



Controlador en modo deslizante aplicado a un tanque de llenado con tiempo muerto

Naranjo Licintuña, Alex Francisco

Vicerrectorado de investigación, Innovación y Transferencia Tecnológica

Centro de Posgrados

Maestría en Electrónica y Automatización mención Redes Industriales

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Magister en Electrónica y

Automatización mención Redes Industriales.

Ing. Pilatásig Panchi, Marco Antonio Mgs.

19 de Mayo del 2023

Latacunga

Reporte de verificación de contenido

Document Information

Analyzed document	TESIS NARANJO ALEX.pdf (D170399769)
Submitted	6/12/2023 4:36:00 PM
Submitted by	Juan Carlos Altamirano
Submitter email	jc.altamiranoc@uta.edu.ec
Similarity	0%
Analysis address	jc.altamiranoc.uta@analysis.orkund.com

Sources included in the report

Entire Document

2 Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología Centro de Posgrados Certificación Certifico que el trabajo de titulación, "Controlador en modo deslizante aplicado a un tanque de Llenado con tiempo muerto" fue realizado por el señor Naranjo Licintuña Alex Francisco el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o similitud de contenidos ; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente. Latacunga, 19 de mayo 2023 Firma:

..... Ing. Pilatasig Panchi Marco Antonio, Mgs Director C.C.:0502375876

3 Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología Centro de Posgrados Responsabilidad de autoría Yo Naranjo Licintuña Alex Francisco con cédula de ciudadanía N° 0503803694, declaro que el contenido, Ideas y criterios del trabajo de titulación: "Controlador en modo deslizante aplicado a un tanque de llenado con tiempo muerto " es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas. Latacunga, 23 de mayo 2023 Firma:

Alex Francisco Naranjo Licintuña C.C.:0503803694

4 Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología Centro de Posgrados Autorización de publicación Yo Naranjo Licintuña Alex Francisco, con cedula de ciudadanía n° 0503803694 autorizo a la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: " Controlador en modo deslizante aplicado a un tanque de llenado con tiempo muerto" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad. Latacunga, 23 de mayo 2023 Firma: Alex Francisco Naranjo Licintuña C.C.:0503803694

5 Dedicatoria Este trabajo lo dedico a mi padre +Juan De Dios Naranjo Naranjo quien me apoyo en el transcurso de mi vida y me impulso a seguir esta maestría y pronto nos veremos en el cielo, a mi madre Rosa María Licintuña que ha estado siempre a mi lado guiándome e impulsándome a continuar, y motivándome a creer que los sueños se hicieron para cumplirse con esfuerzo y dedicación, a mi esposa Alexandra Ayala que ha estado presente en la etapas más importantes de mi vida, a mis hermanos y a mis amigos de Fourier que son los pilares más importantes en mi vida. Su amor y apoyo incondicional, es la muestra del regalo que Dios me ha dado en esta vida, han sido mi inspiración y soporte en esta travesía en la cual su sabiduría e inteligencia me han sido útiles para poder continuar con mi desarrollo personal.

Firma:





Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación, **“Controlador en modo deslizante aplicado a un tanque de Llenado con tiempo muerto”** fue realizado por el señor **Naranjo Licintuña, Alex Francisco** el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o similitud de contenidos ; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 19 de mayo 2023

Firma:



Firmado electrónicamente por:
MARCO ANTONIO
PILATASIG PANCHI

.....
Ing. Pilatásig Panchi, Marco Antonio Mgs

C.C.:0502375876



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Responsabilidad de autoría

Yo, Naranjo Licintuña, Alex Francisco con cédula de ciudadanía N° 0503803694, declaro que el contenido, Ideas y criterios del trabajo de titulación: "**Controlador en modo deslizante aplicado a un tanque de llenado con tiempo muerto** " es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 23 de mayo 2023

Firma:



firmado electrónicamente por:
ALEX FRANCISCO
NARANJO
LICINTUNA

.....
Naranjo Licintuña, Alex Francisco

C.C.:0503803694



Vicerrectorado de Investigación, Innovación y Transferencia de Tecnología

Centro de Posgrados

Autorización de publicación

Yo, Naranjo Licintuña, Alex Francisco, con cédula de ciudadanía n° 0503803694 autorizo a la Universidad de la Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: " **Controlador en modo deslizante aplicado a un tanque de llenado con tiempo muerto**" en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Latacunga, 23 de mayo 2023

