

La Brecha Teórico-Práctica en el Control Industrial: Un Análisis Estructural de las Metodologías de Implementación en PLCs y su Discrepancia con los Modelos Académicos

Juan Felipe Bueno Romero, Kelly Jhoanna Niño Sandoval

Universidad Santo Tomás

Facultad de Ingeniería Mecatrónica

Bucaramanga, Santander

Juanfelipe.bueno@ustabuca.edu.co

Resumen — La presente monografía examina la brecha existente entre los modelos teóricos del control automático y su aplicación práctica en entornos industriales basados en Controladores Lógicos Programables (PLC). Aunque la teoría del control clásica, fundamentada en modelos matemáticos y criterios de estabilidad, proporciona metodologías precisas para el diseño de controladores; en la práctica industrial estas se adaptan mediante herramientas de autosintonía, bloques funcionales y librerías de software desarrolladas por los fabricantes. Dichas adaptaciones, implementadas en plataformas como Logix Designer, TIA Portal y EcoStruxure Control Expert, permiten una configuración ágil y confiable, pero al mismo tiempo introducen una distancia respecto al rigor analítico planteado en los textos académicos. Este trabajo desarrolla un análisis comparativo de las metodologías de implementación PID de Rockwell Automation, Siemens y Schneider Electric, contrastándolas con los enfoques teóricos descritos en la literatura clásica. A partir de una revisión documental y un caso de simulación en TIA Portal y Factory IO, se identifican los factores técnicos y operativos que explican dicha brecha.

Palabras claves: control automático, PLC, implementación PID, brecha teórico-práctica

The Theoretical–Practical Gap in Industrial Control: A Structural Analysis of PLC Implementation Methodologies and Their Discrepancy with Academic Models

Abstract — This monograph examines the gap between theoretical models of automatic control and their practical application in industrial environments based on Programmable Logic Controllers (PLCs). Although classical control theory, grounded in mathematical models and stability criteria, provides precise methodologies for controller design, in industrial practice these are adapted through autotuning tools, function blocks, and software libraries developed by manufacturers. These adaptations, implemented in platforms such as Logix

Designer, TIA Portal, and EcoStruxure Control Expert, enable agile and reliable configuration while also introducing distance from the analytical rigor presented in academic texts. This work develops a comparative analysis of PID implementation methodologies from Rockwell Automation, Siemens, and Schneider Electric, contrasting them with theoretical approaches described in classical literature. Based on a documentary review and a simulation case in TIA Portal and Factory IO, the technical and operational factors that explain this gap are identified.

Keywords: automatic control, PLC, PID implementation, theoretical–practical gap

I. INTRODUCCIÓN

La teoría del control automático constituye uno de los pilares fundamentales de la ingeniería moderna, al proporcionar métodos analíticos que garantizan la estabilidad y el desempeño deseado de los sistemas dinámicos. Autores clásicos como Ogata [1], Dorf y Bishop [2], y Seborg [3] han desarrollado marcos matemáticos que permiten diseñar controladores óptimos para una amplia variedad de procesos. Sin embargo, en el contexto industrial actual, la aplicación práctica de dichos modelos se encuentra mediada por la tecnología de los Controladores Lógicos Programables (PLC), los cuales constituyen el estándar en la automatización de procesos productivos [20], [37].

En estos entornos, los algoritmos de control — particularmente los basados en la estructura PID (Proporcional, Integral, Derivativa)— no son implementados de manera estricta siguiendo los cálculos detallados de parámetros teóricos, sino mediante bloques funcionales preconfigurados ofrecidos por los fabricantes. Estas funciones, incorporadas en plataformas como Logix Designer de Rockwell Automation, TIA Portal de Siemens y EcoStruxure Control Expert de Schneider Electric, incluyen rutinas de auto-sintonía, filtros y modos operativos que facilitan la puesta en marcha, pero que también simplifican etapas clave del diseño teórico.

Este fenómeno genera una brecha perceptible entre el conocimiento enseñado en la academia y las prácticas reales de la ingeniería en la industria. En el ámbito universitario, el énfasis recae en el modelado matemático, el cálculo de ganancias y el análisis de estabilidad; mientras que, en la industria, la prioridad se orienta hacia la eficiencia operativa, la flexibilidad y la facilidad de implementación. No obstante, las metodologías aplicadas en los entornos industriales no carecen de fundamento teórico: representan una adaptación práctica de los principios clásicos de control, traducidas en herramientas funcionales como los bloques PID estándar y los algoritmos de auto-sintonía integrados en los PLC. De este modo, la brecha no implica una contradicción entre teoría y práctica, sino una diferencia en la forma de implementar los mismos conceptos bajo condiciones reales de operación.

La presente monografía tiene como propósito analizar esta brecha teórico-práctica mediante un estudio estructural de las metodologías de implementación del control PID en PLC. Para ello, se examinan las estrategias y funciones de algunos de los fabricantes líderes (Rockwell, Siemens y Schneider), comparándolas con los principios de diseño derivados de la literatura académica. El enfoque metodológico combina la revisión bibliográfica con un análisis descriptivo y una simulación, buscando establecer relaciones claras entre la teoría y la práctica.

Desde la perspectiva académica, esta investigación aporta un marco de referencia actualizado que puede servir para fortalecer los contenidos curriculares en control automático, promoviendo una enseñanza más alineada con los entornos industriales actuales. Desde el punto de vista profesional, ofrece a ingenieros y técnicos un panorama comparativo que facilita la toma de decisiones al seleccionar estrategias de control en sistemas PLC.

II. MARCO TEÓRICO

II-A. Fundamentos del Control Automático y del Control PID

El control automático tiene como objetivo regular el comportamiento dinámico de un sistema para alcanzar un punto de operación deseado, compensando perturbaciones externas y variaciones internas del proceso. La formulación teórica clásica se apoya en el modelado matemático de sistemas lineales mediante funciones de transferencia o representaciones en espacio de estados, así como en criterios de estabilidad desarrollados a partir de herramientas como Nyquist, Bode y Routh-Hurwitz [1], [2].

Entre las estrategias más difundidas se encuentra el control PID (Proporcional-Integral-Derivativo), introducido originalmente en sistemas analógicos y posteriormente adaptado al ámbito digital [7], [3]. Su ecuación general en tiempo continuo se expresa en la ecuación (1):

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (1)$$

Cada término cumple un rol específico:

- $u(t)$ es la señal de salida de control en función del tiempo.

- $e(t)$ es el error entre la referencia y la variable controlada.
- τ es la variable auxiliar de integración.
- Ganancia proporcional (K_p): genera una respuesta inmediata ante el error.
- Ganancia integral (K_i): elimina el error estacionario acumulando desviaciones.
- Ganancia derivativa (K_d): anticipa cambios bruscos, mejorando la respuesta transitoria.

El diseño teórico de un controlador PID implica la determinación óptima de las ganancias K_p , K_i y K_d . En la literatura clásica (Ogata [1], Dorf y Bishop [2], Åström y Hägglund [7]), se presentan múltiples metodologías de sintonización, entre ellas:

- Método de Ziegler-Nichols, basado en respuesta al escalón o en oscilación sostenida.
- Método de Cohen-Coon, que optimiza la respuesta de procesos de primer orden con retardo.
- Métodos de optimización y ajuste por desempeño, basados en índices integrales (IAE, ISE, ITAE).

No obstante, la aplicación directa de estos métodos en entornos industriales se ve limitada por factores como el ruido de medición, la no linealidad de los actuadores, las restricciones de seguridad y la necesidad de tiempos de puesta en marcha reducidos; en este contexto, también se han propuesto enfoques de monitoreo del rendimiento del lazo y repositorios de datos industriales para comparar metodologías de evaluación y aplicaciones [23], [36].

II-B. Implementación del Control PID en PLCs Industriales

Con la consolidación de los Controladores Lógicos Programables (PLC) como estándar en automatización, los fabricantes incorporan módulos PID nativos en sus entornos de programación. Estas implementaciones se caracterizan por su compatibilidad con arquitecturas digitales, su integración con sistemas SCADA y su capacidad de ajuste automático mediante algoritmos internos de auto-sintonía [15], [16], [17], [19], [28], [27].

Adicionalmente, el uso de PLC/SCADA e infraestructura conectada conlleva retos de ciberseguridad y nuevas líneas de investigación (p. ej., bancos de pruebas SCADA, forense digital y automatización inteligente), así como el surgimiento de enfoques basados en modelos de lenguaje para programación/mitigación de vulnerabilidades [24], [25], [26], [29].

II-B1. Rockwell Automation (Allen-Bradley – Logix Designer): El entorno Studio 5000 Logix Designer implementa el bloque funcional PIDE (Enhanced PID Instruction), que permite la configuración de controladores en modo posición o velocidad. Este bloque incluye funciones avanzadas de auto-tuning, anti-windup, filtrado derivativo y escalamiento automático de variables [4], [8].

El bloque PIDE utiliza una forma de velocidad del algoritmo PID, lo que significa que el controlador trabaja con el cambio en el error para cambiar la salida [4], [8].

Diversos proyectos demuestran la versatilidad del bloque PIDE en entornos industriales. El artículo de RealPars describe cómo programar un bucle de control PID básico en un PLC

ControlLogix utilizando la instrucción mejorada PIDE dentro del entorno Studio 5000, con el objetivo de regular variables de proceso como temperatura, presión o flujo mediante una lógica de control automática. Explica paso a paso cómo estructurar el proyecto, añadir la función PID, configurar sus parámetros y conectar las entradas y salidas de proceso para que el lazo responda al set-point y a la variable de proceso real. La implementación es presentada de forma favorable, ya que el uso de la instrucción PIDE y Studio 5000 facilita la creación y puesta en marcha del control frente a desarrollar un algoritmo PID desde cero o usar métodos teóricos aislados, al proveer herramientas integradas, auto-tuning y bloques funcionales que simplifican el trabajo. Como resultado, el lector obtiene una guía práctica que permite programar y comenzar a ajustar un lazo PID funcional en un entorno industrial real, con una base sólida para ampliar o afinar el control en aplicaciones específicas [31].

El artículo de Dennis Lynch explica cómo utilizar el controlador de rampa/soak (RMPS) en PLC Allen-Bradley para generar perfiles de setpoint escalonados y conectarlos a un bucle PID o PIDE, permitiendo que el setpoint varíe de forma automática y gradual en lugar de cambios abruptos. La implementación demuestra que la instrucción RMPS integrada en los PLC permite configurar fácilmente rampas de aumento y fases de mantenimiento (soak), reduciendo intervención manual y mejorando la automatización del proceso de control. Frente a un modelo teórico tradicional de PID puro, esta combinación aporta facilidades importantes: parametrización directa de perfiles de setpoint mediante pocos parámetros (tiempos de rampa y valores de mantenimiento), integración directa con la lógica de control existente y simplicidad de uso sin necesidad de lógica adicional compleja. Los resultados mostraron que el uso conjunto de RMPS con PID permitió ejecutar secuencias de control automáticamente, facilitó pruebas y procesos complejos y mejoró la eficiencia operativa, posibilitando incluso operaciones prolongadas sin supervisión constante [34].

