

Propuesta para la implementación de estrategias de control a través de los ecosistemas de Texas Instruments

Proposal for the implementation of control strategies through Texas Instruments ecosystems

Xiomara Rodríguez Gil¹   Sebastián Cardona Ramírez¹  Diego F Ramírez-Jiménez¹ 

¹ Grupo de Investigación GAMA – Semillero de Investigación GAMA, Universidad del Quindío, Armenia, Quindío, Colombia.

Resumen

Introducción: La evolución tecnológica ha contribuido al desarrollo de múltiples plataformas de microcontrol, como Arduino, mediante las cuales se pueden implementar diversas aplicaciones de propósito general. Sin embargo, la necesidad de sistemas más especializados, como los requeridos para el control en tiempo real, ha impulsado el desarrollo de sistemas de microcontrol, incluyendo los fabricados por Texas Instruments.

Objetivo: El objetivo de este estudio es diseñar e implementar estrategias de control en tiempo real utilizando los ecosistemas de Texas Instruments.

Metodología: El trabajo se centró en un marco experimental mediante el cual se diseñaron controladores digitales utilizando el coprocesador de control como uno de los ecosistemas disponibles en los microcontroladores C2000 de Texas Instruments. Posteriormente, los controladores diseñados se implementaron en plantas de prueba para validar su respuesta en tiempo real.

Resultados: Se implementó una variedad de estrategias de control, tanto clásicas como modernas, en los microcontroladores C2000 de Texas Instruments. Esto se realizó para validar la respuesta de los microcontroladores en las plantas de prueba seleccionadas.

Conclusiones: Los controladores diseñados para los microcontroladores C2000 mediante los ecosistemas de Texas Instruments permiten el desarrollo rápido de sistemas de control en tiempo real con alta capacidad de procesamiento, dadas sus características. Además, estas plataformas encuentran aplicaciones no solo en procesos educativos, sino también en entornos industriales, gracias a la disponibilidad de diversas herramientas de software como MATLAB y Code Composer Studio para su programación.

Palabras clave: Microcontrolador C2000, bucle de control, control digital, marco experimental, MATLAB/Simulink, control en tiempo real, Texas Instruments

Abstract

Introduction: Technological evolution has contributed to the development of multiple microcontrolled platforms, such as Arduino, through which different general-purpose applications can be implemented. However, the need for more specialized systems, such as those required for real-time control, has contributed to the development of microcontrolled systems, including those manufactured by Texas Instruments.

Objective: The objective of this study is to design and implement real-time control strategies using Texas Instruments ecosystems.

Methodology: The work focused on an experimental framework through which digital controllers were designed using the control coprocessor as one of the ecosystems available in the Texas Instruments C2000 microcontrollers. Subsequently, the designed controllers were implemented in test plants to validate their response in real time.

Results: A range of control strategies, both classical and modern, were implemented on the Texas Instruments C2000 microcontrollers. This was done to validate the response of the microcontrollers in the selected test plants.

Conclusions: The controllers designed for the C2000 microcontrollers through the Texas Instruments ecosystems used allow the development of real-time control systems quickly and with high processing capacity given their characteristics. Moreover, these platforms find applications not only in teaching processes but also in industrial environments, given the existence of various software tools like MATLAB and Code Composer Studio for their programming.

Keywords: C2000 microcontroller, Control loop, Digital control, experimental framework, MATLAB/Simulink, Real-time control, Texas Instruments

¿Cómo citar?

Rodríguez X, Cardona S, Ramírez-Jiménez DF. Propuesta para la implementación de estrategias de control a través de los ecosistemas de Texas Instruments. Ingeniería y Competitividad, 2026, 28(1)e-20915098

<https://doi.org/10.25100/iyv.v28i1.15098>

Recibido: 07/07/25

Revisado: 20/11/25

Aceptado: 13/03/26

Online: 26/03/26

Correspondencia

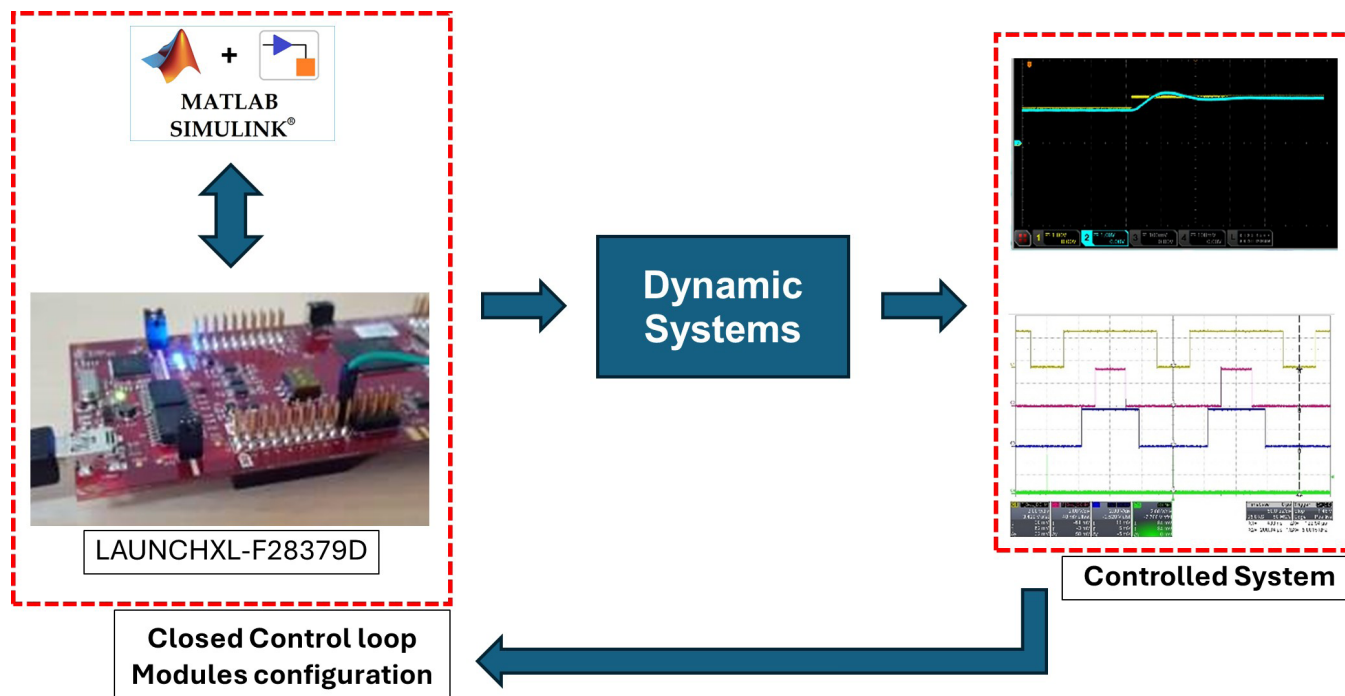
dframirez@uniquindio.edu.co



Contribution a la literatura

El control en tiempo real de sistemas y variables físicas requiere soluciones robustas y de bajo costo que satisfagan las necesidades de diferentes entornos. Si bien actualmente existen diversas plataformas y microcontroladores para este tipo de desarrollo, varios de estos dispositivos no permiten el desarrollo de aplicaciones robustas debido a sus limitaciones físicas. Por lo tanto, la investigación se centró en el uso de la plataforma de microcontrolador LAUNCHXL-F28379D de Texas Instruments y sus diferentes módulos internos, donde se establecieron pruebas experimentales y configuraciones de controladores digitales mediante el Acelerador de Leyes de Control (CLA) y la ejecución de tareas concurrentes a través de las dos CPU. Asimismo, la investigación proporciona los elementos necesarios para la integración de la plataforma LAUNCHXL-F28379D en entornos como MATLAB/Simulink, donde se pueden implementar y validar estrategias de control clásicas y modernas. Otra contribución se centró en el enfoque de prototipado rápido (RCP), proporcionando evidencia de la capacidad de estas plataformas para ejecutar control de lazo cerrado en tiempo real, lo que las posiciona como una alternativa robusta y accesible tanto para la enseñanza como para aplicaciones industriales en sistemas de control embebidos.

Graphical Abstract



Introducción

Los sistemas de control son de importancia fundamental en la automatización y optimización de procesos industriales, incluyendo la fabricación y la robótica. La implementación eficiente de estos sistemas es fundamental para lograr soluciones precisas, eficientes y fiables que satisfagan las demandas de un mercado cada vez más exigente. En este contexto, los avances tecnológicos de la última década han contribuido al desarrollo de una amplia gama de sistemas o plataformas que integran diferentes recursos de hardware, permitiendo así la implementación de sistemas de control en tiempo real bajo el concepto de Prototipado Rápido de Control (RCP) (1). Las plataformas existentes pueden clasificarse principalmente por los dispositivos con los que están equipadas, incluyendo microprocesadores, microcontroladores, procesadores digitales de señal (DSP), convertidores analógico-digital (ADC), modulación de ancho de pulso (PWM), puertos de entrada/salida de propósito general (GPIO), periféricos de entrada/salida (E/S) y protocolos de comunicación. A pesar de la existencia de estos componentes, muchos carecen de arquitecturas de control que permitan la integración entre componentes para mejorar su respuesta en tiempo real. Se ofrece un compendio de las plataformas desarrolladas y en las que se han implementado algunas aplicaciones para el control en tiempo real en (2).

