

Métodos de sintonía de controlador PID para un motor K90-T2

PID controller tuning methods for a K90-T2 motor

Randy Pérez Rivera

Industrial Biotecnológico CIGB-MARIEL S.A., Cuba. randypr9906@gmail.com



PARA CITAR ESTE ARTÍCULO

Pérez Rivera, R. (2023) El Métodos de sintonía de controlador PID para un motor K90-T2. *Alternativas*, 24(1).

DOI

<https://doi.org/10.23878/alternativas.v24i1.419>

CORRESPONDENCIA

randypr9906@gmail.com



UNIVERSIDAD CATÓLICA
DE SANTIAGO DE GUAYAQUIL

Av. Carlos Julio Arosemena, Km 1,5. Guayaquil, Ecuador
Teléfono: +593 4 380 4600
Correo electrónico: revista.alternativas@cu.ucsg.edu.ec
Web: www.ucsg.edu.ec



© The Autor(s), 2023

This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. To view a copy of this license visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

Métodos de sintonía de controlador PID para un motor K90-T2

PID controller tuning methods for a K90-T2 motor

Randy Pérez Rivera

Industrial Biotecnológico CIGB-MARIEL S.A., Cuba. randypr9906@gmail.com

RESUMEN

El presente artículo aborda diferentes métodos de sintonía y autosintonía de controladores PID. Este análisis se realiza mediante la formalización y simulación de cada uno de los métodos de cada fabricante, que van desde métodos tan antiguos como el de Ziegler-Nichols hasta métodos propios de cada uno de los fabricantes. Se realiza la simulación de estos métodos utilizando el asistente matemático Matlab® con dos sistemas de segundo orden obtenidos a partir de señales pseudo-aleatoria multinivel. Como resultado fundamental, se presentan las variadas respuestas que se obtuvieron en la simulación, destacando la buena estabilidad presentada en las respuestas por métodos como el de Aström-Hagglünd.

PALABRAS CLAVE

Controlador PID, métodos de sintonía.

ABSTRACT

This article deals with different methods of tuning and self-tuning of PID controllers. This analysis is carried out through the very specific formalization and simulation of each one of the methods of each manufacturer, ranging from methods as old as Ziegler-Nichols to methods specific to each of the manufacturers. The simulation of these methods is carried out using the Matlab® mathematical assistant with two second order systems obtained from multilevel pseudo-random signals. As a fundamental result, the varied responses obtained in the simulation are presented, highlighting the good stability presented in the responses by methods such as the Aström-Hagglünd method.

KEYWORDS

PID controller, tuning methods.

Introducción

El desarrollo a nivel industrial cada día es mayor. La capacidad que tienen los equipos para realizar tareas con una alta complejidad y eficiencia, y la capacidad del ingeniero de hacer uso de ellas es superior cada día. El sector industrial está en constante innovación, generando una creciente complejidad en las problemáticas y en los procesos, buscando siempre estar lo más cerca de la perfección (Alfaro, 2003).

Un controlador PID (controlador Proporcional, Integral y Derivativo) es un elemento fundamental en el lazo de control, debido a que es el módulo encargado de tomar las decisiones. El controlador PID calcula la diferencia entre la variable real y la variable deseada o de referencia (Zayas, Pardo, Jove, Casteleiro & Calvo, 2020). El algoritmo del control PID consta de tres parámetros distintos: el proporcional, el integral, y el derivativo. El valor proporcional depende del error actual, el integral depende de los errores pasados y el derivativo es una predicción de los errores futuros. La suma de estas tres acciones es usada para ajustar el proceso por medio de un elemento de control. Hay una gran variedad de herramientas para ajustar controladores. La efectividad de cada una de estas herramientas de ajuste depende de la aplicación y de los resultados que se quieran. Es una etapa clave para lograr el comportamiento deseado del sistema en general (Henriquez & Martínez, 2019).

La sintonización del controlador PID consiste en la determinación del ajuste de sus parámetros para lograr un comportamiento del sistema de control aceptable y robusto, de conformidad con criterios de desempeño establecidos (González & Moreno, 2017). La sintonización del controlador basado en prueba y error no es altamente recomendada, pues provoca pérdida de recursos y operaciones límites de instrumentos que pueden ocasionar su ruptura, por lo que muchas empresas destinan sus recursos a realizar programas que proporcionen al ingeniero propuestas de sintonización y la capacidad de evaluar el desempeño del controlador desde muchas perspectivas sin necesidad de interactuar con el proceso en la realidad (González & Fernández, 2022).

Para poder realizar la sintonización de controladores, suele primero identificarse la dinámica del proceso, y a partir de esta determinar los parámetros del controlador utilizando el método de sintonización seleccionado (Miguel, Romero & Sanchis, 2020). La obtención de la información dinámica del proceso requiere que este sea excitado de alguna forma y que tanto la

entrada aplicada como la respuesta de proceso sean registradas (O'Dwyer, 2009). Es importante destacar el papel que juega la correcta sintonía de los controladores en la operación de los procesos industriales y el impacto que tiene el estudio y conocimiento de las distintas reglas de sintonía, pues en la actualidad los controladores potencian la facilidad de autosintonizarse (*autotuning*) (Jahanshahi, Sivalingam & Schofield, 2015).

Debido a que la energía eléctrica consumida por el sector industrial representa, en condiciones normales de trabajo, un porcentaje muy significativo de la producción energética de las plantas generadoras del Sistema Eléctrico Nacional, se ha comprobado que aproximadamente el 70 % de la energía eléctrica que se consume en el mundo, es a través de los motores de inducción trifásicos por constituir la fuerza motriz principal de la industria moderna. Esta realidad, unida a la crisis energética de fines del siglo pasado y principios del actual, ha motivado, por una parte, la fabricación de motores cada vez más eficientes, y por otra, la necesidad de verificar qué métodos de sintonía de controladores PID son más estables para controlar la velocidad de un motor asíncrono, siendo este el problema de interés.

