

# **Desarrollo De Un Sistema Portátil Emulador De Dinámicas De Procesos De Primer Y Segundo Orden Integrado Con Sistemas De Control Clásico, Para El Programa De Ingeniería Mecatrónica De La Sede Villa Del Rosario**

*Desarrollo De Un Sistema Portátil Emulador De Dinámicas De Procesos De Primer Y Segundo Orden Integrado Con Sistemas De Control Clásico, Para El Programa De Ingeniería Mecatrónica De La Sede Villa Del Rosario*

**Brayan David Castro Barbosa** <sup>1\*</sup>   
Universidad de Pamplona

**MSc. Oscar Manuel Duque Suarez** <sup>2</sup>   
SENA, SENNOVA

© 2021 Universidad de Córdoba. Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la licencia Creative Commons Attribution License, que permite el uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que el autor original y la fuente se acreditan.

---

<sup>1</sup> Universidad de Pamplona, Facultad de Ingenierías y Arquitectura, Programa Ingeniería Mecatrónica. Villa del Rosario, Norte de Santander, Colombia.  
Celular: +573193794536 E-mail: brayan.castro2@unipamplona.edu.co.

<sup>2</sup> Ingeniero de Sistemas Unipamplona, Fuerza Aérea Colombiana, Bogota, Colombia, Correo: joseph.sequeda@fac.mil.co ORCID <https://orcid.org/0000-0002-6550-4117>

## RESUMEN

El presente trabajo hace referencia al desarrollo de un dispositivo portable, que emula diferentes tipos de sistemas dinámicos de primer y segundo orden ya que permite el ajuste de sus parámetros, se pueden realizar los procesos tanto de identificación del sistema como de implementación de su correspondiente controlador, debido a que integra guía y manual de usuario para ejecutar dichos procesos, este dispositivo sirve como herramienta para mejorar las prácticas de laboratorio relacionadas al control industrial. Dispone de una interfaz gráfica que consta de 2 pantallas donde se visualizan las señales del proceso (entrada, perturbación, control y salida) y se configuran los parámetros para su funcionamiento.

**PALABRAS CLAVE:** Emulador de sistemas dinámicos, Sintonización de controlador, Identificación de sistemas dinámicos, Amplificadores operacionales.

## ABSTRACT

This work refers to the development of a portable device, which emulates different types of dynamic systems of first and second order as it allows the adjustment of its parameters, the processes of both system identification and implementation of its corresponding controller can be performed, because it integrates guide and user manual to run these processes, this device serves as a tool to improve laboratory practices related to industrial control. It has a graphic interface consisting of 2 screens where the process signals (input, disturbance, control and output) are visualized and the parameters for its operation are configured.

**KEYWORDS:** Dynamic system emulator, Controller tuning, Dynamic system identification, Operational amplifiers.

## INTRODUCTION

Debido al gran avance tecnológico, brinda la posibilidad de crear herramientas de gran utilidad, tanto para los procesos industriales como para el desarrollo de dispositivos que sirven para el fortalecimiento de prácticas que pueden ser llevadas a cabo en ámbitos educativos. Este proyecto plantea brindar la integración de dos procesos fundamentales para las prácticas en control industrial como los son la identificación de sistemas de primer y segundo orden y la sintonización de su correspondiente controlador, para ello se estudió la configuración PID de trabajos como el de Alvarado y Numpaque, 2014.

## 1. IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DINÁMICOS.

En el proceso de identificación de los sistemas dinámicos de primer orden, se dispone de los siguientes métodos. (Bayona & Ricon, 2020).

### 1.1. *Identificación sistemas primer orden.*

En el trabajo presentado por (Instituto Tecnológico Metropolitano, 2017), se pueden obtener métodos de identificación de los sistemas de primer orden que se tuvieron en cuenta para este trabajo, como el de recta de la

tangente Figura 1. y el método de dos puntos general Figura 2.

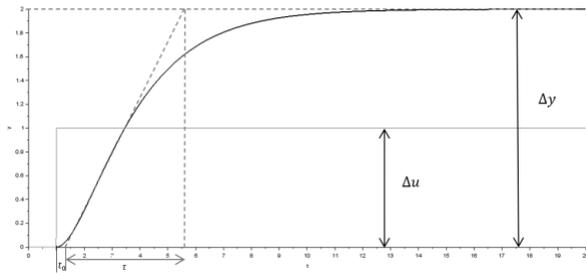


Figura 1. Método identificación recta de la tangente.

Se selecciona el método de dos puntos general, por su simplicidad en el proceso de identificación con este dispositivo, A causa de que el método de la tangente requiere graficar una recta tangente al punto de inflexión de la salida del sistema. (Berdugo, Duarte & Fernández. 2020).

