ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

“Diseño de un Controlador Adaptativo para el Control de Nivel de Tres Tanques Interconectados Bajo Ataques de Inyección de Retardos en el Sistema de Control Industrial”

PROYECTO DE TITULACIÓN

Previo la obtención del Título de:

Magister en Automatización y Control Industrial

Presentado Por:

José Enrique Cueva Tumbaco

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2025

DEDICATORIA

En primer lugar, dedico este logro a Dios, por ser mi fortaleza y guía en cada uno de los momentos de duda. Y a mis padres, quienes han sido mis pilares y mi motivación para que me esfuerce y siga superando cada obstáculo que se me presentaba, con el fin de alcanzar esta meta en mi formación profesional. Este triunfo es tanto mío como de ellos.

AGRADECIMIENTOS

Haber llegado hasta aquí ha sido uno de los desafíos más importantes de la vida profesional, y hoy, al verlo logrado, lo que puedo hacer es agradecerle a Dios por la dirección que me ofreció en el proceso; a mis padres y hermanos, cuyo apoyo y orientación se constituyeron en factores determinantes; al Ph.D. Douglas Plaza, mi tutor, y al Ph.D. Efrén Herrera, mi revisor, por su paciencia, guía y orientación para el desarrollo de la tesis; a Adriana Aguirre por su asesoramiento para resolver los desafíos conceptuales que surgieron en este trabajo. Por último, le agradezco también a toda y cada una de las personas que de cualquier manera sumó para que este día fuera posible.

DECLARACIÓN EXPRESA

Yo José Enrique Cueva Tumbaco acuerdo y reconozco que: La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores. El o los estudiantes deberán procurar en cualquier caso de cesión de sus derechos patrimoniales incluir una cláusula en la cesión que proteja la vigencia de la licencia aquí concedida a la ESPOL.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, secreto empresarial, derechos patrimoniales de autor sobre software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 26 de octubre del 2025.

Firmado electrónicamente por:
JOSE ENRIQUE CUEVA TUMBACO
Validar únicamente con FirmaEC

José Cueva Tumbaco

EVALUADORES

Firmado electrónicamente por:
DOUGLAS ANTONIO PLAZA GUINGLA
Validar únicamente con FirmaEC

Douglas Plaza Guingla Ph.D

PROFESOR TUTOR

EFREN VINICIO HERRERA MUENTES

Digitally signed by EFREN VINICIO HERRERA MUENTES
Date: 2025.10.28 12:24:26 -05'00'

Efrén Herrera Muentes Ph.D

PROFESOR EVALUADOR

RESUMEN

El trabajo tiene por objetivo diseñar un controlador adaptativo, que mantenga el nivel de un sistema de tres tanques interconectados, bajo ataques de inyección de retardos. La propuesta consiste en estimar el retardo que introduce el atacante y aprovechar dicha información para adaptar el controlador Proporcional Integral Derivativo (PID) con el objetivo de mitigar los efectos provocados por el atacante, con ello, permitir que el sistema funcione con normalidad.

El desarrollo del trabajo ha consistido en el modelado matemático de la planta de tres tanques interconectados con su respectivo sistema de control PID en el entorno SIMULINK. Para ello, se simuló la inyección de retardos de tiempo a los canales de feedback y feedforward para emular las inyecciones atacantes, mientras que para la estimación de los retardos se empleó la técnica de identificación de sistemas de caja gris mediante el Método de Mínimos Cuadrados Recursivos (RLSM). Finalmente, se diseñó e implementó un controlador PID adaptativo cuyas ganancias se ajustan a partir de la estimación del retardo.

Los resultados obtenidos mostraron que los ataques de inyecciones de retardo afectan de forma severa el desempeño de un controlador PID convencional, llevando el sistema a la inestabilidad. En contraste, el controlador adaptativo PID que se utilizó logró una mitigación del ataque, preservando la estabilidad del sistema en hasta 200 segundos, incluso bajo condiciones de ataque. El estudio comparativo corroboró la mayor robustez del esquema adaptativo.

Se concluye que la inserción de un mecanismo de estimación junto con una estrategia de control adaptativa es una solución adecuada para defender los Sistemas de Control Industrial (ICS) contra amenazas cibernéticas como es la inyección de retardos. Esta propuesta fortalece la resiliencia de los ICS, aumentando así la operabilidad de las infraestructuras críticas ofreciendo disponibilidad, seguridad y confiabilidad.

Palabras Clave: Controlador Adaptativo, Ciberseguridad, Sistemas de Control Industrial, Inyección de Retardos, Estimación de Parámetros.

ABSTRACT

The objective of this work is to design an adaptive controller to maintain the level of a three-tank interconnected system under delay injection attacks. The proposal consists of estimating the delay introduced by the attacker and using this information to adapt the Proportional Integral Derivative (PID) controller to mitigate the effects caused by the attacker and, thus, allow the system to operate normally.

The development of the work consisted of the mathematical modeling of the three-tank plant with its respective PID control system in the SIMULINK environment. To emulate the attacking injections, time-delay injections into the feedback and feedforward channels were simulated. For the delay estimation, the Grey-Box system identification technique using the Recursive Least Squares Method (RLSM) was employed. Finally, an adaptive PID controller was designed and implemented, whose gains are adjusted based on the delay estimation.

The obtained results showed that time-delay injection attacks severely affect the performance of a conventional PID controller, leading the system to instability. In contrast, the adaptive PID controller that was used successfully mitigated the attack, preserving system stability for up to 200 seconds, even under attack conditions. The comparative study corroborated the greater robustness of the adaptive scheme.

It is concluded that the insertion of an estimation mechanism together with an adaptive control strategy is a suitable solution for defending Industrial Control Systems (ICS) against cyber threats such as time-delay injection. This proposal enhances the resilience of ICS, thereby increasing the operability of critical infrastructures by offering availability, security, and reliability.

Keywords: Adaptive Controller, Cybersecurity, Industrial Control Systems, Delay Injection, Parameter Estimation.

ÍNDICE GENERAL

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ICS	Sistemas de Control Industrial
PID	Proporcional, Integral, Derivativo
RLSM	Método de Mínimos Cuadrados Recursivos
SCADA	Control de Supervisión y Adquisición de Datos
PLC	Controlador Lógico Programable

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la Industria 4.0 permite que sistemas industriales están cada vez más conectados entre ellos, pero surgen nuevas vulnerabilidades de la información de los procesos a través de los ciberataques. Uno de estos ataques es la inyección de retardos en las señales de control. Este tipo de ataque genera inestabilidad en el sistema, lo que conlleva interrupciones en los procesos y da lugar a sustanciales pérdidas económicas.

El presente trabajo se centra en el análisis, en la detección y en la mitigación de este tipo de ataques en un sistema de control de nivel de tres tanques interconectados. El trabajo prosigue y plantea una posible solución mediante el diseño de un controlador PID adaptativo puesto que el mismo contempla la estimación de los retardos que el atacante inyecta en el sistema. Mediante la utilización del Método de Mínimos Cuadrados Recursivos (RLSM), el mismo sistema es capaz de detectar la anomalía generada por el ataque del atacante y de adaptar las ganancias del PID para compensar el retardo y mantener el rendimiento de este.

La propuesta tiene no sólo algún valor técnico porque plantea una solución concreta a una vulnerabilidad concreta, sino que también tiene un impacto social extenso porque la seguridad de los ICS es esencial para la operación continua y segura de servicios esenciales como el suministro de agua y la energía. Mediante modelado, simulación y análisis comparativo, este trabajo busca valorar la eficiencia en las estrategias de control adaptativo como una de las piezas clave para construir ICS resilientes a los ciberataques.

CAPÍTULO 1

1. ESTADO DEL ARTE

1.1 Descripción del problema

En los últimos años, los ICS ha provocado que sistemas que antes operaban de forma aislada, ahora se encuentren conectados a la red y queden expuestos a mayores vulnerabilidades, como parte de la cuarta revolución industrial o industria 4.0 [1]. Por ello, proteger los ICS es ahora más crucial, dadas las posibles consecuencias de un ataque exitoso que podría interrumpir servicios esenciales o incluso causar daños físicos. La detección de ciberataques, específicamente de ataques inyección de retardo que manipula la sincronización de las señales de control en los canales de retroalimentación ("feedback") y anticipación ("feedforward") pueden desestabilizar un sistema con el tiempo [2]. Además, pueden pasar desapercibidos durante largos periodos, lo que permite progresivamente llevar a la inestabilidad del sistema y causar daños significativos tales como pérdidas económicas, riesgos de seguridad e interrupciones de servicios esenciales.

La complejidad de los entornos de ICS y la posibilidad de fallos en cascada presentan desafíos importantes. Por consiguiente, es crucial el desarrollo de técnicas eficaces de detección y mitigación, para ataques de inyección de retardo en ICS. Sin ellas, el riesgo aumenta y las consecuencias podrían ser graves si llegara a ser exitoso el ataque en los ICS. Para validar el presente estudio relacionado a la afectación y posterior estimación y mitigación de ataques a una red de control industrial, se va a enfocar a un sistema de control de nivel de tres tanques interconectados como se observa en la Figura 1.

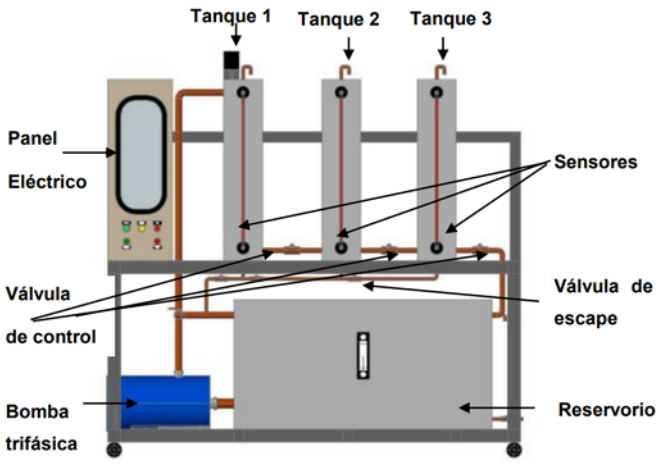

Figura 1 Sistema de la planta de tres tanques [3].

1.2 Justificación del problema

El proyecto no solo aborda problemas de ciberseguridad, sino que se tiene el potencial de incorporar estos aspectos desde las etapas iniciales del desarrollo transformando la manera en el diseño de los ICS. Por ello, se podría permitir que muchas industrias operen de manera más segura y confiable a largo plazo. Además, este proyecto no solo se limita a la protección de sistemas existentes. También, se busca establecer un nuevo estándar en la industria porque cada vez se requiere el desarrollo de enfoques nuevos e innovadores en ciberseguridad, soluciones de vanguardia que se adapte a las condiciones cambiantes y responda a las amenazas a medida que surgen, especialmente aquellos que puedan operar en tiempo real en los ICS.

Por último, no solo tiene implicaciones técnicas, sino que se tiene un componente social porque la seguridad de los ICS afecta a la vida cotidiana de las personas tales como el suministro de energía hasta el tratamiento de agua, la estabilidad de este tipo de sistemas es vital. Entonces, al mejorar la seguridad de los ICS, se está contribuyendo a un entorno más seguro para todos.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un controlador PID adaptativo para el nivel de llenado de tres tanques atacado por inyección de retardos a la red de control utilizando técnicas de estimación de los retrasos en sistemas de control industrial

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar el modelo de la planta de tres tanques y el sistema de control en SIMULINK para el estudio del comportamiento de inyección de retardos en la red de control.
2. Desarrollar el sistema de estimación de los retardos como mecanismo de detección y prevención de los ataques a la red de control del sistema.
3. Elaborar pruebas en el sistema de control de nivel en diversos escenarios bajo ataque y condiciones normales para la obtención del desempeño de los controladores
4. Desarrollar controladores del tipo PID, así como el controlador adaptativo para el control del nivel en el sistema de tres tanques bajo las condiciones de ataque al sistema de control.
5. Desarrollar un análisis comparativo del desempeño de los controladores en condiciones normales de operación y bajo ataque a la red de control.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Modelo de sistema de tres tanques

El sistema de tres tanques es utilizado en aplicaciones industriales tales como plantas químicas, petroleras y gas. Pues, es importante obtener los niveles de los tanques en ciertos valores determinado. El esquema principal del modelo se muestra en la Figura 1, el cual consiste en tres cilindros idénticos con igual sección transversal. Estos están conectados en serie mediante tuberías cilíndricas de sección transversal uniforme. El sistema de tres vasos comunicantes que se analiza está constituido por un reservorio desde el cual una bomba envía agua hacia el primero de los tres tanques interconectados, de ahí el agua pasa al segundo tanque y de éste al tercero, el cual descarga nuevamente en el reservorio original. Adicionalmente, en la conexión entre los tanques existen válvulas que permiten regular el flujo en la tubería entre los tanques [4].

1.4.2 Controlador PID

El controlador PID es un algoritmo de control que se emplea en lazos de retroalimentación para mantener automáticamente una variable de proceso en un valor deseado, conocido como setpoint. Aproximadamente el 90 % de los sistemas de control automático cuentan con este mecanismo universal.

En términos simples, el algoritmo PID regula una variable de proceso calculando una señal de control que es la suma de tres términos: proporcional, integral y derivativo. De ahí su nombre. Como resultado, puede devolver una variable de proceso al rango aceptable [5]. La salida de un controlador PID, que es igual a la entrada de control de la planta, se calcula en el dominio temporal a partir del error de retroalimentación con la ecuación 1.1.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)\ dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \tag{1.1}$$

En la Figura 2, la variable e(t) representa el error de seguimiento, la diferencia entre la salida deseada r(t) y la salida real y (t). Esta señal de error e(t) se envía al controlador PID, y el controlador calcula tanto la derivada como la integral de esta señal de error con respecto al tiempo.

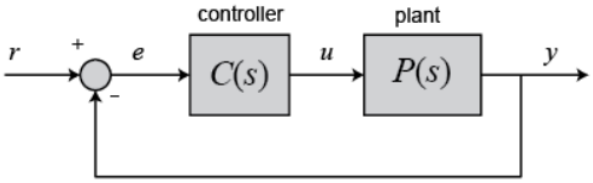

Figura 2 Sistema con retroalimentación unitaria.

Entonces, la señal de control u(t) aplicada a la planta se calcula como la suma de tres términos: la ganancia proporcional K_p multiplicada por la magnitud del error, más la ganancia integral K_i multiplicada por la integral del error, más la ganancia derivada K_d multiplicada por la derivada del error. Esta señal de control u(t) se alimenta a la planta y se obtiene la nueva salida y(t). Esta nueva salida y(t) se retroalimenta y se compara con la referencia para determinar la nueva señal de error e(t). El controlador toma esta nueva señal de error y calcula una actualización de la entrada de control. Este proceso continúa mientras el controlador está activo.

1.4.3 Control PID Adaptativo

El control PID adaptativo ajusta ganancias proporcional, integral y derivativa del controlador de acuerdo con los cambios en la dinámica del proceso. Además, este esquema de control demuestra robustez, capacidad de adaptar sus parámetros en tiempo real para compensar las variaciones no deseadas, frente a perturbaciones y ruido en el sistema. Este tipo de control puede operar en entornos más amplios de condiciones de procesos no lineales, ya que los controladores PID están mejor diseñados para sistemas lineales. Adicionalmente, el control adaptativo está diseñado para operar en entornos dinámicos. Esto significa que puede responder en condiciones de proceso donde las variables cambian de manera rápida, impredecible y no lineal, Por lo tanto, entre otras ventajas sobre la eficacia del control PID convencional en entornos dinámicos porque ajusta automáticamente los parámetros del control en tiempo real [6].