II-B2. Siemens (TIA Portal – SIMATIC PID_Compact / PID_3Step / Continuous Controller): En TIA Portal, el control PID se implementa mediante bloques estándar como CONT_C, PID_Compact y PID_3Step, según el tipo de proceso (continuo, discreto o de tres puntos). El bloque PID_Compact está diseñado para actuadores proporcionales y proporciona capacidades de control continuo, permitiendo la integración con sistemas de simulación y HMI (Human-Machine Interface) para comisionado interactivo [5], [9], [10].

El bloque PID_3Step es un controlador modular especializado para válvulas o actuadores con comportamiento integrante, proporcionando control de tres puntos con salidas discretas (ARRIBA/ABAJO) además de salida analógica PWM [11].

Estos bloques integran rutinas de auto-sintonía basadas en identificación rápida y ajuste de desempeño. Los métodos de auto-sintonización incluyen pre-sintonización y sintonización fina durante el tiempo de ejecución [9], [10].

Se han documentado implementaciones prácticas en contextos industriales: Ruban [18] analiza el desarrollo de un sistema de control basado en PLC con E/S distribuidas,

destacando estabilidad operativa, modularidad y simplificación de integración frente a enfoques de control centralizado.

Además, existe una comunidad activa que aporta recursos prácticos. El tutorial de Solis PLC presenta una introducción a la configuración y uso de bloques PID en TIA Portal, resaltando la ventaja de bloques predefinidos y una interfaz guiada para obtener lazos funcionales en menor tiempo [32]. Por su parte, el repositorio OpenPID-TIA-SCL provee un bloque PID de código abierto en SCL para S7-1200/S7-1500 (TIA Portal 19), con sintonización por pasos, filtrado, anti-windup y utilidades de simulación; como alternativa modificable a los bloques propietarios [33].

II-B3. Schneider Electric (EcoStruxure Control Expert – PID and PIDAT Blocks): Schneider Electric ofrece los bloques PID y PIDAT (Aclarar que a diferencia de Rockwell y Siemens, Schneider Electric separa el controlador PID clásico del mecanismo de auto-sintonía, delegando esta función en bloques específicos como PIDAT.) dentro de su entorno EcoStruxure Control Expert (anteriormente Unity Pro), con soporte para autoajuste, anti-windup, compensación de setpoint y modos manual/automático, de acuerdo con su documentación técnica [6], [12], [13], [30].

El bloque PID proporciona un control continuo estándar basado en la estructura clásica PID, calculando el error como la diferencia entre el punto de ajuste deseado y la variable medida del proceso [7], [12], [13].

El bloque PIDAT incorpora control adaptativo orientado a ajustar parámetros del controlador ante variaciones del proceso, lo cual resulta especialmente útil en sistemas con dinámicas no lineales [14], [17].

Ambos bloques incluyen características como limitación de gradiente de la señal de salida, offset de salida, modos de rastreo para transiciones sin perturbaciones entre manual y automático, y límites configurables de setpoint superior e inferior [12], [13].

La plataforma EcoStruxure Control Expert utiliza estructuras/elementos de datos (p.ej., DDT) para organizar parámetros de los bloques y facilitar la reutilización en múltiples lazos [12].

El artículo de Alfaro y Vilanova analiza la resiliencia de las reglas de sintonización de controladores PID frente a cambios en la ecuación que implementa el controlador, destacando cómo diferentes formulaciones (por ejemplo, PID, I-PD o PI-D) pueden afectar el desempeño y robustez del lazo de control cuando la regla de sintonía original se aplica sobre otra estructura. Los autores proponen evaluar cómo las variaciones en la implementación influyen en la respuesta del sistema y en su robustez en lugar de centrarse solo en parámetros numéricos. La implementación teórica es favorable, ya que demuestra que algunas reglas de sintonía pueden ser más resilientes —esto es, mantener un desempeño aceptable— incluso si se usan en estructuras distintas a las previstas originalmente, ofreciendo una facilidad conceptual frente a métodos clásicos que asumen una única ecuación de controlador fija. Los resultados indican que, bajo ciertas condiciones y formulaciones, las reglas de sintonización resilientes pueden conservar buen desempeño y

robustez, reduciendo la pérdida de control frente a cambios de implementación en aplicaciones reales de PID [22].

La investigación de Gaddekar analiza la transición de sistemas de manufactura convencionales hacia arquitecturas de control digital mediante la integración de controladores lógicos programables PLC y sistemas de supervisión y adquisición de datos SCADA. El autor valida una implementación orientada a la clasificación y empaque industrial donde el PLC gestiona el control discreto en tiempo real mientras la plataforma SCADA consolida la capa de visualización y gestión de variables. Los resultados confirman una implementación favorable, logrando una optimización del throughput y una reducción drástica de la variabilidad operativa inherente al factor humano. Frente a los modelos tradicionales de lógica cableada, esta arquitectura proporciona una flexibilidad superior al permitir la reconfiguración lógica mediante software y una observabilidad centralizada que facilita el diagnóstico predictivo. En última instancia, el despliegue demostró un aumento significativo en la eficiencia general de los equipos (OEE) y una reducción de los costos operativos derivados de la disminución de mermas y tiempos de inactividad técnica [21].

Finalmente, la documentación describe la integración de rutinas de auto-sintonización (p.ej., AUTOTUNE) y estrategias avanzadas de control dentro del entorno, para apoyar la puesta en marcha en planta [6], [13].

III. METODOLOGÍA

El desarrollo de esta monografía se sustenta en un enfoque descriptivo y comparativo, orientado a examinar cómo los principales fabricantes de controladores lógicos programables (PLCs) —Rockwell Automation, Siemens y Schneider Electric— implementan las funciones de control PID y en qué medida estas se relacionan con los métodos teóricos presentados en la literatura académica. El estudio no busca validar experimentalmente un modelo de control, sino comprender las razones técnicas y operativas que explican la brecha entre el enfoque analítico y la práctica industrial contemporánea.

III-A. Enfoque general

La investigación combina tres componentes principales: revisión documental, análisis comparativo de metodologías y una simulación de referencia.

En primer lugar, se realiza una revisión de fuentes técnicas y académicas que incluyen manuales de usuario, guías de aplicación, notas de ingeniería y textos especializados en control automático. Estas referencias permiten identificar tanto los fundamentos teóricos de los métodos PID como las particularidades de su implementación en plataformas de automatización industrial.

En segundo lugar, se lleva a cabo un análisis comparativo de las estrategias de sintonización y ajuste de los bloques PID en los entornos de programación Logix Designer (Rockwell Automation), TIA Portal (Siemens) y EcoStruxure Control Expert (Schneider Electric). Este análisis se centra en las facilidades, limitaciones y parámetros disponibles para el usuario, considerando las rutinas de auto-sintonía, los modos

de operación y la representación de las acciones proporcionales, integrales y derivativas.

Finalmente, se realiza una simulación utilizando TIA Portal y Factory I/O con el fin de ilustrar, de manera práctica, la aplicación de las funciones PID en un entorno industrial simulado. Este ejercicio no pretende validar numéricamente un controlador, sino mostrar cómo se configuran y ajustan los lazos de control en condiciones similares a las de una planta real.

III-B. Fuentes de información y criterios de selección

Las fuentes se agrupan en tres categorías:

1. *Literatura académica*: textos clásicos de control como Ogata (*Modern Control Engineering*), Dorf & Bishop (*Modern Control Systems*), Seborg (*Process Dynamics and Control*) y Åström & Hägglund (*Advanced PID Control*), que establecen los fundamentos teóricos y los métodos de diseño tradicionales.
2. *Documentación técnica de fabricantes*: manuales oficiales y guías de aplicación de Rockwell, Siemens y Schneider Electric, donde se describen las estructuras de los bloques PID, los procedimientos de autosintonía y las recomendaciones para diferentes tipos de procesos.
3. *Artículos e informes de conferencias IEEE*: documentos sobre automatización industrial, control de procesos y enseñanza del control automático, que permiten contextualizar la brecha entre teoría y práctica desde una perspectiva contemporánea.

El criterio de selección se basa en la actualidad de las versiones, la aplicabilidad directa de los contenidos al entorno PLC y la disponibilidad de información verificable. Se limitaron las referencias a un máximo de treinta fuentes, priorizando la calidad técnica sobre la cantidad documental.

III-C. Estrategia para responder las preguntas orientadoras

Cada pregunta planteada en la investigación se aborda con un procedimiento específico:

1. *Facilidades de sintonización en los PLC de los tres fabricantes*: se responde mediante la revisión directa de los manuales y guías de usuario oficiales, comparando las herramientas de auto-sintonía y las opciones de configuración PID disponibles en cada entorno de programación.
2. *Limitaciones o restricciones de los bloques PID frente a la teoría*: se analiza la estructura funcional de los bloques PID industriales y se contrasta con las estructuras analíticas ideales propuestas en los textos académicos, identificando simplificaciones o restricciones operativas.
3. *Casos en los que se recomienda el ajuste manual*: se revisan las guías de aplicación y notas técnicas de los fabricantes, observando en qué condiciones (por ejemplo, procesos con gran retardo o alta no linealidad) se sugiere intervenir manualmente los parámetros del controlador.
4. *Similitudes y diferencias entre fabricantes y su impacto educativo*: se evalúa la documentación de Rockwell, Siemens y Schneider desde una perspectiva formativa,

destacando cómo las diferencias en terminología o estructura pueden influir en la comprensión de los futuros ingenieros de control.

III-D. Limitaciones del estudio

El estudio se enfoca en la comparación estructural y funcional de las metodologías, sin realizar pruebas experimentales con hardware físico. La simulación en Factory I/O se utiliza únicamente con fines ilustrativos. Además, se consideran los manuales más recientes de cada fabricante disponibles en 2024, lo que garantiza relevancia técnica, aunque las actualizaciones futuras podrían modificar algunos procedimientos.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

El estudio permitió identificar cómo los principales fabricantes de PLC —Rockwell Automation, Siemens y Schneider Electric— implementan el control PID dentro de sus plataformas, y cómo estas soluciones se relacionan con los métodos teóricos estudiados en la academia.

En general, se encontró que las herramientas industriales no reemplazan la teoría del control, sino que la adaptan para facilitar su aplicación en entornos reales, donde los tiempos de puesta en marcha y la estabilidad del proceso son prioridades fundamentales.