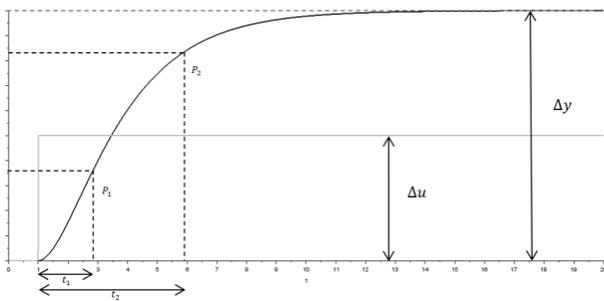


Figura 2. Identificación dos puntos en general.

El método de dos puntos general (Alfaro, 2001) se aplica con las constantes de la Tabla 1, la Ecuación (1) para hallar la constante de tiempo y la Ecuación (2) para calcular el tiempo muerto.

Tabla 1. Constantes para la identificación de los modelos de primer orden más tiempo muerto.

Método	%p1	%p2	a	b	c	d
Alfaro	25.0	75.0	- 0.91	0.91	1.26	- 0.26
Bröida	28.0	40.0	-5.5	5.5	2.8	-1.8
Cheng y	33.0	67.0	1.4	1.4	1.54	-

Yang						0.54
Ho et al	35.0	85.0	- 0.67	0.67	1.3	- 0.29
Smith	28.3	63.2	-1.5	1.5	1.5	-0.5
Vitecko va et al.	33.0	70.0	- 1.24	1.24	1.49	- 0.49

$$\tau = a t_1 + b t_2 \tag{1}$$

$$t_o = c t_1 + d t_2 \tag{2}$$

## 1.2. Identificación sistemas de segundo orden.

En cuanto a la identificación de los sistemas de segundo orden, se encuentran varios métodos, como los presentados a continuación.

### 1.2.1. Sistemas sub amortiguados.

Según (FACET UNT, 2016). Para los sistemas subamortiguados, se puede identificar por medio de los dos máximos sobre impulsos y el periodo de oscilación Figura 3.

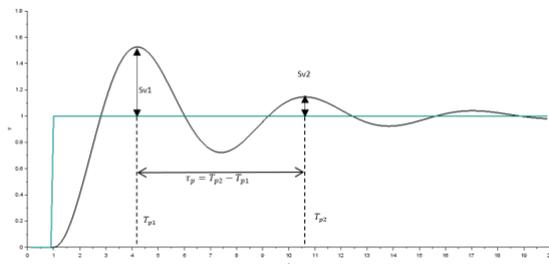


Figura 3. Identificación sistemas subamortiguados.

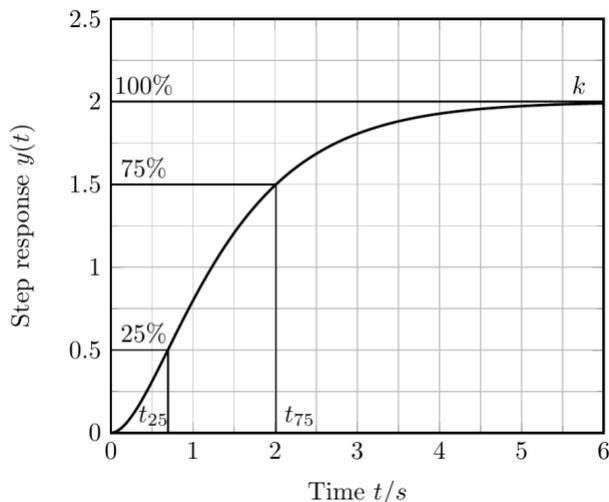
$$\zeta = \frac{\ln(S_{v1})}{\sqrt{\ln(S_{v1})^2 + \pi^2}} \tag{3}$$

$$W_n = \frac{W_d}{\tau_p(\sqrt{1 - \zeta^2})} \tag{4}$$

Con este método se halla el factor de amortiguamiento con la Ecuación (3) y la frecuencia natural con la Ecuación (4).

### 1.2.2. Sistemas sobre amortiguados

Con respecto a los sistemas sobre amortiguados se halló un trabajo realizado por (Weingaunity, 2018), con muy buena precisión al momento de identificar sistemas sobre amortiguados. Este fue realizado por tratamiento de datos experimentales. Consiste en identificar los puntos en el 25% y el 75% de la salida. (Rosado & Verjel. 2020).