1.4.4 Ciberseguridad

La ciberseguridad es la práctica de proteger sistemas, redes y programas de ataques digitales. Estos ciberataques suelen tener como objetivo acceder, modificar o destruir información confidencial; extorsionar a los usuarios mediante ransomware; o interrumpir los procesos comerciales normales. Implementar medidas de ciberseguridad eficaces es especialmente difícil hoy en día, ya que existen más dispositivos que personas y los atacantes son cada vez más innovadores. La ciberseguridad es importante porque los

ciberataques y la ciberdelincuencia tienen el poder de perturbar, dañar o destruir empresas, comunidades y vidas. Los ciberataques exitosos provocan robo de identidad, extorsión personal y corporativa, pérdida de información confidencial y datos críticos para la empresa, interrupciones temporales del servicio, pérdida de negocios y clientes, en algunos casos, el cierre de empresas [7]. Los ciberataques tienen un impacto enorme y creciente en las empresas y la economía. Según una estimación de Cybersecurity Ventures, Programa de Aceleración Internacional de start-ups de ciberseguridad, la ciberdelincuencia costará a la economía mundial 10,5 billones de dólares al año para 2025 debido a que el coste de los ciberataques sigue aumentando a medida que los ciberdelincuentes se vuelven más sofisticados.

1.4.5 Sistema de control industrial

Sistema de control industrial es un término que describe diferentes tipos de sistemas de control e instrumentación asociada, incluyendo dispositivos, sistemas, redes y controles utilizados para operar o automatizar procesos industriales como se observa en la Figura 3. Dependiendo de la industria, cada ICS funciona de forma diferente y está diseñado para gestionar por medio de la red tareas de forma eficiente. Hoy en día, los dispositivos y protocolos utilizados en un ICS se emplean en casi todos los sectores industriales e infraestructuras críticas, como las industrias manufactureras, de transporte, energética y de tratamiento de aguas. Existen varios tipos de ICS, siendo los más comunes los sistemas de control de supervisión y adquisición de datos (SCADA) y los sistemas de control distribuido (DCS). Las operaciones locales suelen estar controladas por los dispositivos de campo, que reciben comandos de supervisión desde estaciones remotas. Para mejorar las funciones y la productividad del sistema, cada ICS incorpora constantemente nuevas tecnologías y software, y al fusionarse, las tecnología de información y la tecnología operaciones se convierten en objetivos más vulnerables para los ciberdelincuentes [8].

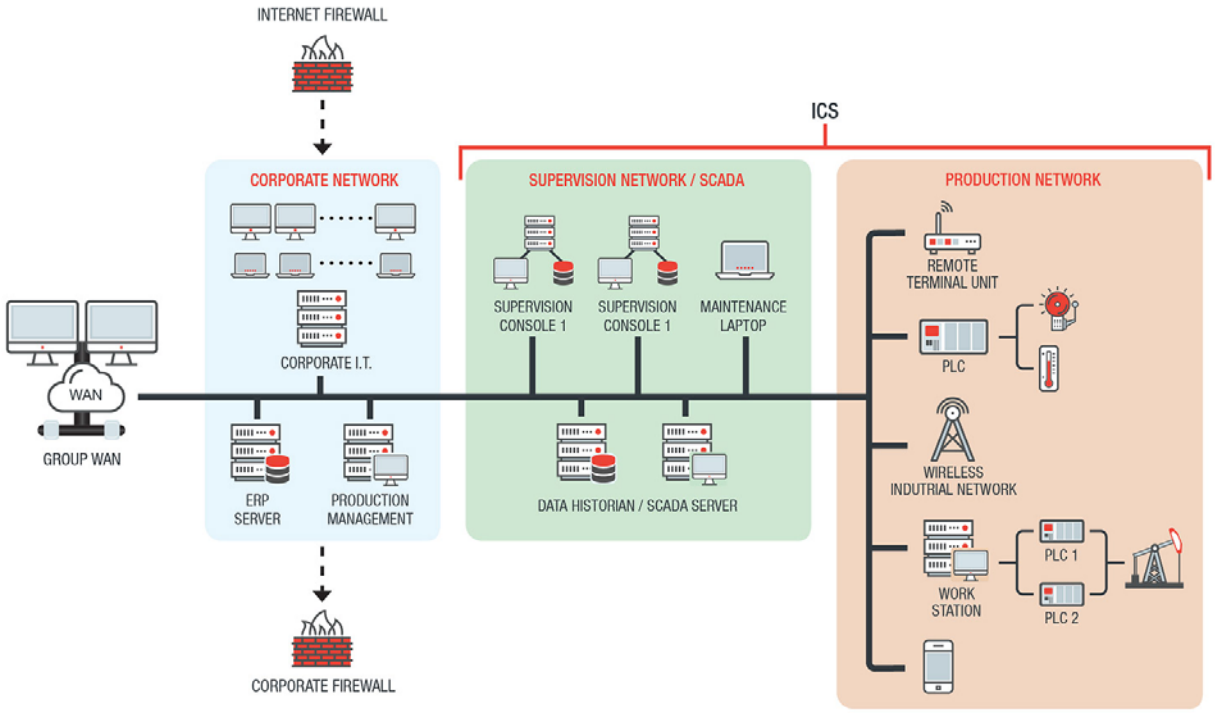

Figura 3 Sistema ICS [8].

1.4.6 Estimación recursiva de parámetros

La estimación recursiva de modelos es una técnica de identificación de sistemas que permite desarrollar un modelo que se ajusta en función de los datos en tiempo real que provienen del sistema. La estimación recursiva de modelos procesa los datos medidos de entrada y salida recursivamente a medida que están disponibles. Esta técnica es útil porque permite obtener el modelo matemático del sistema en tiempo real. En muchas aplicaciones del mundo real, como el control y predicción adaptativo, es necesario o útil contar con un modelo del sistema que se actualiza mientras este está en funcionamiento [9]. Como se ilustra en la Figura 4, una aplicación general de esta técnica consiste en un sistema desconocido, cuyo comportamiento se busca capturar.

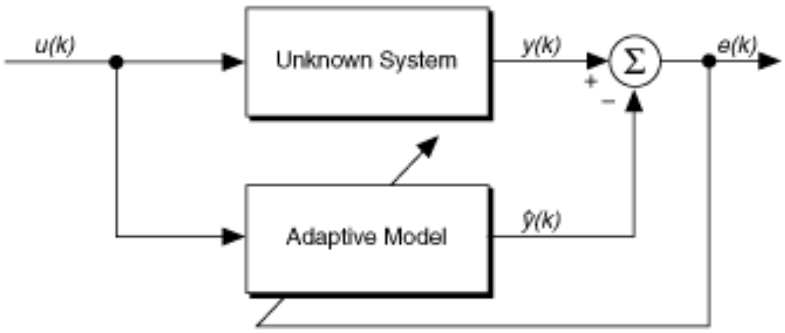

Figura 4 Esquema de identificación de sistemas recursivo [9].

La misma señal de estímulo u(k) alimenta tanto al sistema desconocido como al modelo recursivo w(k). Posteriormente, la salida real del sistema y(k) se compara con la salida predicha por el modelo ŷ(k) para calcular el error de modelado, definida por la ecuación 1.2.

$$e(k) = y(k) – \hat{y}(k) \quad (1.2)$$

En la siguiente iteración temporal (k+1), el modelo adaptativo genera la respuesta prevista ŷ (k+1) en función de u(k+1), el vector paramétrico w(k+1) y el error e(k).
El valor del error e(k) se devuelve al modelo adaptativo, que ajusta el vector paramétrico w(k) para tener en cuenta el error. Se itera este proceso hasta minimizar la magnitud del error cuadrático medio mínimo e(k).

1.4.7 Inyección de retardos temporales

Los retardos pueden afectar significativamente el rendimiento de los controladores PID. Cuando existe un retraso, las acciones correctivas del controlador pueden llegar demasiado tarde para contrarrestar el error eficazmente, lo que provoca oscilaciones, sobreimpulsos o incluso inestabilidad. Las acciones proporcionales, integrales y derivativas del controlador PID pueden verse afectadas negativamente por los retardos [10].

1.4.8 Identificación de caja gris

El modelado de caja gris es una herramienta que permite la identificación de sistemas cuando los datos experimentales de entrada/salida obtenidos presentan una excitación insuficiente. La falta de información en los datos a menudo puede compensarse con conocimiento adicional sobre el sistema modelado, lo que limita la clase de modelos considerados. El sistema real suele ser más complejo y no se ajusta a la clase del modelo, por lo que se produce un error de sesgo.

CAPÍTULO 2

2. Metodología

La metodología utilizada es asumir que el atacante obtiene acceso a la red de control y puede usar una herramienta de modelado de trafico de red para crear retrasos arbitrarios que se inyectan gradualmente para no ser detectados por el ICS. Por ello, la medición inmediata de la salida del proceso deseada y la salida de los actuadores serán reemplazadas por mediciones retardadas como se observa en la Figura 5.

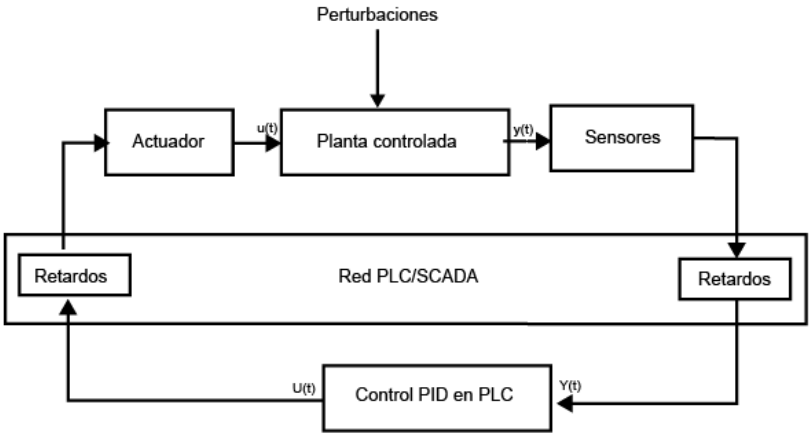

Figura 5 Diagrama de lazo cerrado de inyección de retardo en ICS [2].

Entonces, se obtuvo el modelo matemático del sistema de tres tanques interconectados y se implementó su representación en SIMULINK. Posteriormente, es necesario aplicar un controlador para regular el nivel en el tanque.

Luego, se lleva a cabo pruebas para determinar cómo los retardos afectan el desempeño del sistema en los canales de comunicación de retroalimentación ("feedback") y anticipación ("feedforward"), para establecer en que escenario el sistema comenzaba a experimentar oscilaciones como se observa en la Figura 6.

A partir de los datos recolectados, se utiliza el Método de Mínimos Cuadrados Recursivos (RSLM) un modelo matemático para vincular la entrada y salida del sistema con diferentes valores de retardos, con la finalidad de entender cómo los retardos afectan la relación entre la entrada y la salida observada. Por ello, se utiliza identificación de caja gris de acuerdo con los datos recolectados.

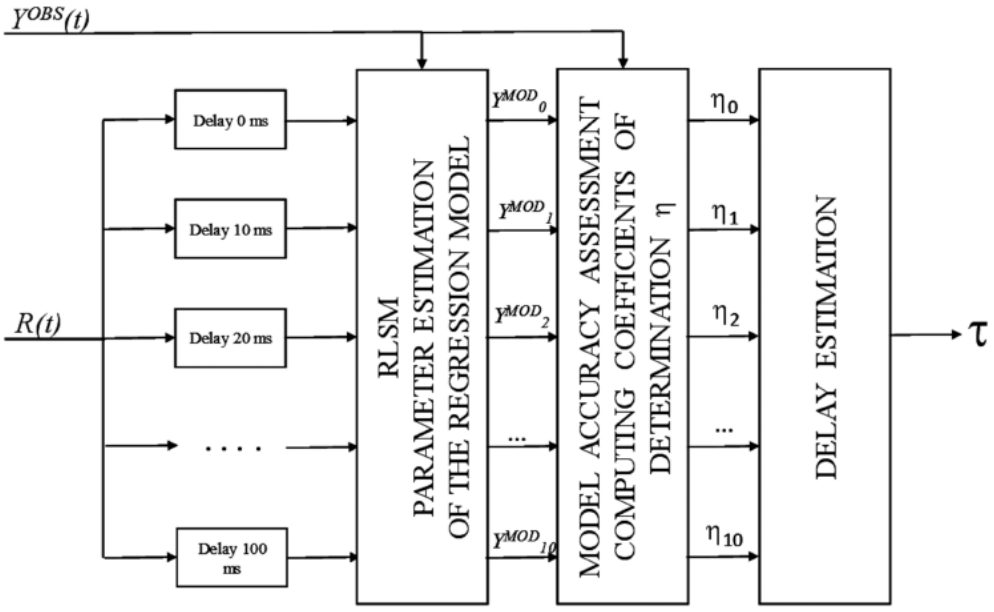

Figura 6 Modelo RLSM para diferentes valores de retardo [2].

Finalmente, se diseña el controlador PID adaptativo de acuerdo con la revisión de literatura para la detección y mitigación de ataques de inyección de retardos para la validación y comparación del desempeño de los controladores diseñados en escenarios de ataque y condiciones normales para la obtención del desempeño de los controladores en un entorno simulado.

2.1 Descripción del modelo de tres tanques

La dinámica no lineal del sistema se lo obtiene usando leyes físicas. En la Figura 7, se observa el volumen de agua almacenado en cada tanque, y debido a que el sistema es no lineal, lo caudales serán afectados por la resistencia de las tuberías (ψ) .

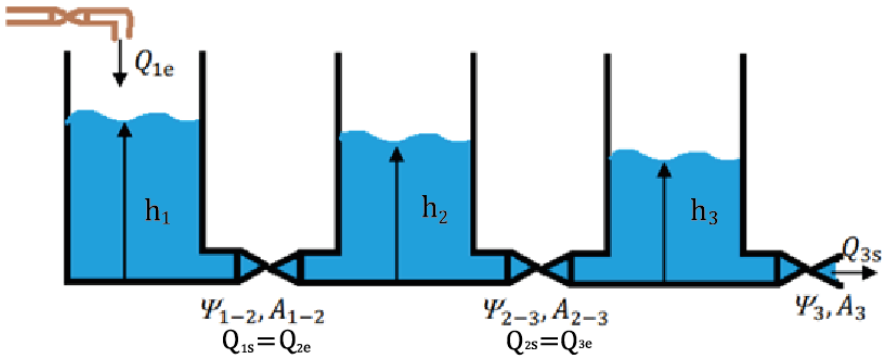

Figura 7 Esquema del modelado de la planta [3].