Firma:



Firmado electrónicamente por:
ALEX FRANCISCO
NARANJO
LICINTUNA

.....
Naranjo Licintuña, Alex Francisco

C.C.:0503803694



Dedicatoria

Este trabajo lo dedico a mi padre +Juan De Dios Naranjo Naranjo quien me apoyo en el transcurso de mi vida y me impulso a seguir esta maestría y pronto nos veremos en el cielo, a mi madre Rosa María Licintuña que ha estado siempre a mi lado guiándome e impulsándome a continuar, y motivándome a creer que los sueños se hicieron para cumplirse con esfuerzo y dedicación, a mi esposa Alexandra Ayala que ha estado presente en la etapas más importantes de mi vida, a mis hermanos y a mis amigos de Fourier que son los pilares más importantes en mi vida. Su amor y apoyo incondicional, es la muestra del regalo que Dios me ha dado en esta vida, han sido mi inspiración y soporte en esta travesía en la cual su sabiduría e inteligencia me han sido útiles para poder continuar con mi desarrollo personal.



Agradecimiento

Agradezco a Dios por brindarme su apoyo, guía y fuerza para sobrellevar las dificultades que se han ido presentando en el camino, además de ser la fuente guía para poder lograr todas las metas y objetivos que me he propuesto y me propondré, agradezco a mi familia en especial a mi madre Rosa María Licintuña, a mi esposa Alexandra Ayala, a mi amigo Robinson Chicaiza, a mis hermanos, sobrinos y amigos de Fourier que han estado presentes en este camino y presentes encada unas de las etapas de mi vida.

Agradezco también a la Universidad de las Fuerzas Armadas Espe, y en especial al centro de postgrados por su programa de la maestría en electrónica y automatización menciona redes industriales, así también a Marco Pilatasig por su paciencia en la ejecución de este proyecto.

A todas las personas que aportaron para que el presente proyecto haya podido culminarse de forma exitosa.

A todos mis más sinceros agradecimientos.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Carátula.....	1
Reporte de verificación de contenido	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento	7
Indice de contenidos	8
Índice de tablas.....	11
Indice de figura.....	12
Resumen	14
Abstract.....	15
Capítulo I: Marco metodológico de la investigación	16
Planteamiento del problema.....	16
Antecedentes	17
Justificación, importancia del proyecto.....	18
Objetivos.....	19
<i>Objetivos generales</i>	19
<i>Objetivos específicos</i>	19
Capitulo II: Marco teórico.....	20
Marco legal.....	20
Fundamentación teórica	20
<i>Automatización</i>	20
<i>Sistemas no lineales</i>	21
<i>Tiempo de retardo</i>	21

<i>Planta de primer orden con retardo</i>	22
<i>Modelos de control</i>	24
<i>Controlador tipo pid</i>	25
<i>Sintonización controlador pid usando ziegler - nichols</i>	25
<i>Control smc (sliding mode controller)</i>	26
Diseño de la ley de control smc	27
<i>Modelo de espacio de estados</i>	27
<i>Aproximación de taylor del modelo fopdt para el tanque</i>	28
<i>Desarrollo de controlador en modos deslizantes</i>	29
<i>Smc con superficie integral</i>	30
<i>Ecuaciones de sintonización de los controladores</i>	31
<i>Ecuaciones de sintonización smc</i>	32
Matlab	32
Simulink	33
Indices de desempeño	33
Capitulo III: Metodología.....	35
Conexión opc.....	35
Software factoryio	37
Curva de reacción del llenado del tanque simulink – factoryio.....	39
Identificación de la planta y modelado	39
Modelo de la planta tanque de llenado factoryio	41
Diseño de controladores en simulink	45
Diseño de controlador del pid	45
Diseño de controlador smc.....	47
Cálculo de índices de desempeño itse y tvu	49
<i>Indice de desempeño itse</i>	49