IV-A. Implementación del control PID según cada fabricante

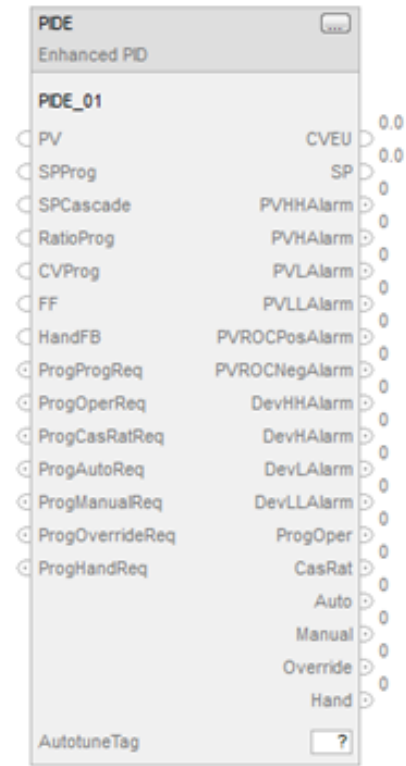
Antes de iniciar esta sub sección es importante aclarar que el mayor nivel de detalle en Siemens responde a la disponibilidad de objetos tecnológicos diferenciados y a su uso como plataforma principal de simulación en este estudio.

IV-A1. Rockwell Automation: En Logix Designer, el bloque PIDE (Enhanced PID) permite configurar el controlador en distintos modos, como Parallel o Series, equivalentes a las estructuras vistas en teoría.

El software incluye funciones de auto sintonía, filtros y compensaciones que ayudan a mantener la estabilidad del sistema, incluso ante saturaciones o variaciones de carga.

El ajuste puede hacerse automáticamente o de manera manual, pero sin necesidad de aplicar fórmulas analíticas. Esto refleja una filosofía centrada en la eficiencia operativa y la flexibilidad de configuración más que en el cálculo teórico explícito.

Figura 1: Bloque PIDE (Enhanced PID).



Adaptado de [8].

Este bloque interactúa con los siguientes componentes integrados a los cuales se puede acceder desde la configuración del propio bloque:

- **Autotune:** activado mediante parámetros específicos.
- **ALM (Alarm):** para la gestión de límites.
- **SCL (Scale):** para normalizar señales analógicas antes de entrar al PIDE.

Para que el PIDE funcione, requiere un conjunto mínimo de variables configuradas:

- **EnableIn:** habilita la ejecución del PID.
- **PV (Process Variable):** señal de proceso en unidades físicas (temperatura, nivel, presión, etc.).
- **PVEUMax / PVEUMin:** rango de unidades de ingeniería para escalar PV y SP (0–100 %).
- **DeltaT:** tiempo en segundos entre actualizaciones de control.
- **Setpoint:** se alimenta desde la estructura interna o desde la variable *SPProg/SPOper* (según sea modo *program* u *operator*).

El PIDE de Rockwell utiliza un algoritmo específico para calcular las ganancias K_p , K_i y K_d sin intervención manual extensiva (auto-sintonía o *Autotune*). Este se activa mediante la pestaña de *Autotune* en la configuración del bloque dentro de Studio 5000. El proceso sigue estos pasos:

- El operador pone el bloque en modo “Autotune”.
- El bloque inyecta un escalón (*step*) o una oscilación en la salida (CV).

- El sistema mide la respuesta de la variable de proceso (PV).
- Calcula los parámetros basándose en la dinámica observada (tiempo de retardo, constante de tiempo y ganancia).

El *autotune* de Rockwell se basa principalmente en el método de Ziegler–Nichols o en el modelo de *Internal Model Control* (IMC), dependiendo de la versión y la configuración elegida. Busca identificar un modelo de primer orden con tiempo muerto (FOPDT – *First Order Plus Dead Time*).

El bloque PIDE es altamente flexible en cuanto a los datos que procesa:

- *Punto flotante* (REAL): a diferencia del PID antiguo que usaba enteros escalados (0–4095), el PIDE trabaja nativamente con valores reales. Esto permite usar unidades de ingeniería directamente (ej., 0.0 a 100.0 °C).
- *Estructuras de datos*: acepta estructuras complejas para el manejo de estados (entradas de operador vs. entradas de programa).
- *Enumerados y booleanos*: para el control de los modos (Manual/Auto) y el manejo de fallas.

IV-A2. Siemens: En el entorno TIA Portal, los bloques PID_Compact, PID_Temp y PID_3Step integran rutinas de auto-tuning y modos de control adaptativo.

El sistema ejecuta un procedimiento automático que mide la respuesta del proceso y estima las ganancias adecuadas, calculando en principios similares a Ziegler–Nichols, pero sin requerir intervención matemática del usuario.

En procesos con alto tiempo muerto o comportamiento no lineal, Siemens recomienda realizar ajustes manuales finos, especialmente del término derivativo, lo que demuestra la conexión con la teoría tradicional de control.

En la Fig. 2 se muestra el bloque PID_Compact, objeto tecnológico integrado en CPUs de la familia SIMATIC (S7-1200/S7-1500) que proporciona un control PID continuo con auto-sintonía integrada, con soporte para modos automático y manual, anti-windup, y opciones de salida analógica o PWM.

Se utiliza llamándolo en un OB cíclico (preferentemente un OB de interrupción con periodo constante) para garantizar que el algoritmo de control tenga un tiempo de muestreo estable.

Figura 2: Bloque PID_Compact.



Adaptado de [10].

Para que el PID_Compact funcione, requiere un conjunto mínimo de variables configuradas:

- *Setpoint*: valor objetivo para el proceso (p. ej., temperatura, nivel).
- *Input*: valor real del proceso (PV) medido o escalado.
- *Input_PER*: alternativa de entrada en % si se usa escalado automático.
- *Disturbance*: perturbación medida que se puede compensar.
- *ManualEnable* / *ManualValue*: habilitan modo manual y definen la salida manual.
- *ErrorAck*, *Reset*: reset de errores o reinicio del controlador.
- *ModeActivate* / *Mode*: control fino de modos operativos del objeto.

La auto-sintonía en el PID_Compact es un proceso asistido que permite al controlador determinar las ganancias óptimas sin que el usuario tenga que conocer la dinámica matemática del sistema. Se realiza a través de dos funciones principales que se pueden activar desde el panel de control del objeto tecnológico:

- *Pre-tuning* (optimización inicial): el bloque aplica un salto brusco en la salida (*Output*) y analiza la pendiente de respuesta y el tiempo muerto de la PV. Se usa cuando el proceso está lejos del *Setpoint*.
- *Fine tuning* (optimización fina): el bloque genera una oscilación controlada de baja amplitud alrededor del *Setpoint* actual para refinar las constantes y reducir el error estacionario.

El algoritmo de sintonía de Siemens se basa en el método de la curva de reacción y criterios de optimización de Chien,

Hrones y Reswick (CHR). Este método permite al usuario elegir entre un control “rápido” (con algo de sobreoscilación) o uno “suave” (sin sobreoscilación), priorizando la estabilidad del actuador o la velocidad de respuesta.

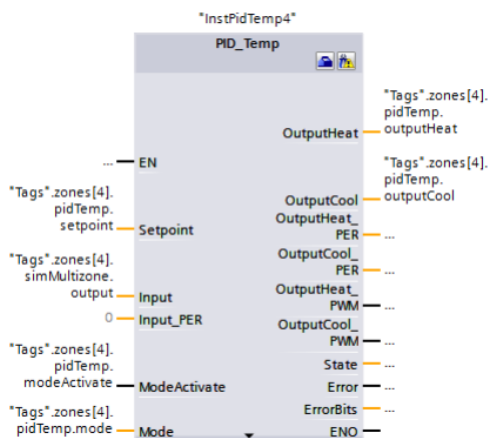
El bloque es extremadamente flexible en cuanto al formato de datos:

- Tipo REAL (flotante): para la variable *Input*. Permite procesar datos que ya han sido convertidos a unidades físicas (presión, temperatura, caudal).
- Tipo INT (entero): para la variable *Input_PER*. Recibe directamente el valor binario de los módulos de entrada analógica del PLC, lo que ahorra el uso de bloques de escalado externos como *NORM_X* o *SCALE_X*.
- Modos de estructura: acepta estructuras de configuración interna (*Data Blocks*) donde se almacenan los límites de advertencia, tiempos de integración y límites de salida.

Según la documentación más reciente, el *PID_Compact* ha mejorado su capacidad de *anti-windup* (prevención de saturación integral). Esto significa que si el actuador llega a su límite físico (ej. válvula 100 % abierta), el bloque deja de acumular error integral automáticamente para evitar un retraso excesivo cuando la señal deba bajar.

Para la Fig. 3 se presenta el bloque *PID_Temp*, que es un objeto tecnológico de lazo de control PID continuo diseñado específicamente para control de temperatura (o procesos análogos con dos actuadores), con dos salidas (una para calefacción y otra para refrigeración) y auto-sintonía integrada. Puede usarse en modo Automático, Manual, *Pre-tuning* y *Fine-tuning*; también puede emplearse en configuraciones en cascada.

Figura 3: Bloque *PID_Temp*.



Adaptado de [9].

Para que el *PID_Temp* funcione, requiere un conjunto mínimo de variables configuradas:

- *Setpoint*: valor objetivo de temperatura.
- *Input*: valor medido del proceso (PV).
- *Input_PER*: opción de lectura de entrada en formato porcentaje (si se usa escalado).
- *Disturbance*: entrada de perturbación medida para compensación (opcional).

- *ManualEnable/ManualValue*: para operar en modo manual.
- *ModeActivate/Mode*: para seleccionar y activar modos de operación (*Pre-tuning*, *Fine-tuning*, Auto, Manual).

El proceso de sintonía en *PID_Temp* es particular porque debe calcular dos juegos de parámetros (uno para calentar y otro para enfriar). El manual especifica que se realiza mediante el asistente de optimización en TIA Portal, siguiendo estas fases:

- Optimización inicial (*Pre-tuning*): el bloque identifica el punto de operación. Si la temperatura está por debajo del *Setpoint*, sintoniza la rama de calentamiento. Si está por encima, sintoniza la de enfriamiento.
- Optimización fina (*Fine tuning*): refina las constantes mediante una oscilación mínima controlada. De forma adicional, el bloque busca una transición suave (gradiente) entre las dos lógicas de control para evitar choques térmicos en el proceso.

Se utiliza un modelo de identificación de sistema de segundo orden (o superior) con tiempo muerto. A diferencia del PID estándar, el *PID_Temp* se basa en la compensación de ganancia no lineal, reconociendo que enfriar (usualmente con agua o aire) tiene una dinámica distinta a calentar (resistencias eléctricas).

El bloque está optimizado para la máxima resolución térmica:

- Tipos REAL: estándar para el procesamiento interno de cálculos de coma flotante.
- Tipos INT (periferia): soporta la lectura directa de tarjetas de temperatura (especialmente útiles para módulos RTD/TC que entregan valores decimales multiplicados por 10 o 100).
- Estructura de datos de calentamiento/enfriamiento: acepta parámetros de configuración específicos para cada método, permitiendo que el PID actúe de forma “agresiva” al calentar pero “conservadora” al enfriar.

La versión 2025 destaca el *modo de calentamiento gradual*, que permite subir la temperatura siguiendo una rampa específica para proteger la integridad física de los materiales (por ejemplo, evitando expansiones térmicas súbitas).