El volumen del agua almacenado de forma general en cada tanque se encuentra expresado en la ecuación 2.1.

$$V_x = \int (Q_{xe} - Q_{xs})\text{dt} \, . \tag{2.1}$$

Donde:

- V_x Volumen del tanque x;
- Q_{xe} Caudal de entrada del tanque x;
- Q_{xs} Caudal de salida del tanque x;
- dt Diferencial del tiempo;

Para la sección transversal del volumen en función del área y altura se muestra en la ecuación 2.2.

$$V_x = A_T h_x \tag{2.2}$$

Donde:

- V_x Volumen del tanque x;
- A_T Área transversal del tanque;
- h_x Nivel de agua del tanque x

A continuación, se obtuvo la derivada de la altura con respecto a los caudales como se muestra en la ecuación 2.3.

$$\frac{dh_x}{dt} = \frac{Q_{xe} - Q_{xs}}{A_t} \tag{2.3}$$

Según la ley de Bernoulli, el caudal se puede expresar mediante la siguiente ecuación 2.4.

$$P_A + \rho g h_A + \frac{1}{2}\rho v_A^2 = P_B + \rho g h_B + \frac{1}{2}\rho v_B^2 \tag{2.4}$$

Donde:

- P_A, P_B Presiones aplicadas en los puntos A y B;
- h_A, h_B Alturas de los puntos A y B;
- v_A , v_B Velocidades del fluido entre los puntos A y B;
- ρ Densidad del fluido;
- g Gravedad;

Luego, se obtiene el sistema de ecuaciones para el modelo no lineal del sistema como se presenta en las ecuaciones 2.5, 2.6 y 2.7.

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{Q_{1\epsilon} - A_{1-2}\psi_{1-2}\sqrt{2g(h_1 - h_2)}}{A_T} \tag{2.5}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{A_{1-2}\psi_{1-2}\sqrt{2g(h_1 - h_2)} - A_{2-3}\psi_{2-3}\sqrt{2g(h_2 - h_3)}}{A_T} \quad (2.6)$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{A_{2-3}\psi_{2-3}\sqrt{2g(h_2 - h_3)} - A_3\psi_3\sqrt{2gh_3}}{A_T} \quad (2.7)$$

Para encontrar la función del caudal de la bomba versus voltaje aplicado al variador de frecuencia, se aisló el primer tanque del segundo cerrando la válvula que los conectaba. Luego, se midió el tiempo que tardó el nivel del agua en alcanzar alturas de 20, 30, 40 y 50 centímetros, variando los voltajes enviados al variador de frecuencia. Posteriormente, se realizó un análisis de regresión lineal para obtener la función de entrada de la ecuación 2.8.

$$Q_b = 500.502V_{vf} - 1410.41 = Q_{le} \quad (2.8)$$

En la tabla 1 se muestran los valores de los parámetros de los tres tanques.

Tabla 1 Parámetros del sistema de tanque

Parámetro	Símbolo	Valor
Área de tanque	At	225 cm²
Área de sección transversal entre tanques	Atq	2.8502 cm²
Coeficiente del efecto de la turbulencia y resistencia de la tubería entre el Tanque #1 y Tanque #2	ψ_{1-2}	0.6909
Coeficiente del efecto de la turbulencia y resistencia de la tubería entre el Tanque #2 y Tanque #3	ψ_{2-3}	0.8274
Coeficiente del efecto de la turbulencia y resistencia de la tubería del Tanque #3	ψ_3	0.5208
Constante de aceleración gravitacional	g	9.18
Área de la sección transversal efectiva entre los tanques 1 y 2.	A_{1-2}	2.850 cm²
Área de la sección transversal efectiva entre los tanques 2 y 3.	A_{2-3}	2.2964 cm²
Área de la sección transversal efectiva del tanque 3.	A_3	1.4151 cm²

Reemplazando los valores de la planta se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dh_1}{dt} = \frac{500.502V_{vf} - 1410.41 - 19685\sqrt{1962(h_1 - h_2)}}{225} \textit{[cm/s]}$$

$$\frac{dh_2}{dt} = \frac{1.9685\sqrt{1962(h_1 - h_2)} - 1.9005\sqrt{1962(h_2 - h_3)}}{225} \textit{[cm/s]}$$

$$\frac{dh_3}{dt} = \frac{1.9005\sqrt{1962(h_2 - h_3)} - 0{,}7370\sqrt{1962h_3}}{225} \text{ [cm/s]}$$

Para encontrar los puntos de operación, se procede a linealizar el sistema con una entrada 3.175 voltios para el variador de frecuencia. Es importante tener en cuenta que el sistema es considerado en estado estable y las derivadas de las alturas son iguales a cero como se muestra a continuación.

$$0 = \frac{500.502(3.175) - 1410.41 - 1.9685\sqrt{1962(h_1 - h_2)}}{225} \text{ [cm/s]}$$

$$0 = \frac{1.9685\sqrt{1962(h_1 - h_2)} - 1.9005\sqrt{1962(h_2 - h_3)}}{225} \text{ [cm/s]}$$

$$0 = \frac{1.9005\sqrt{1962(h_2 - h_3)} - 0.7370\sqrt{1962h_3}}{225} \text{ [cm/s]}$$

Mediante la linealización del sistema en el punto de operación, se obtuvieron las ecuaciones 2.9, 2.10 y 2.11. Este proceso se llevó a cabo utilizando la herramienta de MATLAB, considerando que todas las variables representadas corresponden a desviaciones o variaciones incrementales alrededor del punto de operación.

$$\frac{dh_{1\delta}}{dt} = \frac{500.502V_{v\delta} - 21.273h_{1\delta} + 21.273h_{2\delta}}{225} \text{ [cm/s]} \quad (2.9)$$

$$\frac{dh_{2\delta}}{dt} = \frac{21.273h_{1\delta} - 41.294h_{2\delta} + 20.021h_{3\delta}}{225} \text{ [cm/s]} \quad (2.10)$$

$$\frac{dh_{3\delta}}{dt} = \frac{20.021h_{2\delta} - 23.003h_{3\delta}}{225} \text{ [cm/s]} \quad (2.11)$$

Entonces, resolviendo el sistema de ecuaciones de obtiene los siguientes puntos de operación.

- Vvf = 3.175
- h1op = 38.6843
- h2op = 34.4826
- h3op = 29.9749

Además, el diagrama de bloques del modelo matemático no lineal del sistema se muestra en la Figura 8 y se realiza la respectiva simulación para corroborar los puntos de operación obtenidos.

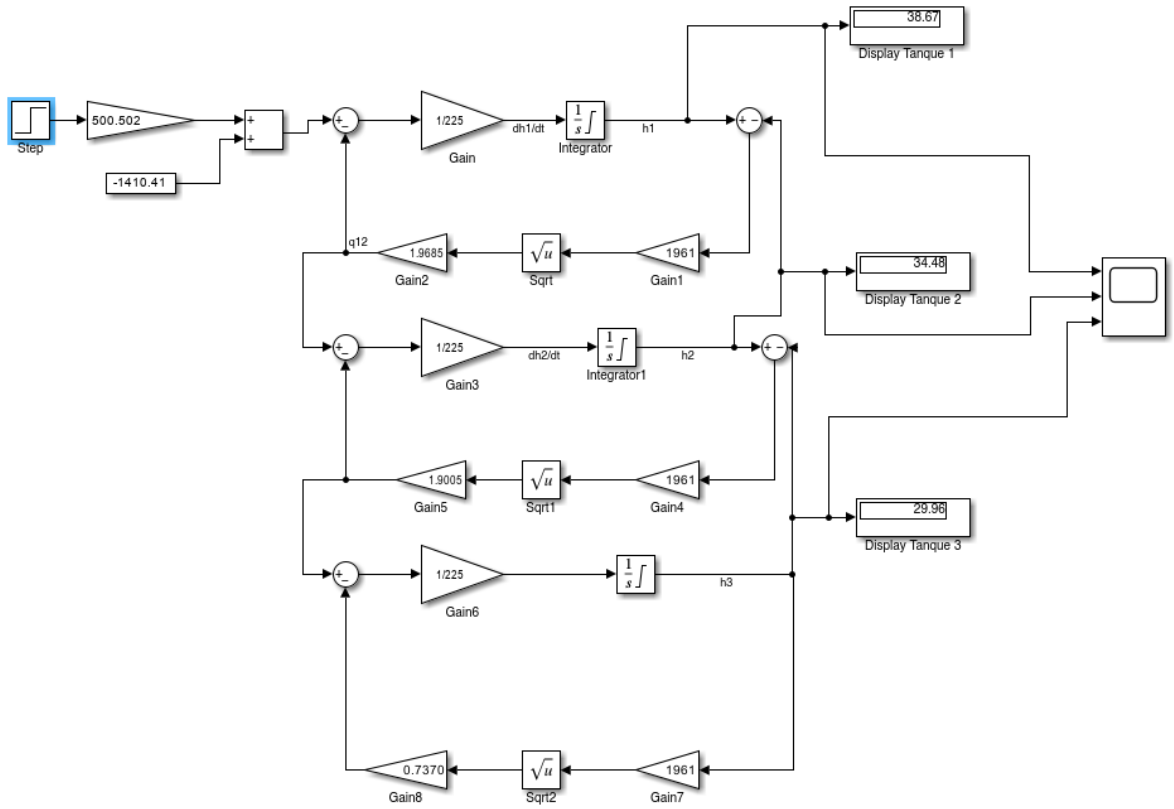

Figura 8 Diagrama de bloques del modelo de tres tanques en SIMULINK

Los puntos de operación que se calcularon a partir del sistema reflejan el equilibrio de las condiciones de alimentación Vvf = 3.175 V, y el nivel de líquido de los tres tanques se estabiliza en h1op = 38.6843 cm, h2op = 34.4826 cm y h3op = 29.9749 cm se muestran en la figura 10. Esta distribución de niveles muestra el comportamiento del sistema en cascada, en el que el siguiente tanque presenta un nivel ligeramente más bajo a causa de las pérdidas hidráulicas y el accionamiento de las válvulas en la interconexión. También, se muestra que el tiempo de estabilización del nivel es aproximadamente 1200 s de acuerdo con la Figura 9.

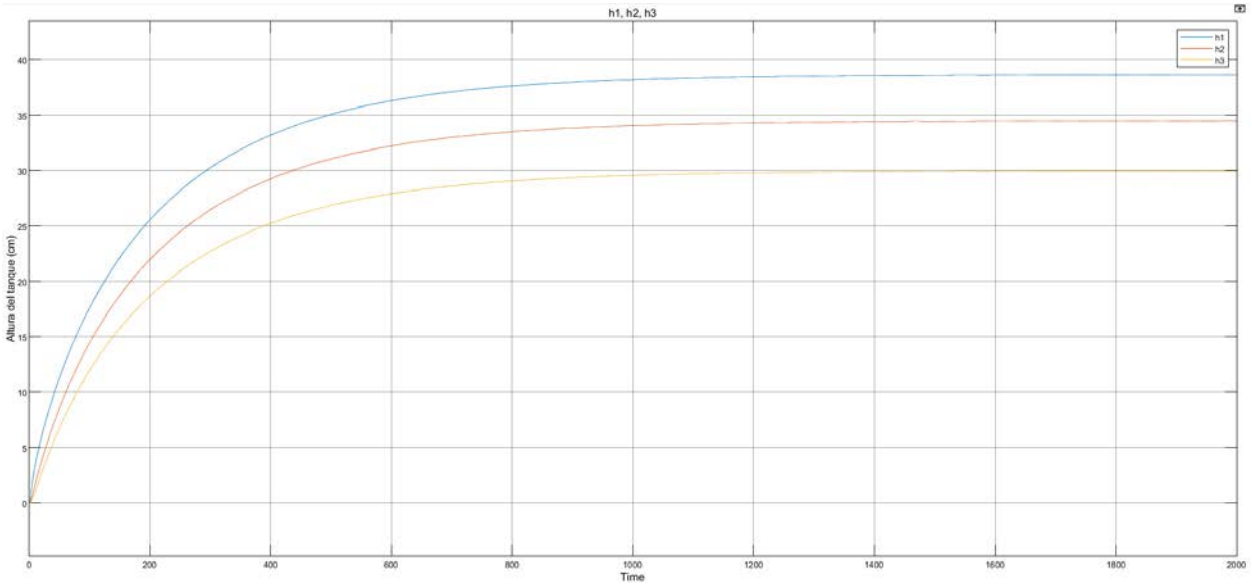

Figura 9 Punto de operación de los niveles de los tres tanques

2.2 Representación del sistema en variables de estado de la planta

A partir del sistema de ecuaciones linealizadas, se obtiene un sistema de ecuaciones donde las variables son las alturas y voltaje incrementales aplicado al variador de frecuencia.

$$\frac{dh_{1\delta}}{dt} = -0.0945h_{1\delta} + 0.0945h_{2\delta} + 2.2245V_{y\delta}[cm/s]$$

$$\frac{dh_{2\delta}}{dt} = 0.0945h_{1\delta} - 0.1835h_{2\delta} + 0.0890h_{3\delta}[cm/s]$$

$$\frac{dh_{3\delta}}{dt} = 0.0890h_{2\delta} - 0.1022h_{3\delta}[cm/s]$$

Luego, se definen los vectores y matrices de entrada y de estado en la ecuación 2.12.

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} h_{1\delta} \\ h_{2\delta} \\ h_{3\delta} \end{bmatrix} \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} V_{vf\delta} \end{bmatrix} \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} -0{,}0945 & 0{,}0945 & 0 \\ 0{,}0945 & -0{,}1835 & 0{,}0890 \\ 0 & 0{,}0890 & -0{,}1022 \end{bmatrix} \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 2{,}2245 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{2.12}$$

Además, para efectos de control la salida es el nivel del agua en el tanque 3, en consecuencia, se obtiene la ecuación 2.13.

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

2.3 Diseño del controlador PID

Para la obtención de la función de transferencia de la ecuación 2.14, se obtuvo la función de transferencia a partir de la representación en diagrama de estados.

$$G(s) = \frac{0.01852}{s^3 + 0.374s^2 + 0.02864s + 0.0001103} \tag{2.14}$$

Luego, se diseñó el controlador PI para la planta utilizando herramienta de SISOTOOL de MATLAB cuyo requerimiento es que el tiempo de estabilización (Tss) sea menor a 100s, y el sobrenivel porcentual sea menor al 5% como se observa en la Figura 10.

