



# POSGRADOS

## Maestría en **MAESTRÍA EN AUTOMATIZACIÓN PARA LA INDUSTRIA 4.0**

RPC-SO-37-NO.653-2023

Opción de Titulación:

Artículos Profesionales de Alto Nivel

Tema:

IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HARDWARE IN THE LOOP DE UNA PLANTA DE NIVEL PARA EL DESARROLLO DE UN CONTROLADOR PID MONITOREADO MEDIANTE IOT

Autor

Jeferson Francisco Toapanta Hurtado

Director:

William Manuel Montalvo López

Quito – Ecuador

2025

***Autor:***



***Jeferson Francisco Toapanta Hurtado.***

Ingeniero Eléctrico en sistemas eléctricos de potencia.  
Candidato a Magíster en Automatización para la Industria 4.0 por  
la Universidad Politécnica Salesiana - Sede el Girón.  
correo electrónico: jtoapantah3@est.ups.edu.ec

***Dirigido por:***



***William Manuel Montalvo López.***

Ingeniero Electrónico en Control y Automatización.  
Máster Universitario en Inteligencia Artificial, Máster en Control  
Electrónico Industrial.  
correo electrónico: wmontalvo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

©2025 Universidad Politécnica Salesiana.

QUITO – ECUADOR – SUDAMÉRICA

JEFERSON FRANCISCO TOAPANTA HURTADO.

***IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HARDWARE IN THE LOOP DE  
UNA PLANTA DE NIVEL PARA EL DESARROLLO DE UN CONTROLADOR  
PID MONITOREADO MEDIANTE IOT.***

# Implementación de un Sistema Hardware-in-the-Loop (HIL) en una Planta de Nivel con Control PID Monitoreado Mediante IoT

Jeferson Toapanta

Universidad Politécnica Salesiana - Ecuador

## Resumen

Este estudio presenta el diseño e implementación de un sistema Hardware-in-the-Loop (HIL) para el control de nivel en una planta, utilizando un controlador PID con monitoreo en tiempo real a través del Internet de las Cosas (IoT). Se desarrolló un modelo de simulación que replica el comportamiento dinámico de una planta física, permitiendo optimizar el desempeño del controlador PID antes de su implementación en entornos industriales reales. El controlador fue sintonizado mediante el método LAMBDA, lo que permitió obtener una respuesta estable, sin sobreimpulsos significativos. La integración con IoT facilitó la supervisión y el ajuste remoto del sistema, reduciendo los costos operativos y mejorando la eficiencia del proceso. Los resultados obtenidos demuestran que el enfoque HIL mejora la precisión del control, reduce el tiempo de respuesta y permite una evaluación más segura de estrategias de control avanzadas.

## Abstract

This study presents the design and implementation of a Hardware-in-the-Loop (HIL) system for liquid level control using a PID controller with real-time monitoring via the Internet of Things (IoT). A simulation model replicating the dynamic behavior of a physical plant was developed, allowing performance optimization of the PID controller prior to deployment in real industrial environments. The controller was tuned using the LAMBDA method, enabling a stable response with no significant overshoot. The IoT integration facilitated remote supervision and adjustment of the system, reducing operating costs and enhancing process efficiency. The obtained results demonstrate that the HIL approach improves control precision, reduces response time, and enables safer evaluation of advanced control strategies.

---

**Palabras clave**— Hardware-in-the-Loop (HIL), Control PID, Internet de las Cosas (IoT), Automatización Industrial, Simulación de Procesos.

# 1 Introducción

La validación de controladores PID es un pilar fundamental en la automatización industrial, especialmente en sistemas donde la precisión y la estabilidad son cruciales. En este contexto, el enfoque *Hardware-in-the-Loop* (HIL) ha surgido como una técnica eficiente para emular el comportamiento dinámico de sistemas físicos complejos sin comprometer la seguridad del entorno físico, permitiendo evaluar estrategias de control en condiciones controladas y económicas. No obstante, su implementación aún presenta limitaciones en entornos que buscan combinar bajo costo, accesibilidad y monitoreo remoto, como lo señala (1).

Diversos estudios han explorado la integración de HIL en procesos industriales, destacando su aplicación en simulaciones de sistemas químicos, robótica y vehículos autónomos. Por ejemplo, (2) validaron controladores para un robot manipulador de dos grados de libertad, demostrando su precisión y robustez. Asimismo, plataformas HIL de bajo costo han sido utilizadas en contextos académicos para simular plantas físicas y optimizar algoritmos de control PID (3), mostrando su potencial para reducir costos operativos y facilitar la formación técnica. En esta línea, (4) desarrollaron una arquitectura de supervisión tipo SCADA con LabVIEW para una planta de nivel, enfocándose en la visualización de variables de proceso y en la implementación de controladores PID, lo que refuerza la utilidad de estos enfoques en aplicaciones educativas.

De forma paralela, el desarrollo del Internet de las Cosas (IoT) ha fortalecido las capacidades de supervisión remota en entornos industriales. Según (5), la integración de sensores y actuadores inteligentes permite automatizar procesos y mejorar la eficiencia operativa. Ejemplos recientes incluyen plataformas IoT académicas con monitoreo y control en la nube, como la desarrollada por (6), que integran simulación mediante Factory I/O y visualización a través de interfaces móviles. Complementariamente, (7) destacan cómo estas soluciones impulsan el mantenimiento predictivo, la sostenibilidad energética y la productividad en la industria.

El presente trabajo presenta el diseño e implementación de un sistema HIL para el control de nivel de líquidos, utilizando un microcontrolador ESP32 de bajo costo y un algoritmo PID ajustado mediante el método Lambda. La integración con IoT, a través de la plataforma Blynk, permite el monitoreo y ajuste remoto del sistema en tiempo real, extendiendo sus capacidades hacia aplicaciones educativas e industriales. En línea con estos objetivos, en (8) se desarrolló una arquitectura basada en ESP32 para el control de nivel con interfaz web, respaldando la viabilidad de este tipo de soluciones en entornos experimentales.

Para lograr una sintonía adecuada del controlador, se aplicó el método Lambda (también conocido como Control Basado en Modelo Interno, IMC), que permite calcular directamente los parámetros PID a partir del modelo matemático de la planta. A diferencia de métodos clásicos como Ziegler–Nichols, Lambda proporciona una respuesta más suave, con menor sobreimpulso y mayor estabilidad (9). Estudios comparativos como el de (10) han demostrado su efectividad en sistemas de caudal variable, validando su idoneidad en contextos reales y educativos.

Este artículo se estructura de la siguiente manera: en la Sección 2 se describe la metodología seguida, incluyendo el modelado de la planta, la sintonía PID y la implementación del sistema HIL. En la Sección 3, se presentan y analizan los resultados experimentales obtenidos en diferentes escenarios de prueba. Finalmente, en la Sección 5, se discuten las principales conclusiones y propuestas para futuros trabajos.

## 2 Metodología

### 2.1 Descripción general del sistema

Esta sección describe la arquitectura general desarrollada para el control de nivel de un tanque de agua, con el objetivo de validar un algoritmo PID mediante una plataforma *Hardware-in-the-Loop* (HIL) integrada con monitoreo IoT.

El sistema está compuesto por una planta virtual programada en LabVIEW que simula el comportamiento dinámico del proceso de nivel, y un controlador físico implementado en un microcontrolador ESP32. Esta arquitectura híbrida permite evaluar el desempeño del algoritmo de control sin requerir una planta física durante las etapas iniciales de validación.

La planta virtual emula una estación de nivel de líquidos y se conecta a un sistema real que

incluye un sensor ultrasónico HC-SR04, una bomba sumergible y un variador de frecuencia, los cuales permiten medir y controlar el nivel del tanque.

El entorno HIL facilita pruebas seguras, repetibles y rápidas, reduciendo los costos y riesgos asociados a prototipos físicos. LabVIEW se encarga de simular el modelo matemático del sistema y de visualizar variables en tiempo real.