El *PID_3Step* es un controlador PID especializado para actuadores con salida de tres puntos o con realimentación de posición de válvula, con auto-optimización de parámetros (*Pre-tuning* y *Fine-tuning*). Su objetivo es igual que cualquier PID: calcular una salida que reduzca la desviación entre la consigna y el valor de proceso, pero con lógica y salidas específicas para dispositivos discretos o con realimentación de posición.

Figura 4: Bloque PID_3Step.



Adaptado de [11].

A diferencia de los bloques analógicos, el PID_3Step requiere variables que definan el movimiento físico del actuador:

- **Setpoint**: consigna configurada para el lazo (valor objetivo).
- **Input**: valor de proceso medido (PV), usualmente escalado.
- **Input_PER**: alternativa de entrada en % si se habilita escalado.
- **Feedback_PER**: realimentación de posición de actuador/válvula (si se usa).
- **ManualEnable**: habilita modo manual.
- **Manual_UP / Manual_DN**: inputs manuales para subida/bajada de actuador en modo manual (también existe un parámetro *ManualValue* en algunas versiones).
- **Mode**: selección del modo operativo (Inactivo, *Pre-tuning*, *Fine tuning*, Automático, Manual, Medición de tiempo de transición, Manual sin topes).
- **ModeActivate**: flanco para activar el cambio de modo.
- **Reset**: resetea el estado/errores y puede obligar a reinicios de modo.

El proceso de sintonía en el PID_3Step es particular porque debe considerar la inercia y el tiempo de tránsito. Se ejecuta a través del panel de optimización de TIA Portal en dos etapas:

- **Optimización inicial (*Pre-tuning*)**: el bloque mueve la válvula para identificar la ganancia del proceso y, sobre todo, para validar el tiempo de tránsito del motor. Identifica la relación entre el movimiento de la válvula y el cambio en la variable de proceso.
- **Optimización fina (*Fine tuning*)**: genera movimientos mínimos (pulsos) para ajustar las constantes P, I, D

de modo que se minimice el “balanceo” o exceso de maniobras del motor, lo cual prolonga la vida útil del actuador.

Se basa en un modelo de proceso con respuesta integral. El algoritmo busca optimizar la respuesta basándose en parámetros de *step control*. El objetivo principal es encontrar un equilibrio entre la precisión del control y el número de maniobras del motor (histéresis de respuesta).

El bloque gestiona tres tipos de flujos de información:

- **Valores de proceso (REAL/INT)**: acepta tanto *Input* (coma flotante) como *Input_PER* (entero de periferia).
- **Retroalimentación de posición**: puede recibir la posición de la válvula como un valor REAL (0–100 %) o un INT analógico. Si no hay sensor de posición, acepta señales digitales de “límite abierto” o “límite cerrado”.
- **Variables de estado**: acepta comandos booleanos para forzar la apertura o cierre manual, ignorando temporalmente el algoritmo PID.

La documentación de 2025 enfatiza el uso del *retardo de conmutación*. Este parámetro asegura que, si la válvula estaba abriendo y debe empezar a cerrar, exista un tiempo de pausa para proteger los devanados del motor y los relés contra arcos eléctricos o sobrecalentamiento.

Cuadro I: Comparación de objetos tecnológicos PID en Siemens TIA Portal

Objeto PID	Entradas principales	Outputs	Auto-sintonía	Tipo de aplicación
PID_Compact	SP, PV, Manual flags, <i>Input_PER</i>	Continuous (Real)	<i>Pre-tuning + Fine tuning</i>	General PID
PID_3Step	SP, PV, Feedback, Mode	3-step/PWM	Sí (tuning incluido)	Válvulas/3-puntos
PID_Temp	SP, PV, Cooling/Heating	Dual output	Sí	Control de temperatura

IV-A3. Schneider Electric: El entorno EcoStruxure Control Expert incorpora el bloque FB_PID, que también ofrece ajuste manual o automático. Su enfoque busca garantizar una operación estable y adaptable a diferentes controladores Modicon.

Los manuales técnicos recomiendan combinar la auto-sintonía con ajustes manuales adicionales cuando el proceso presenta ruido o retardos importantes, en línea con los principios teóricos de diseño robusto y reducción de error integral [6], [12], [13].

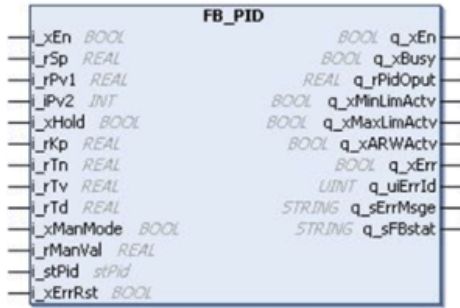
En los tres casos, el controlador PID mantiene la estructura teórica (Proporcional, Integral, Derivativa), pero con parámetros y funciones que pueden configurarse fácilmente desde el software. Las rutinas internas aplican filtros, *anti-windup* y estrategias de compensación que provienen directamente de la teoría del control, aunque ocultas dentro de interfaces más amigables.

A diferencia de algunos otros entornos (como los objetos PID con *autotuning* integrado de Siemens o Rockwell), el bloque básico FB_PID de Schneider no incorpora auto-sintonía automática dentro de ese mismo bloque; por tanto, el ajuste

de parámetros (K_p , K_i , K_d) se debe establecer explícitamente por el programador o mediante bloques/sistemas adicionales (p.ej., una función AUTOTUNE disponible por separado en bibliotecas más amplias) [12], [13].

Adicionalmente, puede usarse junto con bloques auxiliares para realizar *autotuning*; en Machine Expert existe soporte para funciones de *autotuning* complementarias.

Figura 5: Bloque FB_PID.



Adaptado de [13].

Entre las variables y parámetros más relevantes del bloque FB_PID se encuentran:

- i_iKp (INT): ganancia proporcional. El bloque reportará error si se intenta asignar un valor de 0.
- i_iT_i (INT): tiempo integral. Si se establece en 0, el bloque utiliza una fórmula de cálculo alternativa para centrar la salida.
- i_iT_d (INT): tiempo derivativo. Si es 0, se desactiva la acción derivativa (modo PI).
- i_rSp (REAL) / $i_iSetPoint$: valor de consigna (*setpoint*).
- i_rPv1 (REAL) / $i_iMeasure$: variable de proceso (*feedback*); es la lectura real que proviene del sensor.
- $i_xDirectOutput$ (BOOL): sentido de la acción. TRUE para acción directa (la salida aumenta si el error aumenta) y FALSE para acción inversa.
- i_xEn (BOOL): habilitación del bloque. Si es FALSE, las salidas se fuerzan a cero.

La documentación de FB_PID no menciona ningún proceso de *autotuning* interno automático ni cálculo automático de parámetros dentro del propio bloque. Por tanto, el programador debe ajustar manualmente los parámetros PID (i_iKp , i_iT_i , i_iT_d) basándose en un análisis externo del proceso o mediante otros mecanismos de auto-sintonía.

Para auto-sintonía, se suele utilizar bloques/técnicas auxiliares proporcionados por Schneider (como un bloque AUTOTUNE aparte) o rutinas personalizadas fuera de FB_PID. Algunos entornos de programación (como Machine Expert o bibliotecas de control de lazo) incorporan un bloque específico de *autotuning* que trabaja junto con FB_PID para generar parámetros automáticamente.

El bloque PIDAT (*PID Adaptive Tuning*) es un bloque de control PID adaptativo para sistemas M580, diseñado para ajustar dinámicamente sus coeficientes de control en tiempo

real durante la operación del lazo, con el fin de mejorar el desempeño frente a variaciones del proceso o condiciones de operación. Este bloque se incluye en bibliotecas funcionales específicas para EcoStruxure Control Expert en PLC M580 y es más avanzado que un PID simple, ya que monitoriza la dinámica del lazo y ajusta parámetros automáticamente.

Entre sus señales e indicadores típicos se incluyen:

- *MV (Manipulated Variable)*: salida PID escalada para mando de actuador.
- *State/Status*: indica el estado operativo (Auto, Tuning, Fault, etc.).
- *Diag/Errors*: bits de diagnóstico y errores.
- *ParamUpdateFlag*: indica que los parámetros fueron actualizados.

El bloque PIDAT hace auto-sintonía adaptativa, diferente de un *autotuning* clásico por pasos o Ziegler–Nichols. Su lógica monitorea la respuesta del proceso en tiempo real y ajusta los parámetros del controlador en función de esa dinámica:

- Identificación en línea: mide continuamente la respuesta de la PV ante cambios en la MV mientras opera en modo automático o durante perturbaciones planificadas.
- Ajuste adaptativo: estima parámetros dinámicos como tiempo muerto efectivo, constante de tiempo dominante y ganancia del lazo, y ajusta coeficientes PID para mantener rendimiento óptimo.
- Transición suave: aplica cambios de parámetros de forma gradual para evitar saltos bruscos o inestabilidad del lazo.

En la práctica, el PIDAT suele permitir modos de *tuning*, por ejemplo:

- Inicial o de arranque: realiza una estimación primaria cuando el lazo entra en operación.
- Adaptativo continuo: ajusta parámetros dinámicamente según condiciones del proceso.
- Manual: parámetros fijados externamente, sin adaptación.

A diferencia del PID estándar de Schneider, el PIDAT del M580 permite una sintonía adaptativa bajo demanda. Esto es especialmente útil en procesos donde la dinámica cambia con el tiempo (por ejemplo, un tanque que cambia su velocidad de llenado según el nivel actual), permitiendo re-sintonizar el lazo sin detener la producción.

IV-B. Comparación de estrategias PID entre fabricantes

El análisis de las plataformas de Rockwell Automation, Siemens y Schneider Electric evidencia que, aunque todas implementan la estructura clásica PID, cada fabricante adopta una filosofía tecnológica distinta para traducir los principios teóricos del control en herramientas industriales operativas. Las diferencias no radican en la ecuación fundamental del controlador, sino en el grado de abstracción, las estrategias de sintonización y el enfoque de integración con el proceso.

Desde la perspectiva de arquitectura del controlador, Rockwell prioriza una implementación altamente integrada mediante el bloque PIDE, concebido como una instrucción extendida que encapsula funciones avanzadas como *anti-windup*, filtrado derivativo y escalamiento automático. Este enfoque favorece

la rapidez de implementación y la estandarización del lazo, reduciendo la intervención directa del usuario en la formulación matemática. Siemens, en contraste, adopta una arquitectura modular basada en objetos tecnológicos especializados (PID_Compact, PID_Temp y PID_3Step), lo que permite adaptar el controlador a la naturaleza física del actuador—continuo, térmico o de tres puntos— preservando mayor visibilidad sobre los parámetros del lazo. Schneider Electric mantiene una filosofía más cercana al modelo clásico con el bloque FB_PID, donde el usuario gestiona explícitamente las constantes del controlador, complementándolo opcionalmente con funciones adaptativas como PIDAT para escenarios de variabilidad dinámica.

