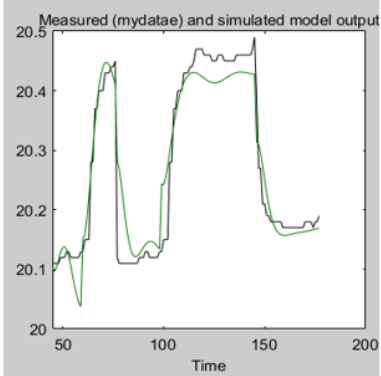
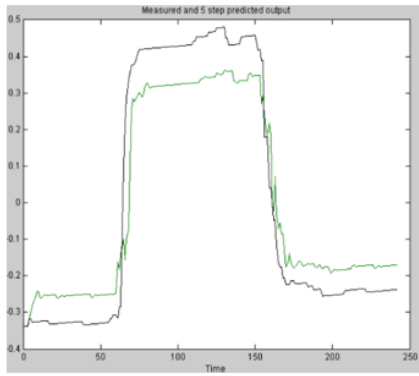
Modelo BJ33320	Modelo ARMAX
$\frac{0,1172s^2+0,04254s+0,03114}{s^2+0,4992s+0,1124}$	$\frac{-0,05379s^3+0,3227s^2-0,6454s+0,4303}{s^3+4,187s^2+4,747s+0,7475}$
Presente trabajo	(Senior, 2010) [4]

Tabla 11. Comparación de los modelos matemáticos obtenidos con respecto a los construidos previamente en trabajos de investigación en tiempo discreto

Modelo BJ33320	Modelo ARMAX
$\frac{0,1145-0,1713z^{-1}+0,08121z^{-2}}{1-1,521z^{-1}+0,6093z^{-2}}$	$\frac{0,09838}{z^3-0,8291z^2}$
Presente trabajo	(Senior, 2010) [4]

Se observó que las ganancias resultantes de esta investigación fueron mayores a las del trabajo en referencia (Tabla 9), esto es debido a la diferencia del método de entonamiento utilizado y a la diferencia en cuanto al modelo matemático trabajado.

Tabla 12. Comparación del comportamiento del modelo determinado con respecto a los construidos previamente en trabajos de investigación

Modelo BJ33320	Modelo ARMAX
	
Presente trabajo	(Senior, 2010) [4]

Luego de haber realizado esta comparación se puede establecer que ambos sistemas responden de forma efectiva ante las perturbaciones inducidas de la data experimental; sin embargo, el modelo matemático obtenido en este trabajo de investigación mediante el modelo polinomial Box-Jeankins (BJ), se acercó más a la data experimental.

Conclusiones

El modelo matemático que presentó mejor ajuste, mayor sencillez en términos de su función de transferencia, fue el modelo BJ33320. No obstante, es importante realizar el análisis del comportamiento de los polos y ceros en tiempo continuo y discreto para este tipo de identificación de modelos, puesto que confirman el comportamiento del sistema en general, siendo el círculo unitario de gran ayuda al momento de analizar con rapidez la estabilidad de un sistema.

El método de Ziegler-Nichols es un método fácil de aplicar cuando se tiene solamente la respuesta del sistema, se puede aplicar la metodología a sistemas de segundo orden que sean sub-armortiguados o que tengan un overshoot despreciable.

El controlador que mejor respondió ante la data experimental del sistema fue el PID para los sistemas de primer y segundo orden; sin embargo, no se seleccionó ningún orden específico, puesto que, al emplearse regresiones lineales para la determinación del modelo y ecuaciones probabilísticas para la estimación de las variables, se acarrea un error de estimación. Por lo tanto, al realizar la reducción de orden a la función de transferencia se le suma un error más. Por lo que se evidencia que, el controlador PID para ambos sistemas responde de manera eficiente para las ganancias probadas.

El controlador diseñado mediante la obtención del modelo matemático BJ y el método de entonamiento Ziegler-Nichols, mostró un mejor rendimiento con respecto al controlador propuesto por Senior [4], debido a que exhibió mejores respuestas de estado transitorio frente a la función escalón, mayor sencillez en las funciones de transferencias propuestas y, mayor ajuste del modelo matemático con respecto a la data experimental.

Referencias bibliográficas

[1] K. Ogata, Ingeniería de Control Moderna. 5ta edición, Madrid: Pearson Educación S.A., 2009.[En línea]. Disponible en: <https://ingenierovizcaino.com/material/libros/sd/ingenieria-de-control-moderna-ogata-5ed.pdf>

[2] C. Smith, & A. Corripio, Control Automático de Procesos. En: C. Smith, & A. Corripio, Control Automático de Procesos: Teoría y Práctica. Primera edición, Ciudad de México: Limusa S.A., 1991. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/11730887/Control_Automatico_de_Procesos_Teoria_y_Practica_SMITH_CORRIPIO

[3] N. Kassem & V. Urdaneta, “Propuesta de mejora del sistema de control básico del horno de craqueo de dicloroetano”. Trabajo especial de grado, Univ. Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela, 2014.

[4] R. Senior, “Desarrollo de un sistema de control PID para un reactor de dicloroetano para la empresa COPLAN C.A.”. Trabajo especial de grado, Univ. Rafael Urdaneta, Maracaibo, Venezuela, 2010.