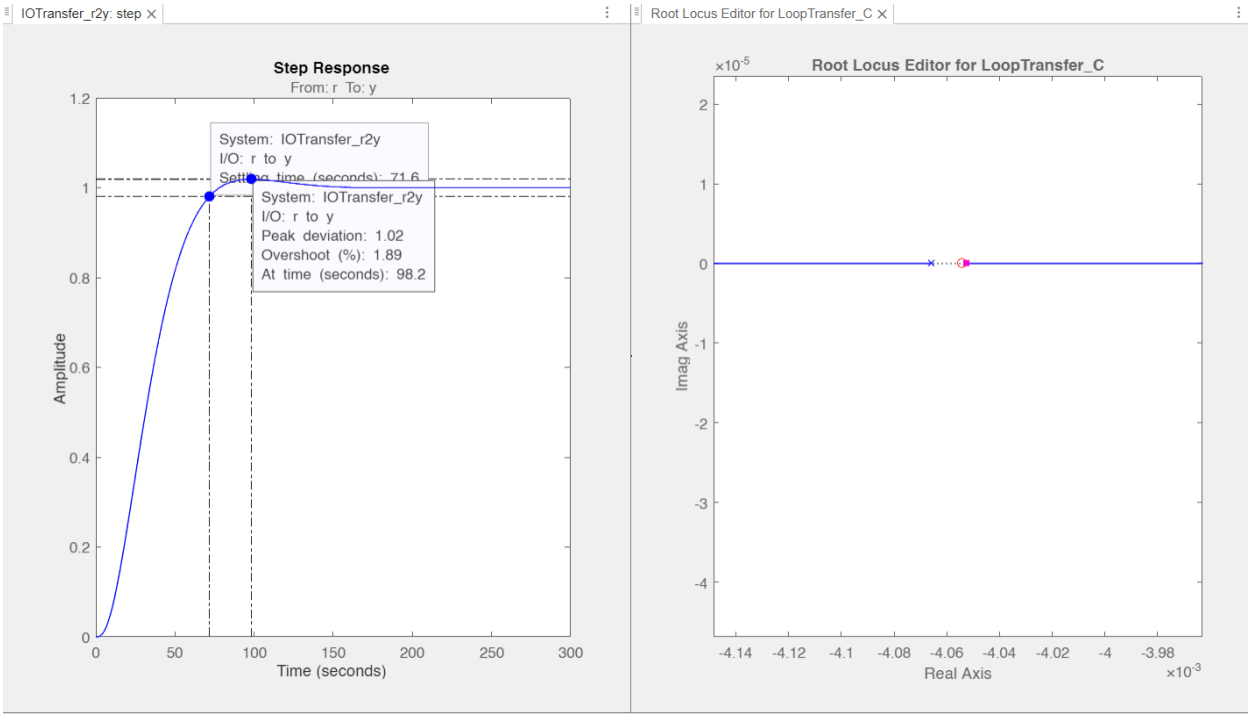

Figura 10 Respuesta del sistema a lazo abierto

Por método de prueba y error se ajusta los parámetros el cero del controlador PI que se muestra en la ecuación 2.15, con el fin que se cumpla los requerimientos antes mencionados.

$$C: \frac{0.044786(s + 0.004054)}{s} \; ; \; PI: K_p + \frac{Ki}{s} \tag{2.15}$$

Mientras que las constantes del controlador son Kp = 0.0448 Ki = 0.000182. Por consiguiente, se realiza el diagrama de bloque del sistema no lineal de la planta mostrado en la Figura 11.

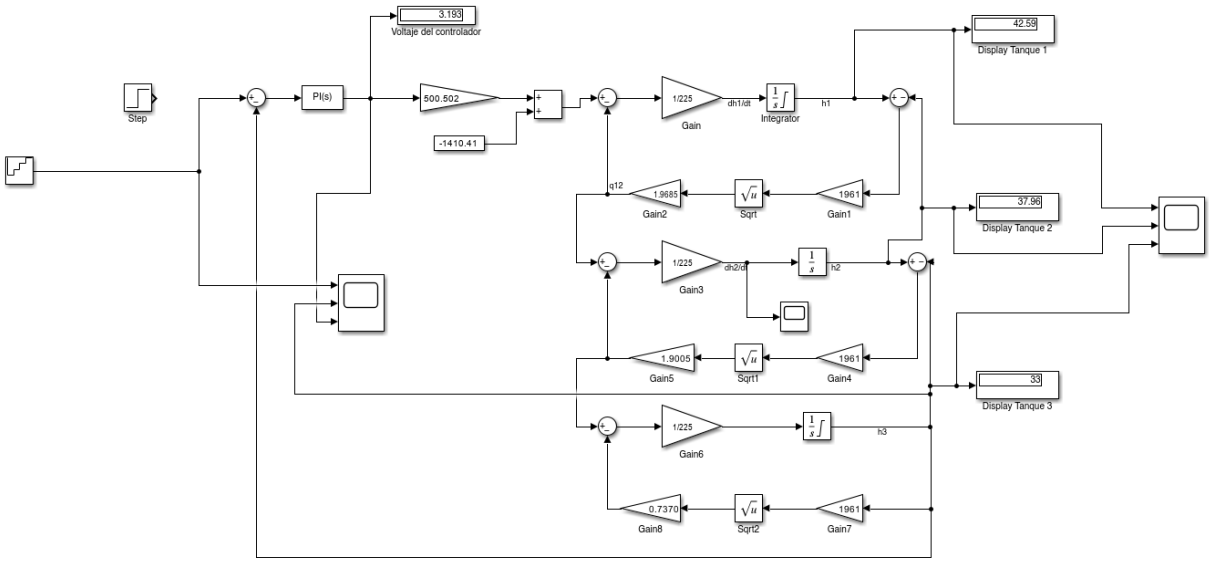

Figura 11 Diagrama de bloques del modelo de tres tanques en lazo cerrado.

El controlador PI presenta un desempeño aceptable en el control, estabilizándose alrededor de los 29.97 cm, y los cambios alrededor del punto de operación, como se observa en la Figura 12, se encuentran dentro del tiempo especificado y manteniendo el sobrenivel por debajo del 5% de acuerdo con las especificaciones del diseño. Por otra parte, la variable de control se encuentra en 3.19 V, por debajo.

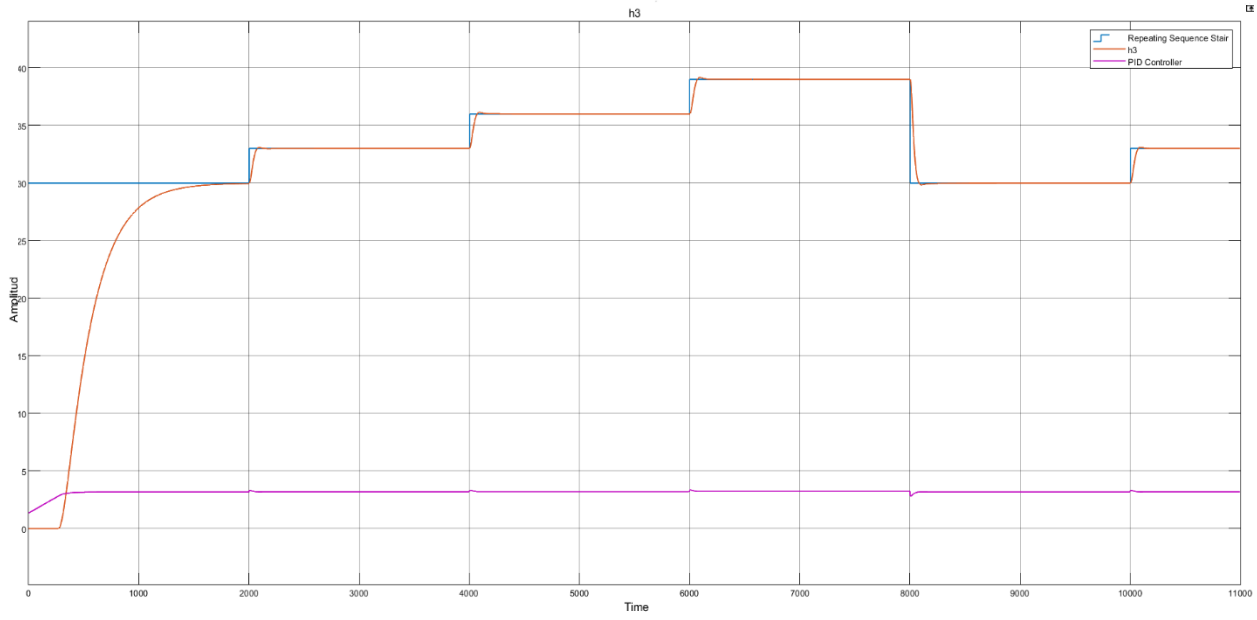

Figura 12 Respuesta de la altura h3 con cambios alrededor del punto de operación

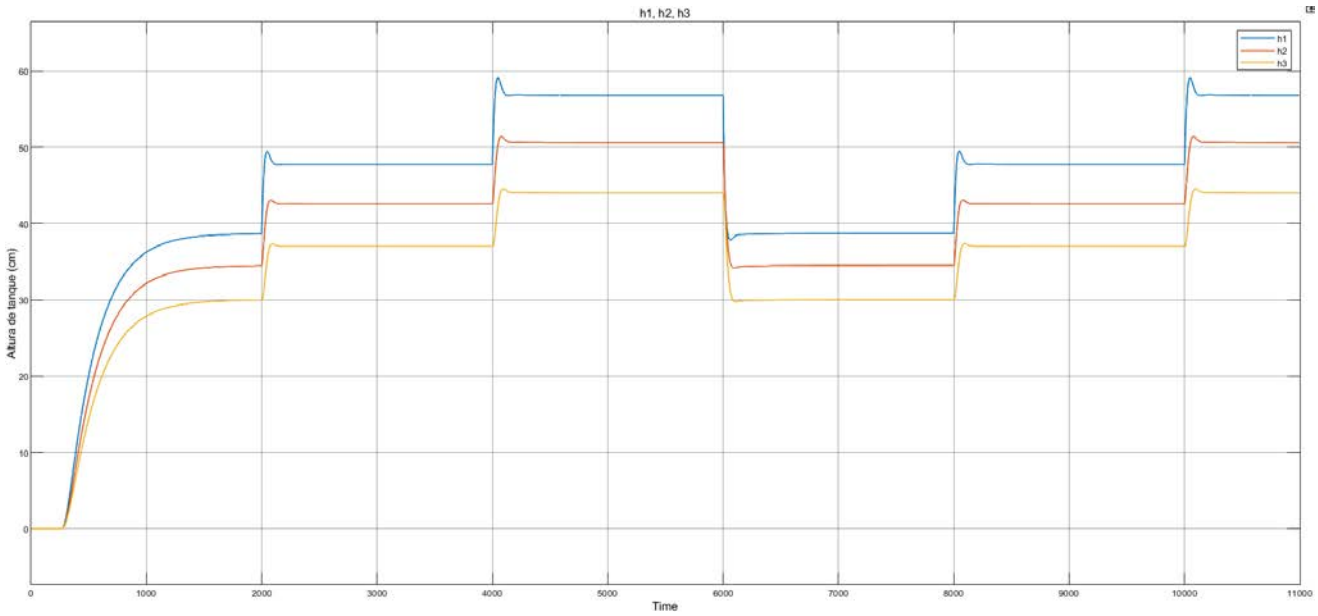

Figura 13 Respuesta de la altura h1, h2, y h3 con controlador PI en h3.

2.4 Inyección de ataques de retardos en el canal de comunicación

Para el diseño de los retardos, se realizó un subsistema donde los primeros 150 segundos no se aplica un retardo, y luego se incrementa por cada intervalo de muestreo una cierta cantidad de tiempo en el diagrama a lazo cerrado de la Figura 14.

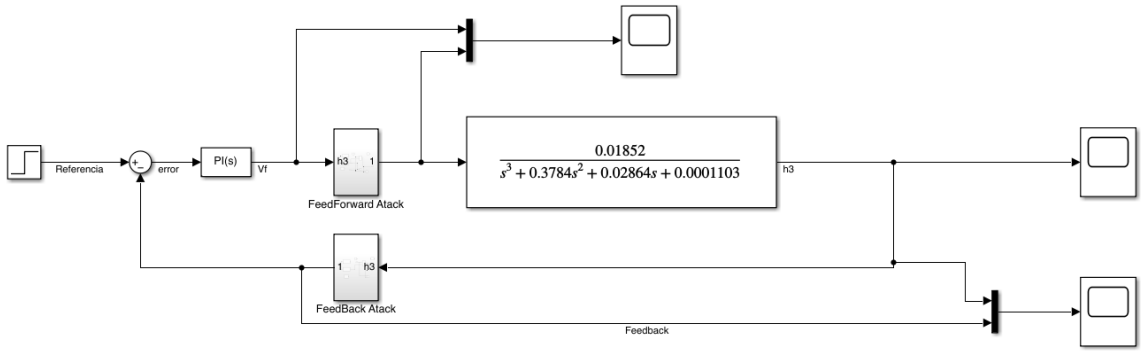

Figura 14 Diagrama de bloques de inyección de retardo.

A continuación, se muestra el subsistema en la Figura 15 y el código de Matlab en la Figura 16.

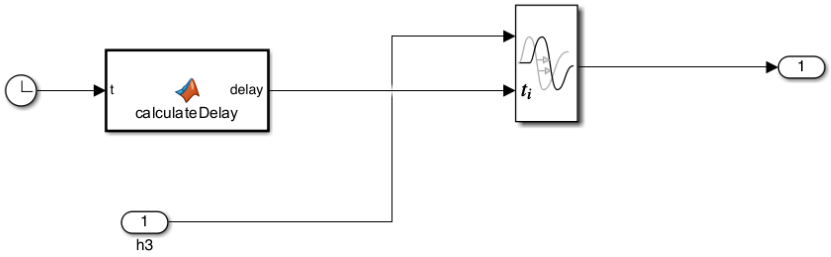

Figura 15 Subsistema de generación de retardo

```
function delay = calculateDelay(t)
    % Retardo mínimo (evita retardos de exactamente cero)
    min_delay = 0.001; % 10 ms como retardo mínimo

    % Durante los primeros 150 segundos, solo aplicamos el retardo mínimo
    if t <= 150
        delay = min_delay;
        return;
    end

    % Intervalo de muestreo
    sampling_interval = 10;

    % Incremento por cada intervalo de muestreo después de 150s
    increment_per_sample = 0.050; % Incremento de tiempo por periodo de muestreo

    % Calcula cuántos intervalos de muestreo han ocurrido desde t=150
    num_samples = floor((t - 150) / sampling_interval);

    % Calcula el retardo actual (escalonado cada 10 segundos)
    delay = min_delay + (num_samples * increment_per_sample);

    % Opcional: limitar el retardo máximo si es necesario
    max_delay = 5000; % Límite máximo opcional
    if delay > max_delay
        delay = max_delay;
    end
end
```

Figura 16 Código para la generación de retardo

2.5 Técnica de identificación de retardo en el canal de comunicación

La salida del canal de comunicación del FeedBack en la Figura 17. puede ser representada por $o^{MOD}(t) = \Phi[i(t)]$, es decir, $\boldsymbol{o^{OBS}(t) = o(t - \tau) \neq o(t).}$

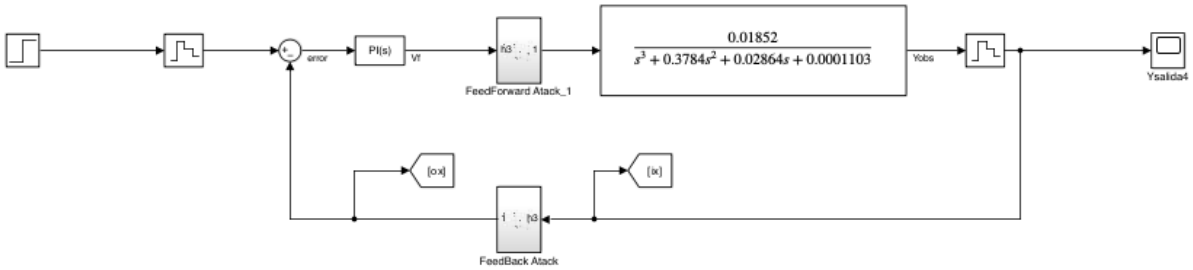

Figura 17 Diagrama de identificación de retardo en el canal de comunicación

La ecuación fue obtenida a través del método de mínimos cuadrados recursivos, el cual se basa en la minimización de la suma de los cuadrados de los errores, que son las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo.