En cuanto a estrategias de sintonización, Rockwell y Siemens integran rutinas de *auto-tuning* orientadas a la identificación del modelo del proceso y ajuste automático de ganancias, minimizando la necesidad de cálculos analíticos. Rockwell emplea procedimientos basados en modelos de primer orden con tiempo muerto (FOPDT), mientras Siemens combina métodos de curva de reacción y criterios CHR para optimizar estabilidad o rapidez según el objetivo operativo. Schneider, por su parte, separa conceptualmente el controlador de la sintonización: el bloque básico requiere ajuste manual, lo que mantiene un vínculo más directo con la teoría tradicional, aunque el bloque PIDAT introduce adaptación en línea para procesos con dinámica variable. Esta diferencia revela tres filosofías: automatización del ajuste (Rockwell), optimización guiada (Siemens) y control explícito del diseñador (Schneider).

Respecto a la flexibilidad operativa, Siemens destaca por su especialización funcional, permitiendo seleccionar controladores diseñados para escenarios específicos como control térmico o válvulas de tres puntos, lo que reduce la necesidad de lógica adicional. Rockwell privilegia la universalidad del bloque PIDE, que puede configurarse para múltiples modos sin cambiar de estructura. Schneider ofrece una base simple y extensible, favoreciendo aplicaciones donde se requiere mayor personalización o integración con estrategias de control adaptativo externas.

Finalmente, en términos de filosofía de diseño, Rockwell orienta su tecnología hacia la productividad y la puesta en marcha rápida; Siemens combina automatización con especialización estructural; y Schneider prioriza modularidad y control explícito del diseñador, con extensiones adaptativas cuando se requiere robustez adicional. Ninguna aproximación contradice la teoría clásica del PID; más bien, representan distintos niveles de abstracción diseñados para equilibrar rigor teórico, facilidad de implementación y estabilidad operativa.

A continuación, en el Cuadro II se condensa esta información con enfoque en la arquitectura del bloque, la filosofía de control y las capacidades integradas.

Cuadro II: Comparación técnica de implementaciones PID en PLC

Criterio técnico	Rockwell – PIDE	Siemens – PID_Compact	Schneider – FB_PID / PIDAT
Forma algorítmica	PID en forma de velocidad (Δerror)	PID continuo basado en modelo de reacción del proceso	PID clásico explícito; PIDAT añade adaptación dinámica
Filosofía de diseño	Automatización orientada a puesta en marcha rápida	Control guiado con identificación del proceso	Control explícito con mayor intervención del usuario
Auto-sintonía integrada	Sí (step/oscillation tuning, FOPDT, ZN/IMC)	Sí (Pre-tuning + Fine-tuning, método CHR)	FB_PID: no nativa / PIDAT: adaptación continua
Manejo de saturación	<i>Anti-windup</i> interno automático	<i>Anti-windup</i> avanzado integrado	Depende del ajuste manual / PIDAT lo gestiona dinámicamente
Escalamiento de señales	Automático en unidades reales	Entrada directa REAL o periférica INT	Parametrización manual
Tipo de datos nativo	REAL (flotante)	REAL + acceso directo a periféricos	INT/REAL configurable
Modos de operación	Auto, Manual, Autotune, Program/Operator	Auto, Manual, Pre/Fine tuning	Manual/Auto + adaptación en PIDAT
Integración con lógica auxiliar	Alta (RMPS, alarmas, escalado)	Integración con objetos tecnológicos	Modular mediante bloques externos
Orientación de aplicación	Control continuo industrial general	Control continuo, térmico y actuadores discretos	Control estándar + procesos variables (PIDAT)
Interfaz de usuario	Estructurada y centrada en ingeniería de proceso	Asistente guiado en TIA Portal	Paramétrica, orientada a control explícito

Desde el punto de vista de la relación con la teoría del control, los tres fabricantes preservan la estructura PID, pero difieren en cuánto de esa estructura permanece visible para el usuario. Rockwell y Siemens encapsulan gran parte del análisis matemático dentro de algoritmos internos, priorizando eficiencia operativa. Schneider mantiene mayor transparencia paramétrica, lo que facilita la correlación directa entre constantes teóricas y comportamiento del sistema. Esta diferencia influye en la experiencia del ingeniero: plataformas más automatizadas reducen la carga analítica, mientras que enfoques explícitos favorecen comprensión y ajuste fino. A continuación en el cuadro III se profundiza esta información.

Cuadro III: Parámetros y funciones visibles para el usuario en bloques PID industriales

Parámetro / Función	PIDE (Rockwell)	PID_Compact (Siemens)	PID_FB (Schneider)	PIDAT (Schneider)
Kp explícito editable	Sí	Sí	Sí	Ajustado dinámicamente
Ki / Ti editable	Sí	Sí	Sí	Adaptativo
Kd / Td editable	Sí	Sí	Sí	Adaptativo
Setpoint estructurado	Sí (SP-Prop/SPOper)	Sí	Sí	Sí
PV escalada automática	Sí	Opcional	Manual	Adaptativo
Disturbance input	No nativo explícito	Sí	Configurable	Implícito
Activación autotuning	Parámetro interno	Panel de optimización	Externo	Automático continuo
Límites de salida	Sí	Sí	Sí	Dinámico
Gestión manual/auto suave	Sí	Sí	Sí	Sí
Ajuste térmico dual	No	Sí (PID_Temp)	No	Adaptable
Control discreto/3 pasos	Externo	Sí (PID_3Step)	Externo	No específico

IV-C. Correspondencia y Discrepancia entre los Modelos Teóricos y las Implementaciones Industriales

Al comparar los métodos de diseño desarrollados en la academia con las estrategias de implementación empleadas en la industria, se observa una relación de continuidad más que de oposición. Ambos enfoques comparten los mismos fundamentos conceptuales —la realimentación, la estabilidad y el ajuste dinámico del sistema—, pero divergen en su forma de implementar esos principios y en las prioridades que orientan su aplicación.

En el ámbito teórico, el diseño de controladores parte del modelado matemático del proceso, del análisis de estabilidad y de la búsqueda de parámetros óptimos mediante métodos formales como Ziegler–Nichols, Cohen–Coon o criterios de desempeño integral. La atención se centra en garantizar una respuesta precisa, predecible y sustentada en ecuaciones verificables. Cada ganancia del controlador —proporcional, integral y derivativa— se determina con base en la dinámica del sistema, suponiendo condiciones ideales de linealidad y disponibilidad total de información sobre el proceso.

En cambio, en el entorno industrial, el proceso de implementación se rige por criterios más operativos. Los ingenieros enfrentan sistemas donde los modelos matemáticos suelen ser incompletos o inestables, las mediciones presentan ruido y los tiempos de puesta en marcha deben ser reducidos. En este contexto, las herramientas integradas en los PLC —como los bloques funcionales PID y las rutinas de auto-sintonía— se convierten en soluciones prácticas que permiten obtener un control confiable sin necesidad de recurrir a cálculos analíticos extensos. Estas funciones, desarrolladas por fabricantes como Rockwell, Siemens y Schneider Electric, incorporan internamente los principios de la teoría del control, pero los

presentan al usuario a través de interfaces gráficas, parámetros simplificados y procesos automáticos de identificación.

Así, la discrepancia entre teoría y práctica no implica una falta de fundamento técnico en las metodologías industriales, sino una adaptación pragmática de los conceptos clásicos a las condiciones reales de operación. Mientras la teoría busca exactitud y validación analítica, la práctica industrial prioriza la robustez, la flexibilidad y la facilidad de mantenimiento. En palabras simples, el ingeniero de planta no sustituye la teoría: la traduce en procedimientos operativos compatibles con los lenguajes y herramientas del entorno PLC.

Esta distancia entre ambos mundos, más que un problema, representa una oportunidad de integración. Comprender cómo los fundamentos teóricos se transforman en funciones prácticas dentro de los controladores industriales permite fortalecer la formación de los futuros ingenieros y mejorar la comunicación entre el diseño académico y la implementación real. En última instancia, la teoría ofrece el “por qué” del control, mientras que la práctica muestra el “cómo” hacerlo funcionar en condiciones reales.

IV-D. Aplicación práctica: Simulación en Factory I/O y TIA Portal

Esta sección presenta un ejercicio de simulación orientado a demostrar la implementación práctica de un controlador PID mediante el bloque `PID_Compact` en un PLC Siemens S7-1200, integrando el entorno de ingeniería TIA Portal con la plataforma de simulación Factory I/O. El objetivo de esta simulación es ilustrar, en un contexto controlado, el comportamiento de una estrategia PID aplicada al control de nivel, permitiendo analizar su respuesta dinámica y validar criterios de desempeño estudiados a lo largo de la investigación. De esta manera, el ejercicio sirve como evidencia del uso de las tecnologías PID y su aplicación en sistemas industriales simulados.

La metodología del ejercicio se estructura en etapas claramente definidas. En primer lugar, se identifican y configuran las variables del proceso, estableciendo como variable controlada el nivel del tanque —representado por una señal analógica que simula un sensor en Factory I/O— y como variable manipulada la señal de salida generada por el controlador, encargada de regular las válvulas de llenado y vaciado que actúan como elementos finales de control.

Posteriormente, se realiza el acondicionamiento de señales y la parametrización inicial del bloque `PID_Compact` en TIA Portal. A continuación, se establece la comunicación entre el PLC virtual y Factory I/O mediante su controlador correspondiente, empleando el modelo de tanque proporcionado por la plataforma. Esta integración permite supervisar en tiempo real la interacción entre el controlador y el proceso simulado bajo distintas consignas de operación.

Finalmente, se desarrollan pruebas experimentales variando puntos de consigna y condiciones operativas con el propósito de evaluar la estabilidad del sistema, su comportamiento transitorio y el error en régimen permanente. A partir de estos ensayos se ajustan los parámetros del controlador, principalmente las

ganancias proporcional e integral, aplicando criterios de desempeño como el tiempo de establecimiento y la minimización de oscilaciones, lo que permite observar el impacto del ajuste en la calidad del control.

La programación del PLC se basa en la definición y gestión de variables que representan las señales del proceso. Estas variables se clasifican en entradas, que corresponden a la información proveniente de los sensores; salidas, asociadas a los actuadores que ejecutan las órdenes de control; y variables internas o auxiliares, utilizadas para el tratamiento lógico y matemático dentro del programa. A continuación, en la figura 5 se presentan las variables globales definidas para este ejercicio, de las cuales vale la pena resaltar:

- **START**: variable que hace referencia a un botón físico conectado al PLC encargado de activar el control PID.
- **STOP**: variable que hace referencia a un botón físico conectado al PLC encargado de desactivar el control PID.
- **LED_START**: salida que enciende un led físico conectado al PLC; es un indicador visual de cuando está activado el control PID.
- **Potenciómetro**: variable de entrada que define el setpoint, enlazada a un potenciómetro presente en el panel de visualización del entorno simulado (figura 16).
- **fill**: señal de salida tratada generada por el controlador, encargada de regular la válvula de llenado.
- **discharge**: señal de salida tratada generada por el controlador, encargada de regular la válvula de vaciado.
- **levelMeter**: señal proveniente del sensor de nivel del tanque.
- **Sp(mm)**: variable del setpoint escalada a milímetros.
- **Sp(%)**: variable del setpoint escalada a porcentaje.
- **PV(mm)**: variable del proceso escalada a milímetros.
- **PV(%)**: variable del proceso escalada a porcentaje.
- **Cv(%)**: señal de control cruda, generada por el controlador.

