



Metodología para la sintonización de controladores PID industriales

(Methodology for industrial PID tuning controllers)

M.Sc. Kenneth E. Rosillón O

Universidad Dr. Rafael Bellosó Chacín

krosillon@urbe.edu.ve

M.Sc. Mariam C Martínez P

Universidad Dr. Rafael Bellosó Chacín

mcmartinez1@urbe.edu.ve

Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo principal establecer una metodología sistemática para la sintonización de reguladores PID de primer, segundo, tercer y orden superior respectivamente. La misma se fundamentó en autores del área de Control de procesos como Bishop (2014), Ogata (2010) y Corripio (2004). Así mismo se fundamentó en las líneas estratégicas de sintonización de reguladores PID propuestas por Astrom (2000) y Sánchez (2010). Este estudio se considera de carácter documental según Arias (2012) con diseño no experimental según Kerlinger (1979). Las unidades de análisis fueron los documentos, revistas y libros utilizados para describir la problemática. La metodología se dio a partir de la técnica de la revisión documental empleando instrumentos como el block de notas y hoja de datos bi variadas. El procedimiento de la investigación se llevó a cabo en cuatro (4) fases bien definidas que abarcan desde la identificación del tipo de proceso y su modelación matemática, para poder así diseñar el regulador PID que más se ajustó al orden del proceso y finalmente poder validarlo. Los resultados de la investigación evidenciaron los procedimientos para la sintonización de reguladores por los métodos de Ziegler y Nichols, Asignación de Polos, así como reguladores óptimos de Cohen Coon, Smith y López, entre otros criterios óptimos que brindaron un algoritmo matemático confiable en la sintonización efectiva de un regulador PID clásico en tiempo continuo.

Palabras Claves: PID, Algoritmo matemático, Reguladores clásicos.

Abstract

The main objective of the present research was to establish a systematic methodology for tuning first, second, third and higher order PID regulators respectively. It was based on authors from the Process Control area such as Bishop (2014), Ogata (2010) and Corripio (2004). Likewise, it was based on the strategic lines of tuning of PID regulators proposed by Astrom (2000) and Sánchez (2010).



This study is considered documentary according to Arias (2012) with a non-experimental design according to Kerlinger (1979). The units of analysis were the documents, magazines and books used to describe the problem. The methodology was given from the technique of document review using instruments such as the notepad and bi-varied data sheet. The research procedure was carried out in four (4) well-defined phases that range from the identification of the type of process and its mathematical modeling, in order to design the PID regulator that best adjusted to the order of the process and finally to be able to validate it. . The research results evidenced the procedures for tuning regulators by the methods of Ziegler and Nichols, Pole Assignment, as well as optimal regulators by Cohen Coon, Smith and López, among other optimal criteria that provided a reliable mathematical algorithm in tuning. effectiveness of a classic PID regulator in continuous time.

Keywords: PID, Mathematical algorithm, Classical regulators.

Introducción

Según Leguizamón (2010) el Control Automático (C.A.) tiene por finalidad lograr que la saudade de un sistema a controlar, tenga un determinado comportamiento, y que dicho comportamiento se mantenga en el tiempo, aun cuando sobre el sistema actúen perturbaciones que tiendan a apartarlo de él. Este objetivo se logra, por lo general, mediante el empleo de realimentación; por eso, se puede decir también que el C.A. es la ciencia que estudia el comportamiento de los sistemas realimentados.

Cabe hacer aquí algunas aclaraciones sobre los términos utilizados. En primer lugar, se llama según autores como Ogata (2010) y Corripio (2004), se define sistema a un conjunto de elementos o partes que trabajan en forma conjunta para realizar una tarea o lograr un resultado determinado. Este concepto es amplio y es muy utilizado en el área de C.A., y puede tratarse por ejemplo de una simple máquina eléctrica, de un conjunto de máquinas, o un sistema eléctrico de potencia interconectado. Sistema de control realimentado es aquel que posee los medios para medir el resultado de una determinada acción de control, compararlo con el resultado deseado y utilizar la posible discrepancia o error que resulte de esa comparación para corregir la acción de control y así reducir ese error al mínimo.

De ahí el nombre de realimentación, ya que se introduce en la entrada del sistema a controlar una acción de control que depende de la información del resultado que se tiene a la salida. Estos sistemas son llamados también sistemas de lazo cerrado, en contraposición a los sistemas que no son realimentados y que se denominan de lazo abierto. Estas denominaciones provienen de la configuración topológica de los sistemas (Ogata, 2010).

A partir de estos planteamientos las industrias venezolanas, dentro de las cuales figuran la termoeléctrica, la petroquímica, la petrolera, textil, metalmech nica, entre otras, necesitan una materia prima renovable o no renovable para garantizar su óptimo funcionamiento y generar un producto final acorde a las especificaciones de la población, que pasa a ser cliente directo de estas grandes compa n as.



En ese sentido, en la actualidad, las plantas en Venezuela presentan sistemas de instrumentación con tecnología de punta, la cual está soportada por controladores modernos que tienen abertura a diversas estrategias de control, bajo diversos protocolos y arquitecturas de comunicación y programación respectivamente Leguizamón, L (2010). Esta planta en uso presenta inconvenientes con ciertas estrategias de control, las cuales están siendo piloteadas en campo a través de lazos de pruebas. Esto es causado por la elección aproximada de modelos de arquitectura de control incorrectos, en función del tipo de variable seleccionada para su estudio. Esto ha provocado que los actuales reguladores sufran en su estructura dinámica, al reproducir lazos de control con márgenes que superan los 6% de error (1% error demás que enuncia la norma ISA 51.1).

Bajo el mismo orden de ideas, un regulador proporcional, integral y derivativo comúnmente llamado PID, es un mecanismo de control genérico y para procesos cuyas dinámicas suelen representarse linealmente sobre una realimentación de bucle cerrado, ampliamente usado en la industria para el control de sistemas. El PID es un sistema al que le entra un error calculado a partir de la salida deseada menos la salida obtenida y su salida es utilizada como entrada en el sistema que queremos controlar. El controlador intenta minimizar el error ajustando la entrada del sistema (Astrom, 2000)

El controlador PID viene determinado por tres parámetros: el proporcional, el integral y el derivativo. Dependiendo de la modalidad del controlador alguno de estos valores puede ser 0, por ejemplo un controlador Proporcional tendrá el integral y el derivativo a 0 y un controlador PI solo el derivativo será 0, entre otros. Cada uno de estos parámetros influye en mayor medida sobre alguna característica de la salida (tiempo de establecimiento, sobre oscilación) pero también influye sobre las demás, por lo que por mucho que se ajuste no se encontraría un PID que redujera el tiempo de establecimiento a 0, la sobre oscilación a 0, el error a 0,... sino que se trata más de ajustarlo a un término medio cumpliendo las especificaciones requeridas. y Sánchez (2010).