El diseño de una estrategia de control eficaz para el proceso de control de la velocidad de un motor asíncrono requiere un modelo matemático que describa la dinámica del proceso y una fase de simulación. En los estudios realizados por Imad y González Santos (2015) se obtuvo un modelado matemático para un motor trifásico K90-T2. Los dos modelos tipo función de transferencia que caracterizan el comportamiento de dicho motor se lograron mediante señales pseudo-aleatorias multinivel, el primer caso mediante señal Binaria de Máxima Longitud (MLB) y el segundo caso mediante señal Binaria de Residuo Cuadrático (QRB).

Reutilizando dichos modelos y contando con una instalación real que lo contiene, el objetivo y principal contribución de este trabajo fue desarrollar métodos de sintonía en un controlador tipo PID y su influencia en el sistema compuesto por un motor trifásico K90-T2. En este caso se estudió la influencia a través de un análisis en tiempo real de las especificaciones de la respuesta temporal del sistema de control PID.

Materiales y métodos Motor asíncrono k90-t2

El motor K90-T2 (Kelvin S.A, 2010) es un motor comercial, asíncrono cerrado, autoventilado, en carcasa de aleación ligera con aletas de refri-

geración, para funcionamiento continuo S1, en cualquier posición y en ambos sentidos de giro.

Tiene rotor en cortocircuito, montado en eje de acero, con retén en cada extremo, gira en rodamientos de bolas. Se fija a través de brida, se ejecuta según conexión en caja de bornes y con configuración estrella-delta.

- Monofásico. 230 V. 50 Hz, dos polos, para invertir el sentido de giro debe estar prácticamente parado.
- Trifásico 230/400 V. 50 Hz. Dos polos, para invertir el sentido de giro se invierten dos fases.

El motor K90-T2 posee los datos de chapa que se muestran en la tabla 1.

Tabla 1. Datos técnicos del motor K90-T2 del fabricante Kelvin®

EJECUCIÓN	TRIFÁSICOS DE DOS POLOS		
Condensador	uF/V	-	
En vacío	r.p.m.	2980	
	A	0.64	
	cos φ	0.65	
Datos Nominales	r.p.m.	2635	
	A	1.54	
	Eléctrica	W	354
	Mecánica	W	179
	HP	0.24	
	Par/Torque	Nm	0.65
Rendimiento	Al freno.	Nm	1.1
	%	51	

Modelos matemáticos

A partir de señales pseudo-aleatorias multinivel se obtuvieron los modelos tipo función de transferencia que reflejan las expresiones (1) y (2).

$$GP2U_MLB(s) = \frac{60}{0.0045s^2 + 0.1034s + 1}$$

$$GP2U_QRB(s) = \frac{60}{0.0047s^2 + 0.1094s + 1}$$

Se emplean los dos modelos con el objetivo de verificar la influencia del pequeño cambio de sus coeficientes en el denominador en la respuesta temporal del sistema.

Características de la respuesta temporal

Entre las especificaciones de las características de la respuesta temporal (Figura 1) se encuentran (Ogata, 2010):

- Sobrepaso máximo, M_p : es el valor pico máximo de la curva de respuesta, me-

dido a partir del valor en estado estable. Si el valor final en estado estable de la respuesta es diferente de la unidad, es común usar el porcentaje de sobrepaso máximo. Se define mediante la fórmula 3, donde $c(tp)$ es el valor de la respuesta en el tiempo de pico y $c(t_\infty)$ es el valor de la respuesta a lo largo del tiempo.

$$\%Mp = \frac{c(tp) - c(t_\infty)}{c(t_\infty)} * 100 \quad (3)$$

- Tiempo pico, tp : es el tiempo requerido para que la respuesta alcance el primer pico del sobrepaso.
- Tiempo de retardo, td : es el tiempo requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad del valor final.
- Tiempo de subida, tr : es el tiempo requerido para que la respuesta pase del 10 al 90%, del 5 al 95% o del 0 al 100% de su valor final.
- Tiempo de establecimiento, ts : es el tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje absoluto del valor final (por lo general, de 2 a 5%) y permanezca dentro de él.

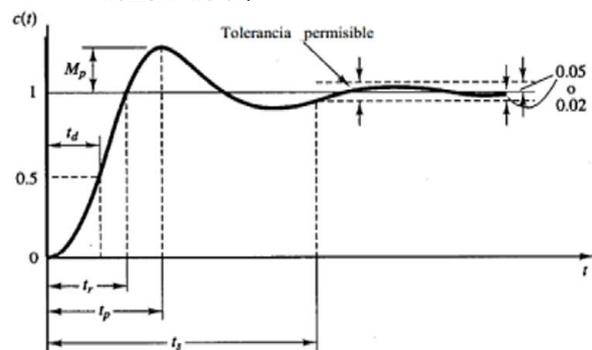


Figura 1. Curva de respuesta escalón unitario en la que se muestran t_d , t_r , t_p , M_p y t_s .

Métodos de sintonía y autosintonía

Método de sintonía de Ziegler-Nichols

El método de Ziegler-Nichols permite ajustar o "sintonizar" un controlador PID de forma empírica, sin necesidad de conocer las ecuaciones de la planta o del sistema controlado. Estas reglas de ajuste propuestas por Ziegler y Nichols fueron publicadas en 1942 y desde entonces constituyen uno de los métodos de sintonización más ampliamente difundido y utilizado. Los valores propuestos por este método en general

intentan conseguir en el sistema realimentado una respuesta al escalón con un sobreimpulso máximo del 25%, que es un valor robusto con buenas características de rapidez y estabilidad para la mayoría de los sistemas.

El método de sintonización de reguladores PID de Ziegler-Nichols permite definir las constantes o ganancias proporcional, integral y derivativa (K_p , T_i y T_d) a partir de la respuesta del sistema en lazo abierto o a partir de la respuesta del sistema en lazo cerrado.

Hay dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols: el primero y el segundo método. A continuación, se hace una breve presentación de estos dos métodos (Ogata, 2010).

- En el primer método, la respuesta de la planta a una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S. Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva con forma de S. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta. La curva con forma de S se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinando las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t) = K$.
- En el segundo método, primero se fija $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando solo la acción de control proporcional, se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico K_{cr} , en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones sostenidas para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces este método no se puede aplicar.) Así, la ganancia crítica K_{cr} y el período P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente.