Figura 6: Variables globales PLC

Variables PLC				
	Nombre	Tabla de variables	Tipo de datos	Dirección
1	START	Tabla de variables e..	Bool	%I0.0
2	LED_Start	Tabla de variables e..	Bool	%Q0.0
3	STOP	Tabla de variables e..	Bool	%I0.1
4	potenciometro	Tabla de variables e..	Int	%IW70
5	fill	Tabla de variables e..	Int	%QW80
6	SP(mm)	Tabla de variables e..	Real	%MD10
7	SP(%)	Tabla de variables e..	Real	%MD14
8	levelMeter	Tabla de variables e..	Int	%IW68
9	PV(mm)	Tabla de variables e..	Real	%MD18
10	PV(%)	Tabla de variables e..	Real	%MD22
11	CV(%)	Tabla de variables e..	Real	%MD26
12	discharge	Tabla de variables e..	Int	%QW82
13	<Agregar>			

La lógica implementada en el PLC se encarga de procesar dichas señales, compararlas con los parámetros de referencia establecidos y generar respuestas que regulen el comportamiento del sistema. De este modo, se garantiza un control automático que integra tanto el monitoreo de condiciones de operación como la activación de los elementos necesarios para mantener la estabilidad y el correcto funcionamiento del proceso. En

las figuras 7A y 7B se muestra la programación en el Main Cycle: en la figura 7A se presenta la lógica detrás de la variable “LED_Start”, la cual se enclava, encendiendo un indicador y activando o desactivando el bloque PID (figura 10) mediante la entrada “ManualEnable”. En la figura 7B se presentan tres bloques de función: “Bloque_1” (setPoint), “Señal_sensor” y “Salida_PID”, encargados del tratamiento de las señales.

Figura 7A: Main Cycle Sweep Program

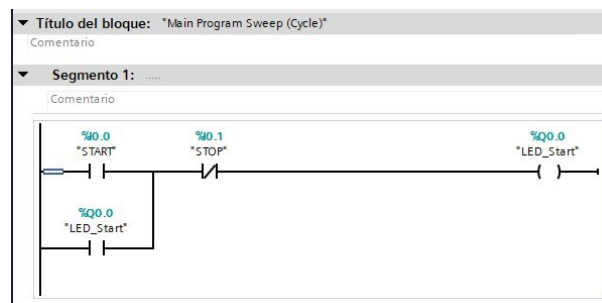
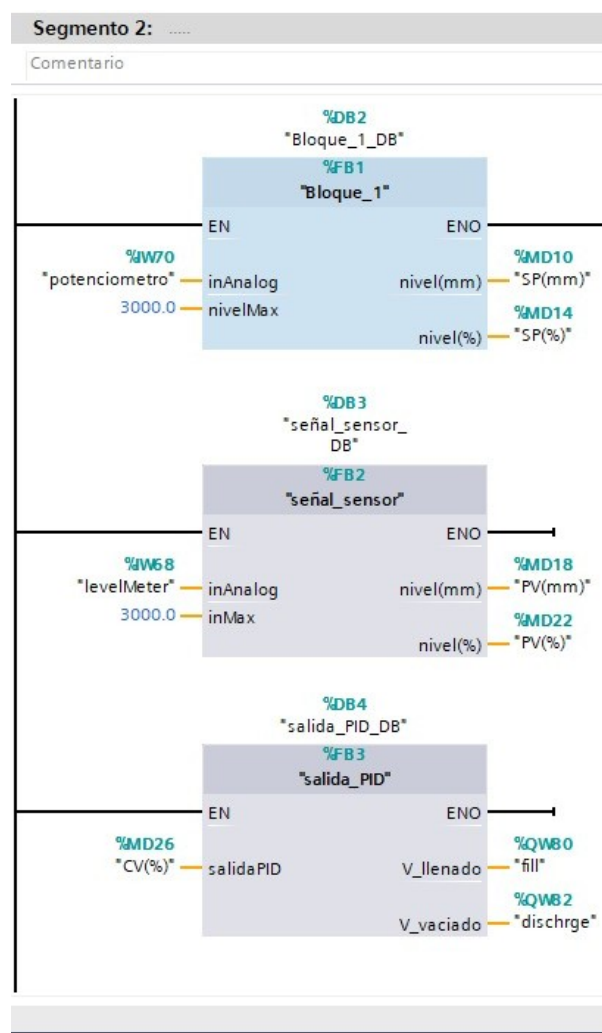


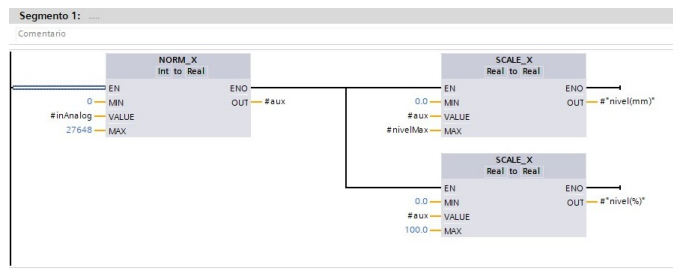
Figura 7B: Main Cycle Sweep Program



El potenciómetro que se encarga de generar una señal analógica en el rango de 0 a 10 V, la cual se envía directamente

a la entrada de este bloque junto con el parámetro de la altura total del tanque, como se ve en la figura 7B, para que posteriormente dentro del bloque (figura 8) se realice una etapa de normalización y escalamiento. La normalización se realiza en función de las entradas analógicas del PLC, asegurando que la señal analógica se interprete correctamente dentro de la resolución del controlador, la cual es de 0 a 27648. Posteriormente, la señal es escalada para su representación en unidades más comprensibles para el proceso, en este caso a porcentaje y milímetros haciendo referencia a la altura del tanque (la variable de milímetros no es utilizada dentro del proceso; se utiliza como referencia de la altura del tanque).

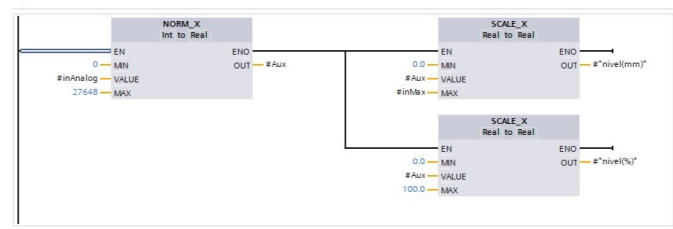
Figura 8: Setpoint



El bloque encargado de procesar la señal del sensor (figura 9) de nivel cumple una función equivalente al bloque del set point, con la diferencia de que aquí se trabaja con la medición del sensor de nivel el cual trabaja con voltajes de cero a diez voltios. La señal proveniente del sensor ingresa al PLC y se normaliza según la resolución de la entrada analógica.

Para su utilización en el control, la señal se somete a un proceso de normalización, de manera que se ajuste al rango de operación del PLC. Posteriormente, se realiza una conversión tanto a porcentaje como a milímetros: el valor en porcentaje se emplea en los cálculos del controlador PID (mientras que la representación en milímetros, pese a que no se utiliza en el proceso, permite una visualización más intuitiva y directa del nivel del tanque dentro del entorno de TIA Portal).

Figura 9: Bloque señal Sensor.



El bloque de función “Salida_PID” (figuras 10A y 10B) recibe como entrada principal la variable CV %, generada por el PID Compact. Esta señal representa la acción de control calculada por el algoritmo, con un rango de -100 % a +100 %. La interpretación de este rango es la siguiente:

- **CV % positiva (0 a +100):** el control actúa sobre la válvula de llenado, generando el aumento del nivel en el tanque.

- **CV % negativa (0 a -100):** el control actúa sobre la válvula de vaciado, provocando la descarga del tanque.

De esta manera, el mismo PID permite gestionar dos actuadores diferentes mediante condicionales lógicos dependiendo del signo de la salida.

Implementación lógica (Figura 10B).

Condicionales de signo:

- Si $CV \% > 0$, el sistema activa la válvula de llenado, se envía la señal analógica (salida escalada) hacia la válvula de llenado y se fuerza un 0 hacia la válvula de vaciado (bloque MOVE).
- Si $CV \% < 0$, ocurre lo contrario: se activa la válvula de vaciado y se fuerza un 0 hacia la válvula de llenado.

Normalización y escalado: como la salida del PID está en porcentaje (%), se debe acondicionar antes de enviarla al mundo real.

Figura 10A: Conversión y Escalado de la Señal de Salida del PID.

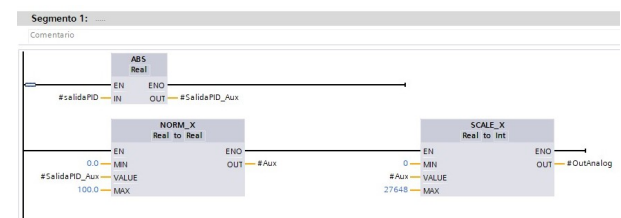
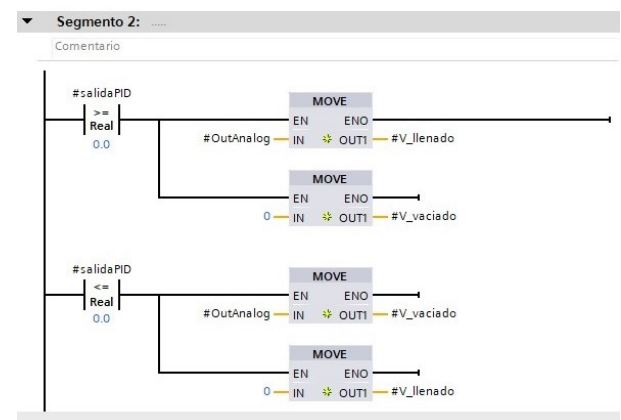


Figura 10B: Conversión y Escalado de la Señal de Salida del PID.