Por lo cual, el control PID es suficiente para procesos donde la dinámica dominante es de segundo orden. Para estos procesos no existe mayor beneficio con el uso de un controlador más sofisticado. Un caso t pico de la acción derivativa, introducida para mejorar la respuesta, es cuando la dinámica del proceso está caracterizada por constantes de tiempo que difieren en magnitud. La acción derivativa puede dar buenos resultados para aumentar la velocidad de respuesta. El control de temperatura es un caso t pico. La acción derivativa es también beneficiosa cuando se requiere un control más fino para un sistema de alto orden. La dinámica de alto orden limitaría la cantidad de ganancia proporcional para un buen control. Con la acción derivativa, se mejora el amortiguamiento ya que se puede utilizar una ganancia proporcional más alta y elevar la velocidad de la respuesta transitoria.

Objetivo general

Establecer una metodología para la sintonización de controladores PID Industriales



Objetivos específicos

1. Identificar el modelo matemático de procesos industriales.
2. Diseñar reguladores PID para los procesos Industriales de diferentes órdenes.
3. Validar el diseño de los reguladores PID diseñados.

Metodología de la investigación

Según Arias (2012) la investigación documental “es un proceso basado en la búsqueda, recuperación, análisis, crítica e interpretación de datos secundarios, es decir, los obtenidos y registrados por otros investigadores en fuentes documentales: impresas, audiovisuales o electrónicas” (p. 25). Para llevar a cabo de manera satisfactoria la investigación se requiere la definición de los requerimientos por medio de una documentación documental, que permite darle soporte y mayor veracidad al estudio realizado y obtener nuevos conocimientos para el análisis del mismo”. En función del concepto manejado por el anterior autor, la presente investigación se considerara como bibliográfica, ya que se dio origen a la caracterización de modelos matemáticos a través de la revisión documental en procesos industriales que se generan en las grandes compañías privadas y públicas del estado Venezolano.

Por otra parte, la investigación no experimental es aquella que se realiza sin manipular deliberadamente las variables. Es decir, donde no se hacen variar intencionalmente las variables independientes. Por el contrario, la investigación no experimental se limita a observar los fenómenos tal y como se dan en su contexto natural, para después analizarlos.

Como señala Kerlinger (1979) “la investigación no experimental o ex-post-facto es cualquier investigación en la que resulta imposible manipular variables o asignar aleatoriamente a los sujetos o a las condiciones” (p. 116). De hecho, no hay condiciones o estímulos a los cuales se expongan los sujetos del estudio. Los sujetos son observados en su ambiente natural, en su realidad. De allí que, esta investigación tenga características no experimentales, ya que no se manipularan variables deliberadamente en la planta, por lo que solo se recolectaran datos para la identificación de modelos matemáticos y su procesamiento a través de software especializados en el diseño de reguladores PID y revistas o documentos consagrado con teorías para tal fin respectivamente.

Resultados de la investigación

En este apartado se mostraran los resultados de la investigación, describiendo los procedimientos a través del análisis de los objetivos específicos descritos anteriormente adaptados como fases de la investigación, esto es debido a que el área de desarrollo como tal no presenta una metodología que se ajuste a los criterios de desarrollo que propondrá el investigador para desarrollar la metodología a proponer. Adicional a esto cada fase tendrá un análisis respectivo de los

resultados para enfocar un resumen a través de las conclusiones y recomendaciones de este trabajo.

Identificación de modelos matemáticos en procesos industriales

Para la identificación de modelos matemáticos en procesos industriales, es necesario establecer a través de una matriz los tipos de procesos a estudiar para el diseño de reguladores a partir de métodos consagrados y teóricamente comprobados para controlar eficientemente dichos procesos (Corripio, 2004). A continuación se muestran las siguientes nomenclaturas de procesos industriales:

Cuadro 1

Funciones de transferencia de diversos procesos

Procesos	Funciones de transferencias
Primer Orden	$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1}$
Primer Orden más tiempo muerto	$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_m s}$
Segundo Orden con polos reales	$G_p = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$
Segundo Orden más tiempo muerto con polos reales	$G_p = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} e^{-t_m s}$
Segundo orden con polos complejos	$G_p = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2}$
Segundo orden con tiempo muerto y polos complejos conjugados	$G_p = \frac{K \omega_n^2}{s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2} e^{-t_m s}$
Tercer Orden con polos reales	$G_p = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1)}$
Tercer Orden con polos reales y tiempo muerto	$G_p = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1)} e^{-t_m s}$
Tercer Orden con polos complejos conjugados	$G_p = \frac{K \omega_n^2}{(s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2)(\tau_1 s + 1)}$
Tercer orden con tiempo muerto y complejos conjugados.	$G_p = \frac{K \omega_n^2}{(s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2)(\tau_1 s + 1)} e^{-t_m s}$

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

En función a los modelos descritos, es necesario considerar los modelos paramétricos y matemático de orden superior por reducción de orden de estados a partir de la presencia de tiempos muertos en los sistemas de control. El primer paso es proponer una manera para manejar el término referente al tiempo muerto, Pude ser aproximado de dos maneras diferentes: una aproximación de primer orden empleando series de Taylor alrededor de t_0 , Ec. 1, o una aproximación de Padé de primer orden. En lo presente, la síntesis del SMC usando la aproximación de Taylor es la presentada, ya que la aproximación de Padé resultó en un controlador inestable.

$$e^{-t_0 * s} \approx \frac{1}{1 + t_0 * s} \quad (1)$$

Substituyendo la Ecuación. (1) en la Ecuación (2).