<i>Índice de desempeño tvu</i>	49
Capítulo IV: Análisis de resultado	51
Pruebas y resultados	51
Prueba de seguimiento	51
<i>Resultados controladores smc</i>	51
<i>Índices de desempeño smc</i>	53
<i>Resultados controlador pid</i>	53
<i>Resultados controlador pid vs smc</i>	55
Prueba de regulación	57
<i>Controlador smc</i>	57
<i>Controlador pid</i>	60
<i>Comparación controlador pid vs smc</i>	62
Cuadro comparativo de los indicadores de desempeño	64
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones	65
Conclusiones	65
Recomendaciones	65
Bibliografía	67
Anexos	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de ecuaciones de ziegler y nichols ajuste pid.....	26
Tabla 2. Parámetros de sintonización smc	32
Tabla 3. Resultados índices de desempeños itse y tvu en el controlador smc.....	53
Tabla 4. Resultado índices de desempeños itse y tvu en el controlador pid	55
Tabla 5. Índice de desempeño controlador smc prueba de regulación.	59
Tabla 6. Índice de desempeño.....	62
Tabla 7. Comparaciones índices de desempeño smc vs pid.....	64

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1. Comparación entre el modelo reducido de primer orden y los modelos aproximados de padé y taylo	22
Figura 2 Método de identificación por curva de reacción.....	23
Figura 3 Sintonización controlador pid usando ziegler - nichols.....	26
Figura 4 Comportamiento control smc	27
Figura 5 Modelo fopdt promediado y aproximación de taylor	29
Figura 6 Esquema de control por modos deslizantes clásico	29
Figura 7 Conexión opc kepservr dispositivos.....	35
Figura 8 Propiedades de las variables del dispositivo.....	35
Figura 9 Conexión opc kepservr	36
Figura 10 Opc quick client.....	36
Figura 11 Configuración de parámetros opc	37
Figura 12 Conexión opc con kepservr en factoryio	37
Figura 13 Factoryio conexión opc cliente en los sensores y actuadores	37
Figura 14 Tanque de factory io	38
Figura 15 Curva de reacción del tanque de llenado.....	39
Figura 16 Función ident matlab pra el modelado de la planta	39
Figura 17 Grafico de comportamiento de la válvula de entrada y salida	40
Figura 18 Modelado de la planta.....	41
Figura 19 Estimación de la identificación del modelo de la planta.....	42
Figura 20 Curva de reacción del modelo identificado.....	42
Figura 21 Modelo del proceso	43
Figura 22 Catos del modelo para determinar la función de transferencia.	43
Figura 23 Curva de reacción modelo de planta vs modelo identificado	44
Figura 24 Diseño de controladores pid/smc en simulink	45
Figura 25 Control pid para el modelo de tanque de llenado con tiempo muerto	45
Figura 26 Control de tanque - controlador pid	46
Figura 27 Control smc.....	47

Figura 28 <i>Curva de comportamiento control smc</i>	47
Figura 29 <i>Indice de desempeño itse</i>	49
Figura 30 <i>Conexión simulink controlador smc</i>	51
Figura 31 <i>Curva de reacción controlador smc en función del tiempo</i>	52
Figura 32 <i>Señal de control smc válvula de entrada</i>	52
Figura 33 <i>Curva de reacción controlador pid en función del tiempo</i>	53
Figura 34 <i>Señal de control pid válvula de entrada</i>	54
Figura 35 <i>Curva de reacción comparación pid vs smc</i>	55
Figura 36 <i>Curva de reacción comparación pid vs smc acercamiento visual</i>	56
Figura 37 <i>Señal de control del actuador smc vs pid</i>	57
Figura 38 <i>Gráfica de control con una variación 10% en la válvula de salida smc</i>	57
Figura 39 <i>Gráfica del actuador - control con una variación 10% en la válvula de salida</i>	58
Figura 40 <i>Señal de la válvula de salida con una perturbación del 10% smc</i>	59
Figura 41 <i>Gráfica de control con una variación 10% en la válvula de salida pid</i>	60
Figura 42 <i>Señal de la válvula de salida con una perturbación del 10% pid</i>	61
Figura 43 <i>Gráfica del actuador - control con una variación 10% en la válvula de salida pid</i>	61
Figura 44 <i>Comparación pid vs smc prueba de regulación</i>	62
Figura 45 <i>Señal de control comparación pid vs smc prueba de regulación</i>	63
Figura 46 <i>Modelo de bloques simulink smc, pid, y perturbaciones.</i>	63

