

ANALISIS EN SIMULACION DE ACCIONES BASICAS DE CONTROL (Julio de 2021)

Jairo Humberto Fresneda Alarcón, Andrés Escobar Díaz, Harold Vacca González

Resumen -

Problema: El escaso conocimiento de las características de funcionamiento de las acciones de control lleva a la implementación de controladores PID con poco rendimiento e incluso la desactivación de la acción derivativa eliminando la capacidad de predicción del controlador.

Objetivo: La investigación tiene como objetivo establecer criterios prácticos para la sintonización de controladores PID.

Metodología: El modelamiento de una planta térmica genera las ecuaciones de estado implementadas en diagrama de bloques realizando la simulación del sistema incluyendo perturbaciones y la aplicación de diferentes configuraciones de controladores con acciones de control proporcional, integral y derivativo.

Resultados: La simulación genera gráficas donde se podrá apreciar la señal de control, la temperatura del sistema y el error para diferentes situaciones por la aplicación de perturbaciones y la activación o no de la saturación del controlador.

Conclusión Se establecen las principales propiedades de las acciones básicas de control por medio del cálculo y comparación del máximo sobre impulso, tiempo de estabilización y error de estado estable dando una idea clara de los efectos de las acciones básicas de control para la sintonización de un controlador PID.

Originalidad: se formulan características de comportamiento de las acciones básicas de control para este sistema que pueden ser escalables en otras aplicaciones.

Limitación: La simulación permite hacerse una idea del comportamiento del sistema, se requiere hacer una aplicación práctica para validar los resultados.

Palabras clave: Proporcional, integral, derivativo, simulación, desempeño, análisis práctico, comportamiento, sintonización.

I. INTRODUCCIÓN

Este documento intenta mostrar las principales características de las acciones básicas de control por medio de la simulación de una planta térmica a la cual se le aplican las diferentes combinaciones de las acciones básicas de control y se evalúa el comportamiento siendo sometido a diferentes perturbaciones. Se obtienen gráficas de las señales del sistema permitiendo la visualización, el análisis y la comparación, así como se hace el cálculo de máximo sobre impulso, tiempo de estabilización y error de estado estacionario de la señal de salida del sensor logrando así un estudio detallado y concreto de cada una de las acciones de control.

A. Antecedentes de investigación

La gran cantidad de publicaciones acerca de controladores PID se destaca dado que es el controlador más usado en la industria para el control de procesos. Además de los fundamentos teóricos del control automático y acciones básicas de control [1]–[19], los estudios se enfocan principalmente en la optimización de métodos de diseño de controladores PID alrededor de la robustez manteniendo un excelente rendimiento frente a cambio de consigna, perturbaciones y características del proceso controlado con el objetivo de establecer reglas de ajuste que hagan más sencilla la sintonización, el avance de estrategias anti-windup [20] en busca de la reducción de sobre impulso evitando una posible saturación del controlador y el desarrollo de soluciones para sistemas con tiempos muertos [21]–[28].

Entre los métodos más comunes para el ajuste de controladores PID están: El método de ajuste manual, las reglas de ajuste de Ziegler y Nichols, el método de ajuste de Cohen-Coon [10], [29]–[31] y diseño en frecuencia [32]. Se encuentran diferentes investigaciones de aplicación de estos métodos de ajuste [33]–[39] entre los cuales se tienen controladores para temperatura [40]–[44], válvula servo controlada [45], [46], velocidad de motor DC y servo Motor [47]–[58], péndulo invertido [59], cuadricóptero [60], [61] y sistemas de suspensión y freno para automóviles [62]–[66] Utilizando Matlab/Simulink como herramienta de cálculo y simulación

La disponibilidad de herramientas inteligentes basadas en software ayuda a automatizar el proceso de diseño y ajuste facilitando la aplicación de diferentes métodos y algoritmos planteados según el modelo de la planta a controlar [67], [68]. Entre los más relevantes se encuentran los algoritmos de auto ajuste basado en filtro Kalman [69], [70], controladores PID difusos [44], [71], [72], diseño de controladores inteligentes utilizando Algoritmos evolutivos [73], PID no lineal basado en funciones no lineales de Han [74], IMC-PID [75]–[77], el cual es el método de sintonía más ampliamente utilizado entre los paquetes de software PID comerciales que utilizan modelos analíticos en la industria.

Algunos de los temas actuales de investigación [78]–[87] que representan gran interés en las áreas de automatización y control.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

Mediante la relación de calor aplicado para incrementar la temperatura y la cantidad de calor que se pierde por los diferentes tipos de transferencia térmica se plantean las ecuaciones que modelan un sistema térmico. El desarrollo de dichas ecuaciones permite obtener las ecuaciones de estado y por medio de la transformada de Laplace se obtiene la función de transferencia del sistema.

Utilizando las herramientas de Matlab/Simulink se implementa el sistema térmico en diagrama de bloques acondicionándolo para controlar o no la saturación y ser sometido a las perturbaciones como ruido y temperatura ambiente. A dicho sistema se le aplican los controladores P, I, PD PI y PID.

Para cada controlador se presentan las gráficas que muestran el comportamiento de error, señal de control y señal de temperatura calculando el máximo sobre impulso, tiempo de estabilización y error de estado estacionario; datos que nos permiten visualizar y comparar el comportamiento de cada controlador las cuales son:

- Respuesta general comparación con y sin saturación
- Respuesta general variando las ganancias K_p , K_i y K_d según sea el caso.

De igual forma se muestra la gráfica:

- Respuesta general con perturbación temperatura ambiente ruido y saturación

Visualizando así el comportamiento del respectivo controlador denotando la velocidad de respuesta ante un cambio drástico y su comportamiento frente a las perturbaciones acercándose a una aplicación de la industria.

Se hace un estudio analizando error de estado estable, tiempo de subida, perturbación ruido, perturbación cambio de temperatura (velocidad de respuesta), estabilidad, saturación y variación de las ganancias para los diferentes controladores logrando así establecer los efectos de cada acción de control en la sintonización.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Modelamiento de una planta térmica

Es uno de los sistemas más utilizado en procesos industriales:

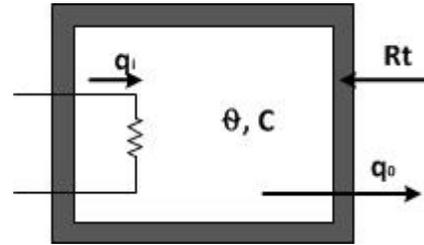


Fig. 1. Sistema Térmico con una capacidad Térmica.

De la anterior figura podemos analizar: En los sistemas térmicos existen: un estado de equilibrio que se puede relacionar entre la cantidad de calor que hace que incremente la temperatura interna del sistema; y la cantidad de calor que se pierde por los diferentes tipos de transferencia térmica que existen, inherente al mismo sistema térmico, por lo tanto, la relación entre el incremento de la temperatura y el incremento del flujo de calor está dado por (1) y (2):

$$\hat{\theta}(t) = \theta(t) - \bar{\theta} \quad (1)$$

$$\hat{q}(t) = q(t) - \bar{q} \quad (2)$$

$\hat{\theta}(t)$: Variación de temperatura

$\theta(t)$: Temperatura inicial

$\bar{\theta}$: Temperatura perdida

$\hat{q}(t)$: Variación flujo de calor

$q(t)$: Flujo de calor inicial

\bar{q} : Calor perdido

Donde θ , temperatura en grados Kelvin ($^{\circ}\text{K}$); q , flujo de calor en Joule en segundo (J/s) o en Vatios (W).