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K * e^{-t_0*s}}{\tau * s + 1} \quad (2)$$

Se obtiene la siguiente expresión mostrada en la ecuación (3):

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{(\tau * s + 1)(t_0 * s + 1)} \quad (3)$$

A partir de esta noción, resultado del uso de la ecuación 1 sustituida en la ecuación 2, se obtendrá que utilizando la ecuación 3 se obtendrán los modelos que sostengan tiempos muertos que serán simplificados por esta relación para su fácil entonamiento a nivel de control. Por lo cual, graficando la eliminación del tiempo muerto frente al mismo, se puede observar la siguiente gráfica mostrada en la figura 1 donde se muestra la respuesta a la aproximación de Pade con Series de Taylor:

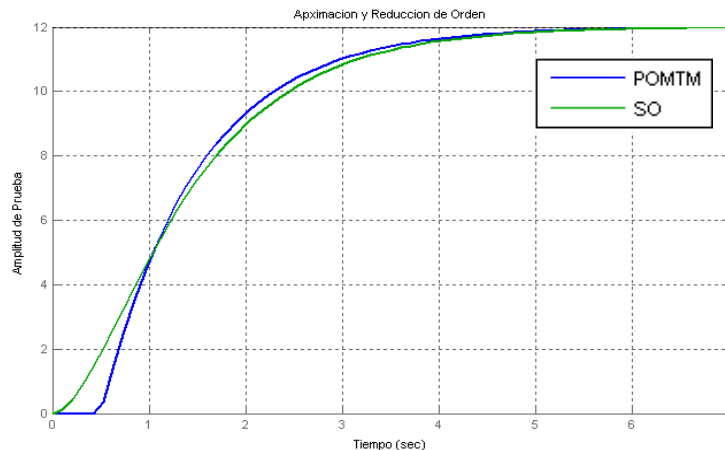


Figura 1. Respuesta a la Aproximación de Pade con series de Taylor
Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

A partir de estas relaciones, se presentan a través del cuadro 2, los modelos matemáticos obedeciendo a diversos procesos industriales en las diversas compañías venezolanas tomando como referencia las ecuaciones anteriormente mencionadas y en aras de buscar las mejores metodologías de sintonización de controladores PID para estos procesos dinámicos respectivamente.

Cuadro 2
Modelos matemáticos de procesos Industriales

Proceso/Sistema/Equipo	Modelo Matemático
Modelo matemático térmico de un cubículo de Maestría, Bloque E, URBE	$G(s) = \frac{75}{338.46s + 1}$
Flujo en una tubería de extracción de agua proveniente de un condensador evaporativo de una planta termoeléctrica	$G(s) = \frac{606.85s + 1.7356}{358.50s^2 + 237.8867s + 1}$
Presión de descarga en un compresor centrífugo de aire de instrumento.	$G(s) = \frac{-0.0052s^3 + 0.015s^2 - 0.018s + 0.16}{s^3 + 2.975s^2 + 1.491s + 0.14}$
Modelo matemático del nivel en el domo de una caldera piro-tubular de una planta termoeléctrica.	$G(s) = \frac{2.55}{s + 3.5} e^{-1.5s}$
Modelo matemático de un motor de arranque de un compresor axial	$G(s) = \frac{100.38}{s^3 + 32.133s^2 + 275.32s + 658.987}$

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

Una vez identificado paramétricamente los modelos matemáticos a los cuales se les aplicaran los métodos de sintonización PID. La divergencia entre los modelos entre los cuales se denotan, procesos de primer, segundo y tercer orden respectivamente. Cabe resaltar que los modelos con tiempos muertos se les aplicaran la aproximación de Pade-Taylor para poder trabajar mejor los tiempos y los parámetros dinámicamente en el controlador a manera de implantación.

Diseño reguladores PID para los procesos Industriales de diferentes órdenes

A partir de los modelos matemáticos anteriormente obtenidos y mostrados en el cuadro 2, se pretende diseñar un regulador para cada evento dinámico propuesto. Motivo por el cual, se presenta a continuación en el cuadro 3, los métodos de sintonización para un control proporcional, integral y derivativo (PID) a utilizar en función del modelo matemático obtenido y su respuesta ante señales de excitación permanente respectivamente.

Cuadro 3
Métodos de sintonización PID

Método de sintonización PID	Modelo Matemático
Asignación de Polos (PI)	Primer Orden Sin tiempo Muerto
Síntesis directa (PID)	Segundo orden Sin tiempo Muerto

Ziegler y Nichols (Primer Método)	Tercer Orden sin tiempo Muerto
Asignación de Polos (PID)	Primer Orden con tiempo Muerto
Ziegler y Nichols (Segundo Método)	Tercer Orden sin tiempo Muerto

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

a) Modelo matemático térmico de un cubículo de Maestría, Bloque E, URBE

Para este sistema, el modelo matemático es el siguiente:

$$G(s) = \frac{75}{338.46s + 1}$$

Partiendo de este principio, se procederá a la aplicación del método de asignación de polos para el diseño de un regulador proporcional integral (PI), capaz de controlar el ambiente de refrigeración de un cubículo de maestría en la Universidad Privada Dr. Rafael Beloso Chacín, como caso de muestra se tiene que para este tipo de procesos lo cual se muestra a través de la ecuación 4 la cual se presenta a continuación:

$$G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (4)$$

La función de transferencia de lazo cerrado del sistema control térmico está dada por la expresión que resulta en la ecuación 5:

$$M_y(s) = \frac{T_s(s)}{T_e(s)} = \frac{K_c K_{proc} (T_i s + 1)}{T_i \tau s^2 + T_i (1 + K_c K_{proc}) s + K_c K_{proc}} \quad (5)$$

Siendo el polinomio característico del sistema de control el mostrado en la ecuación 6:

$$p(s) = s^2 + \left(\frac{1 + K_c K_{proc}}{\tau} \right) s + \frac{K_c K_{proc}}{T_i \tau} \quad (6)$$

Si se desea que este sea de la forma general, entonces se tiene en la ecuación 7:

$$p(s) = s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2 \quad (7)$$

De manera que los polos de lazo cerrado se encuentran mostrados en la ecuación 8 y 9 descritas a continuación:

$$K_c = \frac{2\xi\omega_n\tau - 1}{K_{proc}} \quad (8)$$

$$T_i = \frac{2\xi\omega_n\tau - 1}{\omega_n^2\tau} \quad (9)$$

Partiendo de esto, se pueden dictar diversos parámetros para el establecimiento de una función de salida acorde a la variabilidad de la entrada (Set Point), por lo cual a partir de la siguiente tabla realizada en función de calcular los parámetros PI para el método de asignación de polos, se eligen los valores para complementar y sustituir en las ecuaciones 8 y 9 respectivamente.