Resumen

El Controlador en Modo Deslizante (SMC) se destaca como uno de los métodos más robustos y eficaces para sistemas no lineales, ya que proporciona una respuesta adecuada incluso frente a perturbaciones en el sistema. Este enfoque se caracteriza por su capacidad de ofrecer una respuesta óptima ante perturbaciones externas y variaciones impredecibles de parámetros específicos. En el marco de este proyecto, se llevará a cabo el diseño, la simulación y la comparación del controlador SMC con otro controlador convencional ampliamente utilizado en la industria para un tanque de llenado con tiempo muerto. Para abordar las perturbaciones presentes en el sistema, se emplearán superficies deslizantes basadas en el error y la integral del error. Estas superficies deslizantes permitirán hacer frente de manera efectiva a perturbaciones como el flujo y el volumen en la entrada del fluido. Los algoritmos del controlador SMC serán analizados y evaluados mediante la comparación del valor absoluto del error y la integral del error en la entrada de la planta. El aspecto clave de este proyecto radica en la obtención de resultados experimentales utilizando el controlador SMC. Estos resultados permitirán evaluar si el sistema logra alcanzar los objetivos establecidos y demostrar la robustez del controlador en términos de su desempeño. La comparación exhaustiva entre el controlador SMC y el controlador convencional proporcionará información valiosa sobre las ventajas y limitaciones de cada enfoque, lo cual es fundamental para la toma de decisiones en la implementación de sistemas de control en la industria. Los resultados obtenidos experimentalmente mediante el controlador SMC permitirán evaluar si el sistema es capaz de alcanzar los objetivos y mostrar la robustez del controlador en términos de su desempeño.

Palabras Clave: Predictor de Smith, controlador por modos deslizantes, tiempo muerto, integral del error.

Abstract

The Sliding Mode Controller (SMC) stands out as one of the most robust and effective methods for nonlinear systems, providing an appropriate response even in the presence of disturbances in the system. This approach is characterized by its ability to offer an optimal response to external disturbances and unpredictable variations in specific parameters. Within the framework of this project, the design, simulation, and comparison of the SMC controller with another conventionally used controller in the industry for a dead-time filling tank will be carried out. To address the disturbances present in the system, sliding surfaces based on the error and its integral will be employed. These sliding surfaces will effectively handle disturbances such as flow and volume variations at the fluid input. The algorithms of the SMC controller will be analyzed and evaluated by comparing the absolute error value and the integral of the error at the plant input. The key aspect of this project lies in obtaining experimental results using the SMC controller. These results will assess whether the system achieves the defined objectives and demonstrate the controller's robustness in terms of its performance. The comprehensive comparison between the SMC controller and the conventional controller will provide valuable insights into the advantages and limitations of each approach, which are crucial for decision-making in the implementation of control systems in the industry. The experimental results obtained using the SMC controller will allow evaluating whether the system is capable of achieving the objectives and showcasing the controller's robustness in terms of its performance.

Keywords: Smith predictor, sliding mode controller, dead time, error integral.

Capítulo I

Marco Metodológico

Planteamiento del problema

El controlador en modo deslizante SMC desde su creación ha tomado una serie de esquemas combinados con otros tipos de controladores. En el trabajo de Herrera, Camacho, Leiva, & Smith et al. (2020), se desarrolló un controlador por modos deslizantes dinámicos (DSMC) combinado con las características del compensador de linoya -Altpeter para atacar problemas en sistemas de fase no mínima, atribuyéndose características de robustez y estabilidad.

En el trabajo de titulación presentado por Campoverde Robles & Guayasamín Pico (2018) se muestra como una estructura de controlador SMC puede ser combinado con un predictor de Smith (SPSMC) para atacar los retardos de tiempo, pero desde el punto de simulación y diseño no se dispone de herramientas de simulación que permitan que los diseñadores realicen pruebas para llevar a estos controladores a ser aplicados en la industria, es por esto que es necesario contar con una herramienta de diseño que les ayude a validar el comportamiento, desempeño y dinámica de este tipo de controladores y comparar frente a un control PID (proporcional, el integral, y el derivativo).