Ahora, considerando el modelo construido a partir de la entrada del sistema i $(t,\ T_j)$ y la salida observada $o^{OBS}(t)$ se define la ecuación 2.11.

$$o^{MOD}(t,\ T_j)\ =\ \Phi[i(t,\ T_j)] \tag{2.11}$$

donde T_j, j = 1, 2, 3,… es uno de los varios retardos alternativos insertados en el canal de la variable de entrada i(t).

En la Figura 18 se muestra el diagrama de bloques del modelo RLSM utilizado para adaptar los parámetros del canal de comunicación en cada iteración.

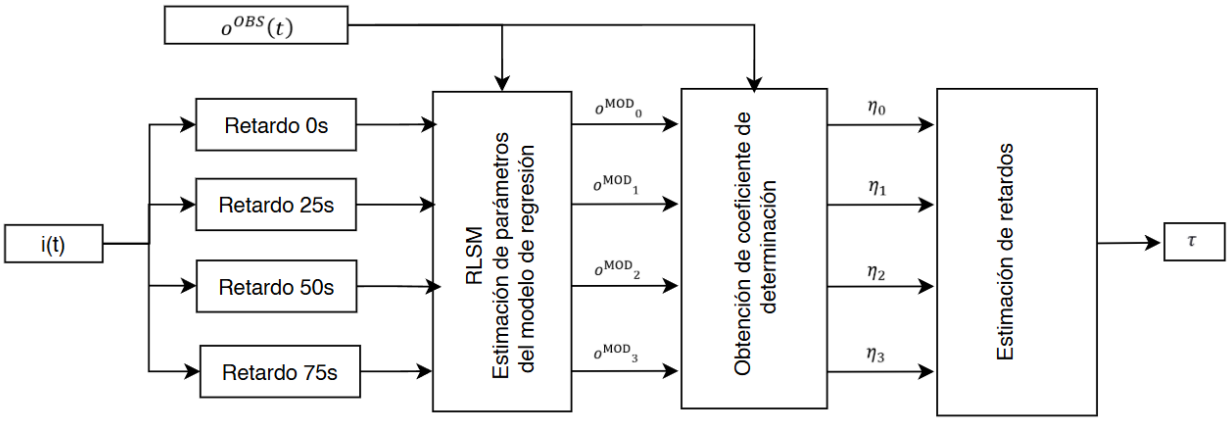

Figura 18 Diagrama de bloques del Modelo RLSM para el canal de comunicación

En primer lugar, se desarrolló un modelo sin retardo en forma de una función de transferencia de dominio Z como se muestra en la ecuación 2.12.

$$\frac{o^{OBS}(z)}{i(z)}\ =\ \frac{b_2z^{-1}\ +\ b_1z^{-2}\ +\ b_0z^{-3}}{1+a_2z^{-1}\ +\ a_1z^{-2}\ +\ a_0z^{-3}} \tag{2.12}$$

O en el dominio del tiempo discreto en la ecuación 2.13.

$$i(t)=\begin{bmatrix}i_1(t)\\ i_2(t)\\ i_3(t)\\ i_4(t)\\ i_5(t)\\ i_6(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}o^{OBS}[(k-1)]\Delta\\ o^{OBS}[(k-2)]\Delta\\ o^{OBS}[(k-3)]\Delta\\ i(k-1)\Delta\\ i(k-2)\Delta\\ i(k-3)\Delta\end{bmatrix},\ O^{OBS}(t), y\ A=\begin{bmatrix}a_2\\ a_1\\ a_0\\ b_2\\ b_1\\ b_0\end{bmatrix} \tag{2.13}$$

k = 1, 2, 3, … es el índice de tiempo discreto.

Δ = es el tiempo de muestreo.

$$o^{OBS}(k)\ =\ -a_2\ *o^{OBS}(k\ -\ 1)\ -a_1\ *o^{OBS}(k\ -\ 2)\ -\ a_0\ *o^{OBS}(k\ -\ 3)\ +\ b_2\ *i(k\ -\ 1)\ +\ b_1\ *i(k\ -\ 2)+\ b_0\ *i(k\ -\ 3) \tag{2.14}$$

Se ha establecido que el tercer orden del modelo es suficiente para la descripción precisa del canal dinámico en cuestión. Aumentos adicionales en el orden del modelo prácticamente no incrementan el valor del coeficiente de determinación. Se puede observar que la versión de tiempo discreto del modelo es una ecuación de regresión, con variables de entrada i, variables de salida o, parámetros A y ∆= 25s, definidos en la ecuación 2.13. Cabe mencionar que, al finalizar la tarea de estimación de parámetros para el modelo sin retardo, el procedimiento ejecuta el RLSM para la estimación de los parámetros de los 4 modelos siguiente que incluyen diversas magnitudes de retardo, y los parámetros del modelo sin retardo se utilizan como valores iniciales.

$$i(t) = \begin{bmatrix} i_1(t) \\ i_2(t) \\ i_3(t) \\ i_4(t) \\ i_5(t) \\ i_6(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} o^{OBS}[(k-1)]\Delta \\ o^{OBS}[(k-2)]\Delta \\ o^{OBS}[(k-3)]\Delta \\ i(k-1)\Delta - T_j \\ i(k-2)\Delta - T_j \\ i(k-3)\Delta - T_j \end{bmatrix}, y \;\; O^{OBS}(t)$$

Entonces, se aplica el modelo RLSM como se muestra en la Figura 19 para el canal de comunicación sin retardo para encontrar los parámetros iniciales de A.

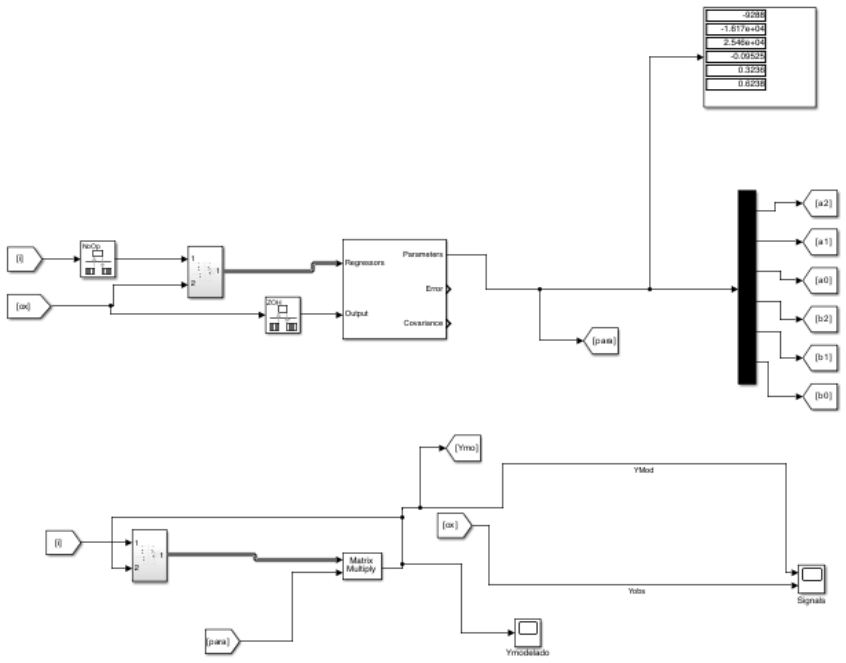

Figura 19 Modelo RLSM del canal de comunicación sin retardo

Además, se utiliza las siguientes ecuaciones para calcular el coeficiente de determinación (η), y para que el modelo RLSM sea aceptado debe estar entre un valor mayor a 0.85 de acuerdo con la revisión de literatura en [10] como se observa en la Figura 20, y se obtiene las ecuaciones 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18.

$$M_Y(k) = M_Y(k-1) + \frac{1}{k}[y(k) - M_Y(k-1)] \tag{2.15}$$

$$\sigma_Y^2(k) = \sigma_Y^2(k-1) + \frac{1}{k}\left([y(k) - M_Y(k)]^2 - \sigma_Y^2(k-1)\right) \tag{2.16}$$

$$\sigma_{MOD}^2(k) = \sigma_{MOD}^2(k-1) + \frac{1}{k}\left([y(k) - x(k)^T A_k]^2 - \sigma_{MOD}^2(k-1)\right) \tag{2.17}$$

$$\eta(k) = \frac{\sigma_Y^2(k) - \sigma_{MOD}^2(k)}{\sigma_Y^2(k)}, \quad k = 1,2,3,\ldots \tag{2.18}$$

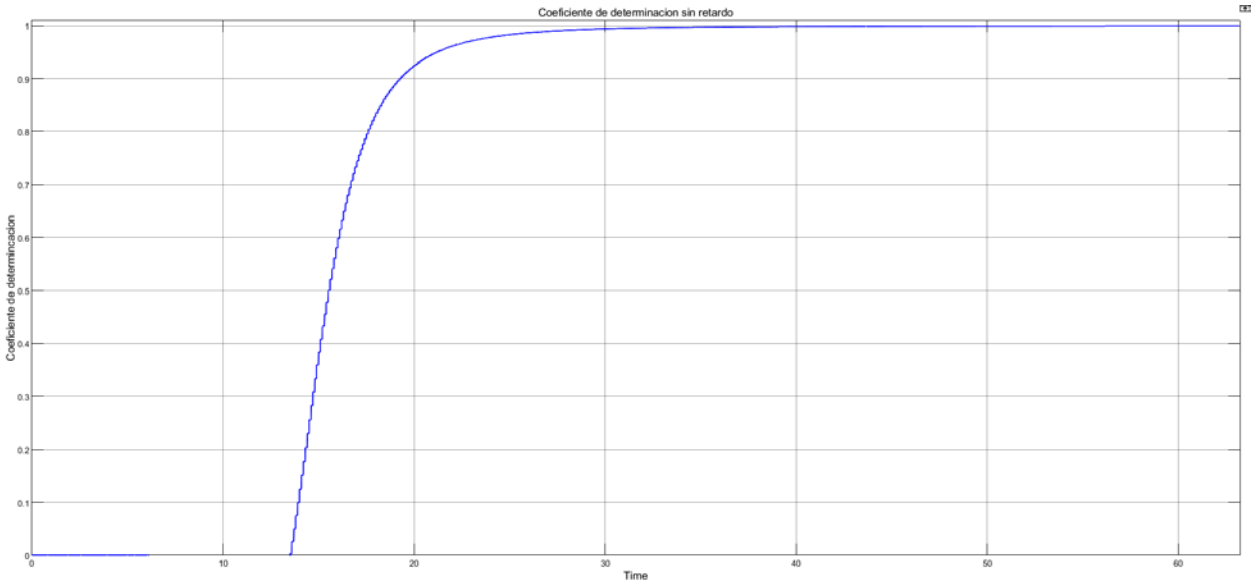

Figura 20 Coeficiente de determinación del modelo RLSM del canal de comunicación sin retardo

Entonces, se obtuvo los siguientes parámetros iniciales para los siguientes modelos RLSM.

$$A = \begin{bmatrix} 0.811 \\ 0.1859 \\ -0.09492 \\ 0.1839 \\ -0.07801 \\ -0.007843 \end{bmatrix}$$

Para encontrar finalmente el retardo, se escoge la señal con el menor error relativo y el mayor coeficiente de determinación entre los modelos como se muestra en la figura 21.

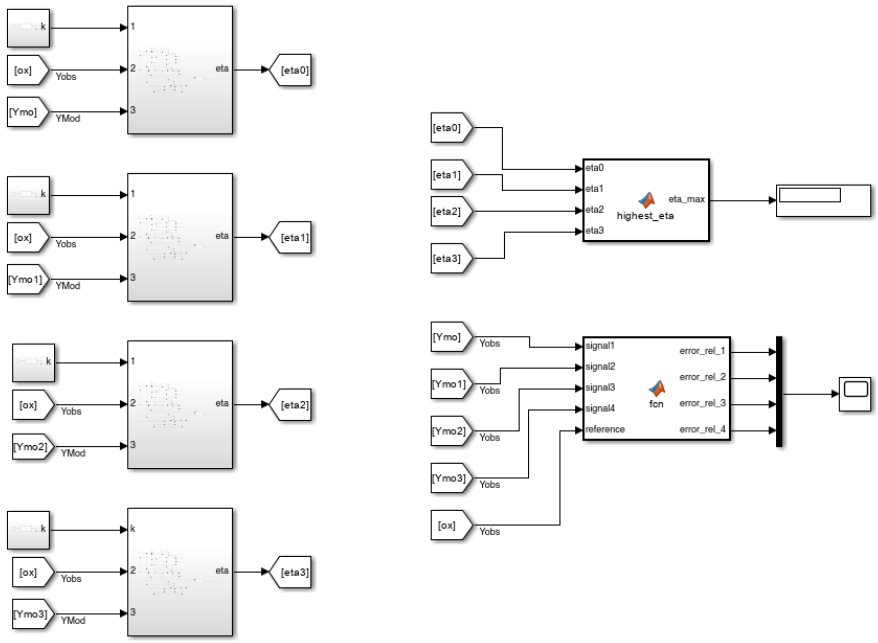

Figura 21 Diagrama de bloques para la selección de la señal modelada Y

Para realizar la correlación entrecruzada entre la salida modelada y la salida observada, se tiene la ecuación 2.19.

$$r_{xy}(n) = \frac{1}{(N-n)\cdot S_y S_x}\sum_{k=1}^{N-n}[x(i)-M_x]\cdot\left[y(i+n)-M_y\right], n = 0,1,2,\dots,n^*; n < N \quad (2.19)$$

x(i) e y(i) son valores en tiempo discreto.

$M_x,\ M_y,\ S_y\ y\ S_x$ son los valores medios estimados y las desviaciones estándar de los procesos aleatorios x(t) y y(t).

Δt es el tiempo de muestreo

Para determinar el retardo máximo utilizando la correlación Ncorr, se sigue el siguiente procedimiento:

- Calcular la función de correlación: Se utiliza la función de correlación para evaluar la similitud entre las señales x(t) y y(t) a diferentes retrasos.
- Identificar el pico de la correlación: El pico de la función de correlación indica el retardo en el que las señales son más similares. Este pico se puede encontrar al calcular:
    - $\tau estimado = \tau \text{argmax}(Corr(\tau))$

- Interpretar el resultado: El valor de τ en el pico de la correlación representa el retardo máximo entre las señales x(t), y(t), lo que indica el tiempo que tarda el estímulo en afectar la respuesta.

2.6 Diseño de PID adaptativo

Para la adaptación de ganancias del PID, se estima el retardo identificado y los parámetros del controlador como se muestra en la Figura 22. En donde, la ganancia proporcional Kp disminuye conforme aumenta el retardo, mientras que la ganancia integral Ki decrece más rápidamente ante incrementos del retardo. La ganancia derivativa Kd será cero porque potencialmente es problemática cuando los retardos son prolongados.