Cuadro 4

Parámetros PI para el método de Asignación de Polos

Caso	Parámetros dinámicos	Valor	K_c	T_i
1	τ	338.46	0	0.0000071266
	K_{proc}	75		
	ω_n	0.0014		
	ξ	1		
2	τ	338.46	0.0063	0.000063212
	K_{proc}	75		
	ω_n	0.0038		
	ξ	0.56		
3	τ	338.46	0.0752	0.0012
	K_{proc}	75		
	ω_n	0.0217		
	ξ	0.45		

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

A partir de los ensayos realizados con los diversos PI para el proceso de regulación térmica, se presenta a continuación una simulación del funcionamiento y entonación de diversos reguladores PI por el método de asignación de polos en una función de transferencia de primer orden. Los resultados se dan para un 100% de los datos lo que representa un escalón en excitación de 1 respectivamente.

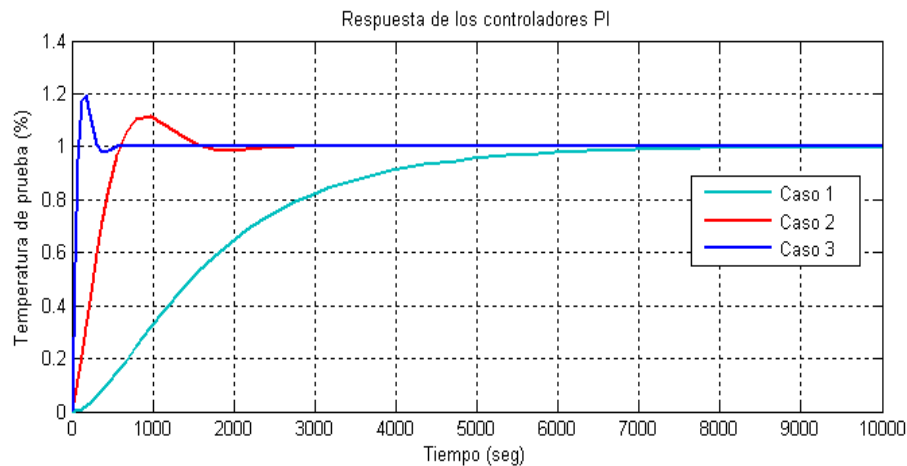


Figura 2. Respuesta PI del proceso de regulación térmica en un cubículo de Maestría de la URBE
Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

Observando la respuesta, se puede decir que la misma es estable dándose 3 casos con diversos factores de amortiguamiento en función de la acción integral, lo cual arroja como resultado un caso número 1, el cual se pre seleccionara como el adecuado en función de los tiempos de respuesta, la acción de control y su tiempo de estabilización ante variaciones en la entrada (Set Point Tracking).

b) Flujo en una tubería de extracción de agua proveniente de un condensador evaporativo de una planta termoeléctrica

Para este sistema, el modelo matemático es el siguiente:

$$G(s) = \frac{606.85s + 1.7356}{358.50s^2 + 237.8867s + 1}$$

Para el caso de una tubería de extracción de agua proveniente de un condensador evaporativo de una planta termoeléctrica, se utilizara el método de Síntesis directa, con la finalidad de conseguir un controlador preciso a partir de un modelo en lazo cerrado de referencia. A continuación se detalla el comportamiento del lazo de control deseado para el esclavo a través de la ecuación del modelo matemático mostrado. A partir de la función de transferencia para el caso a analizar, se excita a través de una entrada escalón como lazo cerrado para comprobar su estabilidad y respuesta en estado estacionario respectivamente, lo cual se muestra en la figura 3:

$$G(s)_{Deseada} = \frac{s + 2}{s^2 + 250s + 2.45}$$

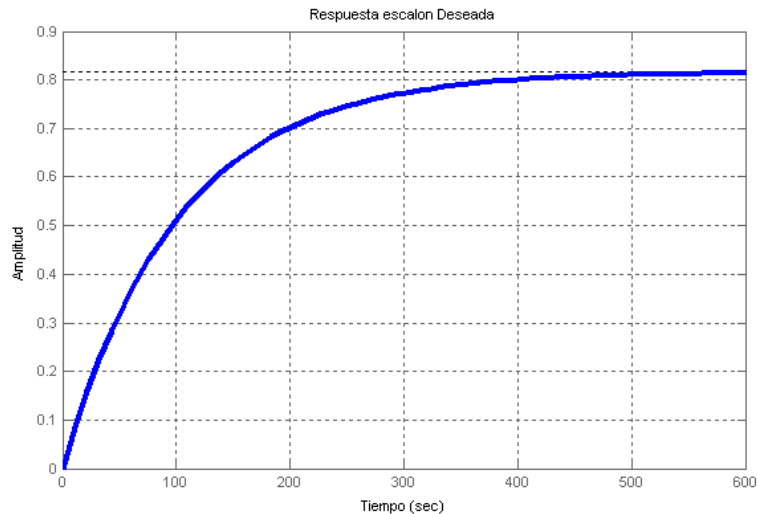


Figura 3. Respuesta Escalón para la función de transferencia de lazo cerrado deseada

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

A partir de la respuesta escalon para la función de transferencia de lazo cerrado; la cual se puede decir que estable en estado estacionario y no contiene sobre paso alguno, se diseña el PI por síntesis directa, tomando en cuenta las ecuaciones 10 y 11 que relatan la función de transferencia en lazo cerrado y la estructura matemática del controlador PID respectivamente, haciendo uso de las mismas, se tiene que:

$$G_{LC}(s) = \frac{G_p(s)C_{PID}(s)}{1 + G_p(s)C_{PID}(s)} \quad (10)$$

$$C_{PID}(s) = K_c \left[1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right] \quad (11)$$

Sustituyendo la ecuación 11 y la función de transferencia del proceso en la ecuación 10

$$G(s)_{Deseada} = \frac{\frac{K_p(T_z s + 1)}{(T_p 1 + 1)(T_p 2 + 1)} * K_p + K_D s + \frac{K_I}{s}}{1 + \left[\frac{K_p(T_z s + 1)}{(T_p 1 + 1)(T_p 2 + 1)} * K_p + K_D s + \frac{K_I}{s} \right]}$$

Aplicando las diversas técnicas matemáticas para la simplificación de la división presentada y agrupando términos, la pasada expresión queda de la siguiente manera:

$$G(s)_{Deseada} = \frac{K_D T_z K_p s^3 + (K_D K_p + K_p T_z K_p) s^2 + (K_p^2 + K_I K_p T_z) s + K_I K_p}{K_D K_p T_z s^3 + (K_p K_D + K_p^2 T_z + T_p 1 T_p 2) s^2 + (K_p T_z K_I + K_p^2 + T_p 1 + T_p 2) s + (1 + K_p K_I)}$$