El presente trabajo tiene como finalidad la simulación y enseñanza de controladores SMC en procesos no lineales, que puedan ser aproximados a un modelo de primer orden con retardo de tiempo muerto FOPDT (Camacho & Smith, 2000). El controlador SMC permitirá evidenciar resultados y compararlos con el procedimiento habitual de diseño y simulación de este tipo de controladores; la librería y aplicación serán empleadas en el diseño de los controladores antes mencionados, en un tanque de llenado no lineal más tiempo muerto. Esto coadyuvará a que nuevas instituciones de educación superior puedan involucrar en sus trabajos de investigación, el diseño y simulación de controladores SMC en sus múltiples versiones. A su vez catedráticos referentes a temas de control puedan incentivar a los futuros ingenieros a emplear esta técnica de control robusto.

Antecedentes

La industria en la actualidad se enfrenta a varios fenómenos internos concretos en ciertas actividades que se buscan controlar, estos campos de control generalmente se representan por modelos matemáticos no lineales. Esta dinámica es compleja y abarca variables que se presentan de forma recurrente dentro del proceso o planta, la no linealidad muestra que no cumple con las propiedades de su superposición que es lo más común dentro de la industria, por esta razón existe la necesidad del control no lineal (Slotine, 1984).

Dentro de estos sistemas de control óptimos para estos eventos no lineales está el controlador de estructura variable, como el control por Modos deslizantes SMC (Sliding Mode Control). El SMC muestra una mayor robustez con respecto a otros sistemas de control, los 45 años de desarrollo han permitido ir desarrollando estrategias adecuadas y cada vez más eficientes. Dentro de los campos de aplicación del SMC está generalmente la presencia de su uso en los sistemas electromecánicos, también se puede encontrar en el control de máquinas eléctricas, motores de inducción, robótica, motores turbo-jet.

El controlador SMC se usa en problemas teóricos, así como también en el campo práctico y aplicaciones. Este controlador acepta las opciones de diseño bajo sus respectivas limitaciones del actuador y hace factible la sintonización para mitigar el esfuerzo de la ley de control.

Además, responde satisfactoriamente ante sistemas no lineales dinámicos, Utkin (1992), menciona que el SMC es inherentemente robusto a la variación de parámetros de sistemas de orden reducido y perturbaciones una vez que se encuentra el modo deslizante del esquema. Para propósitos industriales y de planta se suele emplear superficies deslizantes de tipo PID con el fin de actuar y reaccionar para mitigar el error en el proceso de control, sin embargo, las oscilaciones que se generan en los procesos influyen en la reacción para alcanzar la línea de referencia con rapidez. Las vibraciones que se producen en los procesos hacen que los actuadores no se comporten adecuadamente por lo cual se reduce la eficiencia en el control (Eker, 2006).

Justificación, importancia del proyecto

El diseño y simulación del control en modo deslizante como el presentado por (Vile, Alwi, & Edwards, 2019) en el que se puede tener acceso a funciones para el diseño del controlador o en el presentado por (Manurung, Yoon, & Park, 2010) en el que se desarrolla un SMC para un sistema de masa-resorte, sin embargo, estas librerías solo implementan el control SMC en su versión original e incluso con simplificaciones considerables.

Para el caso de controladores DSMC o SPSMC, no se posee un entorno o herramienta de diseño y simulación que facilite y contribuya a mejorar los tiempos de implementación, sin embargo, el esquema SMC contribuiría a investigadores y diseñadores de control a mejorar estos tiempos de implementación de sus modelos de planta-controlador.

De manera adicional el uso de software especializado tiene el objeto de contribuir al estudio y aprendizaje de controladores SMC, DSMC y SPSMC, por parte de ingenieros, técnicos y catedráticos de control, y a su vez permitir que esta técnica de control robusto disponga de una herramienta de diseño. Esto contribuirá a que la metodología de diseño y simulación sea conocida y socializada a la comunidad universitaria.

Por estas razones en el presente trabajo de titulación se plantea la comparación del controlador SMC frente a uno convencional en la industria que mediante la aplicación de Matlab para el diseño de controladores SMC en un tanque de mezclado no lineal con tiempo muerto aproximables a un modelo FOPDT.

Adicional, esta herramienta podrá ser empleada de manera general a procesos cuyas características sean un modelo FOPDT.