Fabricantes como Texas Instruments (TI) han transformado la forma en que los ingenieros desarrollan y aplican estrategias de control en tiempo real a través de estos dispositivos, ya que cuentan con plataformas microcontroladas equipadas con hardware avanzado para implementar controladores digitales. El microcontrolador C2000 es un ejemplo de una plataforma equipada con un ecosistema, como el Control Law Accelerator (CLA). El CLA es un coprocesador diseñado para ejecutar tareas de control robustas en paralelo con el procesador principal. Esta arquitectura optimiza el uso de los recursos del sistema, proporcionando así un mejor rendimiento y capacidad de respuesta (3). Los microcontroladores C2000 de TI se han desarrollado para el control en tiempo real en diversos sectores, incluyendo el automoción, motores eléctricos, energía solar y diseño de sistemas compactos de bajo coste, entre otros. Estos microcontroladores tienen la capacidad de permitir nuevas posibilidades de automatización, control y sostenibilidad en diferentes campos de la ingeniería (4).

Las ventajas de los microcontroladores C2000 de Texas Instruments van más allá de sus características físicas y los campos en los que se han utilizado. Estos dispositivos pueden programarse actualmente a través de plataformas como Code Composer Studio (CCS), MATLAB/Simulink y Energia IDE, entre otras. La ventaja de la programación multiplataforma es que algunas de estas plataformas son de código abierto y no requieren ningún tipo de licencia para su uso. Ejemplos de estos son Code Composer Studio y Energia IDE. MATLAB/Simulink, en cambio, es una herramienta que requiere licencia para su uso; sin embargo, actualmente no se considera una limitación porque se está utilizando en muchas instituciones educativas e industrias en todo el mundo.

Lo interesante de las herramientas de software de código abierto es que su código fuente puede ser accedido para hacer modificaciones o actualizaciones, como se hizo en (2), donde se hicieron

algunas modificaciones al código fuente del IDE Energia para incluir algunas características de la tarjeta LAUNCHXL-F28379D, que está equipada con un microcontrolador C2000 Delfino. Otros estudios han favorecido el uso de herramientas como MATLAB/Simulink, que cuenta con una caja de herramientas que ofrece soporte completo para la implementación de funciones fundamentales como PWM, ADC y GPIO, así como funciones más avanzadas como Control Law Accelerator (CLA) en diferentes plataformas de microcontroladores de Texas Instruments (5), (6), (7). Las herramientas de software mencionadas anteriormente no son las únicas utilizadas para el desarrollo de aplicaciones con plataformas de microcontroladores, ya que existen proyectos que se llevan a cabo en entornos como LabVIEW (8). Además de las herramientas de software y hardware disponibles para el diseño e implementación de sistemas de control en tiempo real, otra ventaja de este tipo de dispositivo es su bajo coste, ya que algunos de estos sistemas pueden costar entre 28,59 y 50 dólares estadounidenses (9), (10).

Un estudio de la literatura relevante revela que los dispositivos de Texas Instruments, especialmente el microcontrolador TMS320F28379D y su sistema embebido, se han empleado en el diseño de controladores PID para convertidores buck. La integración de MATLAB/Simulink para modelado y Code Composer Studio (CCS) para la implementación de hardware ha dado lugar a una respuesta dinámica rápida y un alto grado de estabilidad del sistema bajo condiciones industriales desafiantes (11). En el contexto de los sistemas energéticos híbridos, el uso combinado de microcontroladores ATmega en plataformas como Arduino y LAUNCHXL-F28379D es especialmente relevante, junto con estrategias como el seguimiento de puntos de máxima potencia (MPPT) y la modulación de ancho de pulso (PWM), que mejoran la eficiencia y extienden la vida útil de las baterías gestionadas por BMS embebido (12). Además, la integración de microcontroladores C2000 con MATLAB y Simulink Embedded Coder facilita la generación automática de código optimizado en C/C++, reduciendo así significativamente el tiempo de desarrollo y permitiendo una validación rápida mediante simulación y ejecución directa en el hardware (13), (14). En (15), se propuso una plataforma de control en tiempo real de bajo coste con sensores eléctricos aislados integrados, también soportada por microcontroladores C2000 y validada controlando diversas topologías de convertidores como buck, push-pull y H-bridge, todas programadas gráficamente en Simulink, lo que mejora su uso académico e industrial con una necesidad mínima de codificación de bajo nivel. Finalmente, otro estudio presentó la validación experimental de un sistema de control en lazo abierto para un motor asincrónico trifásico, donde el microcontrolador TMS320F28379D ejecuta señales de control de modulación por ancho de pulso (PWM) a un inversor IGBT. Este sistema también integra sensores de velocidad y corriente para comunicación en tiempo real a través de MATLAB/Simulink para visualización y análisis, reforzando su aplicabilidad en sistemas de automatización industrial de bajo coste y alta fiabilidad (16).

Metodología

El desarrollo del marco experimental para la investigación realizada se centró en dos elementos: el primero corresponde a los materiales y el segundo a los métodos utilizados, en los que se presentan todas las configuraciones y enfoques utilizados para el desarrollo de los sistemas de control propuestos.

Materiales: plataforma LAUNCHXL-F28379D

El LAUNCHXL-F28379D es una plataforma microcontrolada o sistema embebido, como se conoce comúnmente a este tipo de dispositivos. El desarrollo de esta tecnología fue llevado a cabo por Texas Instruments (TI) con el objetivo de crear una plataforma de bajo coste para evaluación y prototipado rápido. El dispositivo está equipado con un microcontrolador Delfino C2000, con el número de referencia TMS320F28379D. El desarrollo de esta plataforma fue específicamente para aplicaciones en control de motores, conversión de potencia y sistemas automotrices de alto rendimiento (17). El dispositivo opera a una velocidad de 200 MHz, integrando dos núcleos de 32 bits, un coprocesador PLA, módulos ADC de 12/16 bits y un DAC de 12 bits. El sistema incorpora módulos ePWM/HRPWM que pueden sincronizarse con los ADC, permitiendo así implementar bucles de control con resolución temporal en el orden de microsegundos. Para tareas de detección y medición de posición, se ofrecen periféricos como eCAP, eQEP, entradas de señal y conectores codificadores de 5 V. Como se ilustra en la Figura 1, la plataforma LAUNCHXL-F28379D de TI ofrece una visión completa de las opciones disponibles.

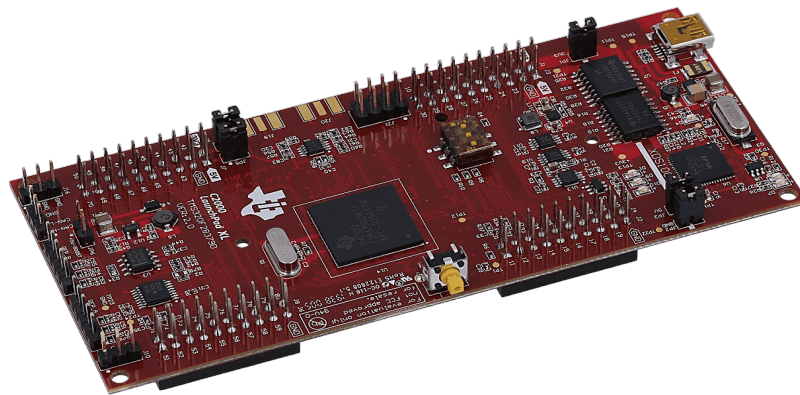


Figura 1. Plataforma LAUNCHXL-F28379D de Texas Instruments.

Fuente: (17).

Plantas de prueba

La primera planta utilizada consistió en una función de transferencia aleatoria proporcionada por MATLAB. Los sistemas aleatorios generados a partir de allí son estables y tienen dinámicas muy variadas, lo que permite crear funciones que emulen cualquier comportamiento físico. El modelo matemático para la función de transferencia generada se presenta en la ecuación (1).

$$G(s) = \frac{4}{s^2 + 0.8s + 4} \quad (1)$$

Como se muestra en la Figura 2, la respuesta del sistema se muestra en tiempo continuo. La dinámica del sistema muestra un sobrepaso máximo de y un tiempo de asentamiento de segundos.

52.7%9.852.7%9.8

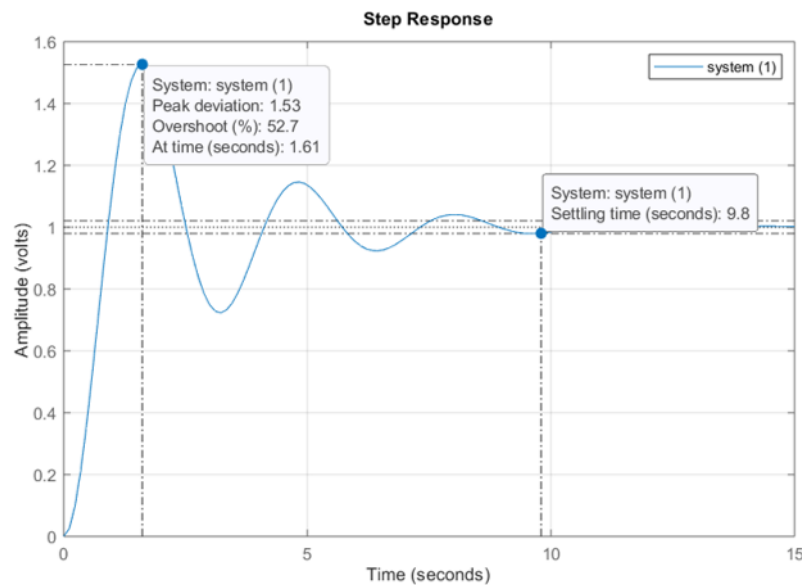


Figura 2. Respuesta transitoria para la planta de pruebas generada por MATLAB.