Además, se integró una plataforma de monitoreo remoto utilizando Blynk sobre ESP32, lo cual permite visualizar y registrar variables como el setpoint (SP), la variable del proceso (PV) y la variable de control (CV), proporcionando una solución moderna basada en IoT.

Esta arquitectura se resume en el diagrama de tuberías e instrumentos (P&ID) de la Figura 1, donde se observa la interacción entre la planta virtual, el controlador físico implementado en ESP32 y la plataforma de monitoreo IoT Blynk.

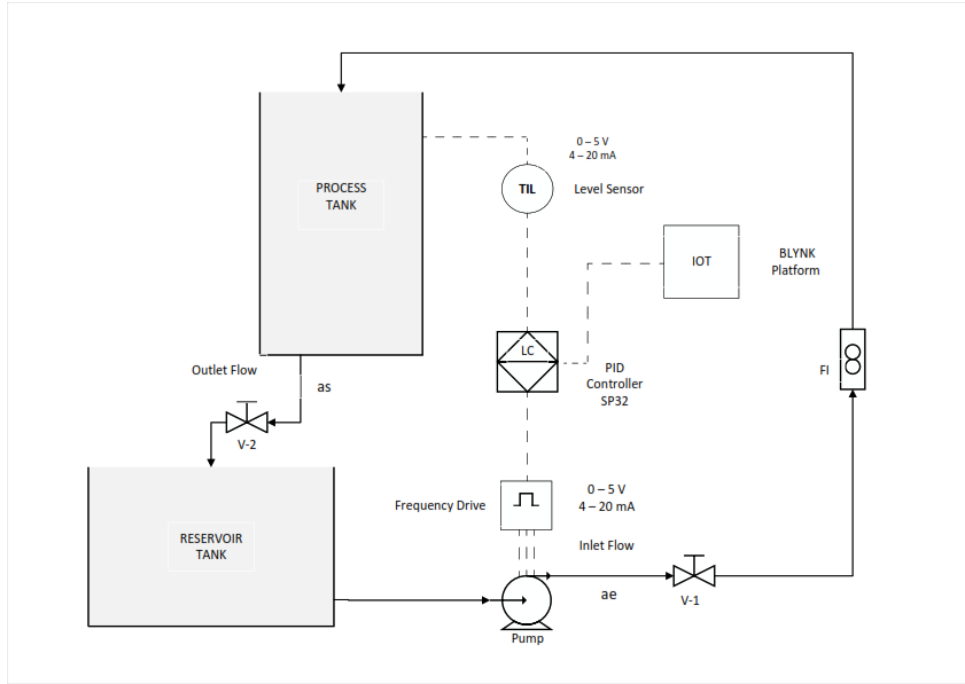


Figure 1: Esquema general del sistema HIL para el control de nivel de líquido con monitoreo IoT.

## 2.2 Fundamento Teórico del Método Lambda

El método de sintonía Lambda, propuesto inicialmente por Dahlin (1968), es ampliamente utilizado en la industria para la sintonía de controladores PID debido a su robustez y facilidad de implementación. Su objetivo es ajustar el comportamiento del sistema cerrado para que siga una dinámica deseada definida por un parámetro de ajuste  $\lambda$  (11).

En este enfoque, se parte de un modelo de planta de primer orden con retardo (FOPDT), cuya función de transferencia se expresa como se muestra en la ecuación (1):

$$G(s) = \frac{Ke^{-Ls}}{1 + \tau s} \quad (1)$$

Donde:

- $K$  es la ganancia del proceso.
- $L$  es el tiempo muerto.
- $\tau$  es la constante de tiempo del proceso.

El controlador PID se diseña para cancelar los polos del sistema y posicionar el polo del sistema cerrado en  $-1/\lambda$ , lo cual permite definir el comportamiento dinámico deseado. Aunque en algunas

referencias se utilizan variantes de las ecuaciones que incorporan el término  $0,5L$  para mejorar la robustez del sistema, en este trabajo se ha optado por la formulación estándar ampliamente difundida y utilizada por autores como (9), la cual se expresa como se muestra en (2):

$$K_c = \frac{\tau}{K_p(\lambda + L)}, \quad T_i = \tau, \quad T_d = \frac{\tau L}{2\lambda + L} \quad (2)$$

Donde  $\lambda$  es un parámetro que se selecciona según el compromiso entre rapidez de respuesta y robustez del sistema.

### 2.3 Identificación del Modelo Matemático

Para el diseño y validación del controlador PID dentro del esquema Hardware-in-the-Loop (HIL), se requiere un modelo matemático representativo de la dinámica de la planta. En este trabajo se ha optado por modelar la planta como un sistema de primer orden con retardo (FOPDT), dado que este tipo de representación es ampliamente utilizado para describir procesos con dinámica lenta y retardo en la respuesta (12).

La función de transferencia obtenida para el modelo identificado se presenta en (3):

$$G(s) = \frac{1,5 \cdot e^{-2s}}{18s + 1} \quad (3)$$

donde:

- $k_p = 1,5$  representa la ganancia estática del proceso.
- $L = 2$  s corresponde al tiempo muerto o retardo del sistema.
- $\tau = 18$  s es la constante de tiempo del proceso.

Los parámetros fueron determinados mediante una prueba de entrada escalón aplicada en el entorno de simulación de LabVIEW, observando la evolución de la variable de proceso (PV). Se utilizó el criterio del 63 % del valor final para estimar la constante de tiempo  $\tau$ , y se identificó el retardo  $L$  como el tiempo en el que la respuesta comienza a variar tras la aplicación del escalón.

En la Figura 2 se presenta la respuesta del sistema ante dicha entrada escalón. La curva azul representa la variable de proceso (PV), mientras que la línea roja indica el valor constante de la entrada (CV). El punto donde la respuesta alcanza aproximadamente el 63 % de su valor final permite determinar la constante de tiempo  $\tau = 18$  s. Asimismo, se observa un pequeño intervalo inicial sin respuesta, correspondiente al tiempo muerto  $L = 2$  s. La ganancia del proceso  $k_p = 1,5$  se estimó a partir del cociente entre el valor final de la salida y la magnitud del escalón aplicado.

Esta aproximación permitió ajustar el modelo teórico al comportamiento observado, facilitando la posterior sintonía del controlador PID.

Este modelo fue posteriormente integrado en el sistema HIL como base para el desarrollo y validación del algoritmo de control, y también utilizado como planta virtual en la plataforma IoT, permitiendo el monitoreo remoto del desempeño del sistema.

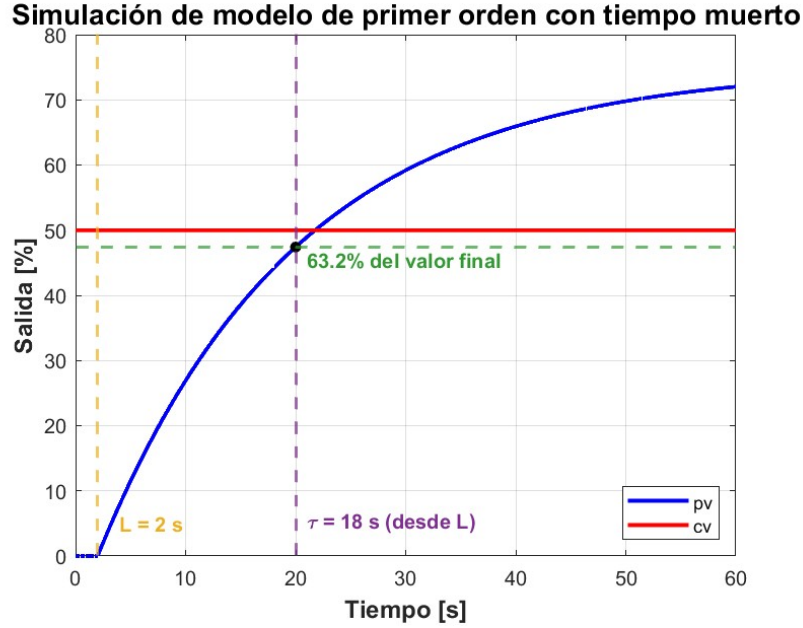


Figure 2: Respuesta del sistema a una entrada escalón para la identificación del modelo FOPDT.