Método de sintonía de Aström-Hagglund

En los métodos tradicionales de respuesta en frecuencia, la función de transferencia de un proceso se determina midiendo las respuestas en estado estacionario a entradas sinusoidales.

Una dificultad de este enfoque es que las frecuencias apropiadas de la señal de entrada se deben escoger *a priori* (Aström & Hägglund, 2009).

Para generar automáticamente una señal de entrada con la frecuencia apropiada se introduce una realimentación no lineal de tipo relé para obtener una oscilación de ciclo límite, generando así una señal de entrada al proceso con un período cercano a la frecuencia última del sistema en lazo abierto (de Souza, 2007). Este método simplifica los mecanismos de identificación y calibración y es aplicable en sistemas no lineales. Es muy eficiente para determinar la ganancia crítica y la frecuencia crítica.

El relé con histéresis es el que se utiliza para reducir el efecto del ruido de medida e incrementar el período de la oscilación. Existe una conmutación que selecciona entre la realimentación del relé o la realimentación ordinaria con el PID. Cuando se desea sintonizar el sistema, la función PID se desconecta y el sistema se conecta al control realimentado con relé, entonces, el sistema comienza a oscilar. El período y la amplitud de la oscilación se determinan cuando se alcanza una oscilación en estado estacionario, obteniéndose el período último y la ganancia última. Se pueden determinar entonces los parámetros del controlador PID a partir de estos valores. El controlador PID entonces se conmuta automáticamente otra vez y el control se ejecuta con los nuevos parámetros del PID.

Método de sintonía de Kappa-Tau

Se basa en la aplicación a un gran número de modelos de un método de sintonización que requiere un conocimiento profundo del proceso, y la búsqueda posterior de unas reglas que aproximen los parámetros óptimos. Puede aplicarse a modelos de dos y tres parámetros (Dulhoste, 2013).

Con este método se puede optar entre robustez y eficacia de regulación por medio del parámetro M_s , parámetro propio del método relacionado con la rapidez y el tiempo de establecimiento de la respuesta.

- $M_s = 1,4 \rightarrow$ Mayor robustez.
- $M_s = 2 \rightarrow$ Mayor rapidez en la respuesta.

Método de sintonía de Honeywell

Honeywell es uno de los fabricantes en el mercado de instrumentación y automatización de más historia y es la única que no ha sido adquirida por una transnacional. Su fundación se remonta a 1885 y ha sido desde entonces uno de los pioneros en el desarrollo de los controles PID.

Honeywell posee su propia nomenclatura para referirse a las variaciones de las estructuras PID de sus equipos:

1. Tipo A: P, I y D actúan sobre el error (PID)
2. Tipo B: P e I actúan sobre el error, mientras D sobre la señal realimentada (PI-D).
3. Tipo C: I actúa sobre el error y los términos P y D sobre y (I-PD)

Cada uno de los tipos es ofrecido en la forma ideal o la forma serie.

En lo que respecta a sistemas de control distribuido, el operador puede elegir todas las opciones anteriores, pero a la hora de la sintonización de los controladores de lazo, la situación no es la misma. Para estos últimos, el usuario solo puede elegir entre los tipos A o B (o ambos) en la forma serie.

Algunos controladores de este fabricante emplean un algoritmo que incluye dos opciones conocidas como sintonización “lenta” o “rápida”, empleadas en la sintonización automática inicial.

Método de autosintonía de Matlab®

La autosintonía de Matlab® se inicia al ejecutarse la opción *Tune* (autosintonía) de la ventana del bloque del controlador PID de Simulink®. El método de autosintonía calcula automáticamente un modelo lineal de la planta, este considera a la planta la combinación de todos los bloques entre la salida del controlador PID y la entrada. Por lo tanto, la planta incluye todos los bloques en el lazo de control, que no sean el propio controlador (Moreno, 2018). Luego, calcula automáticamente un diseño inicial del controlador PID con un buen equilibrio entre rendimiento y robustez. La autosintonización PID basa su diseño inicial en la respuesta de frecuencia en lazo abierto de la planta. Se puede utilizar la autosintonía PID para diseñar controladores PID de uno o dos grados de libertad (Pazmiño, Jácome, Zabala & Cavilanes, 2018).

El sintonizador PID considera como la planta a todos los bloques en el lazo de control entre la salida del bloque controlador PID y la entrada. Los bloques en su planta pueden incluir no linealidades. Debido a que la autosintonización requiere un modelo lineal, el sintonizador PID calcula una aproximación linealizada de la planta. Este modelo linealizado es una aproximación a un sistema no lineal, que es válido en general en una pequeña región en torno a un punto de funcionamiento dado del sistema.

Por defecto, la autosintonización linealiza la planta utilizando las condiciones iniciales especificadas en el modelo de Simulink® como el punto de funcionamiento. La planta linealizada puede ser de cualquier orden y puede incluir cualquier retardo de tiempo. La autosintonía de Matlab® (Holley, 2007) incorpora seis diferentes métodos clásicos de sintonía. Cuando es activada esta autosintonía, se calculan los parámetros del controlador PID por cada uno de estos métodos, pero se escoge la respuesta del método que esté mejor equilibrada entre rapidez y robustez.

Los seis métodos de sintonización que han incorporado en la versión del asistente que se emplea son:

- Respuesta de frecuencia de Ziegler-Nichols: calcula los parámetros del controlador a partir de la búsqueda en la tabla de Ziegler-Nichols, basado en la ganancia máxima y la frecuencia del sistema.
- Respuesta al paso de Ziegler-Nichols: se aproxima la planta como un modelo de primer orden con un retardo de tiempo que calcula los parámetros PID utilizando el método de diseño de Ziegler-Nichols.
- Skogestad IMC: se aproxima la planta como un modelo de primer orden con un retardo de tiempo y calcula los parámetros PID utilizando reglas de diseño de Skogestad.
- Chien-Hrones-Reswick: se aproxima la planta como un modelo de primer orden con un retardo de tiempo y calcula los parámetros PID utilizando una tabla de consulta de Chien-Hrones-Reswick.
- Aproximación de respuesta al paso de MIGO: aproximación en dominio del tiempo a lazo abierto y aproximación de la ganancia integral.
- Aproximación de respuesta de frecuencia de MIGO: aproximación en dominio de frecuencia a lazo cerrado y aproximación de la ganancia integral.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Ziegler-Nichols de lazo abierto

Utilizando los sistemas descritos, se plantea el establecimiento de la respuesta de estos sistemas por el método de Ziegler-Nichols de lazo abierto. Para esto, primeramente, se hace la representación de este en bloques de Simulink® en lazo abierto como se muestra en la figura 2.