**Figura 4.** Identificación sistemas sobre amortiguados método tratamiento de datos.

En este método halla primero la fracción entre los dos tiempos, como en la Ecuación (5).

$$r = \frac{t_{25}}{t_{75}} \quad (5)$$

El punto de la Ecuación (5), se reemplaza en la Ecuación (6) y Ecuación (7).

$$P = -18.56075r + \frac{0.57311}{r - 0.20747} + 4.16423 \quad (6)$$

$$X = 14.2797r^3 - 9.3891r^2 + 0.25437r + 1.32148 \quad (7)$$

Los puntos hallados en la Ecuación (6) y Ecuación (7), se utilizan para hallar uno de los puntos necesarios para la identificación del sistema Ecuación (8).

$$T2 = \frac{t_{75} - t_{25}}{X \left(1 + \frac{1}{P}\right)} \quad (8)$$

Se reemplaza el valor de la Ecuación (8) en la Ecuación (9).

$$T1 = \frac{T2}{P} \quad (9)$$

Finalmente, con los puntos de la Ecuación (8) y Ecuación (9), se hallan los parámetros que representan al sistema de segundo orden sobre amortiguado. El factor de amortiguamiento con la Ecuación (10) y la frecuencia natural con la Ecuación (11).

$$\zeta = \frac{T_1 + T_2}{2T_1T_2} * \sqrt{T_1T_2} \quad (10)$$

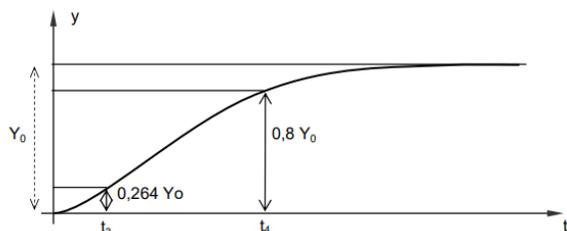
$$W_n = \frac{1}{\sqrt{T_1T_2}} \quad (11)$$

En cambio, para algunos comportamientos se complica un poco más la identificación de los sobre impulsos, En un trabajo presentado por (Rivero, 2008), clasifica los sistemas por medio de su similitud en el comportamiento.

- Sistemas oscilantes con sobre picos significativos ( $\zeta < 0.5$ ).

- Sistemas sin sobre picos o de poco valor ( $0.5 < \zeta < 2$ ).
- Sistemas sobre amortiguados ( $\zeta > 2$ ).

Utilizando el segundo método, por la complejidad de identificar algunos sistemas subamortiguados Figura 5.



**Figura 5.** Identificación sistemas sobre amortiguados sin sobre pico o poco valor.

Para la identificación de los parámetros se requiere la Tabla 2.

**Tabla 2.** Identificación sistema con factor de amortiguamiento entre 0.5 y 2.

$t_4/t_3$	$\zeta$	$\omega_n t_4$
2,21	0,5	1,89
2,33	0,6	2,05
2,46	0,7	2,24
2,62	0,8	2,46
2,80	0,9	2,71
2,90	0,95	2,85
3,00	1	3,00
3,13	1,05	3,19
3,20	1,1	3,31
3,37	1,2	3,63
3,57	1,3	3,96
3,72	1,4	4,30
3,90	1,5	4,64
4,04	1,6	4,97
4,15	1,7	5,30
4,25	1,8	5,63
4,35	1,9	5,97
4,43	2	6,3

El factor de amortiguamiento se halla por medio de la fracción entre los tiempos  $t_4$  y  $t_3$ , la frecuencia natural se calcula con la Ecuación (12).

$$W_n = \frac{W_n t_4}{t_4} \tag{12}$$

## 2. SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES.

En el caso de la sintonización de controladores para sistemas de primer orden se disponen de los controladores PID junto con el controlador por síntesis directa y en cambio para los sistemas de segundo orden solo se establece el controlador por síntesis directa. (Acevedo, Mendoza & Sepúlveda 2020)

### 2.1. Controlador PID por Ziegler-Nichols.

Este método es aplicable solo para funciones de primer orden con tiempo muerto o para aproximar funciones de segundo orden sobre amortiguadas.

**Tabla 3.** Parámetros sintonización controlador PID por Ziegler- Nichols.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{K t_o}$	-	-
PI	$0.9 \frac{\tau}{K t_o}$	$3 t_o$	-
PID	$1.2 \frac{\tau}{K t_o}$	$2 t_o$	$0.5 t_o$

### 2.2. Controlador PID por Cohen Coon.

Tiene el mismo criterio y procedimiento que el método Ziegler-Nichols variando cada una de las constantes del controlador. Requiere de más representación matemática lo que da a entender que es más precisa.

**Tabla 4.** Parámetros sintonización controlador PID por Cohen Coon.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{\tau}{K t_o} \left( 1 + \frac{t_o}{3\tau} \right)$	-	-
PI	$\frac{\tau}{K t_o} \left( 0.9 + \frac{t_o}{12\tau} \right)$	$\frac{t_o(30\tau + 3t_o)}{9\tau + 20t_o}$	-
PID	$\frac{\tau}{K t_o} \left( \frac{4}{3} + \frac{t_o}{4\tau} \right)$	$\frac{t_o(32\tau + 6t_o)}{13\tau + 8t_o}$	$\frac{4t_o\tau}{11\tau + 2t_o}$

### 2.3. Método de sintonización por síntesis directa.

Este método es interesante porque a partir del diagrama de bloques de lazo cerrado se

obtiene la función de transferencia que representa dicho sistema y permite establecer el comportamiento que se desea a la salida del lazo. Dicho sistema aplica tanto para sistemas de primer orden como de segundo orden.