Desarrollando esta relación se obtiene la ecuación de estado (3) y de salida (4) para el sistema

$$\frac{d\theta_i}{dt} = \frac{1}{c} \left(q_i - \frac{\theta_i}{Rt} + \frac{\theta_a}{Rt} \right) \quad (3)$$

$$q_o = \frac{\theta_i - \theta_a}{Rt} \quad (4)$$

Y la función de transferencia

$$H(s) = \frac{y(s)}{u(s)} \quad (5)$$

$$H(s) = \frac{\frac{1}{c}}{s + \frac{1}{Rt c}} \quad (6)$$

Miremos la ecuación de estado en diagrama de bloque por Simulink,

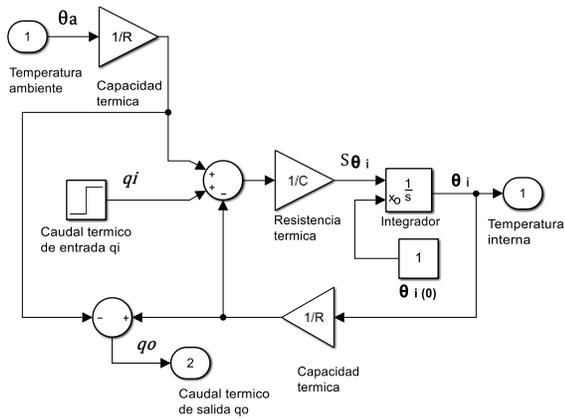


Fig. 2. Sistema Térmico Básico.

B. Simulación acciones básicas de control

1) Graficas comportamiento P

La ecuación del controlador es:

$$C(s) = P \tag{7}$$

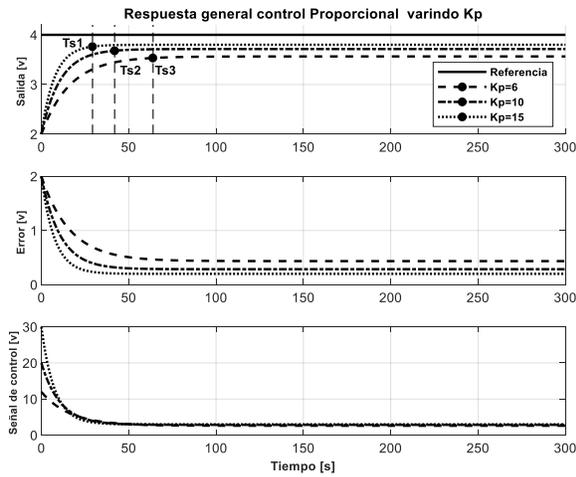


Fig. 3. Respuesta general control Proporcional variando Kp.

TABLA 1

Parámetros respuesta general control proporcional variando Kp

Ganancia Kp	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
6	63.9s	21.74%	0%
10	42s	14.29%	0%
15	29.3s	10%	0%

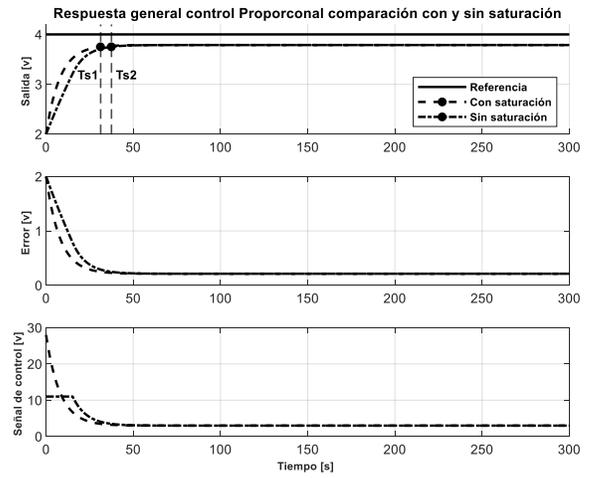


Fig. 4. Respuesta general control Proporcional comparación con y sin saturación.

TABLA 2

Parámetros respuesta general control proporcional comparación con y sin saturación.

Saturación	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
Con	31.3s	10.64%	0%
Sin	37.4s	10.64%	0%

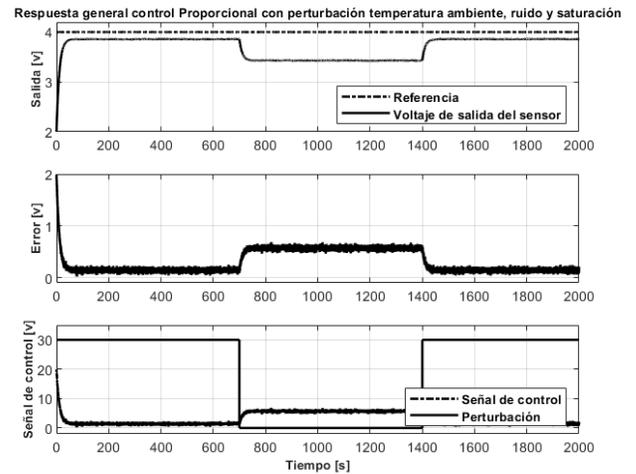


Fig. 5. Respuesta general control Proporcional con perturbación temperatura ambiente, ruido y saturación

2) *Graficas comportamiento I*

La ecuación del controlador es:

$$C(s) = I \frac{1}{s} \tag{8}$$

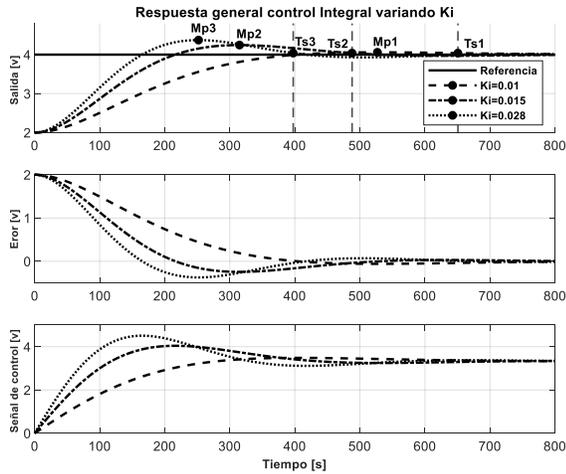


Fig. 6. Respuesta general control integral variando Ki.

TABLA 3

Parámetros respuesta general control integral variando Ki

Ganancia ki	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
0.01	650.7s	0.51%	2.98%
0.015	488s	0.26%	12.26%
0.028	397.5s	0.55%	18.65%

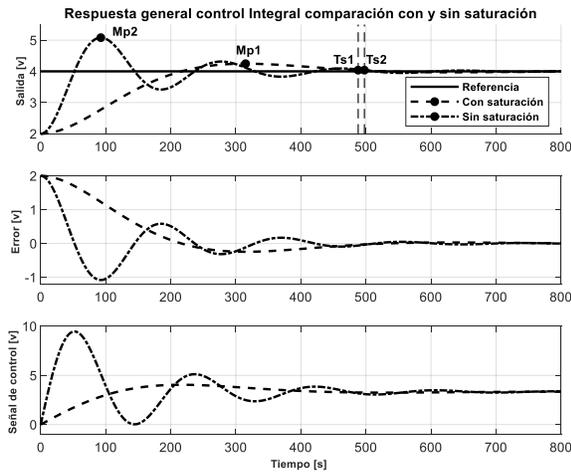


Fig. 7. Respuesta general control Integral comparación con y sin saturación.