Como se resume en la Tabla 1, los parámetros obtenidos permiten representar adecuadamente la dinámica del sistema bajo el modelo FOPDT:

Table 1: Parámetros del modelo FOPDT identificado para la planta de nivel

Parámetro	Valor	Descripción
$k_p$	1.5	Ganancia estática del proceso
$L$	2 s	Tiempo muerto (retardo del sistema)
$\tau$	18 s	Constante de tiempo del proceso

## 2.4 Sintonía del Controlador PID con el Método Lambda

Para garantizar un desempeño adecuado del sistema de control, se implementó la sintonía del controlador PID mediante el método Lambda, también conocido como *Internal Model Control* (IMC). Este enfoque permite calcular los parámetros del controlador directamente a partir del modelo matemático de la planta, ajustando la respuesta del sistema según el nivel deseado de robustez y rapidez (9).

El método Lambda requiere como entrada los parámetros del modelo FOPDT (First-Order Plus 120 Dead Time) identificados experimentalmente, que son los mostrados en la Tabla 1.

A partir de estos valores, el parámetro de diseño  $\lambda$  se determinó según (4):

$$\lambda = \frac{L}{2} + 3\tau \quad (4)$$

Esta formulación establece un equilibrio entre velocidad de respuesta y estabilidad, lo cual resulta especialmente adecuado para procesos con bajo retardo relativo. Sustituyendo estos valores en las ecuaciones de sintonía del método Lambda, se obtienen los parámetros del controlador PID como se muestra en (5):

$$K_c = \frac{\tau}{k_p \left(\frac{L}{2} + 3\tau\right)}, \quad T_i = \tau, \quad T_d = \frac{\tau L}{2\tau + L} \quad (5)$$

Como reporta (13), la implementación del método Lambda para la sintonía de controladores PID en procesos autorregulados e integrantes resulta adecuada en entornos educativos con equipos

de bajo costo. En su estudio, se observó que esta técnica proporciona una respuesta estable con un bajo sobreimpulso, coincidiendo con los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Estas expresiones fueron implementadas en la interfaz de LabVIEW, lo que permitió realizar el cálculo automático y preciso de los parámetros del controlador. Los valores finales obtenidos se muestran en la Tabla 2:

Table 2: Parámetros calculados del controlador PID

Parámetro	Valor
$K_c$	0,223
$K_i$	0,0552
$K_d$	0,0994

Los parámetros calculados se aplicaron directamente al sistema HIL, logrando una acción de control eficiente y estable. Adicionalmente, la plataforma LabVIEW facilitó el ajuste en tiempo real y la visualización de la respuesta dinámica, permitiendo validar de forma inmediata el desempeño del sistema ante variaciones en el nivel del tanque.

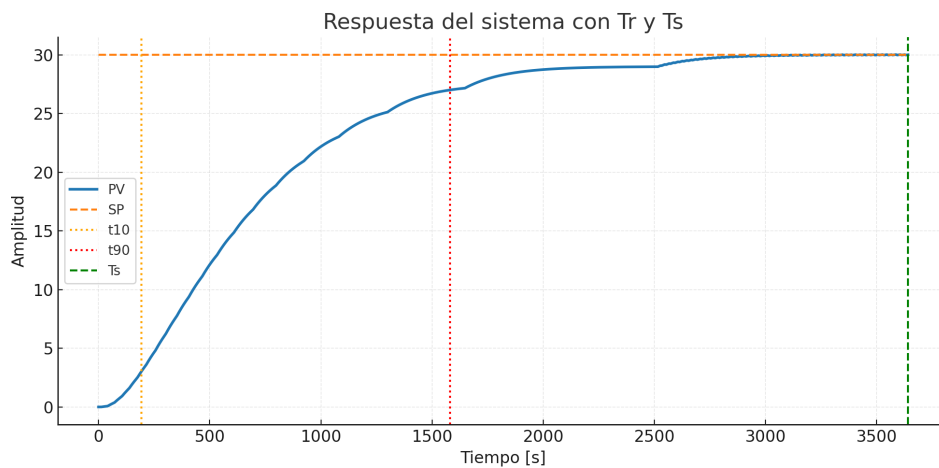


Figure 3: Respuesta del sistema con tiempos característicos:  $T_r$  (tiempo de subida) y  $T_s$  (tiempo de establecimiento).

En la Figura 3 se presenta la respuesta del sistema ante un cambio en la referencia. Se determinó un tiempo de respuesta ( $T_r$ ) de 2,31 minutos, medido entre los instantes en que la variable de proceso alcanza el 10% y el 90% de su valor final. Asimismo, el tiempo de establecimiento ( $T_s$ ) fue de 4,35 minutos, definido como el momento a partir del cual la salida permanece dentro de una banda de  $\pm 2\%$  en torno al valor final. Tal como es característico del método Lambda, la dinámica obtenida es relativamente lenta, pero con la ventaja de no presentar sobreimpulso, lo que garantiza una respuesta estable y segura para el proceso bajo estudio.

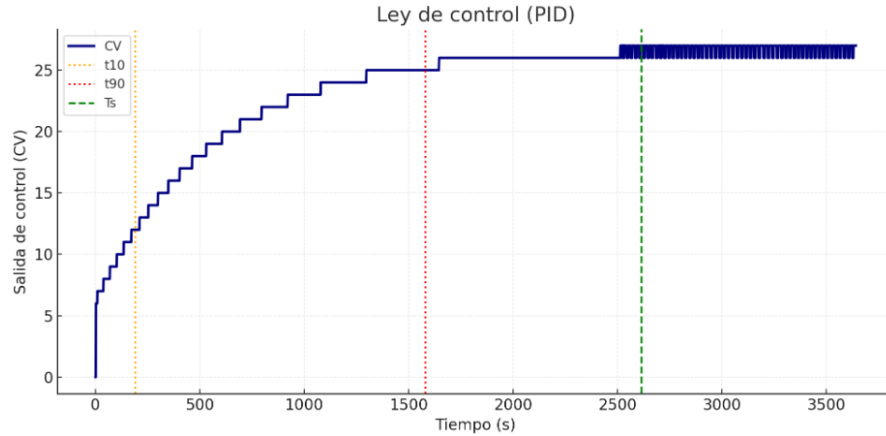


Figure 4: Ley de control PID utilizando el método LAMDA.

En la Figura 4 se muestra la evolución de la señal de control (CV) generada por el controlador PID bajo el método Lambda. Se observa que, desde el inicio, la amplitud de la señal aumenta de forma escalonada y controlada, alcanzando su valor final sin presentar sobreimpulso significativo. El comportamiento evidencia la naturaleza conservadora del método Lambda, priorizando la estabilidad y minimizando el riesgo de oscilaciones. La respuesta es relativamente lenta, lo que coincide con los valores de tiempo de respuesta ( $T_r$ ) y tiempo de establecimiento ( $T_s$ ) previamente determinados en la variable de proceso, y refleja un control robusto pero con dinámica pausada.

## 2.5 Implementación del Controlador PID en el ESP32

El algoritmo PID fue implementado en un microcontrolador ESP32 utilizando el entorno de desarrollo Arduino IDE. La estructura del código corresponde a un controlador PID clásico con retroalimentación, e incluye una técnica de anti-windup para evitar la acumulación excesiva del término integral cuando se presenta saturación en la salida del actuador.