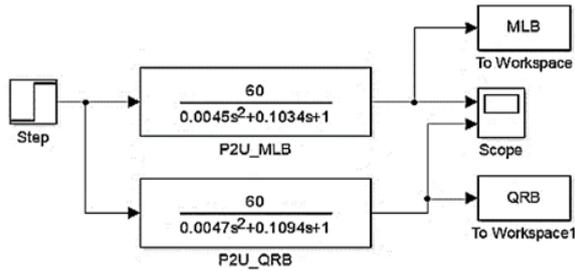


Figura 2. Diagrama en bloques de Simulink® del sistema de segundo orden en lazo abierto.

El primer paso que se realiza en este método es hallar el punto de inflexión de la respuesta para cada sistema en lazo abierto aplicando a su entrada una señal paso escalón unitario, es decir, el punto donde la recta tangente a la respuesta del sistema cambia su sentido de creciente a decreciente. En la figura 3 se muestra lo explicado anteriormente, pudiéndose notar que el punto de inflexión para la señal MLB es (9, 25.1002) y la señal QRB es (9, 24.0130)

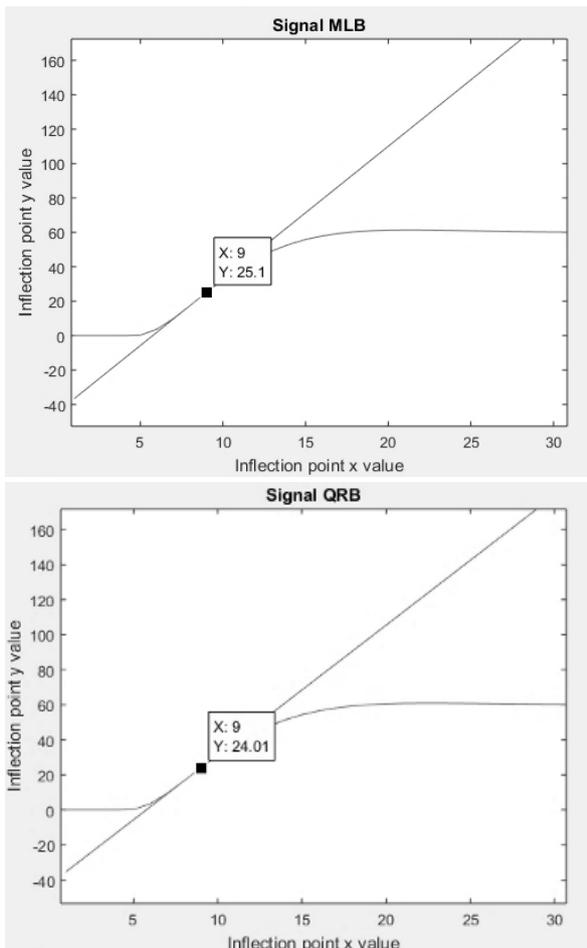


Figura 3. Puntos de inflexión de la respuesta del sistema de segundo orden a lazo abierto.

Ya obtenidos los puntos de inflexión se calculan los parámetros del controlador PID a sintonizar. Estos cálculos se realizan implícitamente durante la simulación de este método en Matlab®, a través de comandos utilizando un fichero tipo script. Los parámetros calculados del controlador PID se muestran en la tabla 2.

En la figura 4 se muestra la respuesta del sistema de segundo orden ya sintonizado por el método de Ziegler-Nichols de lazo abierto, donde la respuesta entre ambas funciones de transferencias es prácticamente igual y en la tabla 3 se muestran los parámetros de la respuesta temporal de este sistema.

Tabla 2. Parámetros del controlador PID para cada una de las funciones de transferencia.

MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS DE LAZO ABIERTO	KP	TI	TD
MLB	0.2854	9.4973	2.3743
QRB	0.2864	9.5130	2.3783

Tabla 3. Parámetros de la respuesta transitoria del sistema sintonizado.

MÉTODO DE ZIEGLER-NICHOLS DE LAZO ABIERTO	TD(S)	TR(S)	TP(S)	MP(%)	TS(S)
MLB - QRB	0.00483	0.0156	0	0	0.0282

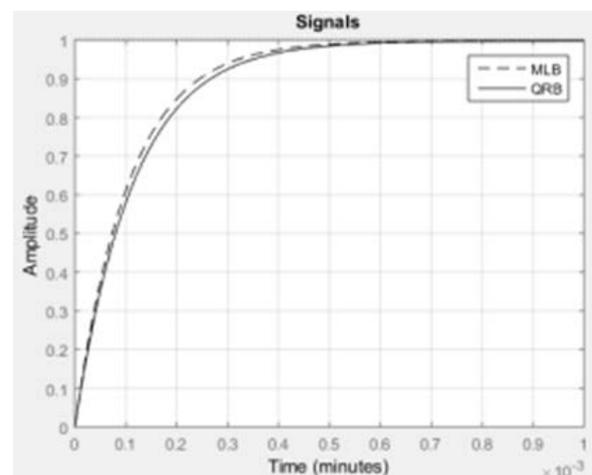


Figura 4. Respuesta del sistema de segundo orden sintonizado

Aström-Hagglund

Empleando la representación en lazo cerrado en diagrama de bloques de Simulink® de los sistemas de segundo orden (1) y (2), como se muestra en la figura 5, se plantea el establecimiento de la respuesta de estos sistemas por el método de Aström-Hägglund.