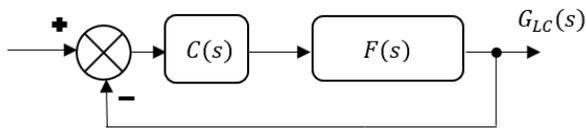


Figura 6. Diagrama de bloques lazo cerrado.

A partir de la Figura 6. Se obtiene la función de transferencia que requiere el controlador Ecuación (13), dependiendo de la función de transferencia del proceso y del lazo cerrado que se desea.

$$C(s) = \left( \frac{G_{LC}(s)}{1 - G_{LC}(s)} \right) \left( \frac{1}{F(s)} \right) \quad (13)$$

### 3. DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA ELECTRÓNICO DE EMULACIÓN.

Para los componentes, se destaca la selección de los potenciómetros, ya que estos influyen en la precisión de la variación de los diferentes sistemas dinámicos.

#### 3.1. Emulador de sistemas de primer orden.

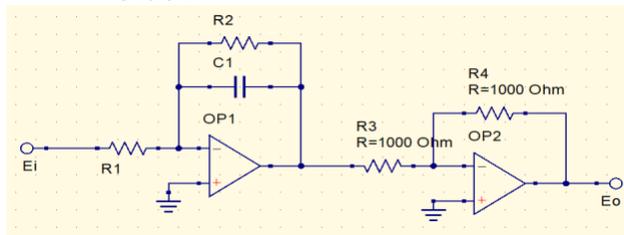


Figura 7. Configuración sistema de primer orden.

En la implementación del sistema de primer orden utilizado por (Escobar y Arévalo,

2013) Figura 7, se pudo evidenciar al variar el potenciómetro, el cambio tanto de la constante de tiempo como la ganancia. Característica no deseada para este, por lo que se decide reemplazar dicho circuito.

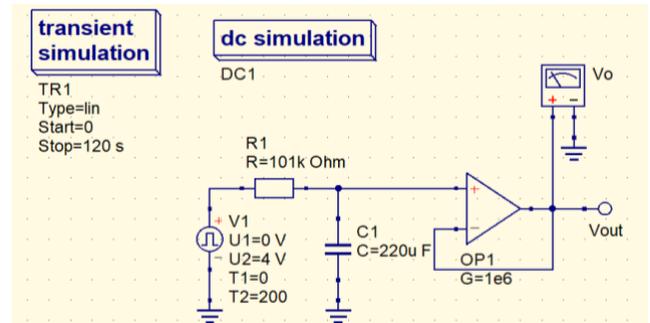


Figura 8. Sistema primer orden con filtro pasa bajas.

En la Figura 8. Se visualiza la nueva configuración que es un filtro pasa bajas de primer orden, este permite la variación solo de la constante de tiempo y a la salida del filtro se acopla un amplificador configurado como seguidor de tensión, debido a la poca corriente de carga que produce el filtro. (Fernández, Mesa & Pérez, 2020).

#### 3.2. Emulador de sistemas de segundo orden.

Al implementar el circuito utilizado por (Escobar y Arévalo, 2013) visualizado en la Figura 9. Se aprecia que este circuito genera a su salida muy pocos sistemas sub amortiguados, característica no deseada para el emulador motivo por el cual se plantea cambiarlo.

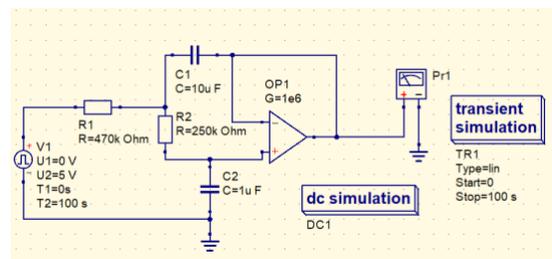


Figura 9. Filtro Sallen Key de segundo orden.

Se encuentra en el trabajo (Morales, 2019), un circuito que emula de manera correcta sistemas de segundo orden con diferente factor de amortiguamiento, se obtienen las ecuaciones que representan por medio del diagrama de bloques (Obando, 2018), se puede apreciar la Figura 10.

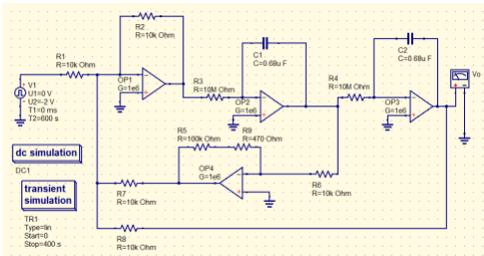


Figura 10. Circuito emulador sistemas de segundo orden.