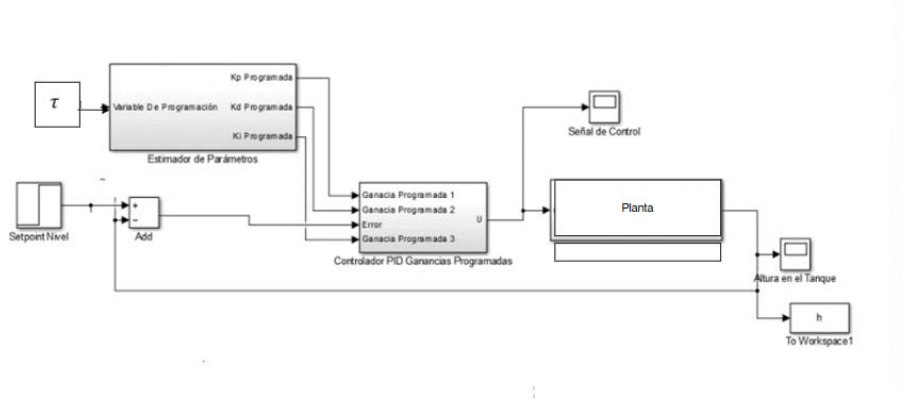

Figura 22 Esquema de bloques del PID con ganancias programadas

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Simulación del control PID en condiciones normales

Para comprobar el control PI, se realiza la simulación con la función de transferencia de la planta como se muestra en la Figura 23.

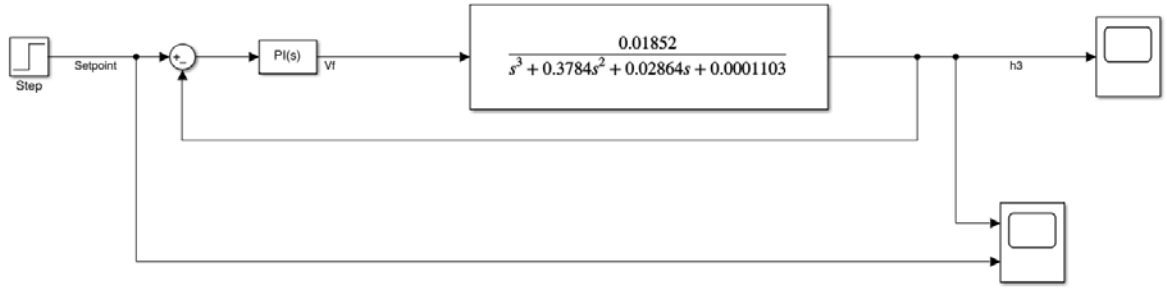

Figura 23 Función de transferencia a lazo cerrado en SIMULINK

En Figura 24, se observa que el sistema se encuentra dentro de la banda del 2% a los 99 segundos de la simulación. Además, no tiene un sobrenivel porcentual mayor del 2%.

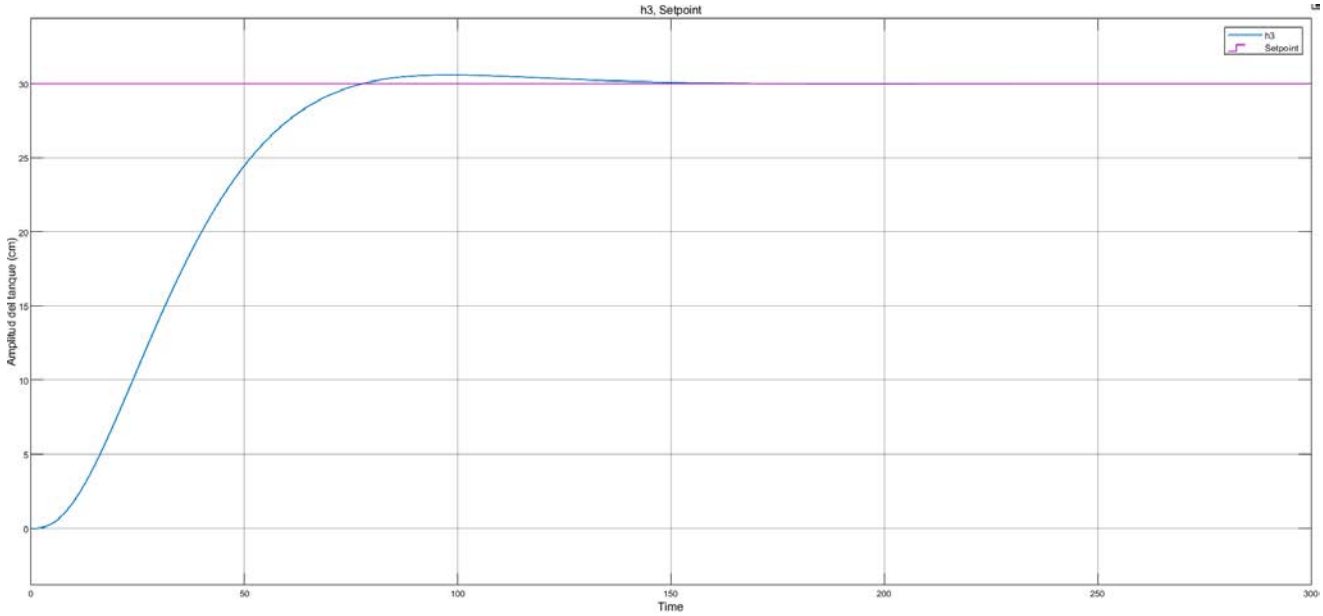

Figura 24 Respuesta del sistema ante una entrada escalón

Además, se realiza las pruebas del controlador en la planta no lineal con cambios alrededor del punto de operación.

3.2 Simulación del comportamiento del sistema con retardo en el feedback y FeedForward

Se observó que tanto en el canal de retroalimentación como en el de alimentación anticipativa, la presencia de retardos vuelve inestable el comportamiento del sistema.

El desfase temporal obligaba al controlador a tomar decisiones basadas en estados pasados del sistema, no en su condición presente. La consecuencia era una señal de control que resultaba inapropiada para la situación actual del sistema como se observa en la Figura 25.

De manera similar, el retardo en el canal feedforward compromete la capacidad anticipativa que constituye la ventaja principal del PID. La señal de alimentación anticipativa llegaba demasiado tarde para contrarrestar efectivamente las perturbaciones, convirtiendo este mecanismo preventivo en uno reactivo pero desfasado.

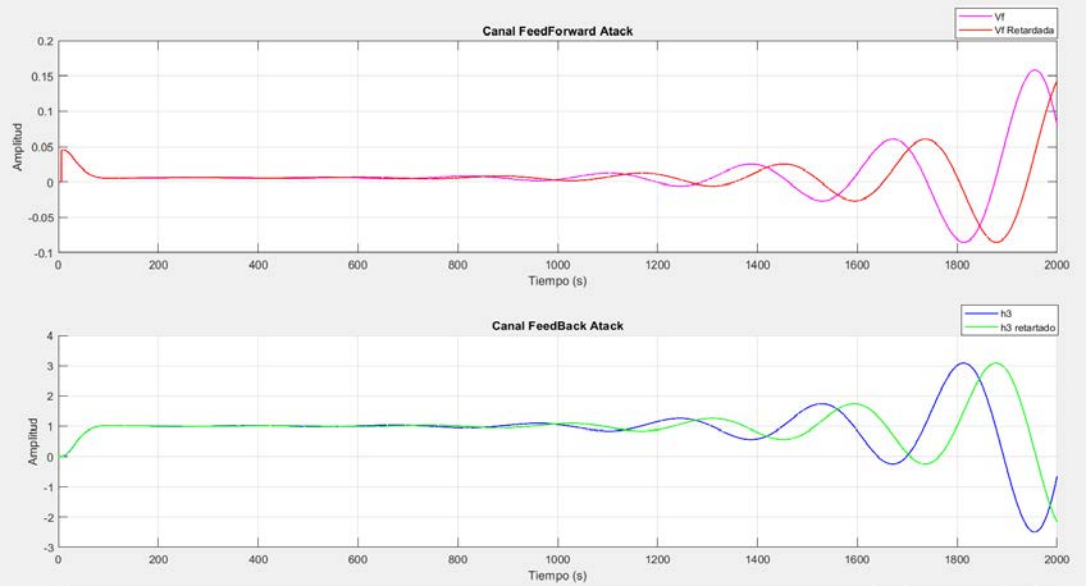

Figura 25 Respuesta del sistema con inyección de retardo

3.3 Estimación de retardo

Para evaluar los modelos, se realizó la simulación de la inyección de retardo con un $\tau = 67s$ y se procedió a obtener el error relativo promedio de las salidas modeladas. Entonces, como resultado se obtiene que el primer modelo c presenta un error de un 0.19% indicando que se acerca a la señal de referencia O^{OBS}. Mientras tanto, el segundo modelo $O^{MOD}{}_{(1)}$ presenta un error de un 1.12%, lo que significa que sigue la tendencia general de la señal O^{OBS}, aunque presenta un error mayor comparada con el primer modelo. Por último, se observa que el error del tercer modelo es alto, con una magnitud

del orden de 10^{37} % porque el modelo tiene una amplitud del orden de 10^{37} en t=291 s, y consecuentemente hace que el modelo no es una buena aproximación a la señal O^{OBS} por tener un error relativo alto como se observa en la Figura 26.

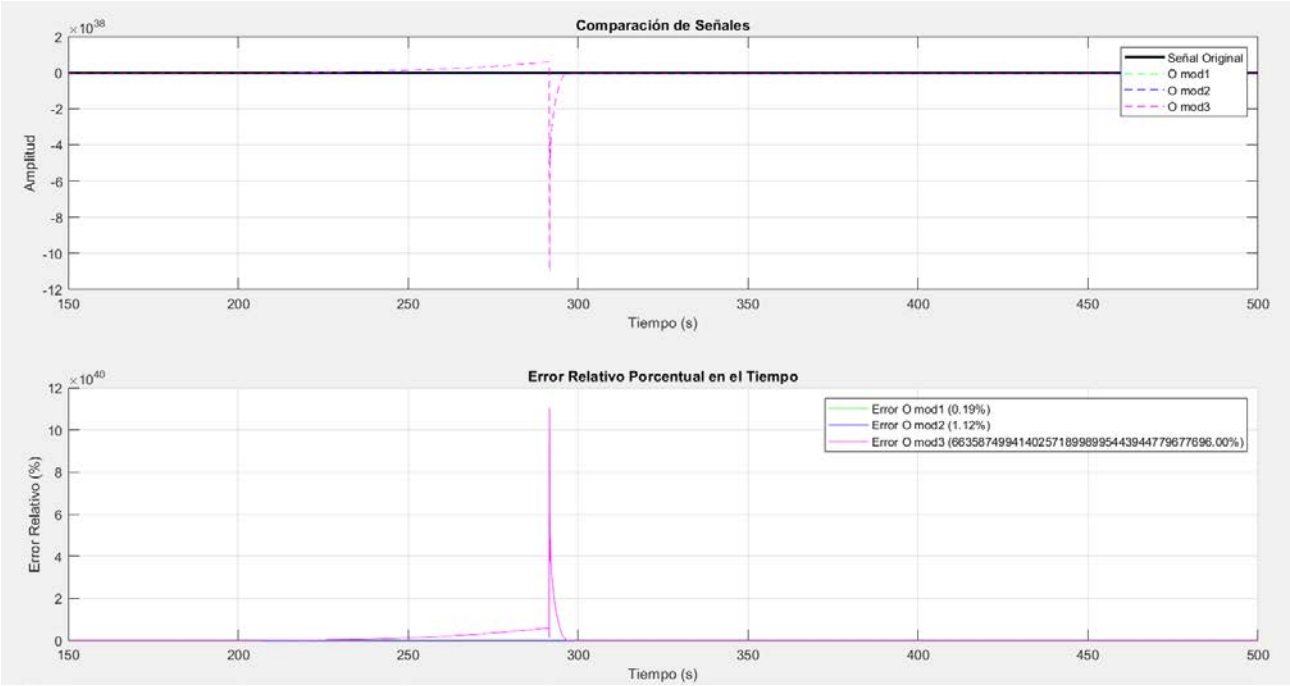

Figura 26 Error relativo porcentual de salidas modeladas

A continuación, se muestra en la tabla 2 los errores de las señales modeladas donde el menor error esta dado por la señal $O^{MOD}{}_{(1)}$.

Tabla 2 Errores relativos promedio de señales modeladas.

Errores	Formula	t = 149s	t = 500s	Promedio
$e_1\ O^{MOD}{}_{(1)}$	$\left\|\frac{O^{MOD}{}_{(1)} - O^{OBS}}{O^{OBS}}\right\|$	10^{-2}	0.2306 %	0.19%
$e_2\ O^{MOD}{}_{(2)}$	$\left\|\frac{O^{MOD}{}_{(2)} - O^{OBS}}{O^{OBS}}\right\|$	10^{-2}	0.3651%	1.12%
$e_3\ O^{MOD}{}_{(3)}$	$\left\|\frac{O^{MOD}{}_{(3)} - O^{OBS}}{O^{OBS}}\right\|$	10^{-2}	0.591 %	10^{37} %

También, se analiza el coeficiente de determinación de las señales modeladas en la Figura 27, ya que es una medida estadística entre 0 y 1, cuyo valor próximo a 1 indica que el modelo representa la variabilidad de los datos tal como se observa de $O^{MOD}{}_{(1)}$, mientras que un valor próximo a 0 refleja la incapacidad del modelo para capturar la relación entre las variables como es el caso de $O^{MOD}{}_{(3)}$.

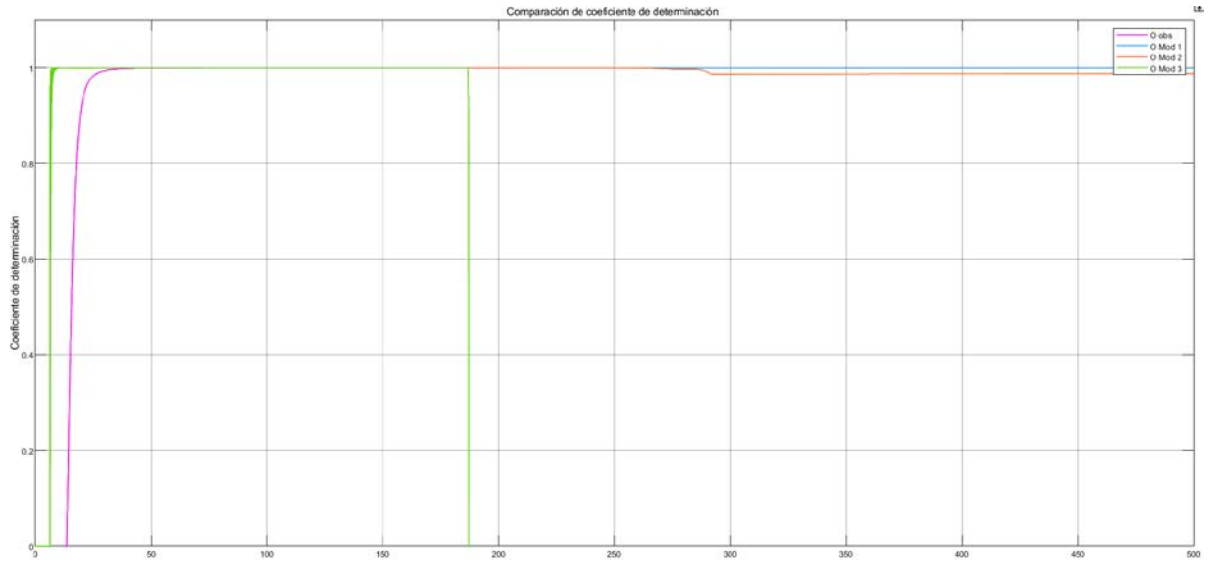

Figura 27 Comparación de coeficiente de determinación.