Asumiendo un PI, entonces la ganancia derivativa sería Nula y sustituyendo la función deseada:

$$G(s)_{Deseada} = \frac{K_D T_z K_p s^3 + (K_D K_p + K_p T_z K_p) s^2 + (K_p^2 + K_I K_p T_z) s + K_I K_p}{K_D K_p T_z s^3 + (K_p K_D + K_p^2 T_z + T_p 1 T_p 2) s^2 + (K_p T_z K_I + K_p^2 + T_p 1 + T_p 2) s + (1 + K_p K_I)}$$

Igualando a la función de transferencia deseada para encontrar los polos deseados y con esto las constantes PI, sería:

$$\frac{s + 2}{s^2 + 250s + 2.45} = \frac{(K_p T_z K_p) s^2 + (K_p^2 + K_I K_p T_z) s + K_I K_p}{(K_p^2 T_z + T_p 1 T_p 2) s^2 + (K_p T_z K_I + K_p^2 + T_p 1 + T_p 2) s + (1 + K_p K_I)}$$

Cuadro 5

Parámetros PI para el método de Asignación de Polos

Controlador	Método	Parámetros
Proporcional (Kp)		0.67
Proporcional+Integral (Ti)		2.12 Seg

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

A partir de los ensayos realizados con los diversos PI para el proceso de regulación de flujo de extracción en un condensador evaporativo, se presenta a continuación una simulación del funcionamiento con entonación del controlador por el método de síntesis directa en una función de transferencia de primer orden. Los resultados se dan para un 100% de los datos lo que representa un escalón en excitación de 1 respectivamente

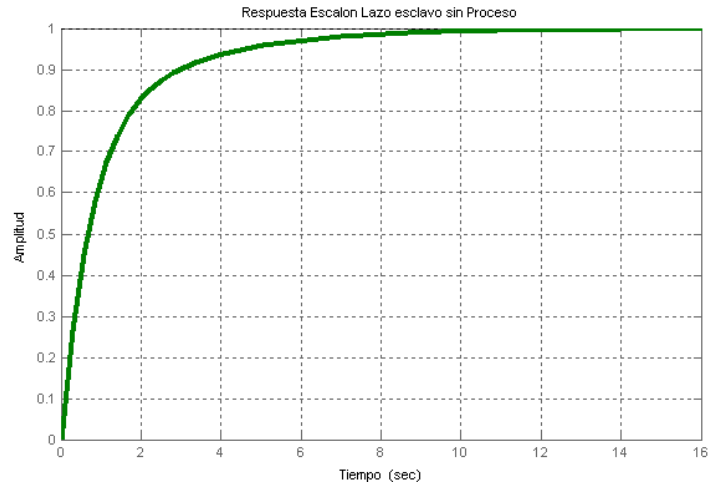


Figura 4. Respuesta PI del proceso de regulación de flujo de extracción en un condensador evaporativo
Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

Observando la respuesta, se puede decir que la misma es estable dándose 3 casos con diversos factores de amortiguamiento en función de la acción integral, lo cual arrojo como resultado un caso número 1, el cual se pre seleccionara como el adecuado en función de los tiempos de respuesta, la acción de control y su tiempo de estabilización ante variaciones en la entrada (Set Point Tracking)

c) Presión de descarga en un compresor centrifugo de aire de instrumento

Para la descarga en el cabezal del compresor de la presión de salida que va dirigida hacia los instrumentos neumáticos u convertidores I/p, se ha registrado la siguiente función de transferencia, a su vez, a partir del comportamiento en lazo abierto de la planta, es necesaria la aplicación del método de Ziegler y Nichols por curva de reacción donde los parámetros localizados son a partir de la curva de respuesta que se muestra en la gráfica de la figura 5:

$$G(s) = \frac{0.16}{s^3 + 2.975s^2 + 1.491s + 0.14}$$

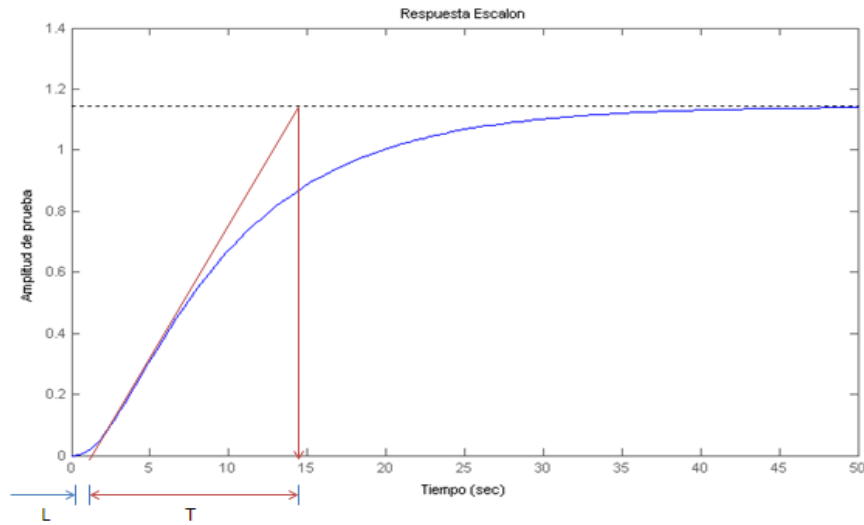


Figura 5. Respuesta de lazo abierto para la aplicación del primer método de Ziegler y Nichols
Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

En función a la curva se tiene la aplicación del método de Ziegler y Nichols:

$$K_c = 1.2t/L \quad T_i = 2L \quad T_d = 0.5L \quad (12)$$

Cuadro 6
Parámetros del PID

Controlador	Parámetros
Proporcional (Kp)	16.2
Proporcional+Integral	2 Seg
Proporcional+Integral+Derivativo	0.5 Seg
Proporcional (Kp)	5.644673
Proporcional+Integral	0.513288
Proporcional+Integral+Derivativo	5.535221

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

A partir del cumplimiento de las reglas de Ziegler y Nichols para el proceso de regulación de presión de salida en un compresor de aire, se presenta a continuación una simulación del funcionamiento con entonación del controlador por el método de curva de reacción en una función de transferencia de tercer orden. Los resultados

se dan para un 100% de los datos lo que representa un escalón en excitación de 1 respectivamente