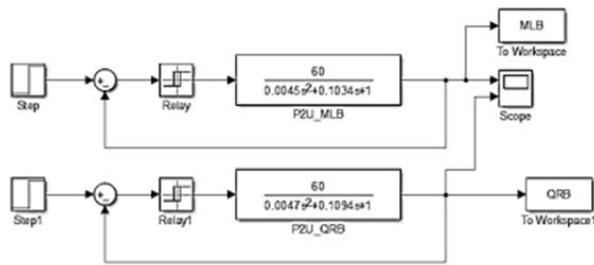


Figura 5. Diagrama en bloques del sistema de segundo orden con relé de Aström.

Al relé representado se le da una amplitud de 5 ya que este valor otorga a la salida del sistema las oscilaciones mantenidas con método de resolución ode23 (Dormand-Prince), mostradas en la figura 6, como las que requiere el método, pudiendo calcular los parámetros necesarios.

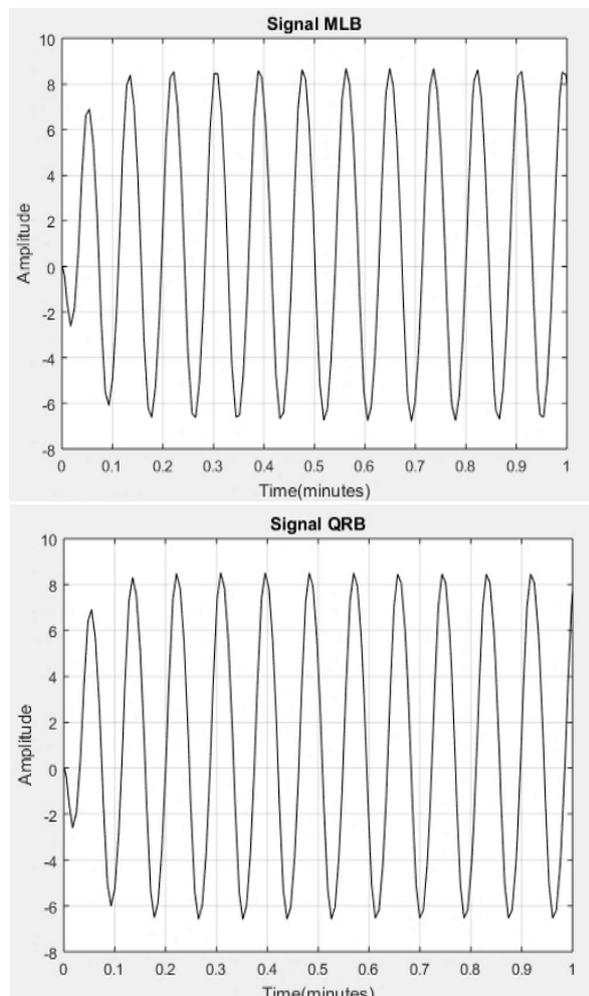


Figura 6. Respuesta del sistema de segundo orden bajo la acción del relé de Aström.

En la respuesta graficada se escogen los tres puntos correspondientes, para calcular los parámetros requeridos, los cuales fueron:

MLB	QRB
(x1, y1) = (0.3882, 8.5044)	(x1, y1) = (1.000, 8.4518)
(x2, y2) = (0.4758, 8.5044)	(x2, y2) = (1.1013, 8.4518)
(x3, y3) = (0.4343, -6.4544)	(x3, y3) = (1.0552, -6.3994)

Por el método de Aström-Hägglund, representado en comandos de Matlab®, se realiza la sintonía para un controlador PID. La respuesta obtenida es la mostrada en la figura 7 de ambas funciones de transferencia, donde se manifiestan los valores del controlador en la tabla 4 y en la tabla 5 se muestran los parámetros de la respuesta temporal de estos sistemas donde hay similitud entre ellos.

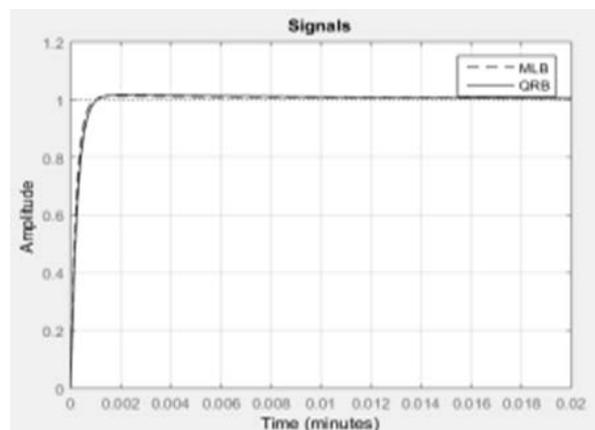


Figura 7. Respuesta del sistema sintonizado por el método de Aström-Hägglund.

Tabla 4. Parámetros del controlador PID para cada una de las funciones de transferencia

MÉTODO DE ASTRÖM-HÄGGLUND	KP	TI	TD
MLB	28.6646	0.0438	0.0109
QRB	28.4641	0.0449	0.0112

Tabla 5. Parámetros de la respuesta transitoria del sistema sintonizado

MÉTODO DE ASTRÖM-HÄGGLUND	TD(S)	TR(S)	TP(S)	MP(%)	TS(S)
MLB - QRB	0.01158	0.03186	0.0972	2.0	0.0522

Análisis del sistema variando la amplitud del relé

Se deseó comprobar si la respuesta del sistema cambia cuando se varía la amplitud del relé. Para eso se realizó una comparación con el mismo sistema, pero con tres diferentes amplitudes del relé (5, 10 y 15), con método de resolución ode23 (Dormand-Prince). Las respuestas de los tres sistemas en lazo cerrado con el relé incluido se observan en la figura 8.