TABLA 4

Parámetros respuesta general control integral con y sin saturación.

Saturación	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
Con	488s	0.26%	12.26%
Sin	497.7s	0.14%	54%

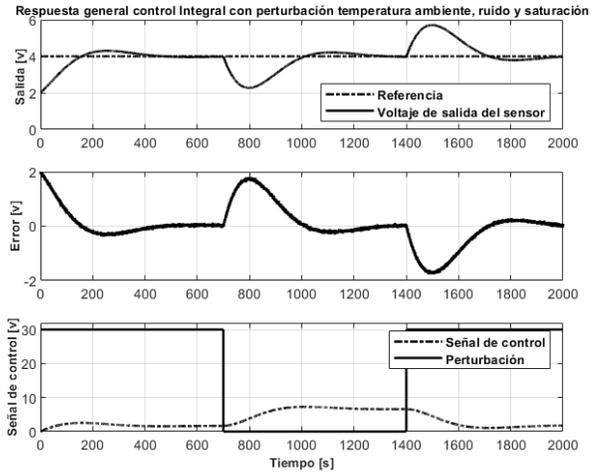


Fig. 8. Respuesta general control Integral con perturbación temperatura ambiente, ruido y saturación.

3) *Graficas comportamiento PD*

La ecuación del controlador es:

$$C(s) = P + D \frac{N}{1+N\frac{1}{s}} \tag{9}$$

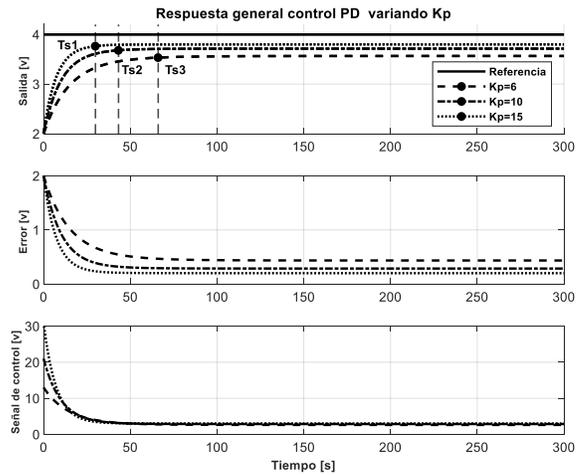


Fig. 9. Respuesta general control PD variando Kp.

TABLA 5

Parámetros respuesta general control PD variando Kp

Ganancia Kp	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
6	66.1s	21.74%	0%
10	43.2s	14.29%	0%
15	29.9s	10%	0%

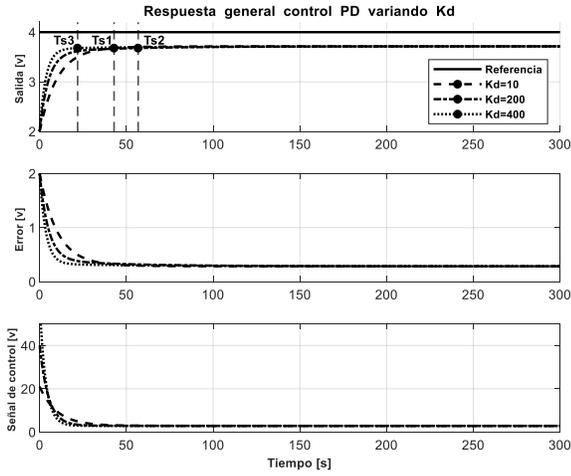


Fig. 10. Respuesta general control Pd variando Kd.

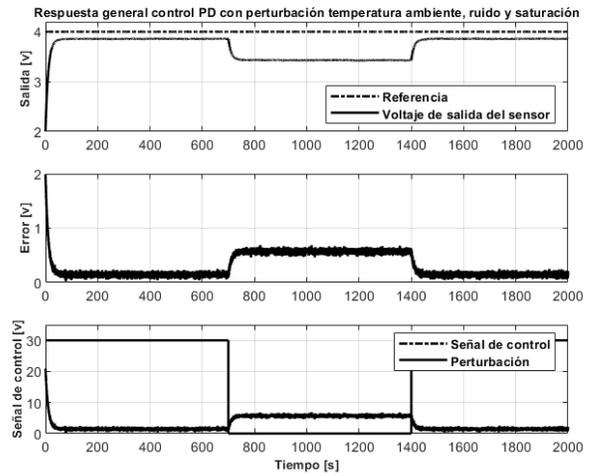


Fig. 12. Respuesta general control PD con perturbación temperatura ambiente, ruido y saturación.

TABLA 6

Parámetros respuesta general control PD variando Kd

Ganancia Kd	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
10	42.9s	14.29%	0%
200	56.8s	14.29%	0%
400	21.9s	14.3%	0%

4) Graficas comportamiento PI

La ecuación del controlador es:

$$C(s) = P + I \frac{1}{s} \tag{10}$$

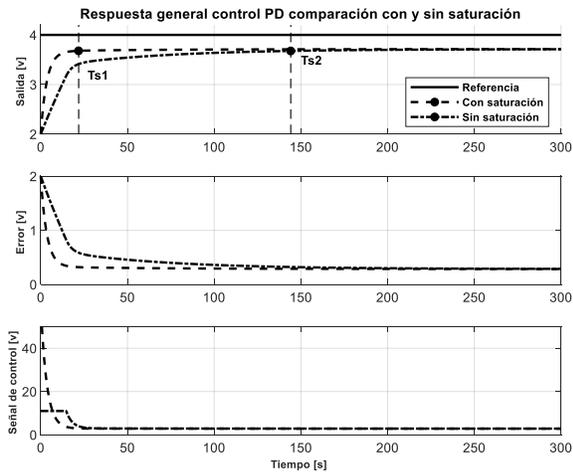


Fig. 11. Respuesta general control PD comparación con y sin saturación.

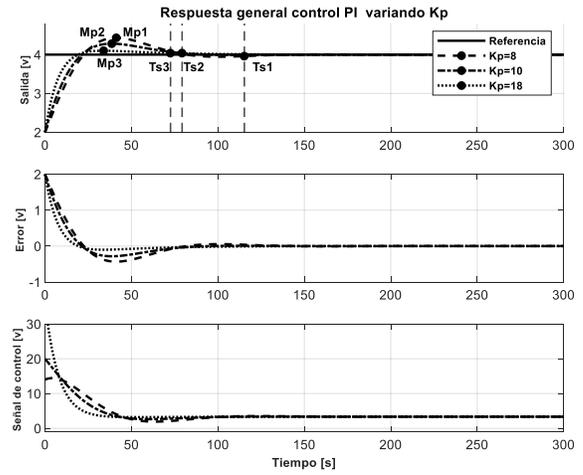


Fig. 13. Respuesta general control PI variando Kp.

TABLA 8

Parámetros respuesta general control PI variando Kp.

Ganancia Kp	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
8	115.3s	0%	21.64%
10	79.3s	0%	14.12%
18	72.6s	0%	5.05%

TABLA 7

Parámetros respuesta general control PD comparación con y sin saturación

Saturación	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
Con	21.9s	14.3%	0%
Sin	144.2s	14.43%	0%

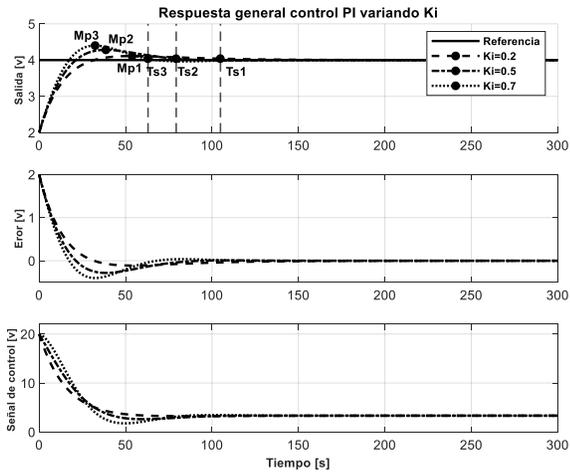


Fig. 14. Respuesta general control PI variando Ki.