El sistema realiza la lectura de datos provenientes de LabVIEW a través del puerto serial. La trama recibida incluye la variable de proceso (PV), el valor de referencia (SP) y los parámetros del controlador PID ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ). Estos datos son extraídos dinámicamente desde el ESP32 para ser utilizados en tiempo real en la ejecución del algoritmo de control.

El algoritmo PID es evaluado de forma cíclica, con un tiempo de muestreo definido en 100 ms. La señal de control se calcula según la siguiente estructura:

- El error se determina como la diferencia entre el setpoint y la variable de proceso.
- El término integral se acumula iterativamente con anti-windup, al limitar la salida del controlador entre 0 y 100.
- El término derivativo se estima con diferencias finitas.
- La salida de control es generada mediante (6):

$$u(t) = K_p \left( e(t) + K_i \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (6)$$

Donde:

- $u(t)$ : señal de control generada por el controlador PID.
- $e(t)$ : error del sistema, calculado como la diferencia entre el valor de referencia (setpoint) y la variable de proceso.
- $K_p$ : ganancia proporcional.

- $K_i$ : ganancia integral.
- $K_d$ : ganancia derivativa.
- $\int e(t)dt$ : integración del error acumulado en el tiempo.
- $\frac{de(t)}{dt}$ : derivada del error respecto al tiempo.

Luego de ser calculada, la salida  $u(t)$  es acotada para evitar saturación en el actuador.

Además, se integró la plataforma IoT Blynk en el ESP32. Esta herramienta permite enviar los valores de referencia (SP), proceso (PV) y señal de control (CV) a través de canales virtuales. Así, es posible visualizar el comportamiento del sistema en tiempo real desde una aplicación móvil. La comunicación WiFi se gestiona mediante la biblioteca `BlynkSimpleEsp32.h`.

El sistema puede operar en modo automático (con control PID activo) o en modo manual (estableciendo la salida directamente), conmutado desde la interfaz HIL desarrollada en LabVIEW.

## 2.6 Modelo de Simulación y Control en LabVIEW

Para la validación del sistema bajo el enfoque Hardware-in-the-Loop (HIL), se desarrolló un entorno de simulación en LabVIEW que permite emular el comportamiento dinámico de una planta de nivel de líquidos. El modelo simula características reales del sistema, como ganancia del proceso, constante de tiempo, retardo de transporte y perturbaciones externas (ruido), brindando una plataforma segura y flexible para el diseño y prueba de controladores.

El sistema de simulación implementado está compuesto por los siguientes bloques funcionales:

- **Modelo matemático de la planta:** basado en una función de transferencia de primer orden con retardo (FOPDT), ajustado a partir de pruebas en lazo abierto.
- **Controlador PID:** ajustable en tiempo real, cuya sintonía fue realizada mediante el método Lambda.
- **Entrada de referencia (SP):** configurada por el usuario.
- **Canal de retroalimentación (PV):** proveniente de la planta simulada.
- **Canal de comunicación serial:** encargado de transmitir las variables de control hacia el microcontrolador ESP32 para cerrar el lazo real.

La Figura 5 muestra el diagrama de bloques desarrollado, donde se puede observar el flujo de señal desde el ingreso del *setpoint*, la ejecución del algoritmo *PID*, y el control aplicado sobre la planta virtual.

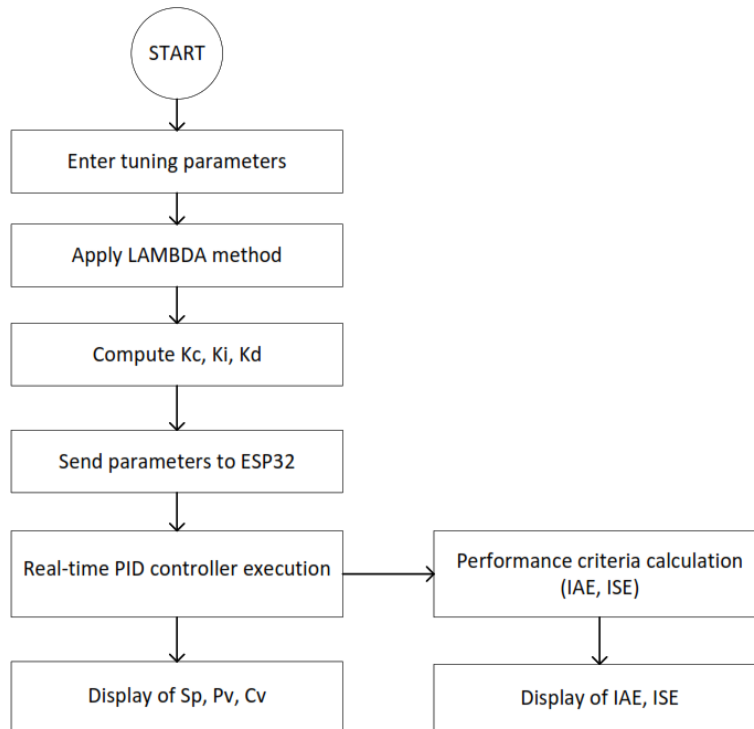


Figure 5: Diagrama de bloques del modelo de simulación HIL implementado en *LabVIEW*.

Esta arquitectura permite alternar entre control manual y automático, facilitar la validación del algoritmo de control, y preparar el despliegue del sistema en condiciones reales de operación. Gracias al uso del entorno LabVIEW, se lograron simulaciones con visualización en tiempo real, simplificando el proceso de prueba y ajuste del sistema.

La Figura 6 presenta la interfaz gráfica implementada en LabVIEW, utilizada para la interacción en tiempo real con el sistema HIL de control de nivel. En el centro se visualiza el tanque de proceso, acompañado del valor de referencia (setpoint) y la lectura del nivel del líquido en unidades métricas.

A la izquierda, se dispone de controles para el modo de operación (manual o automático), la visualización del valor de control aplicado al variador de frecuencia, y la comunicación serial con el ESP32. A la derecha, se encuentra el área de visualización gráfica donde se representan, en tiempo real, las señales de proceso: valor del proceso (PV), señal de referencia (SP) y señal de control (CV), permitiendo un análisis dinámico del desempeño del controlador.

Esta interfaz constituye una herramienta fundamental para la supervisión y validación empírica del comportamiento del sistema, facilitando pruebas de sintonización y evaluación de criterios de desempeño.

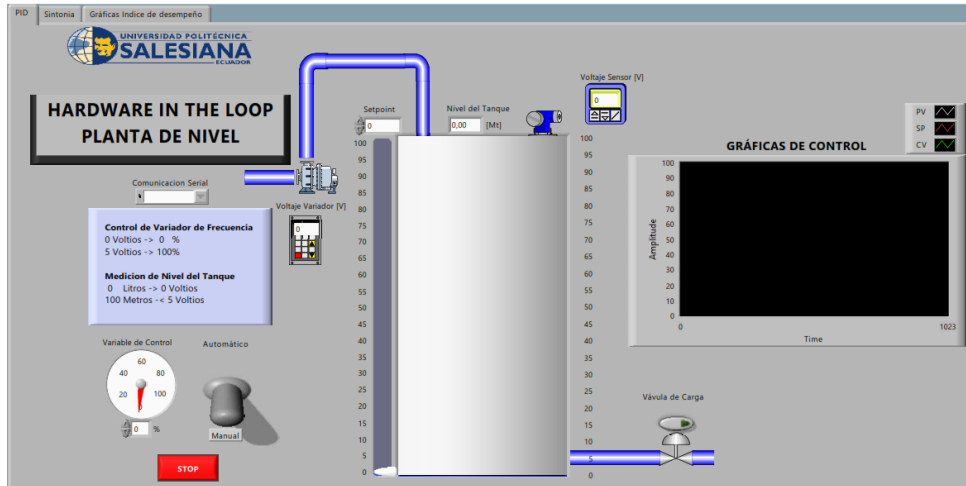


Figure 6: Interfaz gráfica desarrollada en LabVIEW para el monitoreo y control del sistema HIL de nivel.