Fuente: Los autores.

La segunda planta se centraba en un sistema de niveles compuesto por un depósito de cristal de 16 litros, dos bombas sumergibles y un flotador para la medición de niveles. Las bombas utilizadas se activan mediante señales PWM y, al igual que el sensor de nivel, son alimentadas por 6 VDC. La estructura de la planta y sus dimensiones se muestran en la Figura 3.

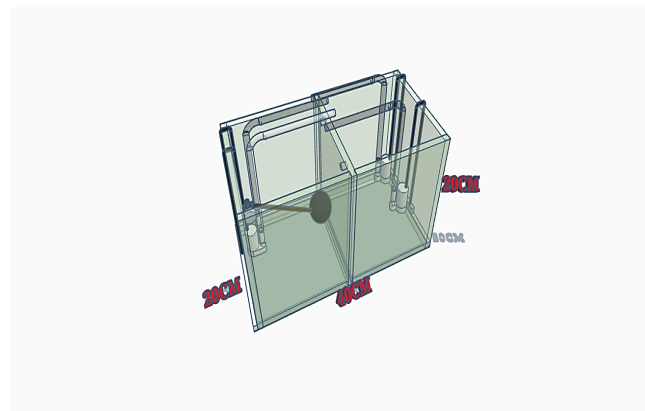


Figura 3. Planta nivelada diseñada para validar el marco experimental.

Fuente: Los autores

El modelo matemático que se ha desarrollado para describir el comportamiento de la planta nivelada se presenta en la ecuación . El modelo en cuestión se obtuvo mediante la recopilación de datos y un proceso de identificación fuera de línea en MATLAB.(2)(2)

$$G(s) = \frac{0.0009854s + 6.558 \times 10^{-5}}{s^3 + 0.18s^2 + 0.005435s + 6.38 \times 10^{-5}} \quad (2)$$

La respuesta transitoria para la planta de nivel se muestra en la Figura 4. Se puede observar que la dinámica del sistema corresponde a la de este tipo de sistema y tiene un tiempo de asentamiento aproximado de segundos.176176

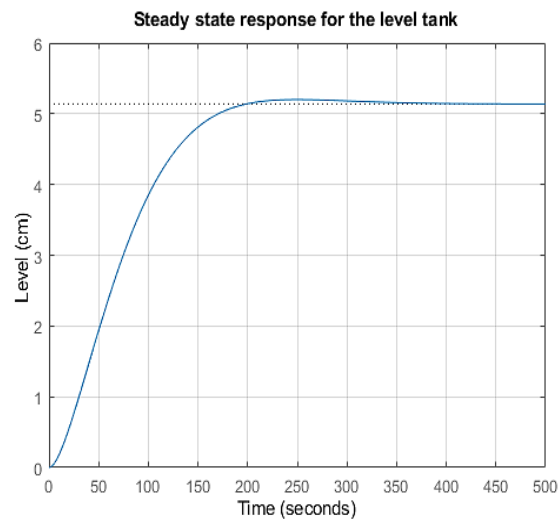


Figura 4. Respuesta transitoria para la planta de nivel mostrada en la figura 3.

Fuente: Los autores

Es decir, sintonizador PID

PID Tuner es una aplicación interactiva incluida en la Caja de Herramientas del Sistema de Control de MATLAB que permite la sintonización automática de controladores PI, PID y PID para sistemas lineales o modelos linealizados. PID Tuner calcula automáticamente los parámetros , y para diferentes configuraciones de controladores PID. El uso de esta aplicación no requiere un conocimiento profundo de la teoría clásica de control, ya que es un método gráfico, y su interfaz permite al usuario ajustar visualmente la respuesta del sistema de control bajo parámetros de respuesta más rápida y mayor estabilidad, observando su dinámica y respuesta en tiempo real. Además, PID Tuner ofrece la posibilidad de exportar el controlador al espacio de trabajo de MATLAB o a otros módulos como Simulink, donde también está disponible la generación automática de código, proporcionando al usuario flexibilidad en cómo interactúa y opera los controladores desarrollados. La Figura 5 muestra el entorno gráfico del sintonizador PID de MATLAB.*KpKiKd*
KpKiKd

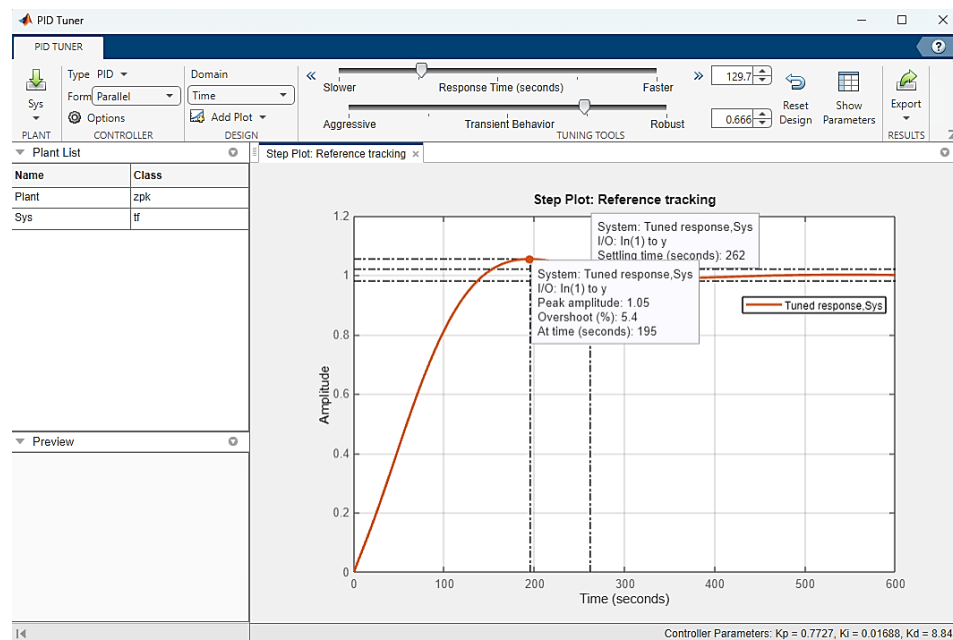


Figura 5. Interfaz gráfica de usuario para el sintonizador PID MATLAB.

Fuente: Los autores

Métodos: CLA MATLAB/Simulink Configuration

Una de las contribuciones de la investigación realizada se centró en la configuración y uso de ecosistemas integrados en la tarjeta LAUNCHXL-F28379D de Texas Instruments para la implementación de estrategias de control en tiempo real. En este caso concreto, el ecosistema empleado fue el Control Law Accelerator (CLA), que se configuró y programó usando MATLAB/Simulink, empleando diagramas de bloques. CLA constituye un ecosistema de procesamiento especializado que se ha integrado en varios microcontroladores de la familia C2000 para la implementación de sistemas de control en tiempo real. Su función principal es reducir la carga operativa de la CPU, disminuyendo así el tiempo entre la adquisición de datos y la respuesta del sistema. La estructura integrada del microcontrolador C2000 de LAUNCHXL-F28379D se resume en la figura 6.

Mientras que el CLA realiza tareas específicas de control de baja latencia, la CPU es responsable de gestionar otras funciones, incluyendo la comunicación y la supervisión general de las diferentes señales del sistema. Es evidente que otras características del CLA están orientadas al procesamiento paralelo y a Rutinas de Servicio de Interrupciones (ISR). La estructura del CLA divide la ejecución de instrucciones en varias etapas que se ejecutan simultáneamente con las instrucciones de la CPU. La configuración del CLA en MATLAB/Simulink implica el uso de dos componentes distintos: el Subsistema CLE, que sirve como punto de entrada para los datos de operación y los vectores o matrices que facilitan la operación, y el propio Subsistema COLA. El segundo bloque corresponde al disparador de tarea y se designa como el disparador de tarea CLAU. Como se ilustra en la figura 7, los diagramas de bloques mencionados anteriormente ofrecen una representación visual de la configuración y las características operativas del CLA.