TABLA 9

Parámetros respuesta general control PI variando Ki.

Ganancia Ki	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
0.2	104.9s	0%	5.54%
0.5	79.3s	0%	14.12%
0.7	63s	0%	20.03%

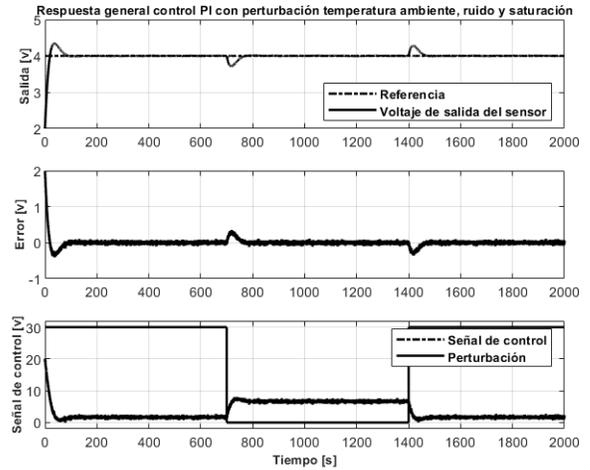


Fig. 16. Respuesta general control PI con perturbación temperatura ambiente, ruido y saturación.

5) Graficas comportamiento PID

La ecuación del controlador es:

$$G(s) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1+N \frac{1}{s}} \quad (11)$$

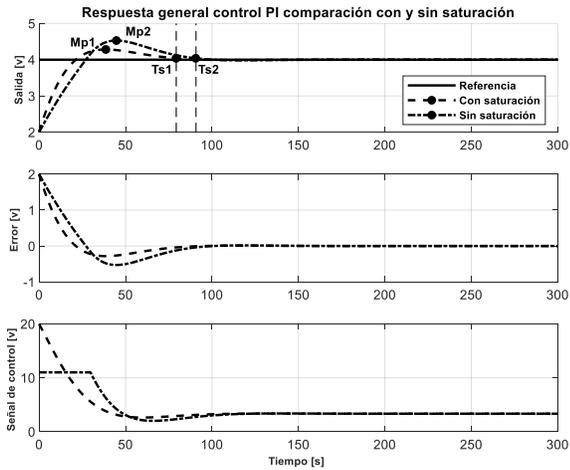


Fig. 15. Respuesta general control PI comparación con y sin saturación.

TABLA 10

Parámetros respuesta general control PI comparación con y sin saturación.

Saturación	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
Con	79.3s	0%	14.12%
Sin	90.7s	0%	26.4%

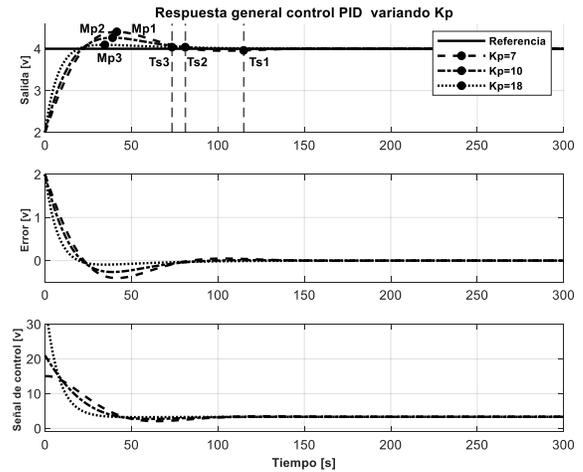


Fig. 17. Respuesta general control PID variando Kp.

TABLA 11

Parámetros respuesta general control PID variando Kp.

Ganancia Kp	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
7	115s	0%	20.27%
10	81.2s	0%	13.23%
18	73.5s	0%	4.67%

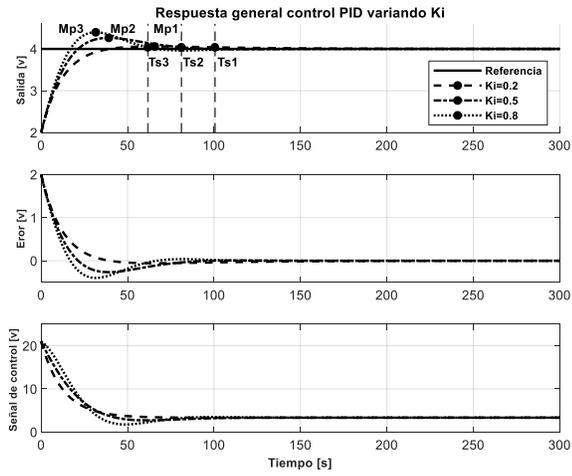


Fig. 18. Respuesta general control PID variando K_i .

TABLA 12

Parámetros respuesta general control PID variando K_i .

Ganancia K_i	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
0.2	100.6s	0.02%	2.9%
0.5	81.2s	0%	13.23%
0.8	61.8s	0%	19.94%

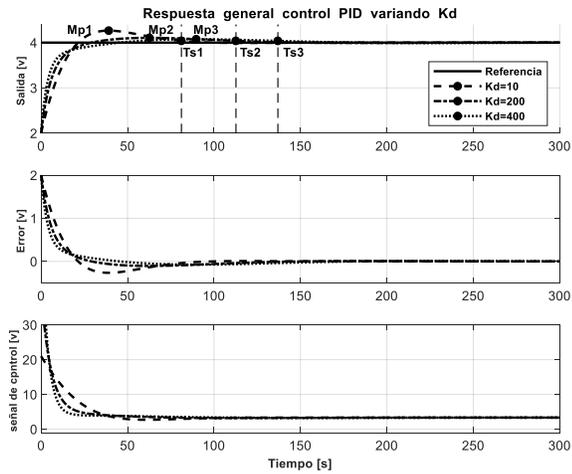


Fig. 19. Respuesta general control PID variando K_d .

TABLA 13

Parámetros respuesta general control PID variando K_d .

Ganancia K_d	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
10	81.2s	0%	13.23%
200	112.7s	0.03%	5.27%
400	137s	0.1%	3.74%

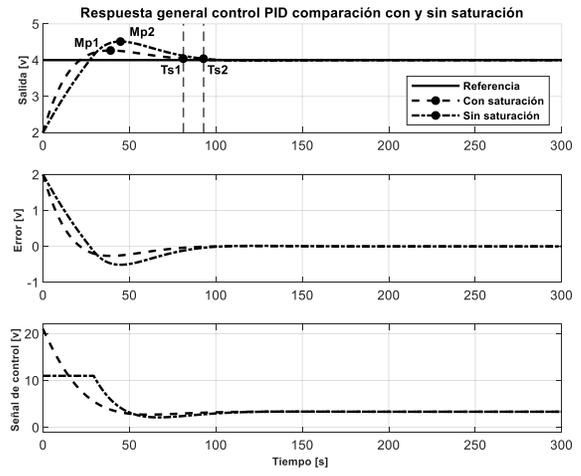


Fig. 20. Respuesta general control PID comparación con y sin saturación.