### 3.3. Circuito generador de setpoint.

Lo que se plantea con el circuito filtro pasa bajas es poder aplicar el setpoint por medio de la interfaz gráfica. La frecuencia de corte del filtro, se requiere que sea menor a la frecuencia de trabajo del microcontrolador, ya que esto permite evitar que pase la señal PWM y genere la tensión analógica convertida. Además, se requiere que la constante de tiempo sea cercana a 0. Para asemejarse a la señal de setpoint. (Moreno, Flórez & Peña, 2020).

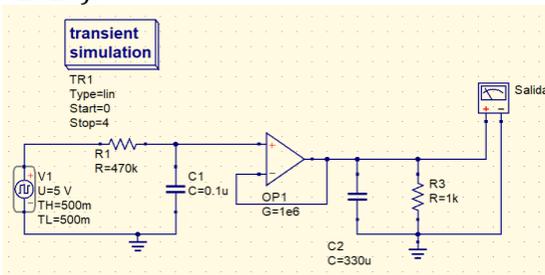


Figura 11. Circuito generador de setpoint.

## 4. IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL PID CON HMI.

### 4.1. Circuito generador de señal de control.

Para el diseño de la salida del controlador

se plantea el mismo circuito que el diseñado para el generador de setpoint Figura 11 y se procede a observar el rango de tensión que requiere el controlador por medio de simulaciones para poder cumplir su propósito. Por limitantes, tanto de la señal máxima del amplificador operacional como de alimentación del mismo se establece un máximo de tensión de 24V.

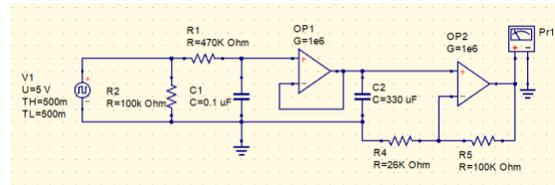


Figura 12. Circuito generador de señal de control.

Finalmente, analizando los circuitos de la Figura 11 y Figura 12. Se puede llegar a la conclusión de implementar solo el circuito generador de señal de control y por medio de este aplicar el setpoint haciendo su respectivo ajuste matemático.

### 4.2. Circuito generador señal de perturbación.

Al dispositivo se le decide integrar un circuito que emule el comportamiento de una perturbación siendo esta el 10% de la señal del setpoint. Aplicando la misma configuración del filtro pasa bajas del circuito generador Figura 11.

### 4.3. Implementación de circuito completo.

Como resultado se obtiene el diagrama de bloques de la Figura 13, que representa la configuración del sistema implementado dependiendo del tipo de lazo.

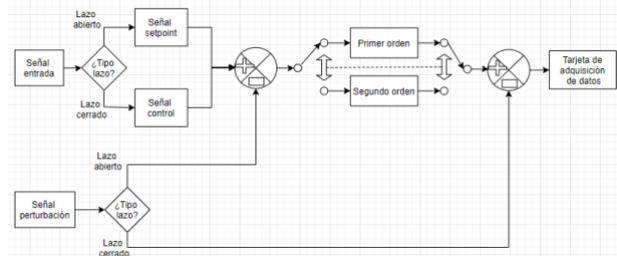


Figura 13. Diagrama de bloques de implementación del sistema.

#### 4.4. Periodo de muestreo.

Para la implementación de un controlador es necesario el uso de la transformada Z para así discretizar una función de transferencia. De aquí parte un factor importante como lo es el tiempo de muestreo, planteado por el teorema de Nyquist-Shannon Ecuación (14).

$$F_s \geq 2F_{m\acute{a}x} \quad (14)$$

Por lo tanto, el tiempo de muestreo es la inversa de la frecuencia establecida en la inecuación del teorema de Nyquist-Shannon. Se puede apreciar en la Ecuación (15).

$$T = \frac{1}{F_s} \quad (15)$$

A partir de dicho teorema, y las contantes de tiempo equivalentes de los sistemas de segundo orden (Castaño, 2019), se puede obtener la Tabla 5, donde se establece el tiempo de muestreo dependiendo del tipo de sistema.

Tabla 5. Tiempos de muestreo de los sistemas.

Sistema	$\tau_{eq}$	$F_{m\acute{a}x}$	$T_s$
Primer orden.	$\tau$	$\frac{1}{\tau}$	$T_s \leq \frac{\tau}{2}$
Segundo orden sub amortiguado	$\frac{1}{\zeta W_n}$	$\zeta W_n$	$T_s \leq \frac{1}{2\zeta W_n}$
Segundo orden sobre amortiguado.	$\frac{2\zeta}{W_n}$	$\frac{W_n}{2\zeta}$	$T_s \leq \frac{2\zeta}{2W_n}$

Además, se hallan las ecuaciones recursivas que representan a cada controlador con la ayuda de la transformada bilineal que se observa en la Ecuación (16).

$$s = \frac{2}{T} * \frac{z - 1}{z + 1} \quad (16)$$

Y por medio de la Tabla 6, se obtiene una ecuación general para poderla implementar

con mayor facilidad en el microcontrolador.