A través del análisis de la correlación cruzada del modelo $O^{MOD}{}_{(1)}$ basado en los criterios establecidos con anterioridad, se ha obtenido experimentalmente en la Figura 28. el τ estimado=47.4 segundos, mientras que el valor de inyección de retardo de $\tau = 67s$. La diferencia 19.6 segundos, es decir un 29.25 % diferencia con respecto al valor teórico, indica que hay situaciones en el sistema de estimación que no es considerada en el modelo original. No obstante, los resultados del análisis muestran un valor de correlación máxima 21329.55 que expresa que la relación de la señal O^{OBS} es alta, observándose 3501 puntos significativos con retardos que oscilan desde el 0 hasta los 350 segundos. La elección del punto de máxima correlación en el tiempo de retardo tiene como soporte el análisis estadístico de los datos que muestra que es el valor de retardo que da el valor máximo de la similitud entre la señal observada y modelada.

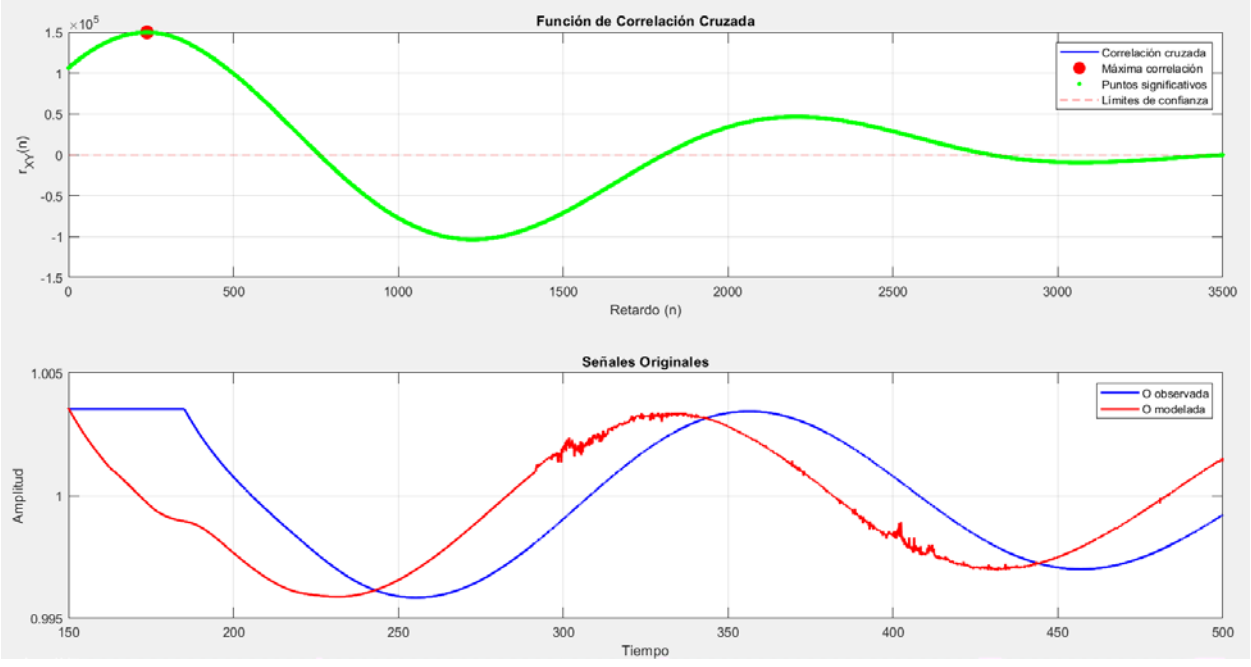

Figura 28 Correlación cruzada entre señal observada y modelada.

Resultados del análisis de correlación cruzada:

- Punto de correlación máxima (nMAX): 474
- Tiempo de retardo máximo (tMAX): 47.4000
- Valor de correlación máxima: 21329.5546
- Número de puntos estadísticamente significativos: 3501
- Rango de retardos significativos: 0 a 3500
- Rango de tiempos de retardo significativos: 0.0000 a 350.0000

Adicionalmente, se realizó otra simulación con una inyección de retardo $\tau = 35s$ y se obtuvo experimentalmente el τ estimado=23.8 segundos. La diferencia de 11.2 segundos (error relativo del 32%) nos lleva a pensar que el método es más bien subestimador del retardo real. Como bien podemos apreciar, el hecho de que el valor de correlación máxima sea alto (149866.41) indica que las dos señales tienen una relación bastante fuerte, pero, por otro lado, la diferencia de retardo sugiere que el modelo de la salida observada no ha sido capaz de recoger como se muestra en la Figura 29.

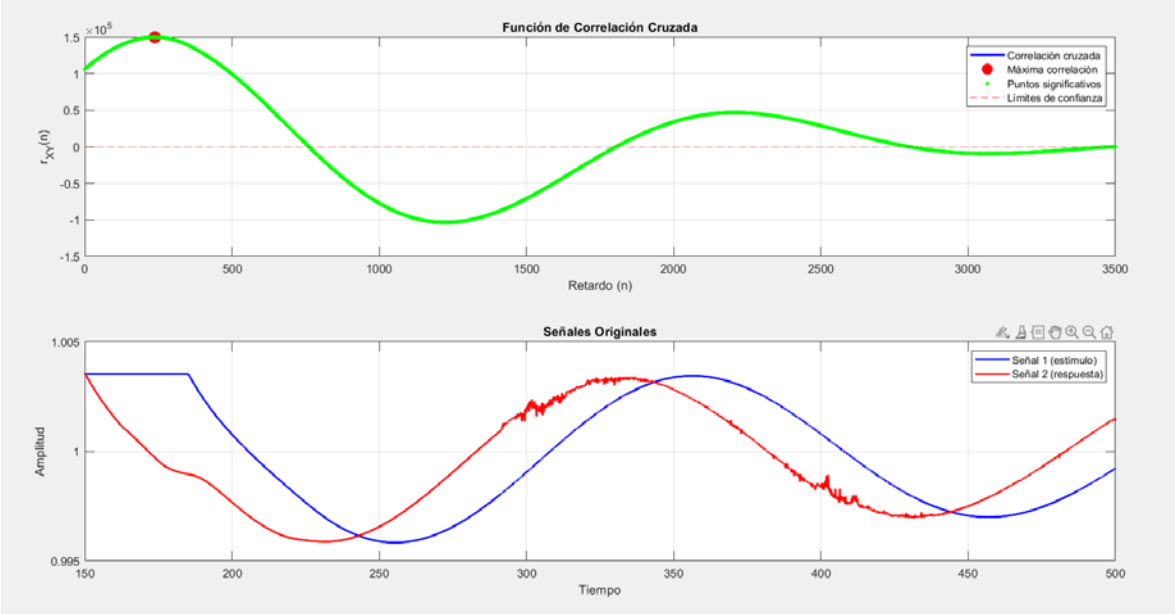

Figura 29 Estimación de retardo a través de correlación cruzada

Resultados del análisis de correlación cruzada:

- Punto de correlación máxima (nMAX): 238
- Tiempo de retardo máximo (tMAX): 23.8000
- Valor de correlación máxima: 149866.4086
- Número de puntos estadísticamente significativos: 3501
- Rango de retardos significativos: 0 a 3500
- Rango de tiempos de retardo significativos: 0.0000 a 350.0000

3.4 Controlador PI con ganancias programadas

Para el diseño del controlador, se ha partido de la planta con los retardos estimados utilizando la aproximación de Padé de tercer orden. Cabe mencionar que la aproximación permite transformar el retardo a un modelo con función de transferencia que puede ser analizado en Matlab como se muestra en las ecuaciones 3.1 y 3.2.

$$H_1(s) = \frac{-s^3 + 0.504s^2 - 0.1059s + 0.008901}{s^3 + 0.504s^2 + 0.1059s + 0.008901} \tag{3.1}$$

$$H_2(s) = \frac{-s^3 + 0.2532s^2 - 0.02671s + 0.001127}{s^3 + 0.2532s^2 + 0.02671s + 0.001127} \tag{3.2}$$

Luego, se ha utilizado la herramienta de sisotool para obtener las ganancias de los controladores con las ecuaciones 2.14, 3.1, 3.2, consideraron como diseño un sobrenivel máximo del 5% en la respuesta al escalón, y un tiempo de establecimiento de 100 segundos con el objetivo de garantizar una velocidad de respuesta adecuada al proceso. El diseño se ha optimizado de forma iterativa, por método de prueba y error, en sisotool hasta cumplir con los criterios mencionados como se observa en la Figura 30.

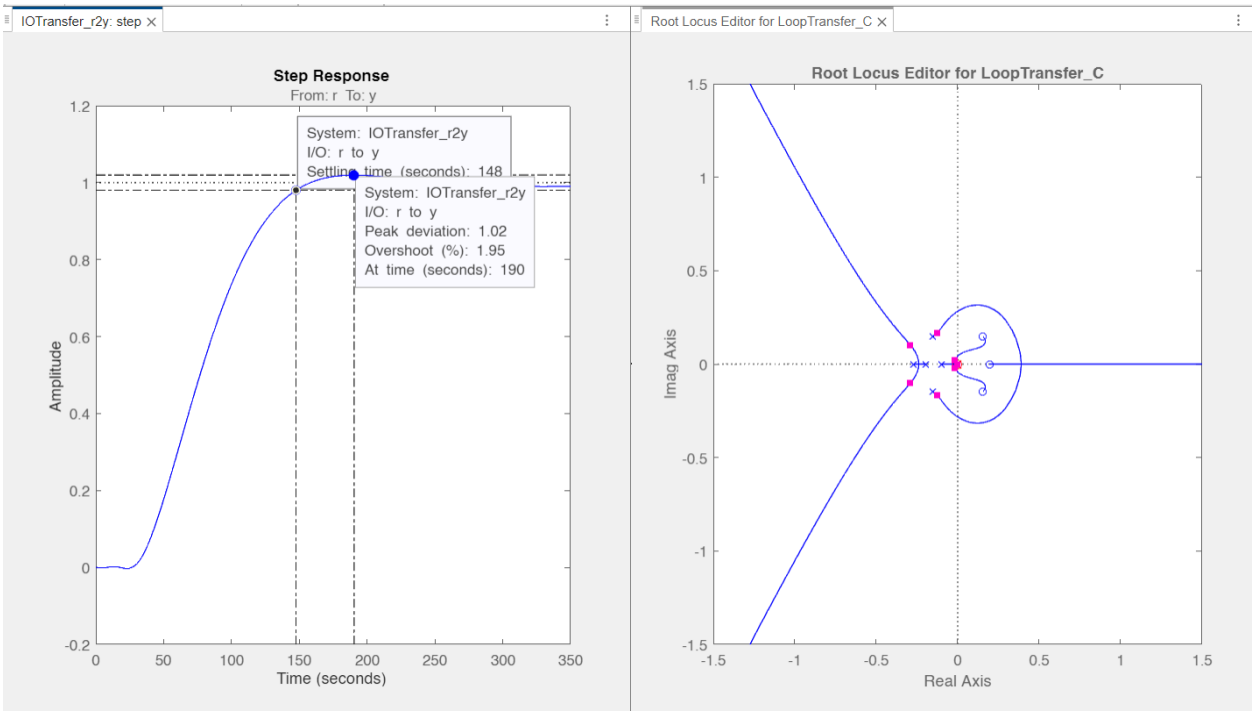

Figura 30 Respuesta del sistema con retardo 23.8s con controlador PI

Las constantes del controlador son Kp = 0.019 Ki = 0.0000723 de acuerdo con el controlador obtenido de la herramienta como se muestra en la Figura 31.

$$C: \frac{0.019023(s + 0.0038)}{s} \quad ; \quad PI: K_p + \frac{Ki}{s} \tag{3.3}$$

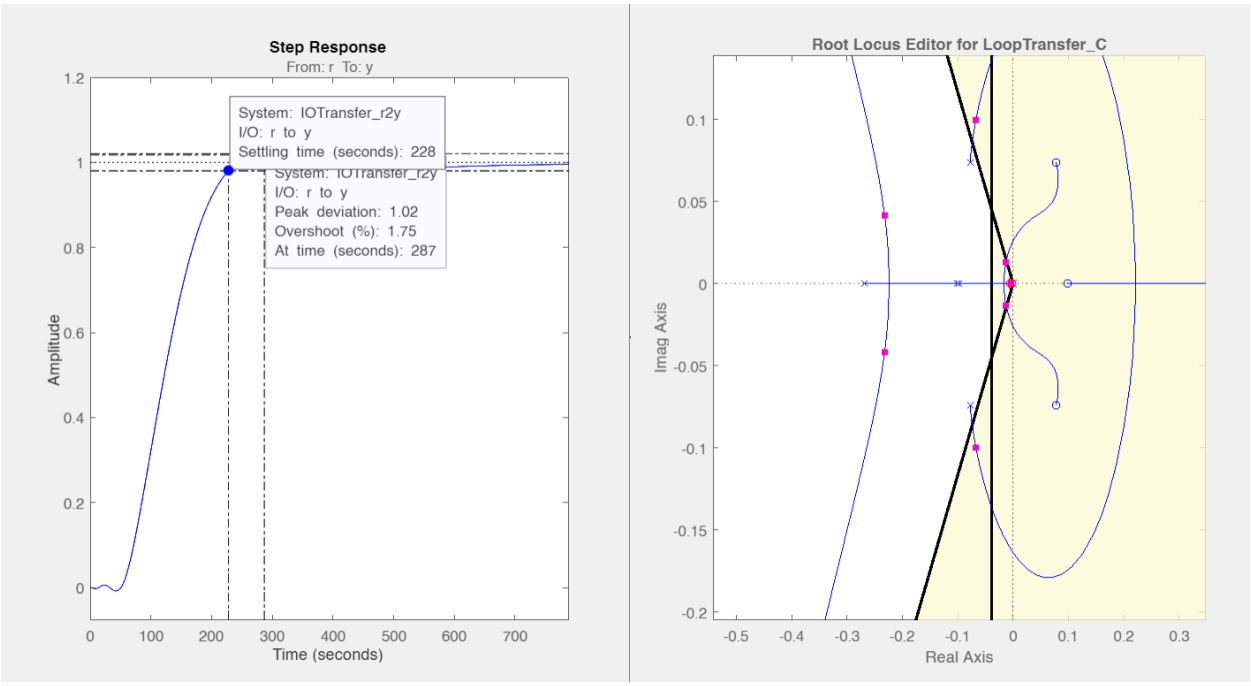

Figura 31 Respuesta del sistema con retardo 47.4s con controlador PI

Mientras que las constantes del controlador son Kp = 0.0122 Ki = 0.0000451 de acuerdo con el controlador obtenido de la herramienta.

$$C: \frac{0.012195(s + 0.0037)}{s} \quad ; \quad PI: K_p + \frac{Ki}{s} \tag{3.4}$$

Las gráficas de respuesta al escalón demuestran que ambos diseños obtienen una respuesta satisfactoria a las especificaciones de diseño solicitadas. El sistema controlado presenta un sobrenivel menor del 1.95% para el primer caso, y del 1.75% para el segundo, ambas respuestas por debajo del límite en el 5% del designado. El subsistema de ganancias programadas que se muestra en la Figura 32. permite un control adaptativo que está estructurada sobre tres rangos, los cuales están definidos por el retardo del sistema: 0 s, 23.8 s y 47.4 s como se muestra en la tabla 3.