Se hará la recopilación bibliográfica de la información para un tanque de llenado con retardo, se estudiarán las variantes del control por modos deslizantes considerando el uso de diferentes superficies y sus limitaciones al aplicarlos, se diseñará el esquema de control por modos deslizantes para procesos no lineales para mejorar el seguimiento sin descompensar la regulación en

los sistemas propuestos. Se simulará el tanque de llenado con las comparativa del controlador PID, SMC, sometido a perturbaciones y cambios de referencia tipo paso de al menos 10% para comprobar el rendimiento y la robustez del esquema de control. Se verificará y comparará el rendimiento del esquema de control diseñado con un SMC general teniendo como referencia los índices de desempeño, ITSE y TVu, sobre-pico y tiempo de asentamiento. Se observa la respuesta de las variables a controlar, las señales de salida del controlador y los índices de desempeño ITSE y TVu para cada uno de los procesos no lineales determinados anteriormente.

Objetivos

Objetivos generales

Diseñar y simular un controlador en modo deslizante para un tanque de llenado con tiempo muerto.

Objetivos específicos

- Recopilar información bibliográfica de la modelización de sistemas no lineales con retardo o tiempo muerto, y de los fundamentos del controlador en modo deslizante.
- Diseñar y sintonizar un controlador por modos deslizantes con base en los índices de desempeño ITSE y TVu.
- Simular un tanque de llenado, para realizar pruebas frente a perturbaciones y cambios de referencia de al menos 10%.
- Comparar el esquema de control propuesto, frente a PID, para constatar la mejora en el rendimiento y robustez de la propuesta mediante la cuantificación de los resultados a través de los índices de desempeño, ITSE y TVu, sobre -pico y tiempo de asentamiento

Capítulo II

Marco teórico

Marco legal

Constitución de la República del Ecuador, (Registro Oficial No. 449, 20-octubre - 2008).

En el artículo 26 establece que “La educación es un derecho de las personas a lo largo de su vida y un deber ineludible e inexcusable del Estado. Constituye un área prioritaria de la política pública y de la inversión estatal, garantía de la igualdad e inclusión social y condición indispensable para el buen vivir. Las personas, las familias”.

- Constitución de la República del Ecuador, (Registro Oficial No. 449, 20-octubre - 2008).

En el artículo 349 establece que “El Estado garantizará al personal docente, en todos los niveles y modalidades, estabilidad, actualización, formación continua y mejoramiento pedagógico y académico; una remuneración justa, de acuerdo con la profesionalización, desempeño y méritos académicos. La ley regulará la carrera docente y el escalafón; establecerá un sistema nacional de evaluación del desempeño y la política salarial en todos los niveles. Se establecerán políticas de promoción, movilidad y alternancia docente.”

Fundamentación teórica

Automatización

La automatización implica la utilización de tecnología para ejecutar tareas sin necesidad de la intervención directa del ser humano. En el ámbito industrial, la automatización se refiere a la aplicación de sistemas de control automatizados para supervisar y gestionar procesos y operaciones en la fabricación de bienes y prestación de servicios (Gaviño, 2019).

Por otro lado, los sistemas de control son herramientas que permiten supervisar y regular procesos, dispositivos y sistemas mediante principios matemáticos y lógicos, tomando decisiones en tiempo real y ajustando los parámetros de los procesos según las condiciones y objetivos

establecidos. Dichos sistemas tienen amplias aplicaciones, desde la automatización de procesos industriales hasta el control de la temperatura en sistemas de climatización y la estabilización de sistemas aeroespaciales (Gaviño, 2019).

Sistemas no lineales

En la planificación y control de procesos y sistemas, es esencial crear modelos matemáticos que a menudo se basan en ecuaciones diferenciales lineales o ecuaciones en diferencia. Aunque en la mayoría de las situaciones, los sistemas y procesos de la vida real son no lineales, lo que implica que no se ajustan a modelos lineales. Aunque se pueden hacer simplificaciones y aproximaciones para crear modelos lineales, estos son aplicables solo en un rango limitado de operación. El control clásico se centra en sistemas lineales debido a su manejo sencillo y su capacidad para representar de manera confiable el comportamiento de sistemas dinámicos. Sin embargo, los sistemas no lineales se utilizan ampliamente en aplicaciones modernas como la robótica, la inyección de combustible, los sistemas de vuelo y otros. Desde una perspectiva matemática, los sistemas no lineales no cumplen con el principio de superposición y homogeneidad, lo que indica que la respuesta de un sistema no lineal a múltiples entradas simultáneas no se puede calcular simplemente sumando las respuestas de cada entrada actuando por sí sola (Firmansyah, y otros, 2022).