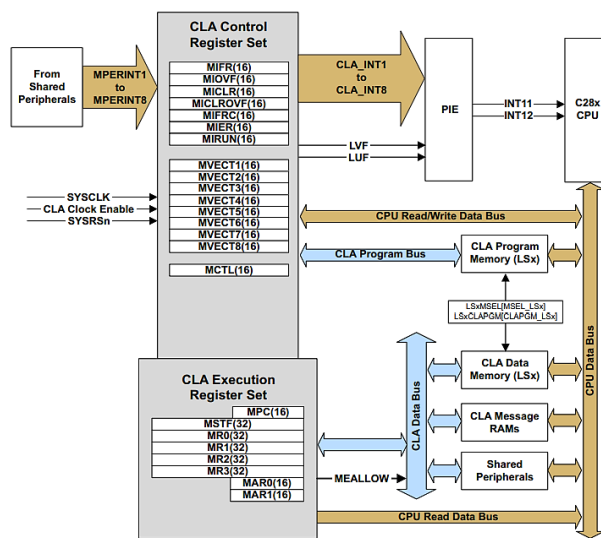


Figura 6. Diagrama de bloques de la arquitectura interna del ecosistema CLA.
Fuente: Texas Instruments

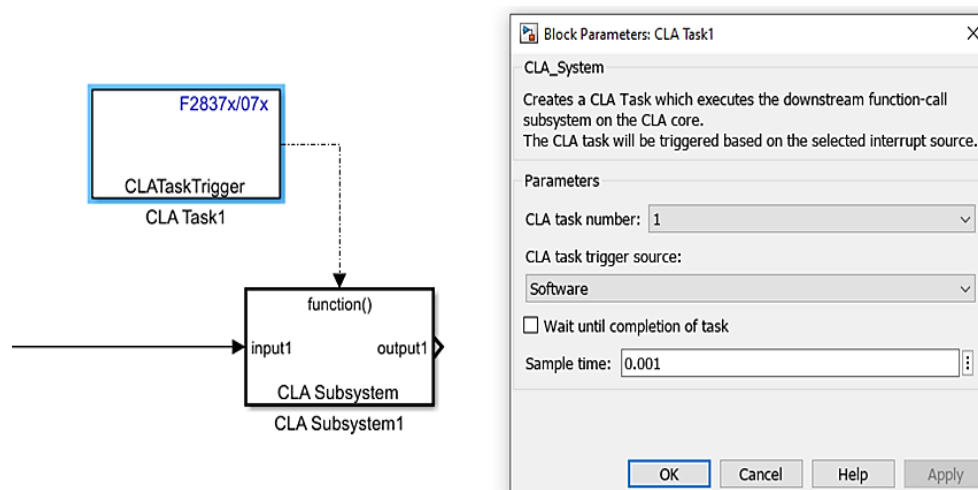


Figura 7. Configuración de CLA en MATLAB/Simulink.
Fuente: Los autores

Mandos clásicos y modernos

Al hablar de control de procesos, es importante tener en cuenta que los conceptos teóricos destacan tres categorías principales: control clásico, control moderno y control avanzado. Cada uno de estos abarca una variedad de controladores que varían en cuanto a su implementación y complejidad. La teoría de control también utiliza dos formas básicas de representación: el tiempo continuo y el tiempo discreto. La primera se utiliza al analizar y estudiar sistemas a nivel de simulación, mientras que la segunda se emplea al implementar sistemas físicos y herramientas de hardware como un DSP, FPGA, microcontrolador, etc. (18), (19). A medida que se estableció el uso

de sistemas físicos en el marco experimental de la investigación llevada a cabo, los controladores se desarrollaron en tiempo discreto.

Controlador clásico

El controlador PID (Proporcional, Integral y Derivado) representado en la figura 8 fue seleccionado como la técnica clásica. Este controlador se utiliza en diversos sectores industriales debido a su versatilidad, que permite emplearse tanto en formas estándar como en paralelo. Además, la combinación de sus diferentes etapas permite la creación de variaciones adicionales, como PI, PD, PID2 y PIDF (20). Otra característica destacada de los controladores PID es su capacidad de ajustarse mientras el sistema está en funcionamiento (21). Actualmente, se documentan multitud de técnicas de ajuste para cada uno de los componentes del controlador (22–24).

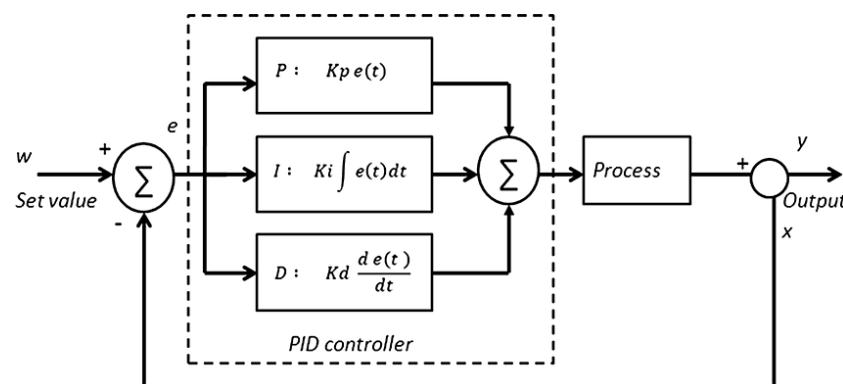


Figura 8. Diagrama de bloques para el controlador PID utilizado.

Fuente: (25)

Mando moderno

El controlador RST (Seguimiento de Señales de Referencia) representado en la figura 9 se utilizó como técnica moderna. El controlador RST proporciona al sistema un comportamiento dinámico porque su estructura se basa en la reubicación de los polos, lo que ayuda a mejorar el rendimiento del sistema frente a perturbaciones externas y otros parámetros. A diferencia del controlador PID, la RST requiere comprender la dinámica de la planta o proceso en lazo abierto.

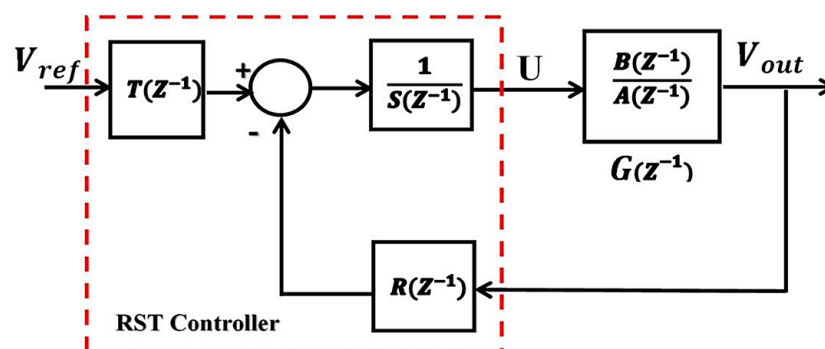


Figura 9. Diagrama de bloques del controlador RST utilizado.

Fuente: los autores

Finalmente, para sintetizar los procedimientos metodológicos mediante la integración de los distintos componentes y materiales, la figura 10 presenta un diagrama completo de flujo de trabajo metodológico diseñado para cumplir los objetivos de la investigación.

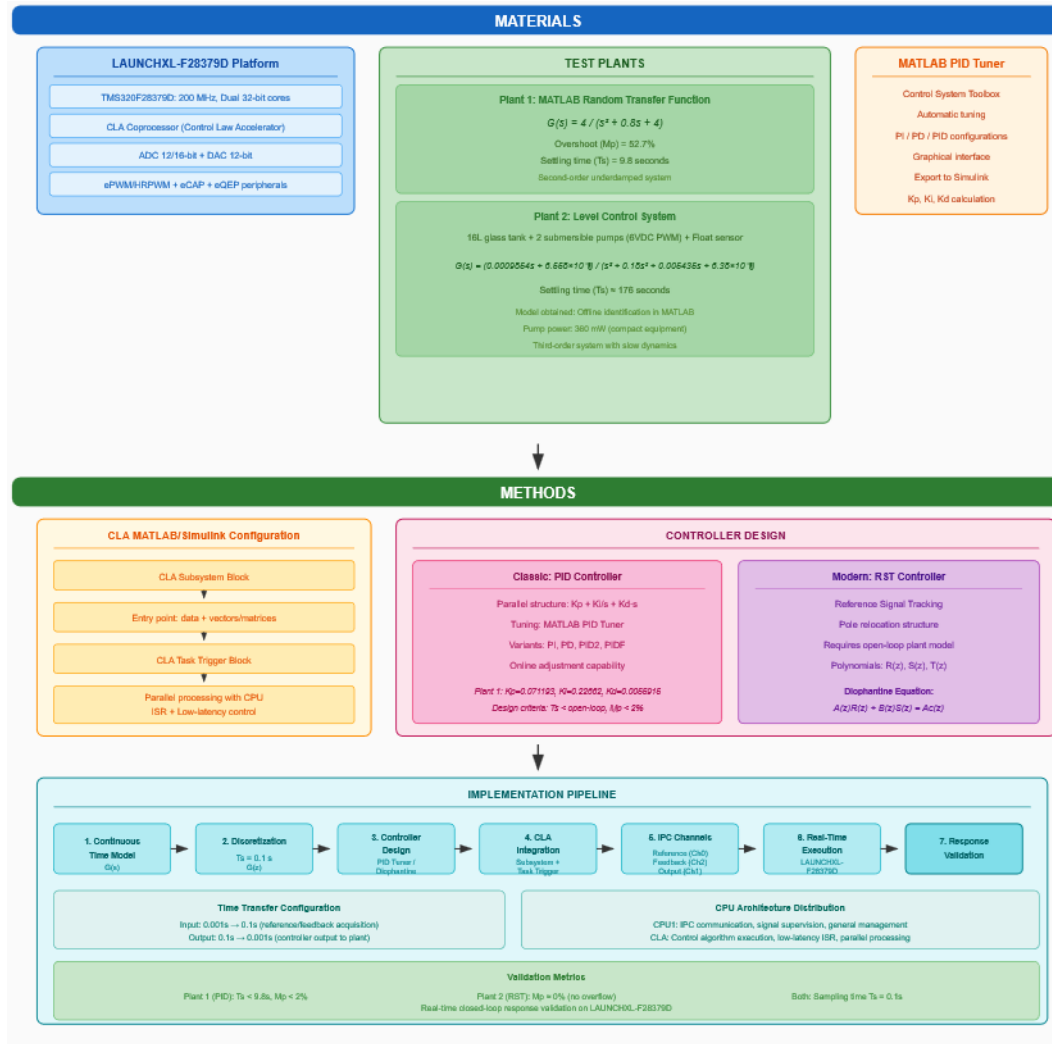


Figura 10. Diagrama metodológico de flujo de trabajo.