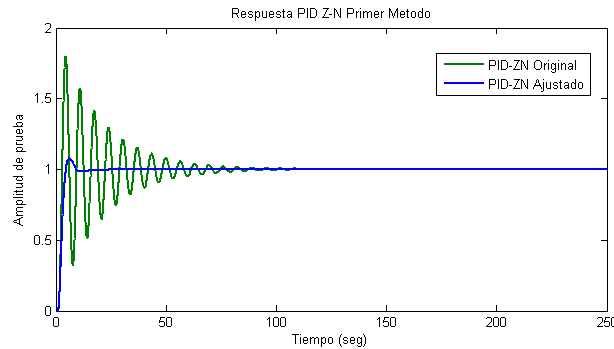


Figura 6. Respuesta PID del proceso de regulación de presión de salida en un compresor centrífugo
Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

Observando la respuesta, se puede decir que la misma es estable pero con una gran cantidad de sobre pasos en su respuesta transitoria. Para esto se ajustó el regulador a partir de reglas heurísticas para recalculer los valores proporcionales, integrales y derivativos en un caso número 2, el cual se seleccionó como el adecuado en función de los tiempos de respuesta, la acción de control y su tiempo de estabilización ante variaciones en la entrada (Set Point Tracking)

d) Modelo matemático del nivel en el domo de una caldera piro tubular de una planta termoeléctrica

$$G(s) = \frac{0.6993}{s + 0.013} e^{-0.1s}$$

Partiendo de este principio y bajo la aplicación del método de asignación de polos para el diseño de un regulador PID capaz de controlar el nivel en domo de una caldera piro tubular de una central termoeléctrica, es necesario cumplir con la siguiente estructura de segundo orden partiendo de la aplicación del método de asignación de polos de segundo orden, se muestra a continuación la ecuación 13 y 14:

$$G_p(s) = \frac{K_p}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)} = \frac{K_p}{(\tau_1 s + 1)(\alpha \tau s + 1)} \quad (13)$$

Donde $\tau_1 > \tau_2$, $\tau = \tau_1$ y $\alpha = \tau_2/\tau_1$ se controla con un PID que tiene la siguiente estructura 21 y a partir de la misma, el polinomio característico del sistema de control sería:

$$p(s) = s^3 + \left(\frac{\tau_1 + \tau_2 + K_c K_p T_d}{\tau_1 \tau_2} \right) s^2 + \left(\frac{1 + K_c K_p}{\tau_1 \tau_2} \right) s + \frac{K_c K_p}{\tau_1 \tau_2 T_i} \quad (14)$$

Si se desea la forma general:

$$p(s) = (s + \alpha \omega_n)(s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2) \quad (15)$$

De manera que los polos de lazo cerrado se encuentren localizados en:

$$\lambda_{1,2} = -\xi \omega_n \pm j \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (16)$$

$$\lambda_3 = -\alpha \omega_n \quad (17)$$

Igualando las ecuaciones 14 y 15 respectivamente, se obtiene que los parámetros requeridos del controlador serán los mostrados en las ecuaciones 18, 19 y 20:

$$K_c = \frac{\tau_1 \tau_2 \omega_n^2 (1 + 2\alpha\xi) - 1}{K_p} \quad (18)$$

$$T_i = \frac{\tau_1 \tau_2 \omega_n^2 (1 + 2\alpha\xi) - 1}{\tau_1 \tau_2 \alpha \omega_n^3} \quad (19)$$

$$T_d = \frac{\tau_1 \tau_2 \omega_n (\alpha + 2\xi) - \tau_1 - \tau_2}{\tau_1 \tau_2 \omega_n^2 (1 + 2\alpha\xi) - 1} \quad (20)$$

A partir de los fundamentos dados por la ecuación 3, se tiene que la nueva función de transferencia bajo la aplicación de la aproximación de Pade será:

$$G(s) = \frac{2.55}{(s + 3.5)(s + 1.5)} = \frac{2.55}{s^2 + 5s + 5.25}$$

Con:

$$\omega_n = 2.2912 \text{ rad/s}$$

$$\xi = 1.0911 \quad \alpha = 0.4285$$

Partiendo de esto, se pueden dictar diversos parámetros para el establecimiento de una función de salida acorde a la variabilidad de la entrada (Set Point), por lo cual a partir de la tabla referida, se eligen los parámetros para complementar y sustituir en las ecuaciones 18, 19 y 20 respectivamente y se obtienen los parámetros PID para el método de asignación de polos que se muestra en el cuadro 7.

Cuadro 7

Parámetros PID para el método de Asignación de Polos

Caso	K_c	T_i	T_d
1	20.2899	1.9539	0.507514
2	6.4877	7.4317	0.3048

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

A su vez, partiendo de la tabla anterior la respuesta bajo la aplicación de señales de simulación, se muestra la gráfica referida a la Respuesta PID del nivel en el domo de la caldera pirotubular de una planta termoeléctrica en la figura 7, observando la respuesta, se puede decir que la misma es estable dándose 3 casos con diversos factores de amortiguamiento en función de la acción integral, lo cual arroja como resultado un caso de ajuste del método con la finalidad de mejorar el amortiguamiento en función de una respuesta más lenta pero no sobre pasando los límites de sobre escalón

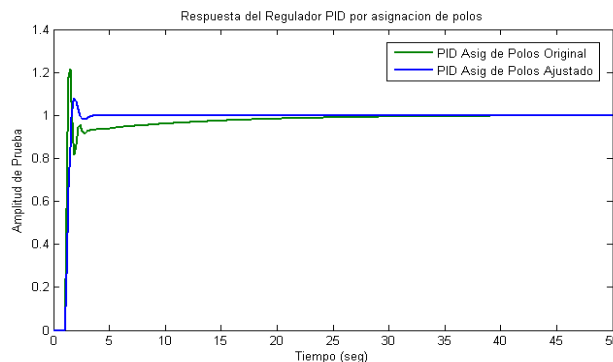


Figura 7. Respuesta PID del nivel en el domo de una caldera pirotubular de una planta termoeléctrica.