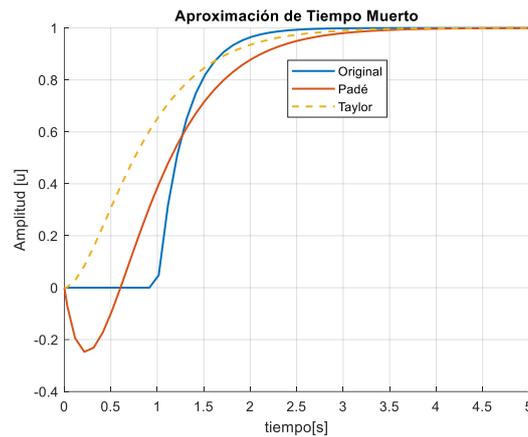
Tiempo de retardo

Los tiempos de retardos están presentes comúnmente dentro de la industria en todos los procesos, al realizar el modelamiento matemático es objetiva la idea de alcanzar a modelar un sistema no lineal, prácticamente los sistemas controlados en la actualidad están ligados a la estandarización y adaptación de sistemas lineales. Las tuberías de llenado de un tanque pueden emitir múltiples señales una de ellas es observar la entrada/salida. El tiempo muerto es un periodo en el cual refiere a cuando la variable manipulada no produce ningún efecto dentro de las variables del proceso (Nise & Romo, 2002).

Hay dos métodos para estimar el retardo de tiempo muerto en un modelo de primer orden: la aproximación de Padé y la aproximación de Taylor. En la imagen se puede ver una comparación entre ambas aproximaciones y el modelo FOPDT.

Figura 1.

Comparación entre el modelo reducido de primer orden y los modelos aproximados de Padé y Taylor



Nota. Tomado de nuevas aproximaciones del tiempo muerto para estudios de control de Víctor Alfaro

Se puede observar que la aproximación de Padé presenta una similitud mayor al modelo FOPDT en lo que respecta al comportamiento en régimen permanente, sin embargo, durante el estado transitorio su comportamiento es similar a un sistema que presenta fase no mínima.

En la Ecuación (1) se muestra la aproximación de Padé y en la Ecuación (2) la aproximación de Taylor.

$$e^{-t_0 s} = \frac{1 - \frac{t_0 s}{2}}{1 + \frac{t_0 s}{2}} \quad (1)$$

$$e^{-t_0 s} = \frac{1}{t_0 s + 1} \quad (2)$$

Planta de primer orden con retardo

Para simplificar el modelo cinemático y dinámico de una planta con retardo, es posible ajustarlo a un modelo de primer orden. Esto implica reducir la complejidad del modelamiento. Una

planta de primer orden se representa con la siguiente función de transferencia, según (Torres Herrera, 2019).

$$G_p = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_0 s} \quad (3)$$

Donde:

K: es la ganancia del proceso

τ : Es al constante de tiempo de proceso, es decir a cantidad de tiempo que se llega a

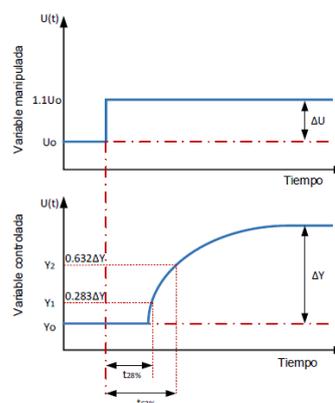
tomar la variable controlada.

t_0 : Es el tiempo muerto, la relación de la variación de la entrada con respecto a lo que tarda en responder para la salida.

El método mencionado ubica dos puntos en la respuesta cuando se alcanza el 28.3% y el 63.2% con referencia al valor final o su valor en estado estable como se muestra en la Figura 2, luego se calcula los tiempos en cada uno de los puntos mencionados y se emplean en el cálculo de los parámetros K, t_0 y τ del modelo FOPDT.

Figura 2.