## 2.7 Integración del Sistema con IoT mediante Blynk

Con el fin de habilitar el monitoreo remoto del sistema HIL, se integró una plataforma basada en Internet de las Cosas (IoT) utilizando Blynk, una herramienta de desarrollo rápido para interfaces móviles conectadas a hardware embebido.

El microcontrolador ESP32 se configuró para enviar datos en tiempo real a la aplicación móvil mediante el protocolo de comunicación WiFi, lo que permitió visualizar y ajustar parámetros del controlador PID de forma remota. Las variables visualizadas incluyeron:

- Setpoint (SP)
- Variable de proceso (PV)
- Variable de control (CV)
- Estados del sistema (modo manual/automático)

La arquitectura IoT desarrollada facilita la supervisión del sistema sin requerir acceso físico al entorno de control, lo cual es especialmente valioso en entornos industriales distribuidos o con restricciones de personal técnico.

Se diseñó una interfaz amigable en la aplicación móvil, permitiendo observar el comportamiento del sistema en tiempo real, ajustar el setpoint y monitorear tendencias históricas de forma sencilla.

Como se muestra en la Figura 7, la interfaz desarrollada en la plataforma Blynk permite visualizar en tiempo real las variables críticas del sistema: el setpoint (SP), la variable de proceso (PV) y la variable de control (CV). Esta visualización facilita la supervisión del desempeño del sistema desde cualquier ubicación con acceso a Internet, reforzando la funcionalidad remota del esquema HIL implementado.

Se identificó una latencia en la visualización de datos, originada por el intervalo de transmisión al servidor IoT (2 s) y por el retardo inherente de la red WiFi, lo que genera que la información mostrada no sea completamente instantánea respecto a la ejecución del control en el hardware. Este desfase no compromete el desempeño del lazo de control, pero debe tenerse en cuenta al analizar los registros.

Trabajos previos como (14) han validado la efectividad de esta plataforma para el monitoreo remoto de sistemas de control, empleando interfaces gráficas conectadas a microcontroladores mediante WiFi y Blynk. Su estudio destaca la facilidad de implementación y la utilidad de estas herramientas en contextos educativos y de automatización industrial de bajo costo.

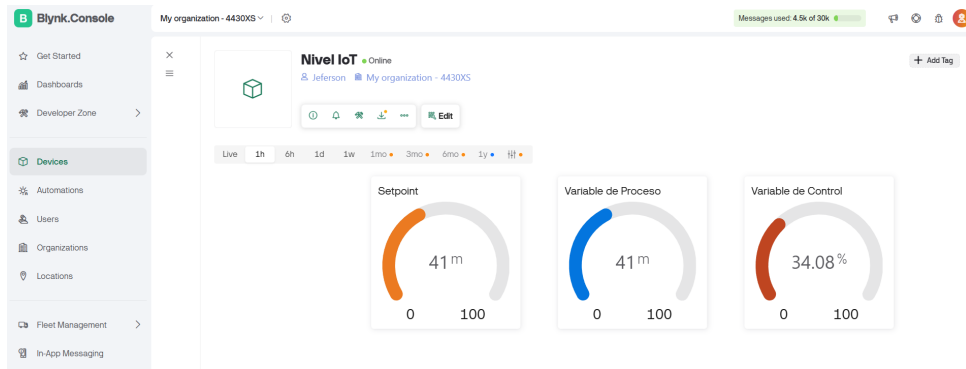


Figure 7: Interfaz desarrollada en la plataforma Blynk para el monitoreo y control remoto del sistema HIL. Se visualizan el setpoint, la variable de proceso (PV) y la señal de control (CV) en tiempo real.

### 3 Resultados

#### 3.1 Desempeño General del Sistema HIL

El comportamiento del sistema fue evaluado para 24 valores distintos de setpoint entre 6 y 100, con el objetivo de medir la eficiencia y estabilidad del controlador PID sintonizado mediante el método Lambda. Las principales métricas analizadas fueron el **IAE** (Integral del Error Absoluto), el **ISE** (Integral del Cuadrado del Error) y el tiempo de establecimiento.

La Figura 8 presenta la evolución del IAE conforme varía el setpoint. Se observa un crecimiento aproximadamente lineal, indicando que el error acumulado se incrementa de forma proporcional con la exigencia del sistema, aunque manteniéndose dentro de márgenes aceptables para cada valor de referencia.

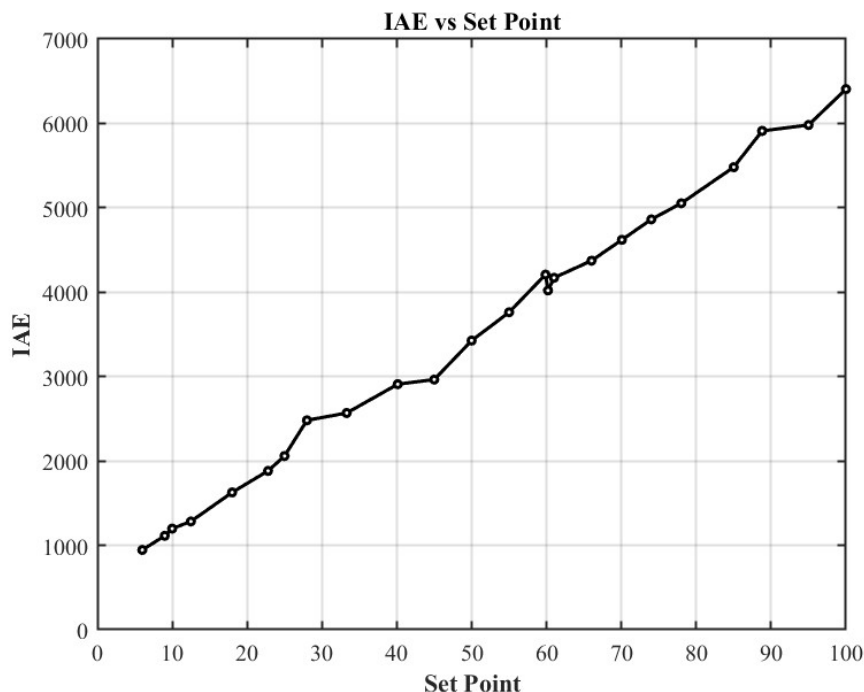


Figure 8: IAE en función del Set Point para el sistema HIL controlado por PID.

Por otro lado, la Figura 9 evidencia que el ISE crece de manera más pronunciada, especialmente

en valores altos de setpoint. Esto se debe a que esta métrica penaliza con mayor peso los errores grandes, siendo más sensible a pequeñas oscilaciones en niveles elevados del sistema.

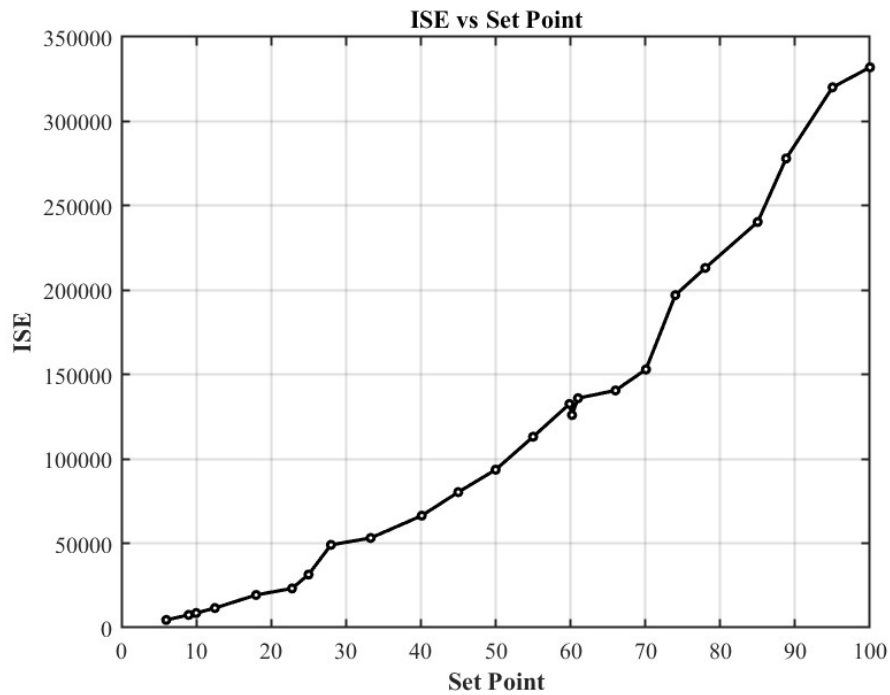


Figure 9: ISE en función del Set Point para el sistema HIL.