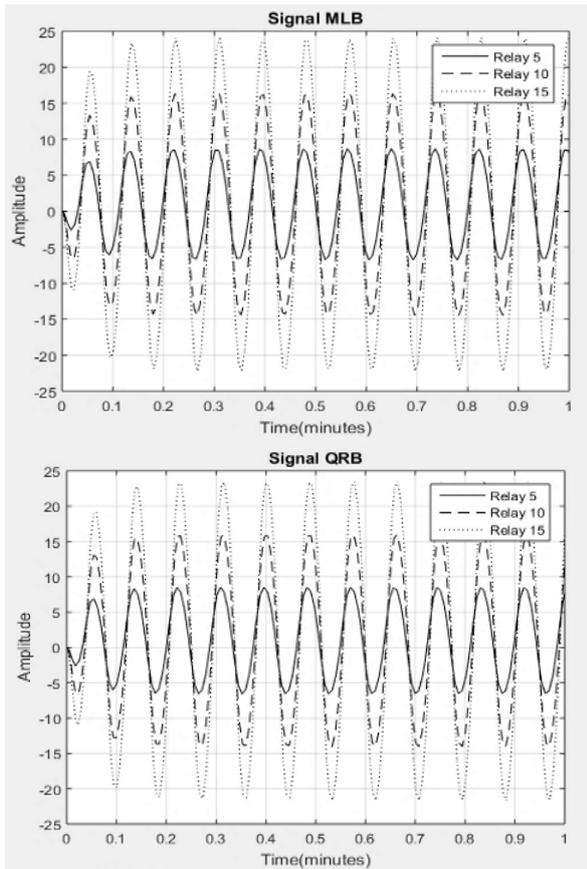


Figura 8. Respuestas del sistema en lazo cerrado bajo la acción de variaciones en la amplitud del relé.

Ya calculados los parámetros para cada sistema con la amplitud de relé correspondiente (Tabla 6), se realizó la sintonía de los tres sistemas y se comprobó que dicha amplitud si influye en esta sintonía. Evidenciándose de que, a mayor amplitud del relé, la respuesta de los sistemas con un controlador PID sintonizados por el método de Aström-Hägglund va mejorando como se puede comprobar en la figura 9.

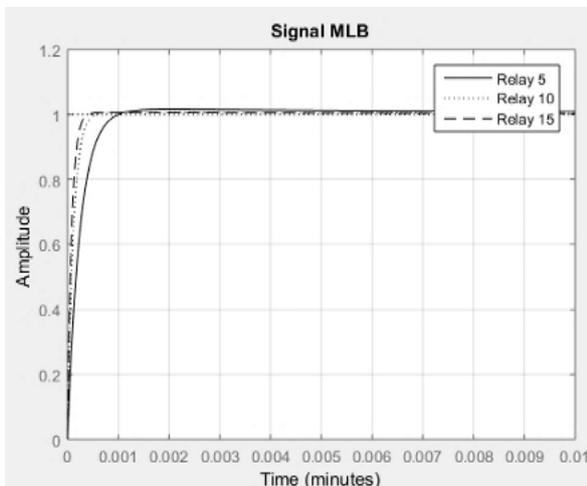


Tabla 6. Parámetros del controlador para cada amplitud del relé.

PARÁMETROS PID	KP	TI	TD
MLB			
Relé de amplitud 5	28.6646	0.0415	0.0104
Relé de amplitud 10	57.8804	0.0438	0.0109
Relé de amplitud 15	86.8624	0.0415	0.0104
QRB			
Relé de amplitud 5	28.0632	0.0438	0.0109
Relé de amplitud 10	56.3214	0.0449	0.0112
Relé de amplitud 15	84.9136	0.0461	0.0115

En la tabla 7 se presentan los parámetros de la respuesta temporal para que se tenga otro objeto de comparación entre estos sistemas.

Tabla 7. Comparación de las respuestas de los sistemas sintonizados variando la amplitud del relé por medio de los parámetros de la respuesta transitoria.

SISTEMA	TD(S)	TR(S)	TP(S)	MP(%)	TS(S)
SEÑAL MLB					
Relé de amplitud 5	0.01008	0.0305	0.1074	2.01	0.04872
Relé de amplitud 10	0.00504	0.01515	0.063	1.1	0.02646
Relé de amplitud 15	0.00348	0.01059	0.063	1.0	0.0177
SEÑAL QRB					
Relé de amplitud 5	0.01056	0.03328	0.105	2.0	0.05316
Relé de amplitud 10	0.00552	0.01587	0.04482	1.1	0.0276
Relé de amplitud 15	0.00355	0.01065	0	0	0.01782

PID autosintonizado mediante el auto-tune

El mismo sistema autosintonizado por medio del método de autosintonía que incluye Matlab®, cuyo diagrama en bloques de Simulink® es mostrado en la figura 10, tiene su respuesta representada en la figura 11.

En la tabla 8 se representan los parámetros del controlador autosintonizado y en la tabla 9 se muestran los parámetros de la respuesta temporal de este sistema.

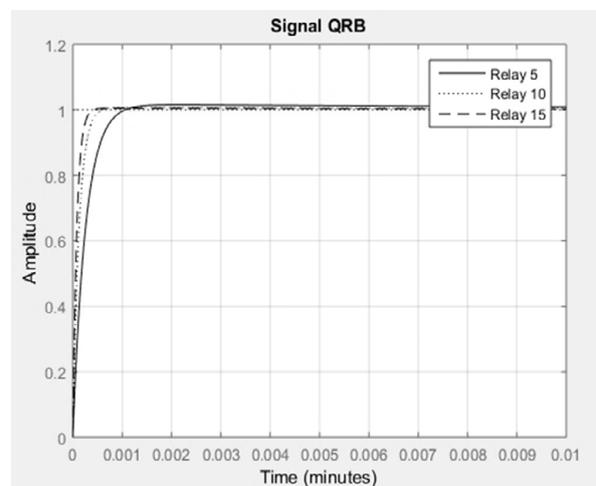


Figura 9. Sistema sintonizado por el método de Aström-Hägglund pero con variaciones en la amplitud del relé.

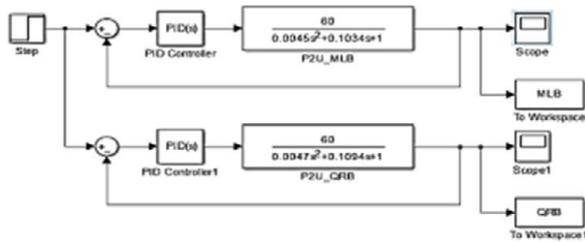


Figura 10. Diagrama en bloques del sistema de segundo orden haciendo uso del controlador PID.