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

e) Modelo matemático de un motor de arranque de un compresor axial

$$G(s) = \frac{100.38}{s^3 + 32.133s^2 + 275.32s + 658.987}$$

Partiendo de la función de transferencia anterior, es necesario su grafica escalón tomando en consideración que por ser un orden superior y de no tener algún polo en el origen, se aplicara para esta ocasión el Segundo Método de Ziegler & Nichols o el método de Curva de oscilaciones para lo cual a continuación se presenta la siguiente figura con el periodo y ganancia crítica respectivamente:

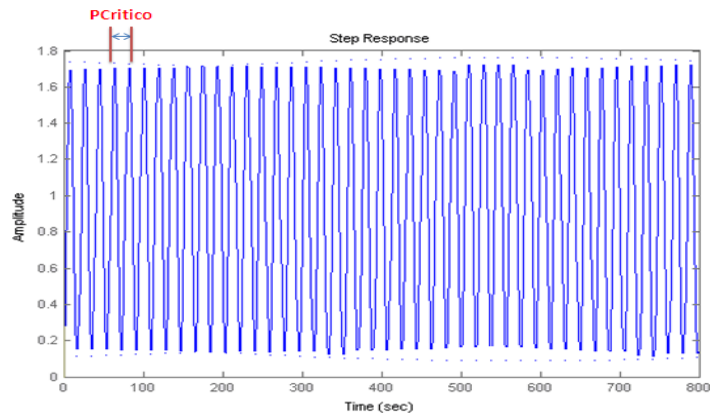


Figura 8. Respuesta PID del arranque de un motor en un compresor axial

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

Partiendo de la curva anterior se tiene que por la aplicación del criterio de routh en lazo cerrado la ganancia crítica fue de:

$$K_{cr} = 81.63$$

A partir de esta ganancia, y tomando en cuenta los polos imaginarios, se tiene que la frecuencia crítica es:

$$\omega_{cr} = 16.59 \text{ rad/s}$$

Utilizando la siguiente expresión:

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{\omega_{cr}} \quad (21)$$

S tiene que:

$$P_{cr} = 0.37 \text{ seg}$$

Sustituyendo en las ecuaciones a continuación respectivamente:

$$K_p = 0.5K_{cr} \quad T_i = 0.5P_{cr} \quad T_d = 0.125P_{cr} \quad (22)$$

Sustituyendo en la expresión 22 con los resultados obtenidos se tienen los parámetros PID para el segundo método de Ziegler y Nichols que se muestran a través del cuadro 8, a partir del cumplimiento de las reglas de Ziegler y Nichols para el proceso de regulación del arranque de un motor que es acoplado a un compresor axial, se presenta a continuación en la figura 9, una simulación del funcionamiento con entonación del controlador. Los resultados se dan para un 100% de los datos lo que representa un escalón en excitación de 1 respectivamente

Cuadro 8
Parámetros PID para el segundo método de Ziegler y Nichols

Caso	K_c	T_i	T_d
1	40.815	0.185	0.04625
2	6.51146	21.958	-0.0170

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

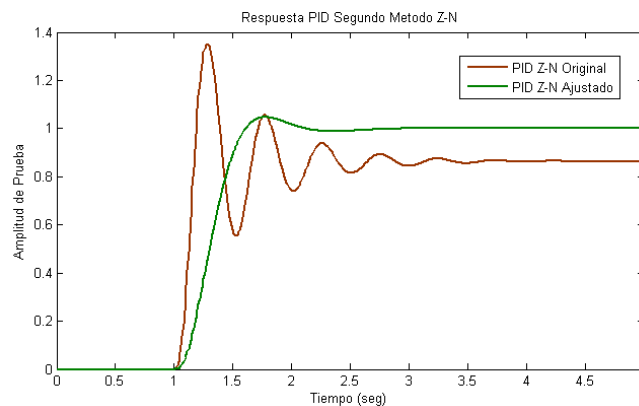


Figura 9. Respuesta PID del arranque de un motor que se acopla a un compresor axial

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

Observando la respuesta, se puede decir que la misma es estable dándose 2 casos con diversos factores de amortiguamiento en función de la acción integral, lo cual arrojo como resultado un caso número 2 (ajustado), el cual se pre seleccionara como el adecuado en función de los tiempos de respuesta, la acción de control y su tiempo de estabilización ante variaciones en la entrada (Set Point Tracking)

Validación del diseño de los reguladores PID diseñados

Partiendo del diseño de los reguladores anteriormente ensayados, fue necesario validar el sistema a través de simuladores en tiempo real, donde se observaron los fenómenos de las variables proporcional, integral y derivativo bajo la acción de tiempos de muestreo en el espacio discreto respectivamente. Para ello se utilizó un software comercial de sistemas de modelado y control de procesos llamado LabVIEW® en el cual se plasmaron posibles escenarios con las variables en los procesos anteriormente explicados. A continuación, en la figura 10, se muestra el HMI diseñado.

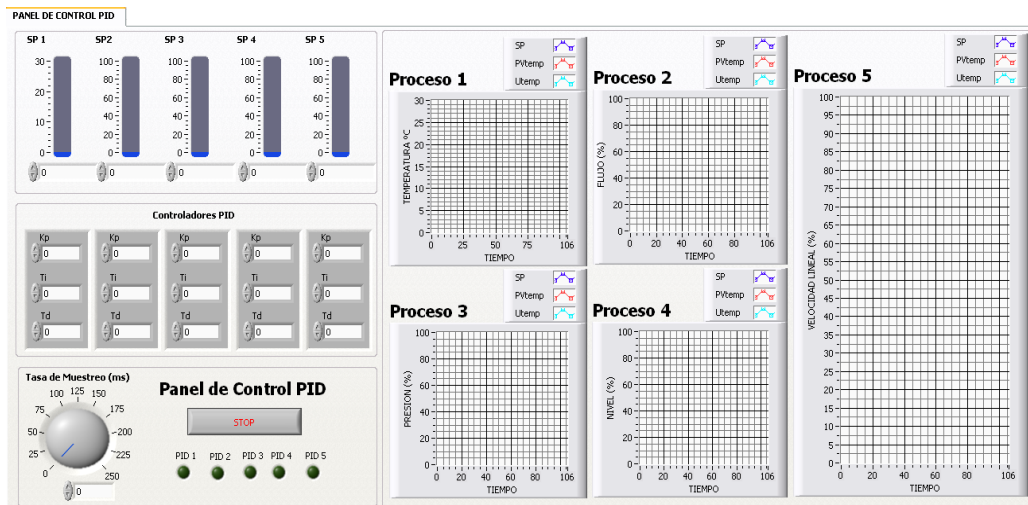


Figura 10. Interfaz hombre-máquina (HMI)