Finalmente, la Figura 10 muestra los tiempos de establecimiento, los cuales varían entre 6 y 8.5 minutos. A pesar de estas fluctuaciones, el sistema mantuvo una respuesta sobreamortiguada, con tiempos de estabilización aceptables para aplicaciones industriales y sin presencia de sobreimpulso significativo.

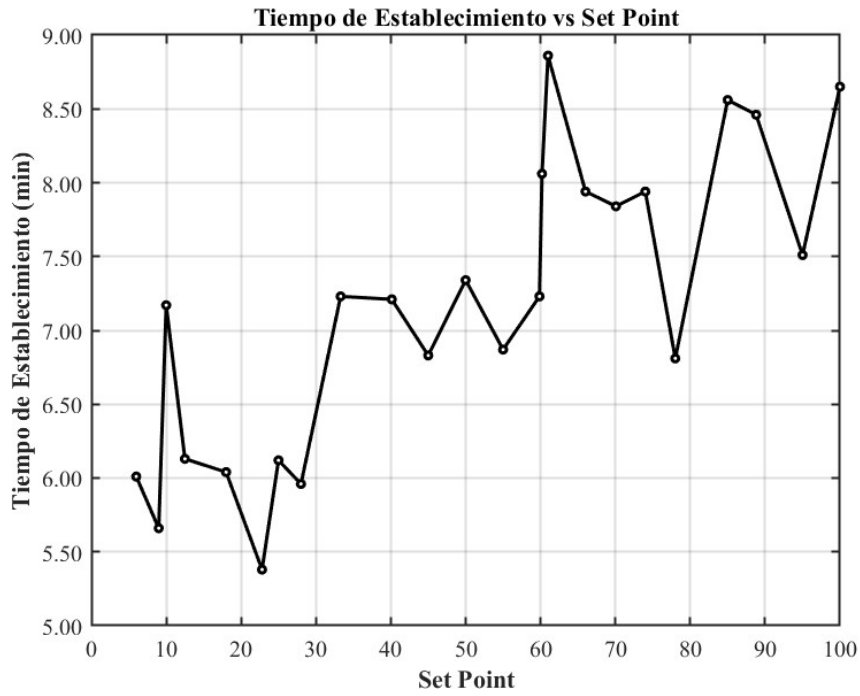


Figure 10: Tiempo de establecimiento en minutos para distintos valores de Set Point.

En conjunto, estas métricas demuestran que la sintonía Lambda implementada proporciona un desempeño robusto, estable y predecible del sistema HIL, incluso ante demandas crecientes de operación.

### 3.2 Comparación entre IAE e ISE

La Figura 11 presenta la relación ISE/IAE en función del setpoint. Esta métrica permite entender cómo varía la penalización de errores más grandes. Se observa que conforme aumenta el setpoint, la relación tiende a incrementarse, reflejando que los errores tienden a ser más grandes en magnitud relativa. A pesar de ello, el sistema mantiene un desempeño aceptable y sin oscilaciones.

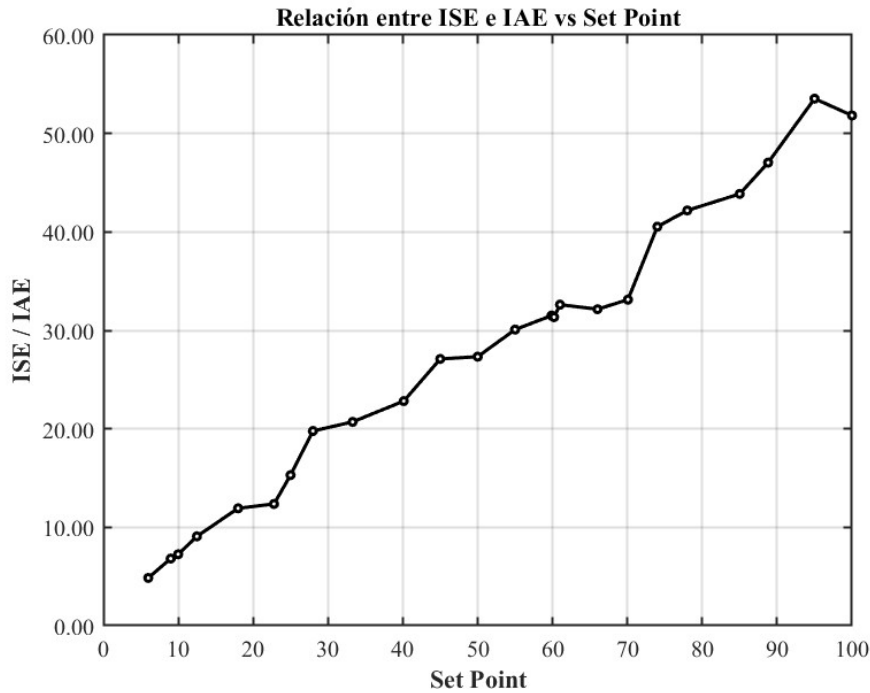


Figure 11: Relación entre ISE e IAE en función del Set Point.

### 3.3 Respuesta del Sistema ante Perturbaciones

Los datos presentados en la Tabla 3 evidencian que, ante la aplicación de perturbaciones mediante una válvula de descarga, el sistema HIL mantuvo un comportamiento estable y predecible. En todos los casos, el valor mínimo de la variable de proceso (PV) cayó proporcionalmente con respecto al setpoint, pero logró recuperar su valor de referencia en tiempos razonables.

Se destaca que el sobreimpulso fue prácticamente nulo en la mayoría de los setpoints, con un valor máximo de apenas 0.19 % en el caso más bajo (SP=35). Este resultado confirma la naturaleza sobreamortiguada del sistema, ya anticipada en las métricas IAE e ISE analizadas previamente.

Los tiempos de estabilización oscilaron entre 5.91 y 7.59 minutos, lo cual valida la capacidad del controlador PID para rechazar perturbaciones y retornar al estado deseado de forma eficiente, sin oscilaciones ni inestabilidad. Esto refuerza la robustez y la confiabilidad del sistema implementado.

Table 3: Resumen de respuesta del sistema ante perturbaciones.

Set Point	PV Mínimo	PV Máximo	Sobreimpulso (%)	Tiempo Estab. (min)
35	18.81	35.07	0.19	5.96
39	24.22	39.00	0.01	7.50
50	34.94	50.00	0.00	6.16
61	46.51	61.00	0.00	5.91
78	63.22	78.01	0.01	7.59

Estos resultados confirman la capacidad del sistema para adaptarse dinámicamente a cambios bruscos, garantizando un retorno eficiente al estado deseado.

La Figura 12 complementa este análisis al mostrar gráficamente la evolución temporal del sistema ante una perturbación. Se aprecia claramente la caída del nivel de líquido (PV) y su posterior recuperación controlada, sin sobreimpulso ni oscilaciones, lo que respalda empíricamente el comportamiento sobreamortiguado reportado en la Tabla 3.