Fuente: los autores

Resultados

Implementación de controladores

El controlador PID aplicado a la planta generado por MATLAB fue diseñado e implementado teniendo en cuenta que el sistema tendría un tiempo de sedimentación más corto que el de la respuesta en lazo abierto y un sobrepaso inferior al propuesto. El controlador se ajustó usando el sintonizador PID de MATLAB, utilizando la función de transferencia de planta descrita en la ecuación. El controlador diseñado se muestra en la Figura 7, que tiene una

estructura paralela. La ventaja del sintonizador PID es que permite cambiar la estructura del controlador a medida que se afina. Tras ajustar los parámetros, se obtuvieron los valores , y. Las respuestas para la simulación del sistema de lazo abierto y del controlador de lazo cerrado se muestran en la figura 11. $(Ts)(Mp)2\%(1)K_p = 0.071193K_I = 0.22662K_D = 0.0055915$

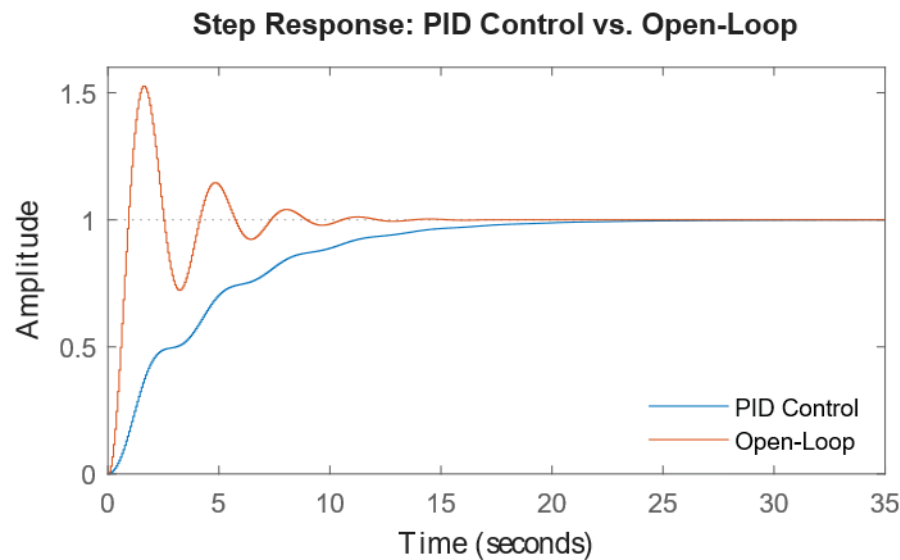


Figura 11. Simulación en lazo abierto de la planta descrita en la ecuación y su controlador PID.(1)

Fuente: Los autores

Tras la adquisición de las constantes , y para el controlador PID, se implementó la estrategia de control digital para la planta de pruebas, tal como se delineó en la ecuación , . El resultado de esta implementación se muestra en la figura 12, que también muestra la configuración del controlador PID en el ecosistema CLA de la plataforma LAUNCHXL-F28379D. $K_p K_I K_D(1)K_p K_I K_D(1)$

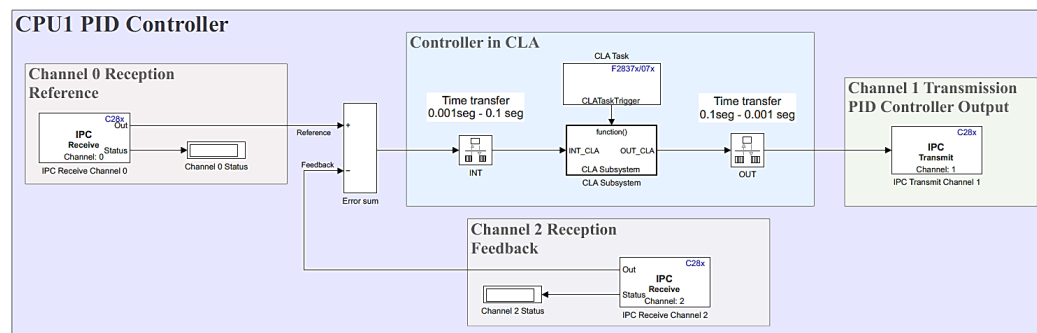


Figura 12. Estructura propuesta para el controlador PID en la planta de pruebas.(1)(1)

Fuente: Los autores

Para validar el funcionamiento de la estructura de control propuesta para la planta de pruebas, el sistema presentado en la ecuación fue discretizado. Para este proceso, se utilizó un tiempo de

muestreo en segundos. La representación discreta del sistema se presenta en la ecuación , y la respuesta a la implementación de la estrategia de control en la plataforma LAUNCHXL-F28379D se muestra en la figura 13. $(1) T_s = 0.1(3)(1) T_s = 0.1(3)$

$$G(z) = \frac{0.17604z^2 + 60.16172}{z^2 - 1.44z + 0.77777} \quad (3)$$

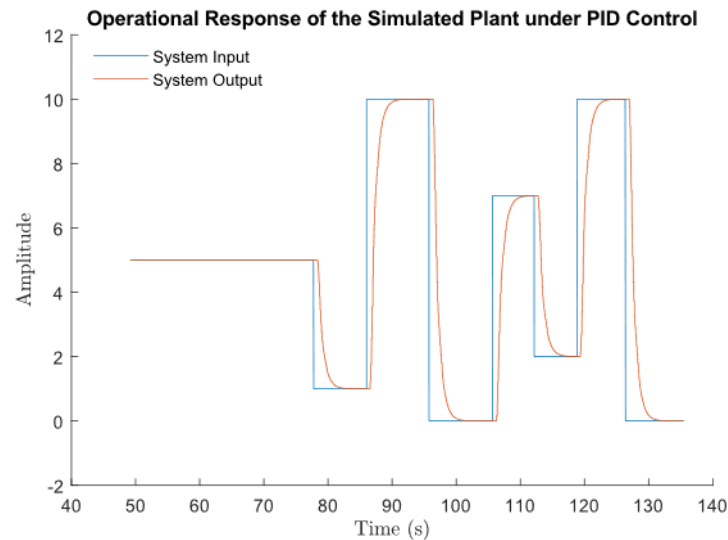


Figura 13. Respuesta del controlador PID para la planta de prueba (1) en la plataforma LAUNCHXL-F28379D utilizando el ecosistema COLA.

Fuente: Los autores.

El diseño del controlador RST aplicado a la planta de niveles se basó en su modelo matemático discreto, que se obtuvo a partir de la ecuación . Una vez más, usando un tiempo de muestreo de segundos, se obtuvo la representación matemática presentada en la ecuación. Posteriormente, se adoptó la configuración del controlador RST, tal como se muestra en la figura 9. Esto implicaba identificar los valores de los polinomios , y , que eran esenciales para la configuración del sistema y lograr el comportamiento de lazo cerrado deseado. Los polinomios en cuestión se obtuvieron resolviendo la ecuación diofántica presentada en la ecuación . $(2) T_s = 0.1(4) R(z) S(z) T(z) (5)$

$$(2) T_s = 0.1(4) R(z) S(z) T(z) (5)$$

$$G(z) = \frac{2.45 \times 10^{-6} z^3 + 2.466 \times 10^{-6} z^2 - 2.417 \times 10^{-6} z - 2.433 \times 10^{-6}}{z^3 - 2.982 z^2 + 2.964 z - 0.9822} \quad (4)$$

$$A(z)R(z) = B(z)S(z) = A_c(z) \quad (5)$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones para el controlador RST de la planta de nivel, se obtuvieron los polinomios para el bucle de control, como se muestra en la figura 14. Para este diseño, se tuvo en cuenta que el comportamiento del sistema de control en lazo cerrado no debía presentar oscilaciones mayores que el valor de referencia, ya que esto representaría un desbordamiento del

nivel máximo permitido por las características del sistema.

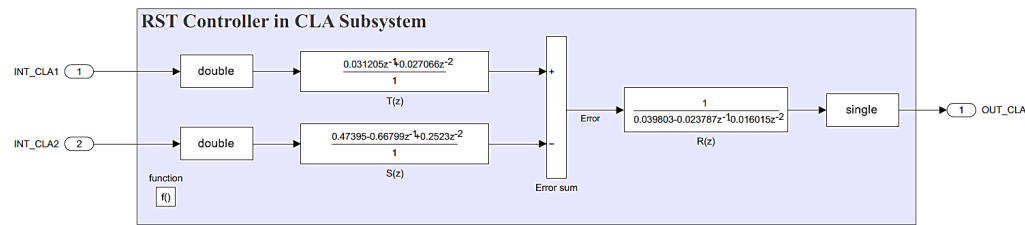


Figura 14. Polinomios obtenidos para el controlador RST de la planta descrita por la ecuación .(4)
(4)

Fuente: Los autores.