Tabla 3 Parámetros de las ganancias programadas.

Retardo (s)	Kp	Ki	Ts (s)	SobreNivel (%)
0.0	0.0448	1.82e-4	100	0.1
23.8	0.019	7.23e-5	190	1.95
47.4	0.0122	4.51e-5	228	1.75

A través de una lógica de comparadores, el sistema puede determinar automáticamente el retardo presente y seleccionar las ganancias que le corresponde, lo que les proporciona una adaptación a las estimaciones de retardo del caso de estudio. Se puede observar una relación inversamente proporcional entre el retardo y las ganancias del controlador, ya que a mayor retardo le corresponden ganancias cada vez menores para asegurar la estabilidad del sistema.

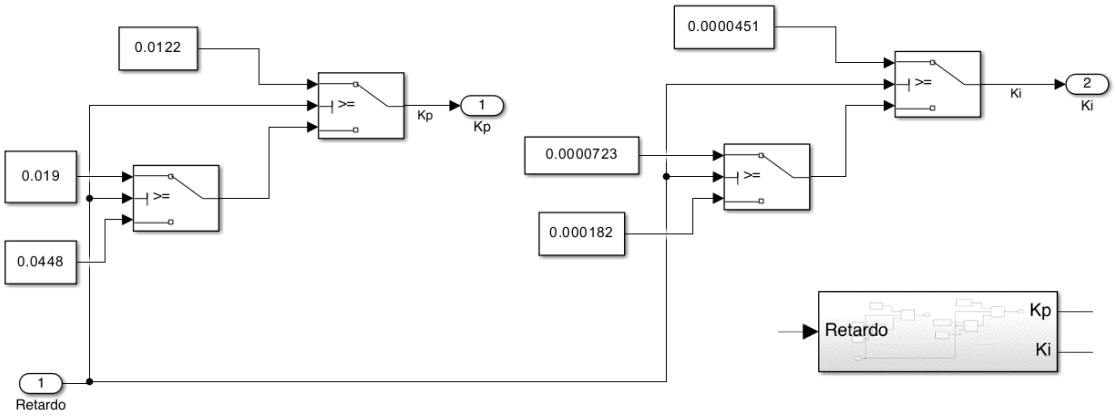

Figura 32 Subsistema de ganancia programada de PI

Mientras que con un retardo de 0 s el Ts que se obtiene es de 100 s, con un retardo de 47.4 s el Ts se incrementa a 228 s, lo cual representa una disminución del 128% en velocidad. Por último, el diagrama de bloques de la Figura 33 representa la estructura completa del controlador adaptativo PI para la planta del sistema.

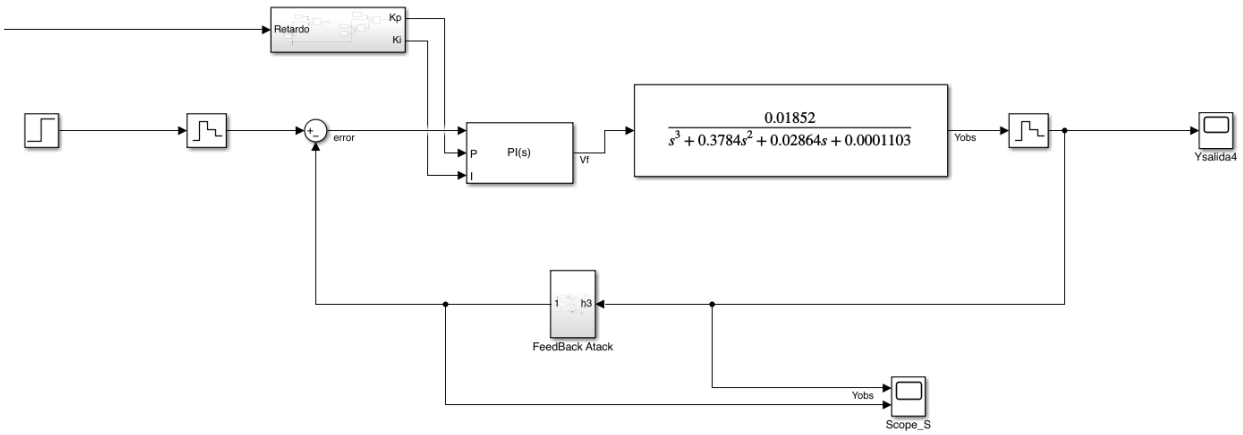

Figura 33 Diagrama de bloques del control adaptativo PI

Como se observa en la Figura 34, se demuestra cómo el sistema mantiene su estabilidad ante condiciones de retardo, manteniendo la estabilidad incluso bajo condiciones de retardo, una vez que entra en acción de la ganancia programada en los 500 segundos.

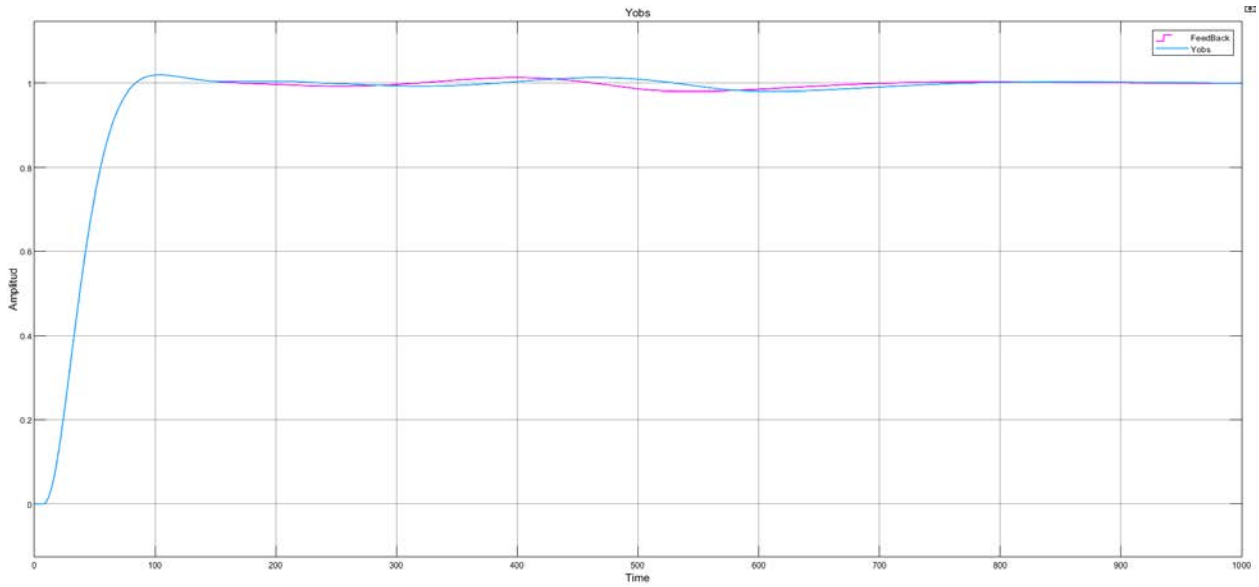

Figura 34 Respuesta del sistema con ganancia programada accionada t=500s

La respuesta del sistema a los diferentes cambios de ganancias del PI señalados en t=500s y t=1000s demuestra un buen desempeño del controlador PI sintonizado. El tiempo de establecimiento es del orden de t=200s, pero el sistema logra converger en ambos casos como se observa en la Figura 35.

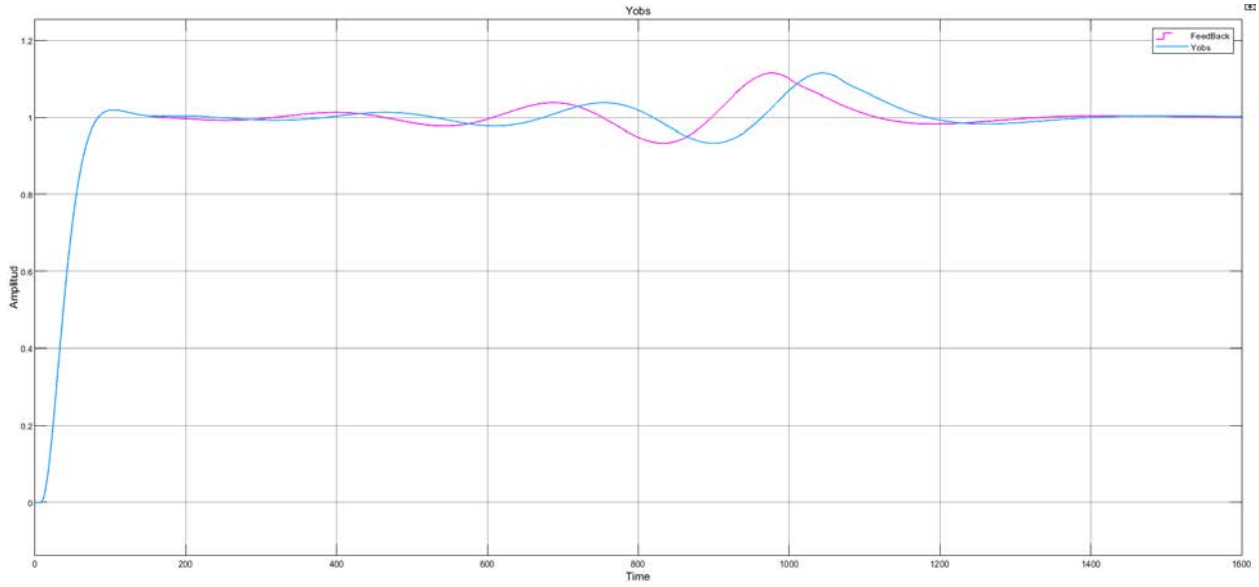

Figura 35 Respuesta del sistema con ganancia programada accionada t=1000s

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El modelo desarrollado en SIMULINK permitió analizar el comportamiento del sistema de tres tanques bajo inyección de retardos en la red de control. Los resultados mostraron que los retardos en los canales de comunicación provocan inestabilidad en el control de nivel debido al uso de información desactualizada para la generación de señales de control, causando efectos en cascada que afectan todo el sistema
- El sistema de estimación basado en el modelo de mínimos cuadrados recursivos estimó los retardos inyectados mediante análisis de correlación cruzada entre las señales modeladas y observadas. La validación del modelo mostró un error relativo promedio de 0.19% entre la salida estimada y la observada. Adicionalmente, el análisis del coeficiente de determinación confirmó que los modelos con valores próximos a uno representan adecuadamente la variabilidad de los datos, mientras que los modelos con valores inferiores presentan limitaciones para capturar las relaciones entre las variables del sistema.
- Se implementó un controlador PID adaptativo que mantuvo la estabilidad del sistema bajo ataques de inyección de retardos. El esquema de estimación detectó los retardos con un error del 29.25% entre el valor teórico (67 segundos) y el estimado (47.4 segundos), logrando prevenir los efectos de los ataques.
- Las pruebas realizadas en diferentes escenarios mostraron que el sistema de control con ganancias programadas se adapta a los retardos estimados, con un tiempo de establecimiento de aproximadamente 200 segundos y convergencia al valor de referencia en todos los casos evaluados. Asimismo, se evidencia que el controlador adaptativo supera al PID convencional en condiciones de ataque.

4.2 Recomendaciones

- El mecanismo de estimación de retardos demostró ser viable para la detección temprana de anomalías, aunque la diferencia del 29.25% entre el valor teórico y estimado indica que el método requiere calibración adicional para aplicaciones donde se necesite más precisión.
- Para futuros trabajos, la estimación de retardos se puede aplicar filtros o métodos más sofisticados como el modelado paramétrico para reducir la discrepancia entre los resultados teóricos y los resultados obtenidos.
- Asimismo, es importante validar los modelos en entornos reales con un PLC con interferencias propios de las redes de tipo industrial para asegurar que los controladores mantienen el desempeño correcto en condiciones prácticas.
- Se sugiere ampliar las pruebas a situaciones con múltiples ataques simultáneos para comprobar la escalabilidad y robustez del sistema propuesto.
- La implementación de canales de comunicación redundantes puede ser aplicado en el sistema de control una vez detectado el retardo en la red.

BIBLIOGRAFÍA

[1] J. B. Slimane, «Securing the Industrial Backbone: Cybersecurity Threats, Vulnerabilities, and Mitigation Strategies in Control and Automation Systems», *J. Electr. Syst.*, vol. 20, n.º 7s, Art. n.º 7s, may 2024, doi: 10.52783/jes.3604.

[2] E. Korkmaz, D. Matthew, y V. Skormin, «Detection and Mitigation of Time Delay Injection Attacks on Industrial Control Systems with PLCs». Accedido: 2 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-65127-9_6

[3] I. J. Pazmiño Castro y N. F. Rodriguez Peralta, «Diseño de un controlador PID con comunicación inalámbrica para una planta de 3 tanques», bachelorThesis, ESPOL. FIEC, 2017. Accedido: 2 de octubre de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/42581

[4] F. I. Kuonquí Gaínza, «Análisis comparativo del funcionamiento de dos sistemas de control automático de nivel de agua en una planta de tres vasos comunicantes, diseñados aplicando los métodos de control de reubicación de polos del modelo interno y de lógica difusa, diseñados e implementados usando Matlab/Simulink», bachelorThesis, ESPOL.FIEC, 2018. Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/45875

[5] T. Yuldashev y A. Solovev, «Fundamentos de los controladores PID: principios de funcionamiento, ventajas y desventajas». Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.integrasources.com/blog/basics-of-pid-controllers-design-applications/

[6] IndMALL, «What Is Adaptive PID Control and When Is It Used?» Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.indmall.in/faq/what-is-adaptive-pid-control-and-when-is-it-used/

[7] P. D. Molin, «Cyberattack on industrial systems: A growing threat», Lumiun Blog. Accedido: 2 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.lumiun.com/blog/en/cyberattack-on-industrial-systems-is-a-growing-threat/

[8] trendmicro, «Industrial Control System». Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.trendmicro.com/vinfo/us/security/definition/industrial-control-system

[9] rument, «Recursive Model Estimation Methods», https://www.ni.com. Accedido: 3 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ni.com/docs

[10] Skormin, V.: Introduction to Process Control. Springer, Cham (2016)

[11] «ICS OT Security: Current Threats and Solutions». Accedido: 1 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.ssh.com/academy/operational-technology/ics-ot-security-current-threats-and-solutions

[12] T. Y. Elete, «Impact of ransomware on industrial control systems in the oil and gas sector: Security challenges and strategic mitigations», *Comput. Sci. IT Res. J.*, vol. 5, n.º 12, Art. n.º 12, dic. 2024, doi: 10.51594/csitrj.v5i12.1759.

[13] A. S. George, D. Baskar, y P. Balaji Srikaanth, «Cyber Threats to Critical Infrastructure: Assessing Vulnerabilities Across Key Sectors», vol. 02, pp. 51-75, feb. 2024, doi: 10.5281/zenodo.10639463.

[14] T. N. I. Alrumaih, M. J. F. Alenazi, N. A. AlSowaygh, A. A. Humayed, y I. A. Alablani, «Cyber resilience in industrial networks: A state of the art, challenges, and future directions», *J. King Saud Univ. - Comput. Inf. Sci.*, vol. 35, n.º 9, p. 101781, oct. 2023, doi: 10.1016/j.jksuci.2023.101781.