### Vista previa - Imagen mejorada desde LabVIEW

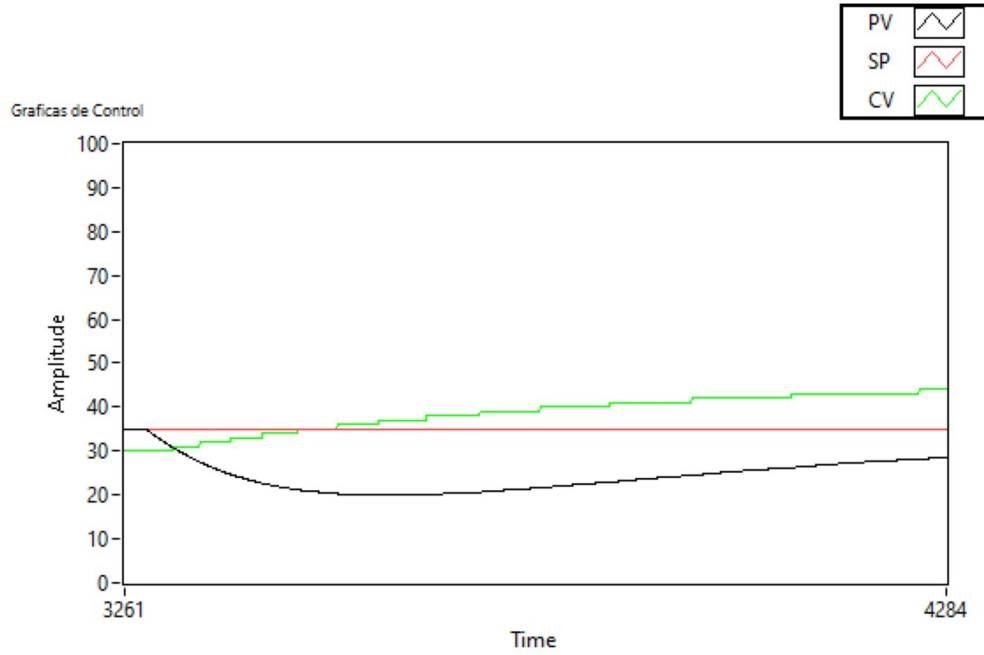


Figure 12: Respuesta del sistema HIL ante una perturbación aplicada.

### 3.4 Comparación entre sintonías PID tradicionales y método Lambda

En esta sección se comparan dos estrategias de sintonía del controlador PID aplicadas a la misma planta y condiciones de prueba: el método tradicional de Ziegler–Nichols (ZN) y el método *Lambda* (IMC). La Figura 13 muestra las respuestas temporales superpuestas y la Tabla 4 resume las métricas de desempeño.

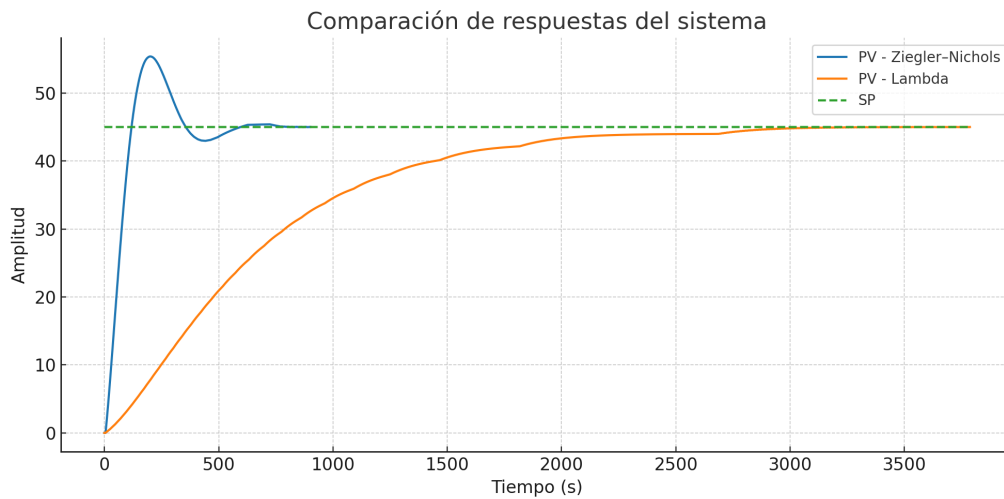


Figure 13: Comparación de las respuestas del sistema para las sintonías Ziegler–Nichols y Lambda, con el mismo setpoint.

Table 4: Métricas de desempeño para Ziegler–Nichols y Lambda.

Métrica	Ziegler–Nichols	Lambda
Tiempo de subida $T_r$ (m)	87.00	1369.00
Sobreimpulso $M_p$ (%)	23.03	0.02
Tiempo de establecimiento $T_s$ (s, $\pm 2\%$ )	116.00	2710.00
Error en régimen permanente $E_{ss}$ (unid.)	0.0173	0.0000
Valor final de PV (unid.)	45.017	45.000

### 3.5 Síntesis de Resultados

El sistema HIL implementado mostró:

- Estabilidad sobresaliente en todas las pruebas, con sobreimpulso menor al 0.2% para la sintonía Lambda y del 23.03% en Ziegler–Nichols.
- Respuesta sobre-amortiguada en Lambda, deseable en procesos de nivel, y respuesta rápida pero con oscilaciones en Ziegler–Nichols.
- Alta robustez ante perturbaciones externas, con recuperación eficiente y sin comprometer la estabilidad.
- Errores integrales controlados en todos los niveles de operación, logrando  $E_{ss} \approx 0$  en Lambda.

Estos hallazgos respaldan la viabilidad del enfoque propuesto como una alternativa práctica, eficiente y de bajo costo para el control de procesos industriales, especialmente en aplicaciones donde la estabilidad prima sobre la rapidez.

## 4 Discusión

El método *Lambda*, también conocido como Control Basado en Modelo Interno (IMC), fue clave en el rendimiento observado. El uso de un valor de  $\lambda = \frac{L}{2} + 3\tau$  promovió un comportamiento sobre-amortiguado, eliminando oscilaciones y manteniendo la estabilidad incluso frente a perturbaciones. Este tipo de sintonía, combinado con una arquitectura HIL y hardware de bajo costo (ESP32), demuestra ser una alternativa eficaz y accesible para entornos industriales. A diferencia de métodos clásicos como Ziegler–Nichols, *Lambda* proporciona un control ajustado, predecible y seguro, lo cual se valida empíricamente en los resultados obtenidos.

La comparación entre ambas estrategias revela el compromiso inherente entre rapidez y estabilidad. Ziegler–Nichols presenta un tiempo de subida reducido ( $T_r = 1,45$  min) y un tiempo de establecimiento breve ( $T_s = 1,93$  min), pero con un sobreimpulso elevado ( $M_p = 23,03\%$ ) y oscilaciones transitorias. Este comportamiento puede ser adecuado cuando la rapidez es prioritaria, aunque implica mayor esfuerzo del actuador y riesgo de inestabilidad. En cambio, *Lambda* ofrece una respuesta sin sobreimpulso ( $M_p \approx 0\%$ ), con error estacionario nulo ( $E_{ss} = 0$ ) y una trayectoria suave hacia el valor de referencia. La penalización es un tiempo de establecimiento mayor ( $T_s \approx 4,51$  min), aceptable en procesos de tipo nivel donde la estabilidad y la ausencia de oscilaciones son prioritarias. Tal como reporta (13), el método *Lambda* contribuye a reducir el sobreimpulso y a mejorar la estabilidad en sistemas con bajo retardo relativo. Los resultados de este estudio confirman dicho comportamiento, reforzando la efectividad del enfoque adoptado.