Tabla 6. Coeficientes en general de la ecuación recursiva.

Tipo control	$V_i(k)$	$V_i(k - 1)$	$V_i(k - 2)$	$V_o(k - 1)$	$V_o(k - 2)$
PID	$\frac{A_0}{B_0}$	$\frac{A_1}{B_0}$	$\frac{A_2}{B_0}$	0	1
Primer orden (SD).	$\frac{A}{C}$	$\frac{B}{C}$	0	1	0
Segundo orden (SD).	$\frac{F}{I}$	$\frac{G}{I}$	$\frac{H}{I}$	$-\frac{J}{I}$	$-\frac{L}{I}$
Coeficientes	a	b	c	d	e

#### 4.5. Selección del microcontrolador.

Para la selección del microcontrolador se optó por establecer las características que se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7. Características para la matriz de selección del microcontrolador.

OPCIÓN	MICROCONTROLADOR	VOLTAJE DE ALIMENTACIÓN	RESOLUCIÓN PWM	RESOLUCIÓN ADC	VELOCIDAD CPU
1	STM32F103C8T6	3.3v	16 bits	12 bits	72 MHz
2	Arduino MEGA	5V	8 bits	10 bits	16 MHz

Características fundamentales para la selección del microcontrolador fueron tanto la resolución del PWM como la del ADC. Esto para establecer señales tanto de entrada del sistema como de la salida del controlador estables. Dando evidencia en la Tabla 8, las valoraciones pertinentes para la selección del microcontrolador STM32F103C8T6.

Tabla 8. Matriz de selección del microcontrolador.

CARACTERÍSTICA	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2
	1 a 5	1 a 5
Voltaje de alimentación (10%)	5	4
Resolución PWM (35%)	5	3
Resolución ADC (35%)	4	3
Velocidad CPU (20%)	5	3
TOTAL	4.65	3.1

## 5. PRUEBAS DE EVIDENCIA DEL FUNCIONAMIENTO.

Para iniciar desde la interfaz se inicia el proceso y se excita el sistema a su entrada con un setpoint de 5v. Durante el proceso de identificación, se utiliza el cursor que dispone la interfaz y se aplica el método de identificación correspondiente. (Ospina, Toro & Gallego, 2020).

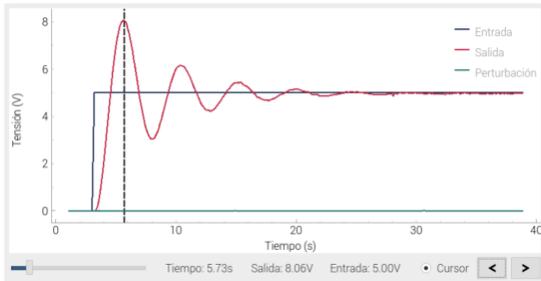


Figura 14. Identificación primer sobre impulso sistema sub amortiguado.

A partir de su identificación, se realiza el proceso de sintonización del controlador por síntesis directa de segundo orden. Y se introducen los parámetros para el controlador, como se observa en la Figura 15.

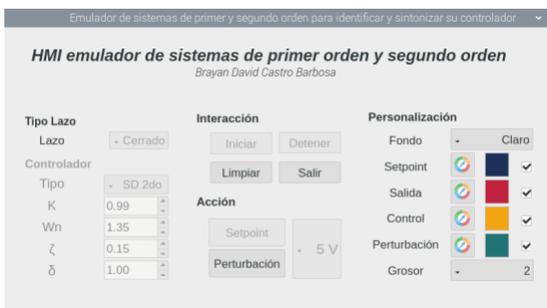


Figura 15. Interfaz con controlador síntesis directa de segundo orden.

Ya implementado el controlador, se puede apreciar cada una de las salidas en la interfaz gráfica. Como se muestra en la Fig 16.

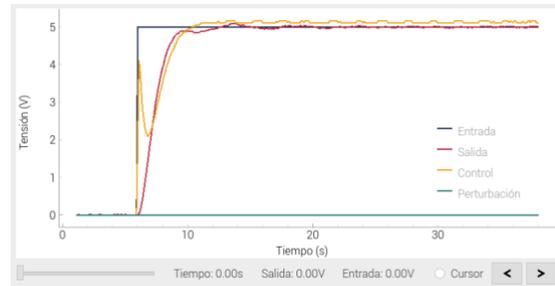


Fig 16. Implementación del controlador por síntesis directa de segundo orden.