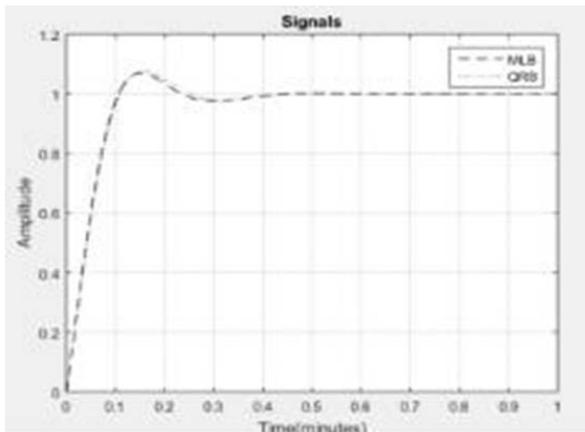


Figura 11. Proceso autosintonizado por medio de la autosintonía de Matlab®.

Tabla 8. Parámetros del controlador para sistema autosintonizado mediante el auto-tune.

AUTOSINTONIZADO MEDIANTE EL AUTO-TUNE	KP	TI	TD	N
MLB	0.03828	10.4714	0.0226	2347.6559
QRB	0.03937	10.3496	0.0227	2347.6559

Tabla 9. Parámetros de la respuesta transitoria del sistema autosintonizado mediante el auto-tune.

AUTOSINTONIZADO MEDIANTE EL AUTO-TUNE	TD(S)	TR(S)	TP(S)	MP(%)	TS(S)
MLB - QRB	2.5944	4.7860	9.498	7.6%	20.148

Kappa-Tau

Utilizando el sistema descrito y haciendo uso también de la representación del método de Ziegler-Nichols de lazo abierto en bloques de Simulink® como se muestra en la figura 5, se aplica el método de Kappa-Tau. Los cálculos se realizan implícitamente durante la simulación de este método en Matlab®, a través de comandos referentes. Los parámetros del controlador PID calculados correspondientes al sistema se muestran en la tabla 10.

Tabla 10. Parámetros del PID según el método de Kappa-Tau.

	PARÁMETRO	KP	TI	TD
MLB	Ms=1.4	0.5032	1.3142	0.2158
	Ms=2.0	2.1566	2.4653	0.6603
QRB	Ms=1.4	0.6335	1.5703	0.2233
	Ms=2.0	3.2493	3.2796	0.9010

La respuesta del sistema de segundo orden, que se viene analizando, ya sintonizado se muestra en la figura 12. En la tabla 11 se pueden observar los parámetros de la respuesta transitoria pertenecientes a las dos opciones de modo de autosintonía que ofrece este método, tanto como para sistema con mayor robustez ($M_s=1.4$) como para un sistema con mayor rapidez ($M_s=2.0$).

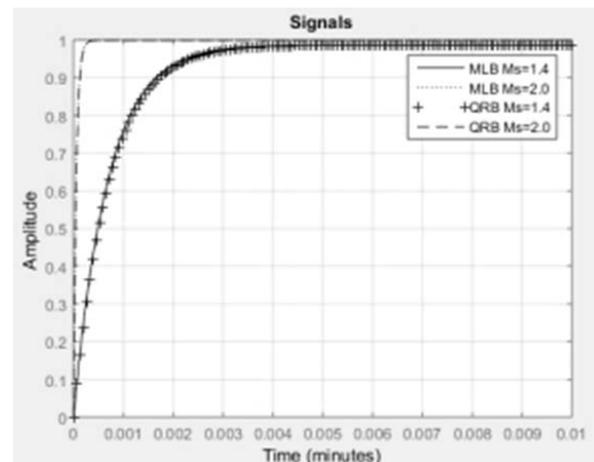


Figura 12. Respuesta del sistema de segundo orden sintonizado

Tabla 11. Parámetros de la respuesta transitoria del sistema autosintonizado por el método de Kappa-Tau.

MÉTODO DE SINTONÍA DE KAPPA-TAU	TD(S)	TR(S)	TP(S)	MP(%)	TS(S)
Ms=1.4	0.03138	0.09807	0	0	0.2118
Ms=2.0	0.00212	0.00731	0	0	0.0131

Honeywell

El sistema tiene su respuesta a lazo abierto con la derivada de esta pasando por el punto de inflexión como se muestra en la figura 2. Esta respuesta es muy necesaria ya que este método en su simulación, reconoce que el sistema es de segundo orden porque la derivada de esta respuesta crece hasta un punto máximo y luego empieza a decrecer. Este punto de inflexión es imprescindible a la hora de calcular los parámetros del controlador PID correspondientes. Este cálculo se realizó mediante comandos de Matlab® implementados en fichero tipo script. En la figura 13 se muestra la respuesta del sistema de segundo orden con el controlador PID. Los parámetros del controlador PID calculados se exponen en la tabla 12 y en la tabla 13 se muestran los parámetros de la respuesta temporal.

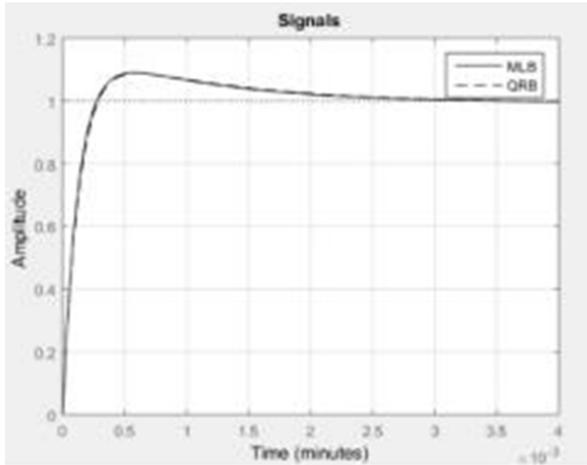


Figura 13. Respuesta del sistema de segundo orden controlado por un PID sintonizado mediante el método de Honeywell.