Los resultados obtenidos en la implementación del sistema Hardware-in-the-Loop (HIL) demuestran que esta metodología constituye una herramienta eficaz para el análisis y validación de controladores PID aplicados a sistemas de nivel. El modelo simulado presentó un comportamiento muy cercano al sistema físico, lo que permitió realizar ajustes y pruebas sin comprometer la integridad de la planta real. La respuesta del controlador, sintonizado mediante el método *Lambda*, evidenció un desempeño estable, con mínima sobreoscilación y un tiempo de establecimiento reducido. Estos resultados coinciden con los reportados por autores como (1) y (9), quienes destacan la efectividad de la sintonización basada en parámetros de tiempo de respuesta controlado. Además, la comparación con otros métodos de optimización (10, 11) sugiere que el método *Lambda* ofrece un balance adecuado entre estabilidad y velocidad de respuesta.

Por otra parte, la incorporación de monitoreo IoT aportó una mejora significativa en la supervisión del proceso, permitiendo el registro remoto de variables y facilitando la detección temprana de desviaciones. Este resultado se alinea con lo planteado en trabajos recientes (6, 7), donde se resalta la importancia del IoT para el control y diagnóstico en tiempo real de procesos industriales. En términos de validación, la integración del HIL permitió replicar con precisión las condiciones de operación del sistema real, evidenciando una latencia mínima en la comunicación entre el entorno de simulación y el hardware físico. Esto respalda el potencial del enfoque HIL como plataforma de enseñanza y experimentación segura, tal como se ha señalado en (2, 3).

En conjunto, los resultados confirman que la aplicación del enfoque HIL con monitoreo IoT constituye una alternativa viable y de bajo costo para la formación y evaluación de estrategias de control industrial. Su implementación mejora la precisión del control, optimiza el tiempo de respuesta y promueve un aprendizaje práctico en entornos académicos e industriales. Asimismo, el uso de tecnologías IoT potencia la supervisión remota y la trazabilidad de las variables del proceso, fortaleciendo el desarrollo de soluciones de automatización inteligentes y seguras.

## 5 Conclusiones

Este trabajo presentó el diseño e implementación de un sistema Hardware-in-the-Loop (HIL) para el control de nivel de una planta mediante un controlador PID sintonizado con el método Lambda, integrando además capacidades de monitoreo remoto a través de IoT.

Los resultados experimentales permiten extraer las siguientes conclusiones relevantes:

- El sistema mostró un desempeño estable, sobreamortiguado y con sobreimpulsos menores al 0.2%, validando la efectividad de la sintonía Lambda en procesos de nivel.
- Los errores integrales (IAE e ISE) se mantuvieron dentro de márgenes aceptables para todos los valores de setpoint, confirmando una respuesta precisa del controlador incluso a niveles altos de operación.
- La recuperación ante perturbaciones externas fue rápida y eficiente, con tiempos promedio de estabilización menores a 7 minutos y errores controlados, lo que demuestra la robustez del sistema.
- El uso de hardware de bajo costo (ESP32) combinado con simulación en LabVIEW confirma la viabilidad del enfoque HIL como una herramienta accesible para la validación de estrategias de control antes de su implementación real.
- La arquitectura desarrollada integra de manera efectiva tecnologías de Industria 4.0 como IoT, mejorando la supervisión remota del sistema sin comprometer la estabilidad ni la seguridad del proceso.

Como trabajo futuro se propone extender esta arquitectura a sistemas multivariados, incorporar algoritmos adaptativos o inteligencia artificial para mejorar la sintonía del controlador, y evaluar el desempeño bajo condiciones de ruido y no linealidades más pronunciadas.

## 6 Agradecimientos

El autor desea expresar su más profundo agradecimiento a su madre, María Hurtado, quien ha sido su principal fuente de inspiración, fortaleza y apoyo incondicional a lo largo de este proceso académico. Su motivación constante y los valores inculcados fueron fundamentales para la culminación de este trabajo de investigación.

Asimismo, se agradece a la Universidad Politécnica Salesiana por el respaldo institucional brindado y a los docentes del programa de Maestría en Automatización para la Industria 4.0 por su guía y acompañamiento durante el desarrollo del presente proyecto.

## References

- [1] S. Brito, J. F. Petit, M. Lemus, and J. Rey, “Aplicación de controladores pid mediante simulación hardware-in-the-loop (hil),” *Revista de Control y Automatización*, vol. 15, no. 2, pp. 123–135, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/HONET59747.2023.10374574>
- [2] D. Bedolla-Martínez, F. H. R. Leyva, and J. A. A. Aguilar, “Simulación hardware-in-the-loop de un robot manipulador con base en un controlador digital de señales,” *La Mecatrónica en México*, vol. 7, no. 1, pp. 25–36, 2018. [Online]. Available: <http://www.mecamex.net/revistas/LMEM>
- [3] B. A. C. C. neda and A. V. C. C. neda, “Implementación de plataforma hardware-in-the-loop para la enseñanza del control sobre sistema embebido de bajo costo,” Bogotá, Colombia, 2022.
- [4] B. A. Bonilla Correa, “Implmentación de un sistema hil (hardware in the loop) para el control de nivel.” 2021.
- [5] R. A. Mouha, “Internet of things (iot),” *Journal of Data Analysis and Information Processing*, vol. 9, pp. 77–101, 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.4236/jdaip.2021.92006>
- [6] A. Díaz and H. González-Acevedo, “Diseño de un sistema de comunicación iot para el monitoreo y control de variables de procesos industriales,” *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 39, pp. 32–36, 2022. [Online]. Available: <https://ojs.unipamplona.edu.co/index.php/rcta/article/view/1371>
- [7] G. A. Vigo Rodríguez, E. J. Velarde Gonzales, and A. C. Mendoza De Los Santos, “La importancia de la optimización de procesos con iot en el sector industrial,” *Ingeniería Investiga*, vol. 6, no. e1091, 2024. [Online]. Available: <https://revistas.upt.edu.pe/ojs/index.php/ingenieria/article/view/1091>
- [8] K. G. Meneses Castillo, “Diseño e implementación de un sistema embebido con monitoreo web para el control de nivel de un tanque empleando una tarjeta esp32 y controlador pid,” Trabajo de titulación para optar por el título de Ingeniero en Electrónica y Automatización, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2024. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30240>
- [9] E. Pruna, C. Reategui, and S. Iturralde, “Lambda tuner tool for analysis and design of pid controllers using matlab/simulink,” *Revista Politécnica*, vol. 40, no. 1, pp. 1–10, 2017. [Online]. Available: <https://www.espe.edu.ec>
- [10] P. S. M. Miranda, “Estudio comparativo de métodos de sintonización en controladores pid aplicado a un proceso de caudal variable,” Trabajo de titulación para Ingeniero Electromecánico, Universidad Técnica de Cotopaxi, Latacunga, Ecuador, 2023.
- [11] E. I. S. Zambrano, “Análisis comparativo de técnicas de optimización para la sintonización de controladores pid adaptativos,” Quito, Ecuador, 2020, dirigido por Ing. Oscar Eduardo Camacho Quintero, PhD. [Online]. Available: <https://repositorio.epn.edu.ec/handle/15000/21291>
- [12] M. Sarzosa, A. Yandún, and L. Garcés, “Análisis del rendimiento de un reactor químico isotérmico mediante controladores pid, ssc y smc,” *Revista Politécnica*, vol. 40, no. 2, pp. 9–20, 2018.
- [13] F. Guagchinga, P. Calvopiña, S. Alpúsig, and M. Cajas, “Control pid de procesos autoregulados e integrantes sintonizados con el método lambda,” *Revista Técnica-Científica Perspectivas*, vol. 3, no. 1, pp. 43–49, 2021.
- [14] G. H. López-Mera, E. A. Padilla-García, R. D. Cruz-Morales, and D. Tinoco-Varela, “Interfaz gráfica de usuario para el control de sistemas en la nube,” *Pädi Boletín Científico de Ciencias Básicas e Ingenierías del ICBI*, vol. 10, no. Especial 5, pp. 59–66, 2022.