### 5.1. Sistema de segundo orden frente a perturbación.

El sistema de segundo orden subamortiguado en lazo abierto frente a perturbación. Se puede observar en la Figura 17.

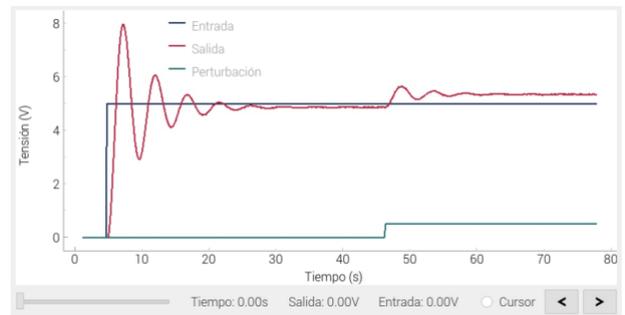


Figura 17. Lazo abierto de sistema de segundo orden subamortiguado en frente a perturbación.

En cambio, el sistema de segundo orden subamortiguado en el lazo cerrado frente a perturbación, se observa en la Figura 18.

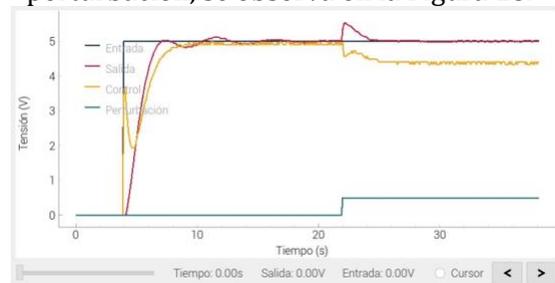


Figura 18. Salida lazo cerrado por síntesis directa del sistema de segundo orden subamortiguado frente a perturbación.

### 5.2. Validación de funcionamiento

Por medio de las siguientes tablas, se evidencia el correcto proceso de identificación de los sistemas. En la Tabla 9, se aprecia la comparación del sistema de primer orden con menor  $\tau$ .

**Tabla 9.** Comparación entre implementación y simulación sistema de primer orden con menor  $\tau$ .

Parámetro	Simulación	Implementación	Error (%)
$V_1$	1.418 V	1.398 V	1.41
$t_1$	0.1879 s	0.088 s	53.16
$V_2$	3.166 V	3.122 V	1.38
$t_2$	0.364 s	0.26 s	28.57

En la Tabla 10, se evidencia la comparación para el sistema de primer orden con mayor.

**Tabla 10.** Comparación entre implementación y simulación sistema de primer orden con mayor  $\tau$

Parámetro	Simulación	Implementación	Error (%)
$V_1$	1.24 V	1.24 V	0
$t_1$	6.44 s	6.34 s	1.55
$V_2$	3.707V	3.72 V	0.35
$t_2$	31.9 s	31.77 s	0.407

En la Tabla 11, se realiza la comparación para el sistema de segundo orden con menor factor de amortiguamiento.

**Tabla 11.** Comparación entre implementación y simulación sistema de segundo orden con menor  $\zeta$ .

Parámetro	Simulación	Implementación	Error (%)
$V_1$	7.97 V	8.06 V	1.13
$t_1$	2.269 s	2.49 s	9.73
$V_2$	6.11 V	6.15 V	0.65
$t_2$	7.05 s	7.2 s	2.08

Y en la Tabla 12, se detalla la comparación realizada para el sistema de segundo orden con mayor factor de amortiguamiento.

**Tabla 12.** Comparación entre implementación y simulación sistema de segundo orden con mayor  $\zeta$ .

Parámetro	Simulación	Implementación	Error (%)
$Y_3$	1.306V	1.298V	0.612
$T_3$	1.003s	0.98s	2.29
$Y_4$	3.92V	3.93V	0.255
$T_4$	3.97s	4.03s	1.51

De las tablas de validación Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11 y Tabla 12. Se evidencia un porcentaje de error mayor para el sistema de primer orden

con menor  $\tau$ . Esto debido al pequeño tiempo de muestreo que requiere este sistema para poder ser identificado con mayor precisión.

### 5.3. Alcance de parámetros

Finalmente, En la Tabla 13, se puede apreciar el alcance en cada uno de los parámetros que se obtiene con este dispositivo.

**Tabla 13.** Alcance de parámetros del dispositivo.

Parámetro	Valor mínimo	Valor máximo
Ganancia K	0.47	1
Constante $\tau$	0.22	22.22
Factor de amortiguamiento $\zeta$	0.15	1.66
Frecuencia $W_n$	1.28	1.35

## REFERENCIAS

- [1]. Acevedo Meza, H., Mendoza García, J. L. ., & Sepúlveda Mora, S. B. . (2020). Estrategias de Control MPPT aplicadas en un Convertidor DC/DC Tipo Boost para Sistemas Fotovoltaicos. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 2(30), 102-108. <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.175>
- [2]. Bayona Ibáñez, E. ., & Ricon Parada, I. K. . (2020). Hábitos de estudio y rendimiento académico en los estudiantes de ingeniería mecánica. Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada, 1(29), 64-69. <https://doi.org/10.24054/16927257.v29.n29.2017.191>
- [3]. Escobar, V. & Arévalo J. (2019). Tesis desarrollo de una metodología de identificación on-line

mediante técnicas de inteligencia artificial para fines de control autoajutable presentado. Villa del Rosario.