TABLA 14

Parámetros respuesta general control PID comparación con y sin saturación.

Saturación	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
Con	81.2s	0%	13.23%
Sin	92.9s	0%	25.57%

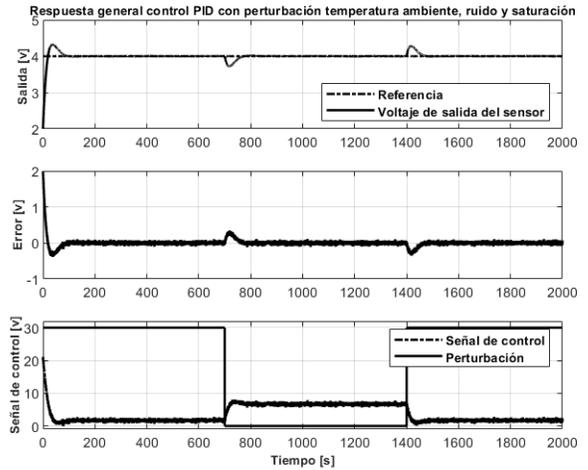


Fig. 21. Respuesta general control PID con perturbación temperatura ambiente, ruido y saturación.

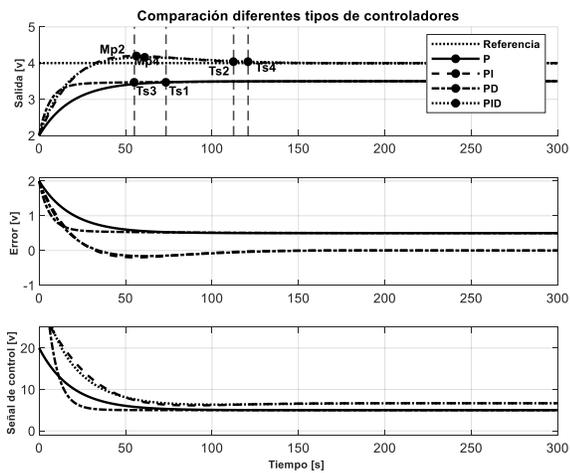


Fig. 22. Comparación diferentes tipos de controladores.

TABLA 15

Parámetros comparación diferentes tipos de controladores.

Controlador	Tiempo de estabilización	Error de estado estable	Máximo sobre impulso
P	73.4s	25%	0%
PI	112.5s	0%	9.83%
PD	55.1s	25.03%	0%
PID	120.9s	0	7.97%

IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Analizando las gráficas y los cálculos que se aprecian en las gráficas se presentan las siguientes características de los controladores.

TABLA 16

Análisis del comportamiento de los controladores

Característica	P	I	PD	PI	PID
Error de estado estable	Mantiene	Elimina	Mantiene	Elimina	Elimina
Tiempo de subida	Lento	Muy lento	Rápido	Rápido	Rápido
Perturbación Ruido	Amplifica	Elimina	Amplifica un poco	Amplifica	Amplifica un poco
Perturbación cambio de temperatura (velocidad de respuesta)	Lento	Rápido	Lento	Rápido	Muy rápido
Estabilidad	Estable	Inestable	Estable	Un poco inestable	Estable
Saturación	Con: menor tiempo de subida	Con: lento y estable Sin: oscilatorio y lento	Con: menor tiempo de subida	Con: menor tiempo de subida, menor sobre impulso	Con: menor tiempo de subida, menor sobre impulso
Aumentando Kp	Reduce error de estado estable, menor tiempo de subida, Saturación		Reduce error de estado estable, menor tiempo de subida, Saturación	Aumenta sobre impulso, disminuye tiempo de estabilización, saturación	Aumenta sobre impulso, disminuye tiempo de estabilización, saturación

	excesiva del controlador		n excesiva del controlador	del controlador	del controlador
Aumentando Ki		Aumenta sobre impulso, reduce tiempo de estabilización		Aumenta sobre impulso, disminuye tiempo de estabilización.	Aumenta sobre impulso, disminuye tiempo de estabilización.
Aumentando Kd			Menor tiempo de subida, aumenta saturación del controlador		Disminuye sobre impulso, Aumenta saturación del controlador, aumenta tiempo estabilización

Controlador P:

La principal aplicación del controlador proporcional es disminuir el error de estado estable. Aumentar Kp disminuye el tiempo de subida y proporciona una mayor sensibilidad al ruido porque lo amplifica directamente incrementando el porcentaje de sobre impulso y el número de oscilaciones. Aumentar Kp disminuye el error de estado estable pero no llega a cero.

Controlador I:

El controlador es muy lento, comienza a ser eficiente después de un tiempo. Elimina el error de estado estable.

Controlador PI:

El controlador PI elimina el error de estado estacionario, pero no tiene buen rendimiento respecto a la respuesta transitoria, la velocidad de respuesta y estabilidad general del sistema. El incremento de la acción integral aumenta la oscilación en la respuesta del sistema. El controlador PI es apto en sistemas donde la velocidad no es importante.

Controlador PD:

El control PD aumenta la estabilidad del sistema mejorando el control ya que tiene la capacidad de predecir el error futuro de la respuesta del sistema. La acción derivativa mejora la respuesta transitoria disminuyendo el tiempo de subida y las oscilaciones, pero no elimina el error de estado estable.

Controlador PID:

El control PID combina todas las ventajas de las acciones de control: tiene error de estado estable cero, tiempo de subida corto, sin oscilaciones y buena estabilidad.

La ganancia derivativa elimina el sobre impulso, las oscilaciones, compensa el retraso de fase que causa la integración y tiene un excelente comportamiento frente a perturbaciones.

Se concluyen los efectos de las acciones básicas de control:

Proporcional: P

La ganancia proporcional reduce el tiempo de subida y disminuye el error de estado estable, pero no lo elimina. Hace al sistema más oscilatorio.

Integral: I

La ganancia integral elimina el error de estado estable pero afecta la respuesta transitoria. Aumentar K_i reduce un poco el tiempo de subida, pero desde cierto punto solo aumentara el sobre impulso.

Derivativo: D

La ganancia derivativa tiende a aumentar la estabilización, disminuye el sobre impulso y mejora la respuesta transitoria del sistema.

TABLA 17

Efectos de la sintonización independiente de P, I y D en la respuesta de bucle cerrado

Ganancia	Tiempo de subida	sobre impulso	Tiempo de estabilización	Error de estado estacionario	Estabilidad
Incrementar K_p	disminuye	Aumenta	Pequeño aumento	Disminuye	Degrada
Incrementar K_i	Pequeña disminución	Aumenta	Aumenta	Gran disminución	Degrada
Incrementar K_d	Pequeña disminución	disminuye	disminuye	Cambio menor	Mejora

La habilidad para combinar estos parámetros hará que el sistema sea eficiente y estable teniendo en cuenta que son interdependientes por lo tanto la modificación de uno puede cambiar el comportamiento de los otros dos.