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

En función de la pantalla de usuario diseñada también conocida como interfaz gráfica, se puede comentar que existen ciertos indicadores, gráficos, tasas de muestreo y luces indicadoras las cuales reflejan la operatividad de los controles diseñados. En la figura 11 se presenta el código de programación para los reguladores diseñados, utilizado en la ventana de comandos de LabVIEW® por lo cual se tiene:

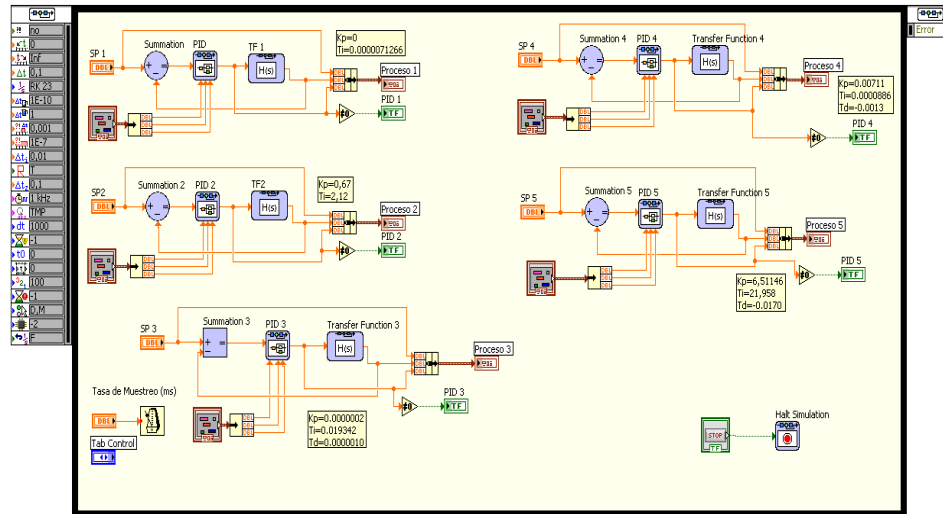


Figura 11. Código de programación
Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

El código que se mostró anteriormente se enmarcó en un lenguaje de programación gráfico (Comúnmente llamado Código G), por lo que este posee versatilidad al momento de la escritura o lectura de datos en tiempo real, lo que tiene como consecuencias, que el proceso sea dinámicamente manejable por cualquier personal experto en el área. Partiendo de esta premisa, y en aras de representar el sistema de control PID bajo diversos esquemas metodológicos de sintonización y con premisas industriales, se muestra la respuesta en tiempo real para los procesos identificados y modelados anteriormente

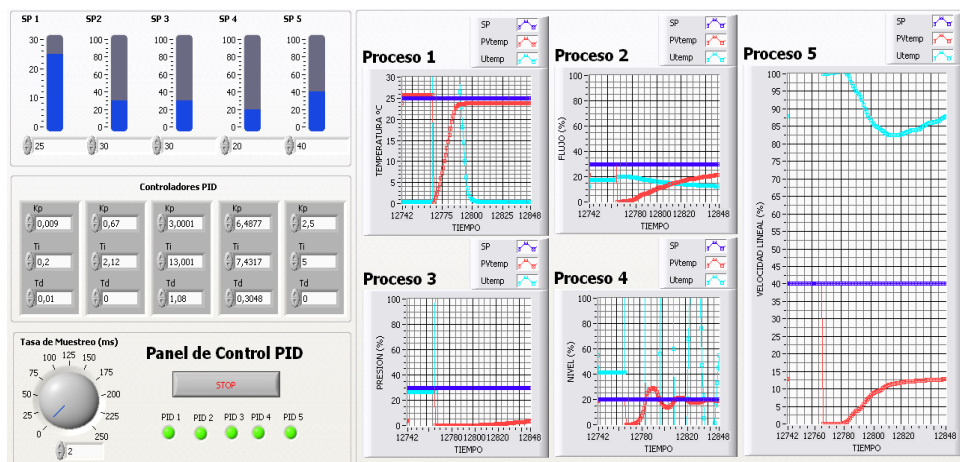


Figura 12. Respuesta en tiempo real de los reguladores diseñados
Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

Partiendo de la figura anterior se puede decir que los controles diseñados sufrieron un cambio en sus parámetros los cuales fueron previamente sintonizados



por lo que, bajo ámbitos industriales, estos a partir de una base suelen ser alterados heurísticamente. Estas alteraciones hicieron que los sistemas descritos fueran estables en el tiempo y robustos ante perturbaciones. A continuación se presenta la característica de los sistemas.

Cuadro 9
Comparación en la respuesta de los controladores diseñados

Parámetros	PID ₁	PID ₂	PID ₃	PID ₄	PID ₅
Tiempo de Estabilización	5seg	55 seg	60 seg	80 seg	250 seg
Máximo sobre paso	0%	0%	0%	12%	0%

Fuente: Martínez y Rosillón (2016)

Conclusión de resultados

En función de los resultados obtenidos, se puede decir que el regulador PID funciona bastante bien para los procesos ensayados, por lo cual se obtuvieron tiempos de respuestas bastantes acertados por lo cual se tuvo problemas al momento de simular en tiempo real el PID₄ correspondiendo al nivel del tanque debido a la conversión de Pade realizada; sin embargo, se logró un control efectivo a partir de la referencia propuesta.

Referencias Bibliográficas

- Astrom, K (2000) *Control de procesos por computadora*. México. Editorial Prentice Hall.
- Arias (2012). *El proyecto de la Investigación*. 3era. Edición. Caracas, Venezuela. Editorial Episteme.
- Bishop, D (2014). *Control moderno de procesos*. México. Editorial Prentice Hall.
- Corripio, S (2004). *Control de procesos*. México. Editorial Prentice Hall.
- Kerlinger (1979). *La Investigación del Comportamiento*. México. Editorial Interamericana.
- Leguizamón, L (2010) *La teoría del control automático aplicada al área de ingeniería eléctrica*. Recuperado: <https://core.ac.uk/download/pdf/268219414.pdf>
- Ogata, K (2010) . *Ingeniería de control Moderna*. México: Editorial Mw Graw Hill.



UNIVERSIDAD
Rafael Beloso Chacín



Revista Electrónica de
Estudios Telemáticos

TÉLÉMATIQUE

Sánchez, A (2010) *Procesos Industriales, Instrumentación y control*. México.
Editorial Panapo.