Una vez conocidos los valores de los polinomios , y para la estructura de control RST, el controlador mostrado en la Figura 8 fue simulado en MATLAB/Simulink. En este controlador, se debía garantizar un sobrepaso mínimo (cercano a cero) dada la dinámica de la planta a controlar. El resultado de la simulación del controlador RST para la planta de nivel se muestra en la figura 15.
 $R(z)S(z)T(z)(Mp)$
 $R(z)S(z)T(z)(Mp)$

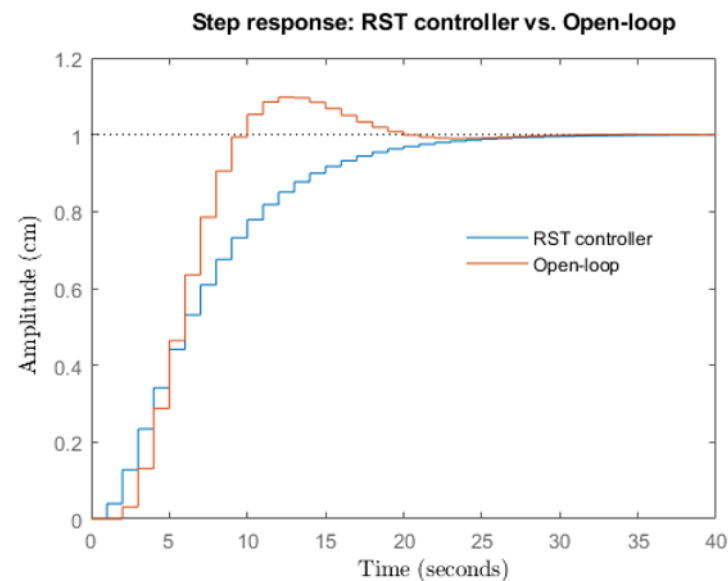


Figura 15. Simulación en lazo abierto de la planta descrita en la ecuación y su controlador RST.(4)
(4)

Fuente: Los autores

Tras la simulación de la estrategia de control RST para la planta de nivel, el bucle de control representado en la figura 8 se implementó en MATLAB/Simulink utilizando el ecosistema CLA de la plataforma LAUNCHXL-F28379D, empleando una metodología análoga a la empleada para el controlador PID. El resultado de esta estructura de implementación se muestra en la figura 16.

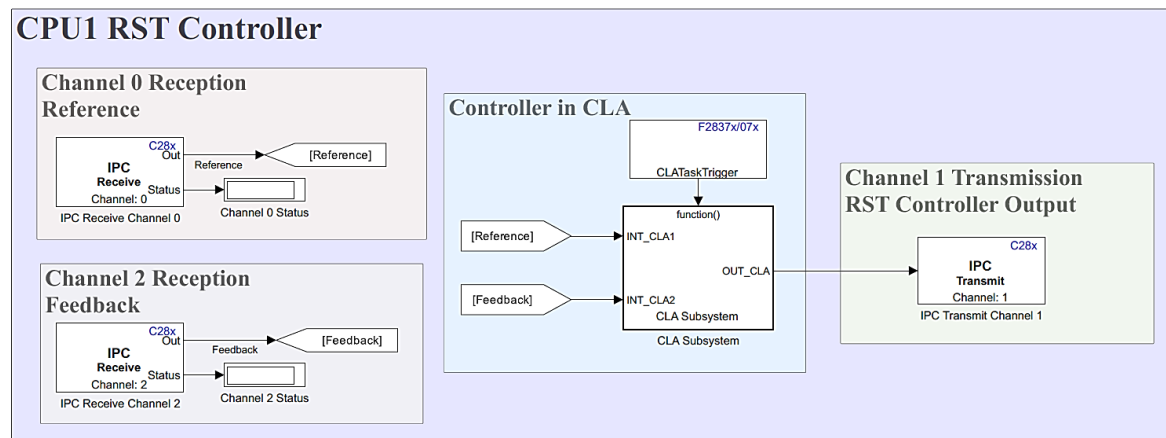


Figura 16. Estructura propuesta para el controlador RST a nivel de planta, usando ecuaciones y como parámetros.(4)(5)(4)(5)

Fuente: Los autores

La respuesta obtenida para la implementación descrita en la figura 16 se muestra en la figura 17. El sistema de control digital y la planta descrita en la ecuación se discretizaron a un tiempo de muestreo en segundos. Se utilizó el mismo tiempo de muestreo que la implementación digital para el controlador PID, asegurando que los parámetros y la configuración del ecosistema CLA en la plataforma LAUNCHXL-F28379D tuvieran las mismas condiciones operativas.(4) $T_s = 0.1$ (4) $T_s = 0.1$

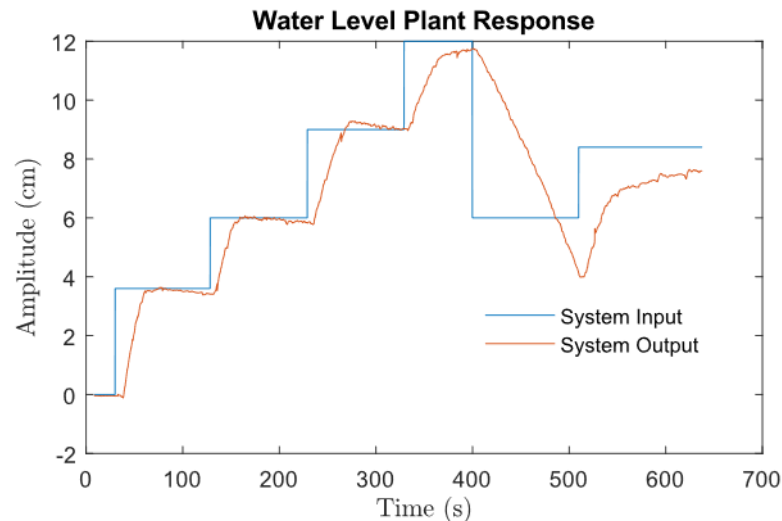


Figura 17. Respuesta del controlador RST para la planta de nivel en la plataforma LAUNCHXL-F28379D utilizando el ecosistema COLA.

Fuente: Los autores

Discusión

Tras presentar los resultados para la implementación de los controladores digitales propuestos, se analizaron algunas implicaciones importantes de los experimentos realizados:

Los controladores digitales propuestos para cada una de las plantas usaban un tiempo de muestreo de segundos. La respuesta transitoria para la planta aleatoria muestra que esta vez cumple con el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, permitiendo capturar adecuadamente la dinámica del sistema. En la planta nivelada, se produjo un posible sobremuestreo porque el sistema tiene dinámicas lentas que varían poco según el tiempo de muestreo elegido. Esto puede representar un aumento innecesario de la carga computacional del CLA, acumulación de error numérico en la acción integral del controlador PID debido a iteraciones excesivas y un alto consumo de energía. Realizar pruebas con tiempos de muestreo diferenciales para las plantas aleatorias y niveladas podría mejorar la respuesta de estas últimas, ya que, al tener dinámica lenta, un tiempo de muestreo más largo se adaptaría mejor a sus características. Finalmente, el CLA podía ajustarse a resoluciones de microsegundos, lo que ayudaría a optimizar la capacidad de los microcontroladores C2000 para aplicaciones de control motor. $T_s = 0.1T_s = 0.1$

Otro elemento importante del estudio se centra en las limitaciones del hardware. Por ejemplo, los microcontroladores C2000 tienen memoria compartida entre CPU1, CPU2 y el CLA, lo que restringe el tamaño de los búferes y el orden de los controladores a implementar. En cuanto a potencia de procesamiento, los microcontroladores C2000 tienen velocidades de 200 MHz y una arquitectura de punto fijo optimizada para el control, lo que permite al CLA ejecutar acciones en paralelo a través de buses compartidos con la CPU. Los sistemas y dispositivos utilizados son de bajo consumo, lo que implica que deben añadirse etapas adicionales de circuitos de potencia para controlar dispositivos más robustos. También se podían usar otros tipos de protocolos de comunicación externos para enviar y gestionar información de forma remota.

Comparando los resultados obtenidos con estudios previos reportados en la literatura, se encontraron algunas diferencias en las aplicaciones realizadas. En (11), se desarrolló un controlador en tiempo real para convertidores buck. El estudio se basó en un enfoque basado en modelos para reducir procesos complejos de programación y validación experimental con arquitectura hardware/software. En (15), se desarrolló una plataforma de control de bajo coste para sistemas eléctricos con sensores de corriente y voltaje para validación en un convertidor buck trifásico de 20 kVA. El trabajo realizado en (16) corresponde a una implementación experimental de hardware y software dedicada al entrenamiento de velocidad variable de un motor asíncrono sin carga alimentado por un inversor trifásico de dos niveles usando control en lazo abierto con comunicación en tiempo real entre el codificador y MATLAB/Simulink. En (26), se desarrolló una propuesta para la implementación de controladores digitales utilizando microcontroladores de Texas Instruments mediante prototipado rápido de control (RCP) y software libre para el desarrollo de prácticas que usan PWM, ADC, DAC y otros periféricos de microcontroladores C2000. En este trabajo, los autores utilizaron Energia IDE como marco de referencia para las implementaciones de controladores. Por último, aunque

los estudios reportados en la literatura presentan aplicaciones para la electrónica de potencia y sistemas remotos en tiempo real, no utilizan características específicas de los microcontroladores C2000 como IPC, CLA, procesos de doble núcleo, entre otros.