- [4]. Ospina Toro, D. ., Toro Ocampo, E. M. ., & Gallego Rendón, R. A. . (2020). Solución del MDVRP usando el algoritmo de búsqueda local iterada. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(31), 120-127. <https://doi.org/10.24054/16927257.v31.n31.2018.139>

#### SITIOS WEB

- [5]. Alfaro, V. (2001), Identificación de procesos sobre amortiguados utilizando técnicas de lazo abierto. San José, Costa Rica. ([https://tableroalparque.weebly.com/uploads/5/1/6/9/51696511/identificacion\\_de\\_procesos\\_sobre\\_amortiguados\\_usando\\_tecnicas\\_de\\_lazo\\_abierto.pdf](https://tableroalparque.weebly.com/uploads/5/1/6/9/51696511/identificacion_de_procesos_sobre_amortiguados_usando_tecnicas_de_lazo_abierto.pdf)). (Consultado: 15 agosto de 2020).
- [6]. Alvarado JD, Numpaque H. Control PID de temperatura y dosificación de ph para la producción de gas metano a partir de la digestión anaeróbica de residuos sólidos orgánicos. 2014. *Revista Tecnologías de Avanzada - Uipamplona - Journal* Vol. 2, Núm. 24 (2014)
- [7]. Berdugo Portilla, D. J. ., Duarte, J. E. ., & Fernández Morales, F. H. . (2020). Desarrollo de un ambiente de aprendizaje mediado con TIC para la enseñanza de la educación económica financiera. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 1(31), 160-167. <https://doi.org/10.24054/16927257.v31.n31.2018.143>
- [8]. Castaño, S, *Sistemas de Segundo Orden*. (2019). [https://controlautomaticoeducacion.com/control\\_realimentado/sistemas-de-segundo-orden/](https://controlautomaticoeducacion.com/control_realimentado/sistemas-de-segundo-orden/). (Consultado: 13 agosto de 2020).
- [9]. FACET UNT. (2016). Determinación de parámetros de funciones de transferencia. <https://catedras.facet.unt.edu.ar/controldeproce>
- sos/wp-content/uploads/sites/85/2016/02/T2.1-Identificacion.pdf. (Consultado: 12 septiembre de 2020).
- [10]. Instituto Tecnológico Metropolitano. (2017) Identificación de procesos y curva de reacción. [https://tableroalparque.weebly.com/uploads/5/1/6/9/51696511/5\\_identificacion\\_de\\_procesos\\_y\\_curva\\_de\\_reaccion.pdf](https://tableroalparque.weebly.com/uploads/5/1/6/9/51696511/5_identificacion_de_procesos_y_curva_de_reaccion.pdf). (Consultado: 16 agosto de 2020).
- [11]. Fernández Samacá, L. ., Mesa Mesa, L. A. ., & Pérez Holguín, W. J. . (2020). Investigación formativa para estudiantes de ingeniería utilizando robótica. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(28), 30-38. <https://doi.org/10.24054/16927257.v28.n28.2016.203>
- [12]. Hurtado, C., Cortez, C & Triana, M. (2017). Estimación del Carbono Almacenado en el Bosque Natural en la Cuenca Media-Baja. Municipio de Río Quito Chocó, Colombia. *Ingeniería e innovación*. 5(1): 36-50. <https://doi.org/10.21897/23460466.1102>.
- [13]. Morales, A. (2019). Módulo interactivo para control de procesos. Universidad Técnica Federico Santa María. Viña del Mar. <https://repositorio.usm.cl/bitstream/handle/11673/46104/3560901064284UTFSM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. (Consultado: 16 de septiembre 2020).
- [14]. Moreno C, G. G. ., Flórez, E. G. ., & Peña, C. A. . (2020). Estudio de estabilidad de vehículos pesados. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada*, 2(30), 1-6. <https://doi.org/10.24054/16927257.v30.n30.2017.180>
- [15]. Obando, L. (2018). Diagrama de Bloques. <https://dademuch.com/2018/02/10/diagrama->

de-bloques-ingenieria-de-control/. (Consultado:  
15 agosto de 2020).

sistemas de segundo orden.  
<http://www.edutecne.utn.edu.ar/tutoriales/identificacion-sistemas-segundo-orden.pdf>

[16]. Rivero, R. (2008). Identificación de