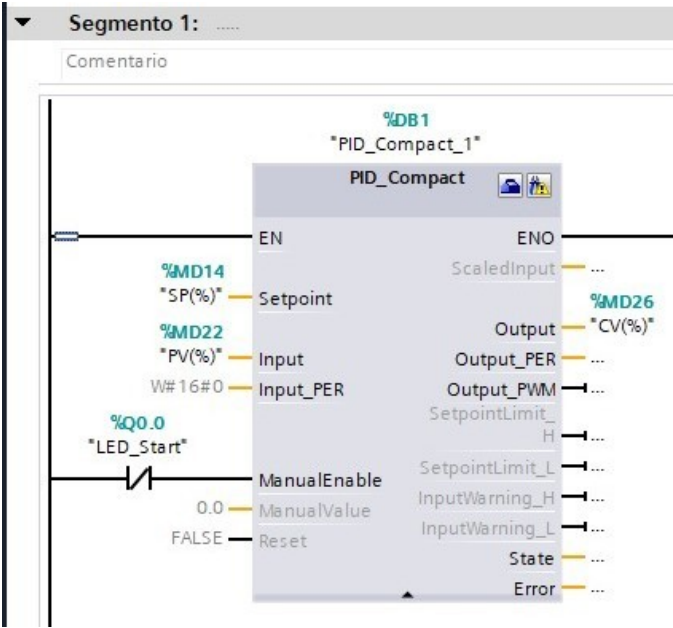
El bloque de control PID Compact de la figura 11 se implementa dentro de un bloque de interrupción cíclica (*Cyclic Interrupt*), configurado con un periodo de 100 milisegundos. Esto permite que su ejecución sea más rápida y prioritaria en comparación con el Main Cycle, garantizando una respuesta ágil del lazo de control.

Dentro del bloque se procesan las siguientes variables: Setpoint (SP), Process Value (PV) y Control Variable (CV). Adicionalmente, el bloque incorpora una entrada de habilitación manual (*Manual Enable*). Esta está asociada a una compuerta normalmente cerrada, cuya función es deshabilitar el PID en caso de que se requiera un control manual o que se interrumpa el flujo de corriente. Con la lógica de control

implementada, esta señal es gestionada de manera que el PID se active o desactive mediante la variable “LED_Start” según las condiciones de operación establecidas.

De esta forma, el PID Compact asegura un control continuo, confiable y flexible sobre el nivel del tanque, permitiendo la correcta interacción entre el setpoint definido, el valor de proceso medido y la variable de control aplicada al sistema.

Figura 11: Ejecución bloque PID Compact.



IV-E. Conexión del Programa en TIA Portal con el Escenario de Simulación en Factory I/O

La conexión entre Factory I/O y TIA Portal (figura 12) se establece configurando el intercambio de datos mediante un driver de comunicación que permite vincular el entorno de simulación con el controlador (figura 13). Una vez enlazados, las señales de entradas y salidas generadas en Factory I/O pueden ser interpretadas por el PLC en TIA Portal, y viceversa (figura 14).

Figura 12: Configuración Interfaz.

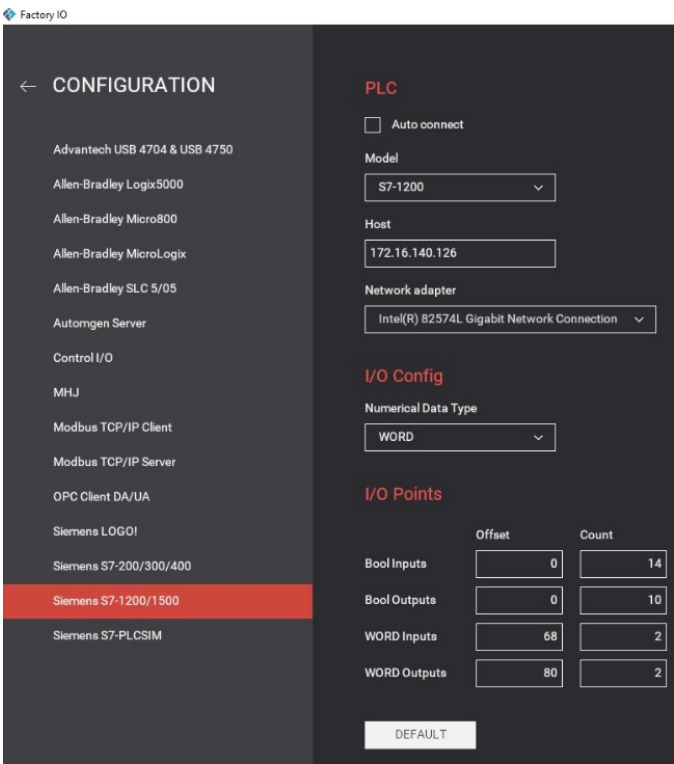
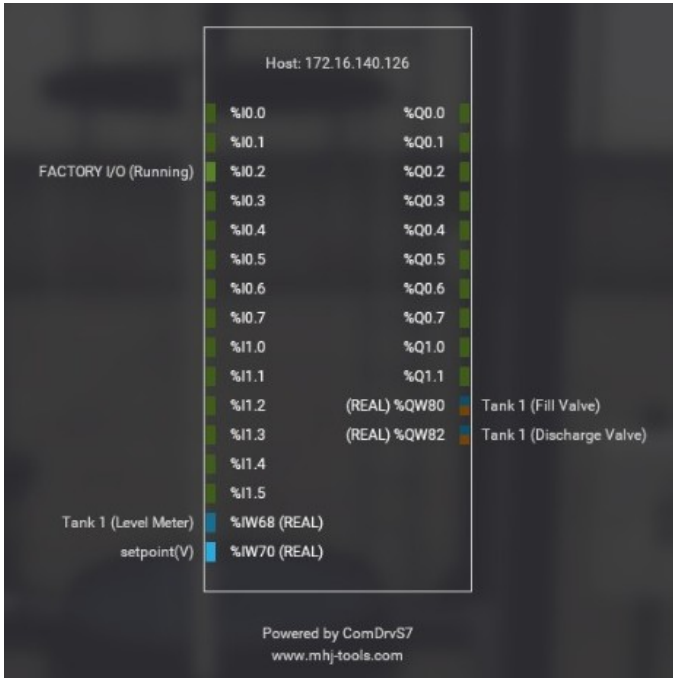


Figura 13: DRIVER, Selección PLC.



Figura 14: Asignación de sensores y actuadores.



En la simulación se representa un tanque de proceso (figuras 15 y 15A) donde se incluyen sensores de nivel y actuadores asociados. Los sensores permiten detectar y transmitir el estado del nivel del líquido dentro del tanque, mientras que los actuadores, como válvulas de llenado o vaciado, responden a las órdenes de control enviadas desde el programa en el PLC. De esta forma, se logra una interacción dinámica entre el modelo virtual y la lógica de automatización desarrollada.

Figura 15A: Visualización de la planta.

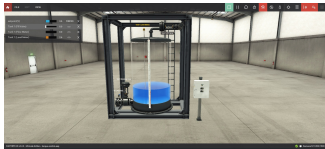


Figura 15B: Visualización de la planta.



A continuación, en la figura 16 se presenta el panel de visualización implementado en el entorno virtual con el fin de visualizar y manipular el proceso desde este mismo. El panel cuenta con un potenciómetro mediante el cual se varía el setpoint y dos pantallas en las cuales se evidencia el setpoint actual y la variable de proceso actual.

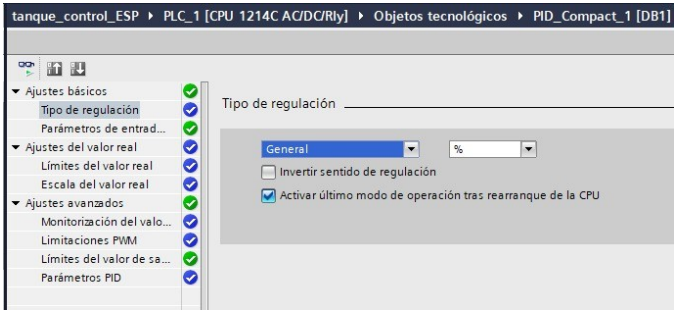
Figura 16: Panel de visualización.



IV-F. Programación y ajuste del controlador PID Compact en TIA Portal

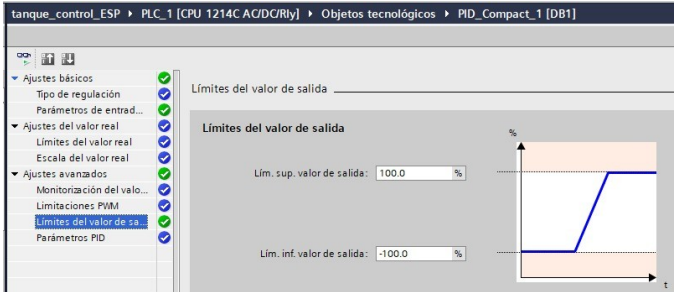
En la configuración del bloque PID Compact se establecen los parámetros de control, definiendo que las variables de proceso y de referencia serán trabajadas en valores porcentuales (figura 17).

Figura 17: Tipo de Regulación bloque PID COMPACT.



Como se había dicho anteriormente, la configuración de los límites del valor de salida se ajustó a un límite superior de 100 % y a uno inferior de -100 % (figura 18). Esto se realiza para que, mediante el uso de condicionales, se pueda controlar dos actuadores al tiempo (la válvula de llenado y la de vaciado).

Figura 18: Límites de valor de salida.



Otros de los parámetros que se pueden editar dentro de las funciones del bloque PID_Compact, como por ejemplo "limitaciones PWM", no son relevantes para el actual ejercicio, por lo que estos se dejan tal como están, a excepción de "Parámetros PID" (figura 19), el cual posteriormente el propio sistema de auto sintonía le asignará valores.

Figura 19: Fig. 18. Parámetros PID.

Parámetros PID

☐ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 1.0

Tiempo de integración: 20.0 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coefficiente retardo derivativo: 0.0

Ponderación de la acción P: 0.0

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 1.0 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PID

En este punto, el PID_Compact ya se encuentra en funcionamiento (el proceso de auto tuning Anexo1.Video funcionamiento Planta de control), enviando y recibiendo datos dentro del entorno de simulación. Se establece un setpoint y se observan tanto la variable de control como la variable de proceso en operación. En la gráfica, la línea cian representa el setpoint, la línea verde corresponde a la variable de proceso, la cual busca alcanzar el valor de referencia; se aprecia un ligero *overshoot*, correspondiente a un comportamiento subamortiguado. Durante este proceso, la acción de control, de color rojo, responde adecuadamente para conducir el sistema hacia el valor deseado. Como se observa en las figuras 20A y 20B.

Figura 20A: Interfaz gráfica del controlador PID.

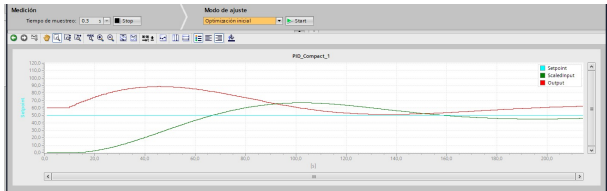
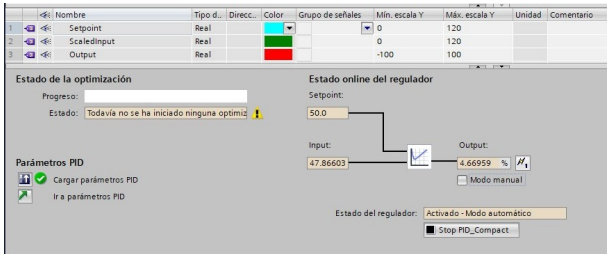


Figura 20B: Interfaz gráfica del controlador PID.