Implicaciones industriales

El marco experimental demuestra la viabilidad de los ecosistemas C2000 para el desarrollo de sistemas de control industrial, donde el enfoque de diseño basado en modelos permite reducciones estimadas en los tiempos de desarrollo del 60-80% para el diseño de algoritmos, 50-70% para pruebas unitarias usando validación PIL (Processor-in-the-Loop), y 40-60% para integración periférica en comparación con los métodos tradicionales de codificación manual en C/C++. La plataforma LAUNCHXL-F28379D incluye varios dispositivos adicionales que pueden utilizarse en aplicaciones industriales específicas, como la capacidad de controlar simultáneamente inversores de tracción, convertidores DC-DC y cargadores a bordo en vehículos eléctricos a la mitad del coste tradicional del sistema, logrando una eficiencia del 96% en el control de motores síncronos y un 99% de precisión en la detección de fallos de rodamientos, arcos eléctricos, y desequilibrios en los sistemas de ventilación. Otra ventaja de los microcontroladores C2000 es su capacidad para adaptarse temporalmente a tiempos de muestreo bajos (del orden de microsegundos) para responder a aplicaciones de sistemas de rápida evolución. En cuanto a protocolos de comunicación, los microcontroladores C2000 están equipados con protocolos industriales como CAN, facilitando una rápida integración en redes y sistemas industriales.

Limitaciones de investigación

La investigación realizada presenta limitaciones que deben considerarse para la correcta interpretación de los resultados y su posible transferencia a entornos industriales. Estas limitaciones se clasifican en tres categorías: metodológicas, hardware y alcance experimental.

Limitaciones metodológicas

El tiempo de muestreo se aplicó de forma uniforme a las plantas de prueba utilizadas sin realizar un análisis de sensibilidad paramétrica para evaluar el impacto de diferentes valores en el rendimiento del controlador. El modelo matemático de la planta de nivelación se obtuvo mediante un proceso de identificación offline en MATLAB, sin documentar el método específico de identificación utilizado, los criterios de validación del modelo ni el porcentaje de ajuste obtenido. Esta omisión limita la repetibilidad del estudio y la evaluación de la incertidumbre asociada al modelo identificado. Además, no se realizó un análisis robusto de estabilidad ni una evaluación de los márgenes de ganancia y fase para los controladores diseñados, lo cual es relevante para garantizar el rendimiento frente a variaciones paramétricas en el proceso. El controlador PID se ajustaba exclusivamente usando la herramienta MATLAB PID Tuner, sin comparaciones con otros métodos de ajuste documentados en la literatura, como Ziegler-Nichols, Cohen-Coon o métodos basados en optimización. Para el controlador RST, no se especificaron los criterios de selección para los polos del sistema en lazo cerrado, ni se documentó el polinomio característico deseado, lo que limitaba la comprensión del proceso de diseño. T_s T_s

Restricciones de hardware

La plataforma LAUNCHXL-F28379D tiene arquitectura de doble núcleo (CPU1 + CPU2) con capacidad de procesamiento paralelo y redundancia; sin embargo, las implementaciones presentadas usan solo CPU1 junto con el CLA, dejando CPU2 sin explotar. Esta configuración no aprovecha las capacidades disponibles en este tipo de sistema.

El sistema de niveles utilizado como planta de prueba emplea bombas sumergibles con una potencia máxima de 360 mW, lo que limita la validación a sistemas de muy baja potencia. La transferencia directa de los resultados a sistemas industriales que operan en el rango de kilovatios a megavatios requeriría etapas de potencia adicionales y circuitos de protección no contemplados en el marco experimental. La detección de nivel se realizaba mediante un flotador con una salida resistiva conectada directamente al ADC del microcontrolador, sin incorporar aislamiento entre la etapa de detección y el controlador. Esta configuración es inadecuada para entornos industriales donde se requiere protección contra el ruido electromagnético y las diferencias de potencial de tierra. El uso de memoria CLA para los algoritmos implementados no estaba documentado, lo que es información necesaria para evaluar la escalabilidad a controladores de orden superior como observadores de estado extendido o controladores adaptativos. La memoria CLA tiene restricciones de tamaño que pueden limitar la complejidad de los algoritmos implementables. La comunicación se restringió a canales internos de IPC entre CPU1 y CLA, sin integración de protocolos de comunicación industrial como CAN y EtherCAT, que son estándar en aplicaciones de automatización industrial y están disponibles en la plataforma utilizada.

Limitaciones del alcance experimental

La validación experimental se limitó a dos plantas de prueba con dinámica lenta: un sistema de segundo orden generado aleatoriamente en MATLAB (segundos) y un sistema de nivel de tercer orden (). No se incluyeron plantas con dinámica rápida representativa de aplicaciones industriales típicas de microcontroladores C2000, como el control de motores eléctricos, convertidores de potencia conmutados o bucles de corriente en inversores trifásicos. La comparación con estudios previos fue de carácter descriptivo y no incluyó pruebas experimentales comparativas bajo condiciones equivalentes. Los mismos controladores no se implementaron en plataformas alternativas (Arduino, dSPACE, FPGA) que habrían permitido cuantificar las ventajas específicas del ecosistema C2000 en términos de latencia, consumo de recursos computacionales o facilidad de implementación. Los experimentos se llevaron a cabo en condiciones de laboratorio controladas, sin evaluar el rendimiento de los controladores frente a perturbaciones externas, variaciones de carga, ruido en señales de medición o condiciones ambientales adversas (temperatura, humedad, interferencias electromagnéticas) que caracterizan entornos industriales reales.

$$T_s = 9.8T_s = 176 \text{ seconds} \quad T_s = 9.8T_s = 176 \text{ seconds}$$

Finalmente, no se realizaron pruebas prolongadas de operación para evaluar la estabilidad a largo plazo de los controladores implementados, la deriva del sensor o posibles problemas de acumulación numérica en los integradores durante la operación continua.

Hoja de ruta para la investigación futura

Finalmente, la Figura 18 presenta una hoja de ruta de posibles líneas de investigación que podrían desarrollarse en el futuro basándose en las tecnologías utilizadas en este estudio.

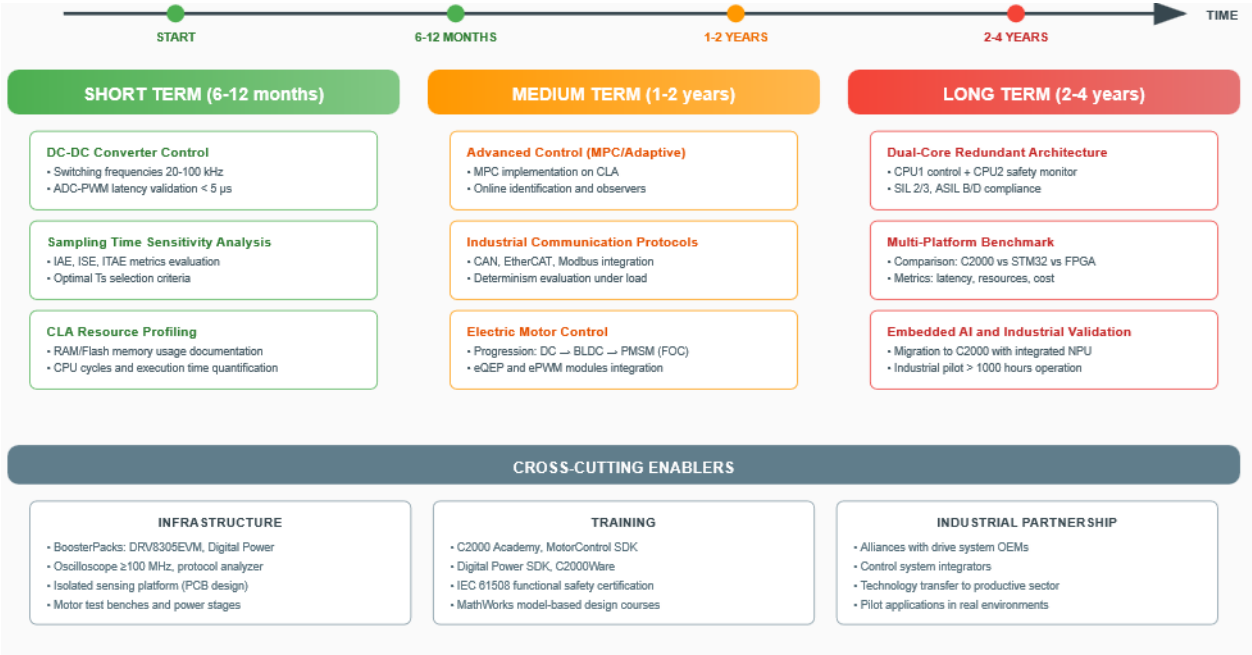


Figura 18. Hoja de ruta sobre las futuras líneas de investigación.
Fuente: Los autores.

Conclusiones

La investigación realizada ha demostrado la viabilidad y efectividad de los ecosistemas de Texas Instruments, en particular la plataforma LAUNCHXL-F28379D, para implementar estrategias de control en tiempo real. La integración de módulos como el CLA (Control Law Accelerator) permitió el desarrollo de algoritmos con circuitos de control de baja latencia y procesamiento en paralelo, lo cual fue fundamental para garantizar una respuesta adecuada del sistema en aplicaciones experimentales.

La planta nivelada, desarrollada como prototipo experimental, demostró que su respuesta transitoria era lenta. Uno de los factores que causan este comportamiento es el uso de un sistema hidráulico con dos bombas motor para equipos compactos con una potencia máxima de 360 mW, ya que aunque estas bombas motor limitan la velocidad de respuesta del sistema, son útiles para validar la eficacia de los controladores en condiciones reales para sistemas estáticos a pequeña escala.