V. CONCLUSIONES

- ✓ Matlab/Simulink es un software que utilizado para la simulación de sistemas de control facilita el análisis y comprensión de las características de las acciones básicas de control.
- ✓ Basado en la simulación se entiende el comportamiento de cada controlador y el efecto generado por la manipulación de cada acción de control. Dichos conocimientos se pueden aplicar en casos reales de sintonización de controladores.
- ✓ Como principales características el control proporcional reduce el tiempo de subida y disminuye el error de estado estable, el control integral elimina el error de estado estable y el control derivativo tiende a aumentar la estabilización, disminuye el sobre impulso y mejora la respuesta transitoria del sistema.
- ✓ La aplicación del control PID en la industria es esencial, haciendo un uso de correcto de cada una de las acciones de control se puede obtener una

sintonización apropiada que optimiza el rendimiento en los procesos productivos

REFERENCIAS

- [1] K. J. Astrom and R. M. Murray, "Feedback Systems," *Encycl. Stress*, pp. 293–313, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-012373947-6.00158-6>.
- [2] G. H. Farrington, "Theoretical foundations of process control," *J. Inst. Electr. Eng. - Part IIA Autom. Regul. Servo Mech.*, vol. 94, no. 1, pp. 23–34, May 1947, doi: <https://doi.org/10.1049/ji-2a.1947.0005>.
- [3] K. H. Ang, G. Chong, and Y. Li, "PID control system analysis, design, and technology," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 13, no. 4, pp. 559–576, 2005, doi: <https://doi.org/10.1109/TCST.2005.847331>.
- [4] S. Temel, S. Yagli, and S. Gören, "P, Pd, Pi, Pid Controllers," pp. 1–63, 2012.
- [5] Mauricio Amestegui Moreno, "Apuntes de control pid," *Univ. MAYOR SAN ANDRES LA PAZ – Boliv.*, pp. 10–22, 2001.
- [6] "Diseño De Sistemas de control," pp. 1–30, [Online]. Available: http://isa.uniovi.es/docencia/ra_marina/UCLM_TEM A11.PDF.
- [7] Jean F. Dulhoste, "Teoria de control," pp. 129–134, 2006, [Online]. Available: <https://docplayer.es/14883071-Teoria-de-control-prof-jean-f-dulhoste.html>.
- [8] B. Kuo, "sistemas De Control Automático," pp. 664–713, 2010.
- [9] K. Ogata, "Ingenieria de control moderna," pp. 211–228, 1998.
- [10] K. J. Åström and T. Hägglund, "PID controllers: theory, design, and tuning," pp. 59–270, 1995.
- [11] K. J. Åström and T. Hägglund, "Control PID avanzado," pp. 1–282, 2005, [Online]. Available: https://www.academia.edu/33825646/Control_PID_avanzado_-_1ed.
- [12] W. Bolton, "Mecatronica," pp. 333–355.
- [13] Walter J. D. Cova, "Summary for Policymakers," *Clim. Chang. 2013 - Phys. Sci. Basis*, pp. 1–30, 2005, doi: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- [14] K. J. Åström, C. J. Hang, and P. Persson, "Towards intelligent PID control," *Annu. Rev. Autom. Program.*, vol. 15, no. PART 2, pp. 53–58, Jan. 1989, doi: [https://doi.org/10.1016/0066-4138\(89\)90010-4](https://doi.org/10.1016/0066-4138(89)90010-4).
- [15] J. M. Jacob, "Industrial Control Electronics," pp. 279–324, 1989.
- [16] R. H. Gavino, "Introduccion a los sistemas de control," pp. 361–387, 2010.
- [17] W. Bolton, "Ingeniería de control," *Dyna*, pp. 225–249, 2002.
- [18] A. O'Dwyer, "Handbook of PI and PID controller tuning rules," *Eur. J. Haematol.*, pp. 290–295, 2009, doi: <https://doi.org/10.1142/p575>.
- [19] K. J. Astrom and B. Wittenmark, "Computer Controlled Systems: Theory and Design," *Int. J.*

- Electr. Eng. Educ.*, pp. 293–368, 1996, doi: <https://doi.org/10.1177/002072098602300430>.
- [20] C. Bohn and D. P. Atherton, “An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies,” *IEEE Control Syst.*, pp. 34–40, 1995, doi: <https://doi.org/10.1109/37.375281>.
- [21] B. Kristiansson and B. Lennartson, “Robust and optimal tuning of PI and PID controllers,” *IEE Proc. Control Theory Appl.*, vol. 149, no. 1, pp. 17–25, 2002, doi: <https://doi.org/10.1049/ip-cta:20020088>.
- [22] K. J. Åström and T. Hägglund, “The future of PID control,” *Control Eng. Pract.*, vol. 9, no. 11, pp. 1163–1175, 2001, doi: [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00062-4](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00062-4).
- [23] K. J. Åström and B. Pid, “Advances in PID Control,” 2000, pp. 1–8.
- [24] V. M. Alfaro Ruíz, “Métodos De Sintonización De Controladores Pid Que Operan Como Reguladores,” *Rev. Ing.*, vol. 12, no. 1–2, pp. 21–36, 2011, doi: <https://doi.org/10.15517/RING.V12I1-2.6430>.
- [25] R. Vilanov and V. M. Alfaro, “control PID robusto: Una visión panorámica,” *RIAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 8, no. 3, pp. 141–158, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.riai.2011.06.003>.
- [26] B. Doicin, M. Popescu, and C. Patrascioiu, “PID controller optimal tuning,” *Proc. 8th Int. Conf. Electron. Comput. Artif. Intell. ECAI 2016*, pp. 49–52, 2016, doi: <https://doi.org/10.1109/ECAI.2016.7861175>.
- [27] K. J. Astrom and B. Wittenmark, “Adaptive Control,” pp. 328–341.
- [28] R. C. Dorf and R. H. Bishop, “Modern control systems,” *Mod. Control Eng.*, pp. 984–1023, 2019.
- [29] K. Ogata, “Ingeniería de control moderna,” *Ingenio y Concienc. Boletín Científico la Esc. Super. Ciudad Sahagún*, pp. 567–591, 2010.
- [30] G. C. Goodwin, S. F. Graebe, and M. E. Salgado, “Control System Design,” *IEEE Control Syst.*, pp. 157–191, 2000, doi: <https://doi.org/10.1109/MCS.2007.284513>.
- [31] C.-T. Chen, “Analog & Digital Control Systems Design Transfer-function, State-space, & Algebraic Methods,” pp. 551–563, 1993.
- [32] S. E. LeBlanc and D. R. Coughanowr, “Process systems analysis and control third edition,” pp. 391–401, 2009, [Online]. Available: https://www.academia.edu/33416215/Process_Systems_Analysis_and_Control_Donald_R_Coughanowr_3rd.
- [33] F. Aslam and G. Kaur, “Comparative Analysis of Conventional, P, PI, PID and Fuzzy Logic Controllers for the Efficient Control of Concentration in CSTR,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 17, no. 6, pp. 12–16, Mar. 2011, doi: <https://doi.org/10.5120/2226-2836>.
- [34] M. B. Bayram, H. I. Bülbül, C. Can, and R. Bayindir, “Matlab/GUI based basic design principles of PID controller in AVR,” *Int. Conf. Power Eng. Energy Electr. Drives*, no. May, pp. 1017–1022, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/PowerEng.2013.6635750>.
- [35] L. Ying, “The Simulation Design of PID Control Based on LabVIEW and MATLAB,” *2018 Int. Symp. Sens. Instrum. IoT Era, ISSI 2018*, pp. 1–8, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/ISSI.2018.8538212>.
- [36] M. Saeki and A. Takahashi, “Parameter space PID design based on simulation and its application,” *IEEE Conf. Decis. Control. Eur. Control Conf. 2005 Seville, Spain*, pp. 7241–7246, 2005, doi: <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1583329>.
- [37] A. M. Hawas, F. O. Hareb, and A. R. Zerek, “System Performance Effected by PID Controller Invesitgation and Simulation,” *Int. Conf. Electr. Eng. Autom. Control*, no. November, pp. 1–5, 2013, [Online]. Available: https://www.academia.edu/13517451/System_Performance_Effected_by_PID_Controller_Invesitgation_and_Simulation.
- [38] J. Alexander, R. Urrego, N. Ligia, and P. Restrepo, “Aplicación de diseño, simulación, identificación de sistemas e implementación de controladores PID - Digitrol,” *Rev. Politécnica*, vol. 12, no. 23, pp. 27–35, 2016, doi: <https://doi.org/10.33571/rpolitec>.
- [39] J. M. Zamarréño, M. J. Fuente, and L. F. Acebes, “Desarrollo de un controlador PID accesible como servidor OPC,” *XXXVI Jornadas de Automática*, vol. 100, no. 1, pp. 997–1000, 2015, [Online]. Available: <https://bit.ly/38LOvDI>.
- [40] L. H. Berrio and E. Gómez, “Modelo de un prototipo a escala y diseño de un control de temperatura en simulación y en un microcontrolador dsPpic usando espacio de estados,” *Ing. Solidar.*, vol. 12, no. 19, pp. 49–61, 2016, doi: <https://doi.org/10.16925/in.v12i19.1193>.
- [41] Sundayani *et al.*, “PID temperature controlling of thermoelectric based cool box,” *ICCREC 2017 - 2017 Int. Conf. Control. Electron. Renew. Energy, Commun. Proc.*, vol. 2017-Janua, pp. 236–240, 2017, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCREC.2017.8226671>.
- [42] D. M. Ovalle M and L. F. Cómbita A., “Teaching basic control concepts with a home-made thermal system,” *IEEE Glob. Eng. Educ. Conf. EDUCON*, no. April, pp. 739–744, 2014, doi: <https://doi.org/10.1109/EDUCON.2014.6826176>.
- [43] K. K. D. R. Lx *et al.*, “Study on Fuel Oil Temperature PID Control System and Simulation,” pp. 2897–2900, 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/CECNet.2012.6202133>.
- [44] T. Li and H. Zhu, “Research of predictive PID algorithm Simulation in drawing roller temperature control,” *Proc. 2018 Chinese Autom. Congr. CAC 2018*, pp. 401–405, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/CAC.2018.8623444>.
- [45] A. Trojnar and P. Ostalczyk, “Simulation of the fuel gas valve PID controller in closed loop system,” *2018 Int. Interdiscip. PhD Work. IIPhDW 2018*, no. 501, pp. 13–16, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/IIPHDW.2018.8388235>.
- [46] Q. Yang and H. Dai, “Flow simulation analysis of EEV-CAT system based on PID control algorithm,” *2011 Int. Conf. Electron. Commun. Control. ICECC 2011 - Proc.*, pp. 1468–1471, 2011, doi:

- <https://doi.org/10.1109/ICECC.2011.6067876>.
- [47] M. Kathamuthu, G. Balasubramanian, and K. Ramkumar, "Dc motor speed control using PID controller," in *International Journal of Applied Engineering Research*, 2015, vol. 10, no. 11, pp. 2–6, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/310416585_DC_MOTOR_SPEED_CONTROL_USING_PID_CONTROLLER.
- [48] A. P. Singh, U. Narayan, and A. Verma, "Speed Control of DC Motor using Pid Controller Based on Matlab," *Innov. Syst. Des. Eng.*, vol. 4, no. 6, pp. 22–28, 2013, [Online]. Available: <http://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/view/6018>.
- [49] R. K. Munje, P. P. Shinde, and S. S. Kale, "Performance comparison of PI/PID controllers for DC motor," *11th IEEE India Conf. Emerg. Trends Innov. Technol. INDICON 2014*, pp. 1–3, 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/INDICON.2014.7030359>.
- [50] J. U. Castellanos, "Experimentación del hardware de control para un seguidor solar," *Ing. Solidar.*, vol. 7, no. 13, pp. 53–60, 2013.
- [51] G. Huang and S. Lee, "PC-based PID speed control in DC motor," *ICALIP 2008 - 2008 Int. Conf. Audio, Lang. Image Process. Proc.*, pp. 400–407, 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/ICALIP.2008.4590052>.
- [52] O. J. Oguntoyinbo, "Pid Control of Brushless Dc Motor and Robot Trajectory Planning and Simulation With Matlab/Simulink," pp. 32–74, 2009, [Online]. Available: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-200912107630>.
- [53] R. K. Achanta and V. K. Pamula, "DC motor speed control using PID controller tuned by jaya optimization algorithm," *IEEE Int. Conf. Power, Control. Signals Instrum. Eng. ICPCSI 2017*, pp. 983–987, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/ICPCSI.2017.8391856>.
- [54] E. C. Miguel and C. A. G. Gutiérrez, "IMPLEMENTACIÓN Y CO-SIMULACIÓN DE UN CONTROLADOR PID EN TIEMPO REAL CON FPGA DE BAJO COSTO Y CÓDIGO LIBRE IMPLEMENTATION AND CO-SIMULATION OF PID CONTROLLER Resumen," vol. 40, no. 130, pp. 1567–1581, 2018, [Online]. Available: <https://www.semanticscholar.org/paper/IMPLEMENTACIÓN-Y-CO-SIMULACIÓN-DE-UN-CONTROLADOR-EN-Miguel-Reséndiz/20665e77180705d25f9889bb66173647732b2c49#references>.
- [55] D. Feng, L. Yan, L. Xu, and W. Li, "Implement of digital PID controller based on FPGA and the system co-simulation," *Proc. - 2011 Int. Conf. Instrumentation, Meas. Comput. Commun. Control. IMCCC 2011*, pp. 921–924, 2011, doi: <https://doi.org/10.1109/IMCCC.2011.232>.
- [56] O. A. Trujillo, F. E. Hoyos, and N. Toro, "Design , Simulation and Experiment of a PID Using Rapid Control Prototyping Techniques," *VI Simp. Int. sobre Calid. la Energía Eléctrica SICEL 2011*, pp. 1–8, 2011, [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/254560830_Design_Simulation_and_Experiment_of_a_PID_Using_Rapid_Control_Prototyping_Techniques.
- [57] Q. Guo and D. Jiang, "Moving process PID control in robots' field," *Proc. - 2012 Int. Conf. Control Eng. Commun. Technol. ICCECT 2012*, pp. 386–389, 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCECT.2012.108>.
- [58] M. E. ANAYA PÉREZ, V. H. BENÍTEZ BALTAZAR, and J. H. PACHECO RAMÍREZ, "Diseño de Controladores P, PI y PID para el Comportamiento Dinámico de una Servo-Sistema Hidráulico, Basado en el Desarrollo Experimental," *Epistemus*, no. 2007–4530, pp. 13–21, 2007, [Online]. Available: <https://investigadores.unison.mx/en/publications/diseño-de-controladores-p-pi-y-pid-para-el-comportamiento-dinámico-2>.
- [59] J. J. Wang, "Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers," *Simul. Model. Pract. Theory*, vol. 19, no. 1, pp. 440–449, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.08.003>.
- [60] V. Praveen and A. S. Pillai, "Modeling and simulation of quadcopter using PID controller," *Int. J. Control Theory Appl.*, vol. 9, no. 15, pp. 7151–7158, 2016, [Online]. Available: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85006054887&partnerID=40&md5=be399a3df60cf168b4ed59a943e20341>.
- [61] Z. Zhang, "Application of PID Simulation Control Mode in Quadrotor Aircraft," *Proc. - 2020 Int. Conf. Comput. Eng. Appl. ICCEA 2020*, pp. 826–829, 2020, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCEA50009.2020.00181>.
- [62] K. D. Rao, "Modeling, simulation and control of semi active suspension system for automobiles under MATLAB Simulink using PID controller," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 3, no. PART 1, pp. 827–831, 2014, doi: <https://doi.org/10.3182/20140313-3-IN-3024.00094>.
- [63] D. Hanafi, "PID controller design for semi-active car suspension based on model from intelligent system identification," *2010 2nd Int. Conf. Comput. Eng. Appl. ICCEA 2010*, vol. 2, no. 3, pp. 60–63, 2010, doi: <https://doi.org/10.1109/ICCEA.2010.168>.
- [64] X. Chen, M. Hu, and Q. Guan, "Modeling and simulation of vehicle braking system based on PID control," *Proc. IEEE Int. Conf. Softw. Eng. Serv. Sci. ICSESS*, vol. 2019-Octob, pp. 654–657, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/ICSESS47205.2019.9040743>.
- [65] Y. Nianjiong, "Research on air suspension system based on PID control," *Proc. - 2013 5th Int. Conf. Intell. Human-Machine Syst. Cybern. IHMSC 2013*, vol. 2, pp. 106–109, 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/IHMSC.2013.172>.
- [66] Q. Fu, L. Zhao, M. Cai, M. Cheng, and X. Sun, "Simulation research for quarter vehicle ABS on complex surface based on PID control," *2012 2nd Int. Conf. Consum. Electron. Commun. Networks, CECNet*