En la interfaz gráfica del controlador PID_Compact se dispone de una sección para realizar el ajuste inicial, donde mediante el *auto-tuning* es posible configurar los parámetros proporcional, integral y derivativo, permitiendo definir la respuesta dinámica del sistema de acuerdo con las necesidades del proceso. En esta fase se determinaron las variables del sistema y se ajustaron los parámetros del controlador. Una vez

terminado el proceso de *auto-tuning* se revisaron los parámetros que este calculó para el sistema (figura 21). Se observa que se asignaron valores a los parámetros proporcional e integral, mas no al derivativo, lo cual transforma el esquema PID en un PI.

Figura 21: Fig. 20. Parámetros Autosintonía PID.

Parámetros PID

☒ Activar entrada manual

Ganancia proporcional: 6.075318

Tiempo de integración: 13.34233 s

Tiempo derivativo: 0.0 s

Coefficiente retardo derivativo: 0.1

Ponderación de la acción P: 0.8

Ponderación de la acción D: 0.0

Tiempo muestreo algoritmo PID: 2.000012E-1 s

Regla para la optimización

Estructura del regulador: PI

IV-G. Implicaciones académicas e industriales

Desde la perspectiva académica, este análisis evidencia que los estudiantes de ingeniería deben complementar la formación teórica con el conocimiento de las herramientas industriales actuales. Entender cómo funcionan las funciones de auto-sintonía, los límites de operación y los modos de control de los PLC es clave para aplicar correctamente los conceptos aprendidos.

En el ámbito profesional, los resultados resaltan la importancia de que los ingenieros comprendan el fundamento teórico detrás de las herramientas de software, ya que esto permite interpretar los resultados de auto-sintonía, identificar errores y realizar ajustes más precisos en campo. En otras palabras, la práctica industrial depende de la teoría, pero la teoría solo se vuelve útil cuando puede aplicarse de forma eficiente en el entorno operativo.

V. CONCLUSIONES

El desarrollo de esta monografía permitió comprender que la brecha entre los modelos teóricos de control automático y las metodologías aplicadas en la industria no representan una contradicción, sino una diferencia de enfoque. Mientras la teoría busca precisión analítica y rigurosidad matemática, la práctica industrial prioriza la operatividad, la seguridad y la rapidez en la implementación.

Los tres fabricantes analizados —Rockwell Automation, Siemens y Schneider Electric— demuestran que los principios del control PID clásico siguen siendo la base del control industrial moderno. Sin embargo, su aplicación ha sido adaptada a entornos digitales que integran rutinas de auto-sintonía, bloques de funciones estandarizados e interfaces de configuración que simplifican el trabajo del ingeniero. Estas herramientas no

sustituyen la teoría, sino que la incorporan de forma implícita para hacerla accesible a través del software.

Uno de los hallazgos más relevantes es que las plataformas industriales no operan al margen del conocimiento académico, sino que lo traducen en algoritmos internos optimizados para condiciones reales de operación. Esto explica por qué los controladores PID en PLC pueden ajustarse sin necesidad de modelar matemáticamente el proceso: el fabricante ya integró esos modelos en las funciones de *auto-tuning*, basado en investigaciones y experiencias acumuladas durante décadas.

Desde la perspectiva formativa, los resultados sugieren que los programas académicos de ingeniería deberían fortalecer el vínculo entre la teoría y la práctica, incorporando simulaciones y laboratorios con PLCs reales o entornos virtuales de fábricas. De este modo, los estudiantes podrían entender cómo los conceptos de estabilidad, tiempo de establecimiento o sobreimpulso se traducen en parámetros concretos dentro de las herramientas industriales.

Finalmente, puede afirmarse que la brecha teórico-práctica no es una separación, sino una evolución: la teoría del control continúa siendo el fundamento, pero su aplicación se ha transformado para responder a las necesidades del entorno productivo. El desafío actual para los ingenieros no es elegir entre teoría o práctica, sino dominar ambas dimensiones para diseñar, ajustar y optimizar sistemas de control cada vez más eficientes, seguros y flexibles.

APÉNDICE A

ANEXO 1. VIDEO FUNCIONAMIENTO PLANTA DE CONTROL

El video correspondiente al funcionamiento de la planta de control se adjunta como material complementario del proyecto. <https://youtu.be/veyAyuvfiEs>

REFERENCIAS

- [1] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 5th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2010.
- [2] R. C. Dorf and R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 13th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Pearson, 2016.
- [3] D. E. Seborg, T. F. Edgar, D. A. Mellichamp, and F. J. Doyle, *Process Dynamics and Control*, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2017.
- [4] Rockwell Automation, *Logix 5000 Controllers Process Control and PIDE Instruction Reference Manual*. Milwaukee, WI, USA: Rockwell Automation, 2021.
- [5] Siemens AG, *PID Control—Function Manual*, A5E35300227-AJ. Siemens Industry Online Support, Nov. 2025.
- [6] Schneider Electric, *EcoStruxure Control Expert—PID Enhanced Function Block Manual*. Rueil-Malmaison, France: Schneider Electric, 2021.
- [7] K. J. Åström and T. Hägglund, “The future of PID control,” *Control Eng. Pract.*, vol. 9, no. 11, pp. 1163–1175, 2001.
- [8] Rockwell Automation, “Manual de referencia de instrucciones PID (PIDE) mejorado,” Studio 5000 Logix Designer Online Help, 2024.
- [9] Siemens AG, *Multi-Zone Control with PID_Temp—Application Example*, SIMATIC S7-1200/S7-1500, V1.1. Siemens Industry Online Support.
- [10] Siemens AG, “Guía de configuración de objetos de tecnología PID_Compact,” Siemens Industry Support Documentation, 2023.
- [11] Siemens AG, “Control de tres puntos paso con PID_3Step,” Application Example, SIMATIC S7-1200/S7-1500, 2022.
- [12] Schneider Electric, *EcoStruxure Control Expert—Function Block Library Manual (Unity Pro Documentation)*, 2022.
- [13] Schneider Electric, “Referencia del bloque de función PID (FB_PID),” EcoStruxure Control Expert Help System, 2023.
- [14] Schneider Electric, “Especificación técnica del bloque de control adaptativo PIDAT,” PLC M580 Documentation, 2021.
- [15] T. Amosun *et al.*, “Diseño de un sistema de control de temperatura basado en PLC,” *Rev. Int. Investig. Desarro. Ing.*, vol. 19, no. 2, pp. 45–58, 2023.
- [16] S. Aslam, S. Hannan, M. U. Sajjad, and M. W. Zafar, “Control predictivo de modelo basado en PLC para el control de procesos industriales,” *Int. J. Adv. Appl. Sci.*, vol. 4, no. 6, pp. 63–71, 2017, doi: 10.21833/ijaas.2017.06.009.
- [17] B. Goswami, “Diseño de controladores PID para procesos de automatización industrial,” *Int. J. Eng. Res. Methodol. Appl. Sci.*, 2025.
- [18] O. Ruban, “Análisis y desarrollo del sistema de control PLC con aplicación industrial,” M.S. thesis, Tallinn Univ. of Technology, Tallinn, Estonia, 2008.
- [19] J. W. Kibulungu *et al.*, “Sistema de control automático basado en la industria 4.0, PLC y SCADA,” in *Sustainable Smart Systems: Selected Papers of WorldS4 2022*, vol. 578. Cham, Switzerland: Springer, 2023, pp. 183–197.
- [20] A. Suresh *et al.*, “Un estudio de controladores lógicos programables (PLC) en aplicaciones industriales,” Toronto Metropolitan Univ., Toronto, ON, Canada, 2021.
- [21] S. Gaddekar, “Automatización de fábrica basada en PLC interconectada con SCADA para aplicaciones industriales,” *SSRN Electron. J.*, pp. 1–12, 2021.
- [22] V. M. Alfaro and A. Vilanova, “Control PID: Resiliencia con respecto a la ecuación del controlador y las reglas de sintonización,” *Front. Control Eng.*, vol. 3, Art. no. 1085357, 2022, doi: 10.3389/fcteg.2022.1085357.
- [23] M. Bauer *et al.*, “Repositorio de datos de lazo de control PID industrial y comparación de métodos de monitoreo del rendimiento del lazo de control,” in *Proc. Amer. Chem. Soc. Meeting*, 2019.
- [24] I. Ahmed, V. Roussev, W. Johnson, S. Senthivel, and S. Sudhakaran, “Un banco de pruebas de sistemas SCADA para la investigación y pedagogía en ciberseguridad y análisis forense,” in *Proc. IEEE Int. Conf. Digital Forensics and Incident Analysis (DFIA)*, 2016.
- [25] R. A. Awad *et al.*, “Herramientas, técnicas y metodologías: una revisión de la informática forense para sistemas SCADA,” *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.*, vol. 2, no. 4, Art. no. 25, 2018, doi: 10.1145/3131994.
- [26] A. Shamshad, M. T. Riaz, A. Raza, and M. A. Khan, “Automatización inteligente de un transformador de potencia mediante PLC y SCADA en una subestación,” in *Proc. Int. Conf. Advanced Computational Techniques and Intelligent Systems*, 2023.
- [27] J. Lu, “Aplicación de la tecnología de control PLC en el control automático inteligente,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 69, no. 5, pp. 4523–4535, 2022, doi: 10.1109/TIE.2021.3095879.
- [28] M. Chattal *et al.*, “Automatización y control industrial a través de PLC e internet de las cosas,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 1–15, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2919876.
- [29] R. Dharmaji, “Large language models for industrial control system programming and real-world software vulnerability mitigation,” M.S. thesis, Univ. of California, Irvine, Dept. Elect. Comput. Eng., 2024.
- [30] Instrumentation Tools, “¿Cómo configurar un controlador PID en varios PLC de Schneider?,” Instrumentation, Control and Automation Articles, 2022.
- [31] RealPars, “Cómo programar un bucle PID básico en ControlLogix,” Industrial Automation Training, 2025.
- [32] Solis PLC, “Introducción a la programación PID en Siemens TIA Portal,” TIA Portal Tutorials, 2024.
- [33] LCC-Automation, “OpenPID-TIA-SCL: Un bloque de función PID de código abierto para Siemens S7-1200 y S7-1500,” GitHub Repository, 2024.
- [34] Control.com, “Uso del controlador de rampa/mantenimiento Allen-Bradley con un PID,” Industrial Automation Knowledge Base, 2022.
- [35] PLC Online Support, “Implementación de bucle en cascada PIDE de Studio 5000,” Technical Documentation and Training, 2024.
- [36] “Un análisis exhaustivo de las aplicaciones del control PID en sistemas industriales,” in *Control Proporcional-Integral-Derivativo: Análisis y Aplicaciones*. Dr Press Online Publishing, 2024.
- [37] K. Z. Khankeldiyeva, “El papel de los controladores programables (PLC) en la automatización de procesos tecnológicos,” in *Proc. Int. Conf. Scientific Developments: Perspectives on Modern Science and Innovative Practices*. Bukhara State Technical Univ., 2025.