Las pruebas realizadas mostraron que los coprocesadores CLA son relativamente flexibles. Aunque fueron diseñados para adaptarse a sistemas como los propios motores y convertidores de

potencia de Texas Instruments, son lo suficientemente versátiles como para usarse en otros tipos de procesos físicos como el control de nivel o sistemas genéricos. Esta característica aumenta la aplicabilidad del microcontrolador C2000 tanto en entornos académicos como industriales.

Sin embargo, la aplicación de Simulink y el método de diseño basado en modelos (MBD) fue esencial para optimizar el diseño, la simulación y la ejecución de los controladores PID y RST. La generación automática de código utilizando el codificador embebido y el conjunto de bloques de microcontrolador C2000 permitió una transición fluida del entorno de simulación a la ejecución por hardware, minimizando errores y reduciendo significativamente los tiempos de desarrollo.

Por último, destacan la arquitectura de CPU del microcontrolador C2000 y la configuración eficiente de periféricos como ePWM, ADC y DAC, consolidando los ecosistemas de Texas Instruments como una solución robusta, escalable y accesible para el desarrollo de sistemas de control en tiempo real. Esta plataforma es adecuada no solo para fines educativos, sino que también representa una herramienta poderosa para la innovación en entornos industriales.

Declaración de contribución de autoría de CreditT

Conceptualización - Ideas: Sebastián Cardona Ramírez, Xiomara Rodríguez Gil, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Curación de datos: Sebastián Cardona Ramírez, Xiomara Rodríguez Gil, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Análisis formal: Sebastián Cardona Ramírez, Xiomara Rodríguez Gil, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Investigación: Sebastián Cardona Ramírez, Xiomara Rodríguez Gil, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Metodología: Sebastián Cardona Ramírez, Xiomara Rodríguez Gil, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Dirección de Proyecto: Sebastián Cardona Ramírez, Xiomara Rodríguez Gil, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Recursos: Sebastián Cardona Ramírez, Xiomara Rodríguez Gil, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Software: Sebastián Cardona Ramírez, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Supervisión: Diego Fernando Ramírez Jiménez. Validación: Sebastián Cardona Ramírez, Xiomara Rodríguez Gil, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Redacción - borrador original - Elaboración: Sebastián Cardona Ramírez, Diego Fernando Ramírez Jiménez. Redacción - revisión y edición -Elaboración: Sebastián Cardona Ramírez, Diego Fernando Ramírez Jiménez.

Financiación: no declara.

Conflicto de intereses: no declara. Aspecto ético: no declara.

Referencias

1. Hoyos-Gutiérrez J, Cardona-Aristizabal J, Muñoz-Gutiérrez P, Ramirez-Jimenez D. A Systematic Literature Review on Rapid Control Prototyping Applications. IEEE R Iberoamericana Tecnologías Aprendizaje. 2023;18:76-85.

<https://doi.org/10.1109/RITA.2023.3250559>

2. Ramirez-Jimenez DF, Parrado AL, Medina JV. Overview of a framework for Implementation of digital controllers in Energia IDE using Texas Instruments microcontrollers. 2021 IEEE 5th Colombian Conference on Automatic Control (CCAC) [Internet]. Ibagué, Colombia: IEEE; 2021 [cited 2024 July 4]. p. 13-18.

<https://doi.org/10.1109/CCAC51819.2021.9633305>

3. Microcontrollers (MCUs) & processors | TI.com [Internet]. Available from: <https://www.ti.com/microcontrollers-mcus-processors/overview.html>

4. Instruments T. C2000 real-time microcontrollers | TI.com [Internet]. Available from: <https://www.ti.com/microcontrollers-mcus-processors/c2000-real-time-control-mcus/overview.html>

5. Rahman MA, Abushaiba AA, Elrajoubi AM. Integration of C2000 Microcontrollers with MATLAB Simulink Embedded Coder: A Real-Time Control Application. 2024 7th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE) [Internet]. Los Angeles, CA, USA: IEEE 2024

<https://doi.org/10.1109/CEEGE62093.2024.10744177>

6. Angrilli D, Centi F, Credo A, Tursini M. Neural Network Control of AC/DC Converters Robust to AC Grid Faults. 2024 IEEE 22nd Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON) [Internet]. Porto, Portugal: IEEE 2024

<https://doi.org/10.1109/MELECON56669.2024.10608575>

7. Ramírez-Jiménez DF. Proposal of a Flying-Cutting Plant for the Development of Control Systems in Academic Environments. Ciencia e Ingeniería Neogranadina. 2025;35:87-112.

<https://doi.org/10.18359/rcin.7500>

8. Xu Q, Zhuang J, Xu Z. Parameter Identification Design of Intelligent Contactor Based on DSP-Control Law Accelerator. 2024 9th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE) [Internet]. Shanghai, China: IEEE 2024

<https://doi.org/10.1109/ACPEE60788.2024.10532501>

9. Yu K, Yang Z, Li Y, Yi H, Wang F, Zhuo F. Three-Phase Three-Level Shunt APF Control System Based on Multi-Task Parallel MCU. 2020 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC) [Internet]. New Orleans, LA, USA: IEEE 2020

<https://doi.org/10.1109/APEC39645.2020.9124099>

10. Alonge F, D'ippolito F, Garraffa G, Giaconia GC, Latona R, Sferlazza A. Sliding Mode Control of Quadratic Boost Converters Based on Min-Type Control Strategy. IEEE Access. 2023;11:39176-39184.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3267984>

11. Gorel G, Bektes Y, Korkmaz F, Ozkaya H. PID Controller Design in Buck Converters: Real-Time Implementation and Performance Evaluation with TMS320F28379D. Journal of Engineering and Applied Sciences. 2025;3:1-14.

<https://doi.org/10.70988/ajeas.1583799>

12. Malele RH, Mendu B, Monchusi BB. Microcontroller-Driven Battery Management in Hybrid Energy Systems: A Systematic Review of Applications, Control Strategies, and Emerging Trends. IEEE Access. 2025;13:29341-29360.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3539929>

13. Rahman MA, Abushaiba AA, Elrajoubi AM. Integration of C2000 Microcontrollers with MATLAB Simulink Embedded Coder: A Real-Time Control Application. 2024 7th International Conference on Electrical Engineering and Green Energy (CEEGE) [Internet]. Los Angeles, CA, USA: IEEE 2024

<https://doi.org/10.1109/CEEGE62093.2024.10744177>

14. Ramírez-Jiménez DF, Torres Valencia CA. Experimental Design and Simulation of a Fly-Cutting Plant for Academic Environment Practices. *Machines*. 2024;13:15

<https://doi.org/10.3390/machines13010015>

15. Merchan-Villalba LR, Lozano-Garcia JM, Gonzalez-Longatt F, Ramirez-Arredondo JM, Pizano-Martinez A, Avina-Cervantes JG. Low-Cost Real-Time Control Platform with Embedded Isolated Electrical Sensors for Power Electronics. *Electronics*. 2023;12:3320.

<https://doi.org/10.3390/electronics12153320>

16. Halimi H, Elgarouaz M, Lazrak L, Daoudi S. Experimental validation of an open loop drive control of an asynchronous motor with the TMS320F28379D DSP card and speed sensor. *Results in Engineering*. 2025;26:105116.

<https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105116>

17. LAUNCHXL-F28379D Development kit | TI.com [Internet]. [cited 2025 June 30]. Available from:

<https://www.ti.com/tool/LAUNCHXL-F28379D>

18. Ogata K. Ingeniería de control moderna. 5a. ed. Madrid: Pearson Educación; 2010

19. Smith CA, Corripio AB. Principles and practice of automatic process control. 2nd ed. New York: J. Wiley; 1997

20. Dorf RC, Bishop RH. Modern control systems. Thirteenth edition. Hoboken: Pearson; 2016

21. Ramírez-Jiménez DF, Bedoya-Benítez PA, Munoz-Gutierrez PA. Visualization and Control System for a Wastewater Laboratory Plant with Biological Treatment. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. 2024;34:105-122.

<https://doi.org/10.18359/rcin.7270>

22. A. H. Bharmal, M. Khan, A. Dilawar, A. Ali, S. U. Baig, I. A. Makda, A. Usman, H. Qamar. Hardware-in-Loop-enabled Controller Design for Isolated Boost Converter using Ziegler-Nichols Method for Electric Vehicle Applications. IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2023. p. 1-6

<https://doi.org/10.1109/IECON51785.2023.10311854>

23. Supriyanto H, Suryatini F, Martawireja ARH, Rudiansyah H. IMPLEMENTASI KONTROLER PID DENGAN METODE TUNING ZIEGLER-NICHOLS DAN COHEN-COON PADA SISTEM SCADA KENDALI LEVEL AIR. *JTT*. 2022;8:149.



<https://doi.org/10.31884/jtt.v8i2.410>

24. Bobál V, Macháček J, Prokop R. Tuning of Digital PID Controllers Based on Ziegler - Nichols Method. IFAC Proceedings Volumes. 1997;30:145-150. doi: 10.1016/S1474-6670(17)41430-3

[https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)41430-3](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)41430-3)

25. Halim AH, Ismail I. Tree physiology optimization on SISO and MIMO PID control tuning. Neural Comput & Applic. 2019;31:7571-7581.

<https://doi.org/10.1007/s00521-018-3588-9>

26. Jiménez DFR, Arbeláez CMG, Gutiérrez PAM. Propuesta para la implementación de controladores digitales usando microcontroladores de Texas Instruments. EIEI ACOFI [Internet]. 2025 [cited 2026 Feb 11];

<https://doi.org/10.26507/paper.4247>