- 2012 - *Proc.*, pp. 2072–2075, 2012, doi: <https://doi.org/10.1109/CECNet.2012.6201828>.
- [67] B. Wittenmark, K. J. Åström, and K.-E. Årzén, “Computer Control: An Overview,” *IFAC Prof. Br.*, no. December 2014, pp. 1–82, 2002.
- [68] J. L. Guzmán, K. J. Åström, S. Dormido, T. Häggglund, and Y. Pigué, “Interactive learning modules for PID control,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 7, no. PART 1, pp. 7–12, 2006, doi: <https://doi.org/10.3182/20060621-3-ES-2905.00003>.
- [69] N. D. BERNARDES, “Implementação do PID fracionário com filtro de Kalman em um robô móvel diferencial,” pp. 1–94, 2017, [Online]. Available: <https://repositorio.ifes.edu.br/handle/123456789/409>.
- [70] S. Wakitani, H. Nakanishi, Y. Ashida, and T. Yamamoto, “Study on a Kalman Filter based PID Controller,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 422–425, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.131>.
- [71] K. S. Tang, K. F. Man, G. Chen, and S. Kwong, “An optimal fuzzy PID controller,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 48, no. 4, pp. 757–765, 2001, doi: <https://doi.org/10.1109/41.937407>.
- [72] T. Y. Wang and C. Der Chang, “Hybrid Fuzzy PID Controller Design for a Mobile Robot,” *Proc. 4th IEEE Int. Conf. Appl. Syst. Innov. 2018, ICASI 2018*, no. 1, pp. 650–653, 2018, doi: <https://doi.org/10.1109/ICASI.2018.8394340>.
- [73] N. M. G. Paulino, M. Foo, J. Kim, and D. G. Bates, “PID and State Feedback Controllers Using DNA Strand Displacement Reactions,” *IEEE Control Syst. Lett.*, vol. 3, no. 4, pp. 805–810, 2019, doi: <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2019.2918977>.
- [74] Z. Lei and Y. Zhou, “A kind of nonlinear PID controller for Refrigeration Systems based on Vapour Compression,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 716–721, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.188>.
- [75] R. Cajo, S. Zhao, C. M. Ionescu, R. De Keyser, D. Plaza, and S. Liu, “IMC based PID Control Applied to the Benchmark PID18,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 728–732, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.06.210>.
- [76] D. E. R. Flores, “A methodology for integrated system identification with IMC-PID controller design,” *RLAI - Rev. Iberoam. Autom. e Inform. Ind.*, vol. 4, no. 4, pp. 5–18, 2007, doi: [https://doi.org/10.1016/s1697-7912\(07\)70240-6](https://doi.org/10.1016/s1697-7912(07)70240-6).
- [77] I. Chien, “IMC-PID CONTROLLER DESIGN - EXTENSION I-Lung Chien,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 21, no. 7, pp. 147–152, 1988, doi: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)53816-1](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)53816-1).
- [78] J. D. Nieto Duran, L. F. Santos Quintero, L. J. Vargas Escobar, and S. A. Salinas, “Geolocalización para pacientes con alzhéimer: una propuesta,” *Visión Electrónica*, vol. 11, no. 1, pp. 40–44, jun. 2017. <https://doi.org/10.14483/22484728.12791>
- [79] K. Duarte Barón and C. Borrás Pinilla, “Generalidades de robots paralelos,” *Visión electrónica*, vol. 10, no. 1, pp. 102–112, jun. 2016. <https://doi.org/10.14483/22484728.11711>
- [80] C. H. Caicedo and A. Smida, “Intensidad informacional para la longitudinalidad asistencial en sistemas de salud,” *Visión electrónica*, vol. 10, no. 1, pp. 83–95, jun. 2016. <https://doi.org/10.14483/22484728.11612>
- [81] Óscar I. Montiel, M. A. Ayala, and L. Ripoll, “Diseño y simulación de antena no resonante: guía de onda de ranuras para 30 GHz,” *Visión electrónica*, vol. 10, no. 1, pp. 49–56, jun. 2016. <https://doi.org/10.14483/22484728.11611>
- [82] J. C. Briñez de León, H. A. Fandiño Toro, A. Restrepo Martínez, and J. W. Branch Bedoya, “Análisis de resolución en imágenes de fotoelasticidad: caso carga dinámica,” *Visión electrónica*, vol. 11, no. 1, pp. 69–75, jun. 2017. <https://doi.org/10.14483/22484728.12789>
- [83] J. F. Herrera-Cubides, P. A. Gaona-García, C. E. Montenegro-Marín, S. Sánchez-Alonso, and D. Martín-Moncunill, “Abstraction of linked data’s world,” *Visión electrónica*, vol. 13, no. 1, pp. 57–74, feb. 2019. <https://doi.org/10.14483/22484728.14397>
- [84] T. Salamanca, “Prototipo para monitorización de signos vitales en espacios confinados,” *Visión electrónica*, vol. 12, no. 1, pp. 83–88, may 2018. <https://doi.org/10.14483/22484728.13401>
- [85] A. Angulo, F. Martínez, and G. López, “Almacenamiento de energía usando ultracondensadores en sistemas fotovoltaicos autónomos,” *Visión electrónica*, vol. 11, no. 1, pp. 30–39, jun. 2017. <https://doi.org/10.14483/22484728.12875>
- [86] A. C. Lemus Pinto, C. A. Garzón Sogamoso, and G. M. Tarazona Bermúdez, “TIC en gestión de la cadena de suministro bogotana,” *Visión electrónica*, vol. 10, no. 2, pp. 195–202, dic. 2016. <https://doi.org/10.14483/22484728.11653>
- [87] G. López Martínez, C. Buriticá Arboleda, and E. Silva Lora, “La biomasa residual pecuaria como recurso energético en Colombia,” *Visión electrónica*, vol. 12, no. 2, pp. 180–188, nov. 2018. <https://doi.org/10.14483/22484728.14066>