Tabla 12. Parámetros del controlador del sistema por el método de Honeywell.

MÉTODO DE HONEYWELL	KP	TI	TD
MLB	760.5941	0.0036	0.00089
QRB	767.65	0.0037	0.0009

Tabla 13. Parámetros de la respuesta transitoria del sistema por el método de Honeywell.

MÉTODO	T_0 (S)	T_r (S)	TP(S)	MP(%)	T_s (S)
Sintonizado por el método de Honeywell	0.004404	0.011748	0.03966	9.5	0.1326

En la tabla 14 se hace un resumen de los parámetros de respuesta temporal obtenidos de los diferentes métodos.

Tabla 14. Tabla resumen de los parámetros de respuesta temporal obtenidos.

SISTEMA	TD(S)	TR(S)	TP(S)	MP(%)	TS(S)
ZIEGLER-NICHOLS					
De lazo abierto	0.00483	0.0156	0	0	0.0282
ASTRÖM-HÄGGLUND					
MLB					
Relé de amplitud 5	0.01008	0.0305	0.1074	2.01	0.04872
Relé de amplitud 10	0.00504	0.01515	0.063	1.1	0.02646
Relé de amplitud 15	0.00348	0.01059	0.063	1.0	0.0177
QRB					
Relé de amplitud 5	0.01056	0.03328	0.105	2.0	0.05316
Relé de amplitud 10	0.00552	0.01587	0.04482	1.1	0.0276
Relé de amplitud 15	0.00355	0.01065	0	0	0.01782
PID AUTOSINTONIZADO					
Mediante el auto-tune	2.5944	4.7860	9.498	7.6	20.148
KAPPA-TAU					
Ms=1.4	0.03138	0.09807	0	0	0.2118
Ms=2.0	0.00212	0.00731	0	0	0.0131
MÉTODO DE HONEYWELL					
	0.004404	0.011748	0.03966	9.5	0.1326

Conclusiones

Las funciones de transferencia G_{P2U_MLB} y G_{P2U_QRB} se diferencian solamente en dos cifras en el denominador, en el primer caso en el elemento cuadrático en la parte de las diezmilésimas y en el elemento lineal en la parte de las milésimas, estas pequeñas diferencias son casi imperceptibles en la respuesta temporal de cada método coincidiendo las respuestas entre ambas funciones.

Para la simulación del método de Aström-Hagglund se pudo apreciar la estabilidad de la respuesta del sistema escogido, siendo fundamental la correcta elección de la amplitud del relé a la que se va a someter la planta. Esta afirmación se argumentó aún más cuando se hicieron varias simulaciones con el mismo sistema, pero con diferentes amplitudes de relé, comprobándose de que, al aumentar la amplitud del relé, la respuesta del sistema ya sintonizado mejoraba considerablemente.

Otro método simulado fue el de la autosintonía que incluye Matlab®, de este, no se obtuvieron las respuestas que se esperaba, ya que se puede apreciar que tarda mucho en estabilizarse la planta. Una de las causas por las cuales se puede entender esto, es el por el tiempo integral tan grande que presenta.

Los dos métodos que muestran las mejores características de respuesta temporal son el método de Kappa-Tau para el caso de $M_s=2.0$ y el método de Aström-Hagglund para la cuestión de mayor amplitud de relé, siendo el método de Kappa-Tau el que presenta mejor respuesta temporal dentro de los métodos empleados.

Referencias bibliográficas

- Alfaro Ruiz, VM. (2003). *Métodos de sintonización de controladores PID que operan como servomecanismos*. Ingeniería: Revista de la Universidad de Costa Rica. 13,13-29.
- Aström K., Hägglund T. (2009). *Control PID avanzado*. España: Pearson.
- de Souza M. G. (2007). *Relay Method on Auto-Tuning Automation Solutions*. Portugal: Universidad Técnica de Lisboa.
- Dulhoste, J. F. (2013). *Introducción al control de procesos para ingenieros*. Mérida-Venezuela: Escuela de Ingeniería Mecánica
- González Santos A. I., & Moreno Vega V. (2017). *Introducción a la automatización en los sistemas de producción*. (2a. ed). La Habana: Félix Varela.
- González Santos A. I., & Fernández Ruiz. R. (2022). *Monografía. Aproximación teórica a la sintonía del controlador PID*. La Habana.

- Henriquez Novoa J. A., & Martínez Rodríguez, W. J. (2019). Identificación y sintonización de controladores PID para procesos de integración. Colombia: Departamento de Ciencias de la Computación y Electrónica, Universidad de Colombia.
- Holley M. (2007). Matlab® para ingenieros. México: PRENTICE HALL MEXICO.
- Imad Verdés. R., & González Santos A. I. (2015). Controladores MPC y PID con autoajuste para un proceso de dinámica rápida a través de MATLAB®/Simulink® y OPC. Revista de Ingeniería Electrónica, Automática y Telecomunicaciones.; 36(3),80-93.
- Jahanshahi, E., Sivalingam, S., & Schofield, J. (2015). Industrial test setup for autotuning of PID controllers in large-scale processes: Applied to Tennessee Eastman process. 9th International Symposium on Advanced Control of Chemical Processes. Canadá. p. 5-20.
- Kelvin S.A. (2010). Motores asíncronos. España; Miguel Escrig O, Romero Pérez JA, & Sanchis Llopis R. (2020). Tuning PID controllers with symmetric send-on-delta sampling strategy. Journal of the Franklin Institute. 357,832-62.
- Moreno Pérez, J. C. (2018). Entornos de desarrollo. Madrid, España: Síntesis SA.
- O'Dwyer, A. (2009). Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules. (3a. ed). Londres: Imperial College Press.ç
- Ogata, K. (2010). Ingeniería de Control Moderna. (5a ed). España: Pearson Educación.
- Pazmiño A. A., Jácome T. J., Zabala A. L., & Gavilanes C. J. (2018). Matlab® básico. Ecuador: Espoch.
- Zayas G.F., Pardo Q. H. Jove P. E., Casteleiro R. J., & Calvo R. J. (2020). Diseño de controladores PID. España: Universidad de la Coruña.