Método de identificación por curva de reacción



Nota. Tomado de process control (T. E. Martin, 2015)

Con los datos obtenidos, se procede al cálculo de la constante de tiempo Ecuación (4) y el retardo de tiempo en la Ecuación (5)

La ganancia en estado estable se calcula como la relación entre la variación de la salida y la variación de la entrada en el sistema con la Ecuación (6)

$$\tau = 1.5 (t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) \quad (4)$$

$$t_o = t_{63.2\%} - \tau \quad (5)$$

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta U} \quad (6)$$

El modelo de primer orden con retardo de tiempo muerto se emplea en el diseño de controladores en modos deslizantes, en su estructura clásica presentado por (Camacho & Smith, 2000) y en el diseño de controladores usando una estructura con el Predictor de Smith.

Modelos de control

Los modelos de control son herramientas matemáticas que permiten representar de manera simplificada el comportamiento de sistemas dinámicos, con el fin de diseñar y analizar sistemas de control automático que permitan modificar o mantener las variables del sistema dentro de rangos deseables de operación. Estos modelos se basan en ecuaciones diferenciales o en diferencias que describen cómo las variables del sistema cambian en el tiempo en respuesta a entradas y perturbaciones externas. Los modelos de control se utilizan en diversas áreas, como la ingeniería eléctrica, mecánica, química y aeronáutica, entre otras. En la práctica, los modelos de control son fundamentales para el diseño de sistemas de control en la industria y en la automatización de procesos, permitiendo mejorar la eficiencia, calidad y seguridad de los procesos (Manurung, Yoon, & Park, 2010).

Controlador tipo PID

El control PID es uno de los más utilizados dentro de los procesos industriales, El controlador ha sido desarrollado y actualizado, con el pasar del tiempo y el mejoramiento de la tecnología, esto ha permitido presentar características adicionales como la auto sintonización y adaptación continua (Sarmiento & Soto, 2020).

El controlador PID ajusta automáticamente una salida de control en función de la diferencia entre la variable controlada. El controlador mide la diferencia entre las dos variables y utiliza los términos "proporcional", "integral" y "derivativo" para calcular la salida de control.

La acción proporcional es proporcional a la diferencia entre la variable controlada y la variable deseada. La acción integral es proporcional a la integral del error a lo largo del tiempo. La acción derivativa es proporcional a la derivada del error en función del tiempo (C. B. Kadu, 2016).

La ecuación de PID se describe a continuación:

$$\tau = 1.5 (t_{63.2\%} - t_{28.3\%}) \quad (7)$$

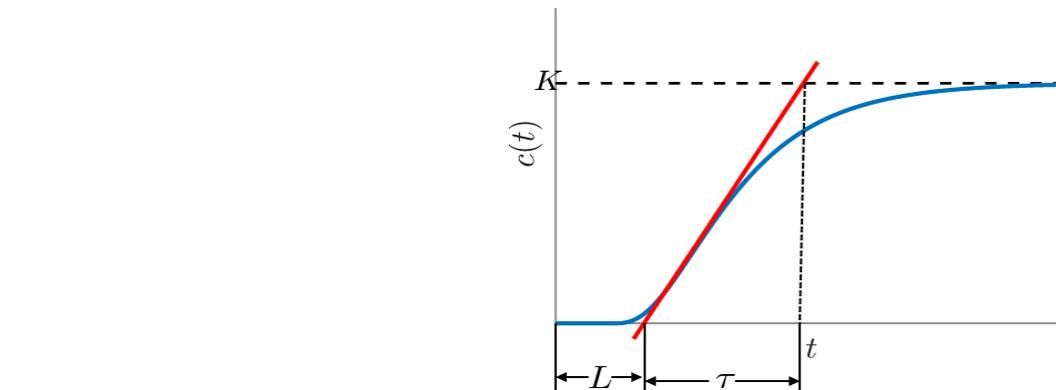
Donde $U_{pi}(t)$ es la señal de control, $e(t)$ representa el error. Los parámetros de sintonización son la ganancia integral Ti , proporcional K y derivativa Td .

Sintonización controlador PID usando Ziegler - Nichols

La técnica de Ziegler-Nichols es comúnmente utilizada en la sintonización del controlador PID para ajustar sus parámetros en control de procesos industriales. Consiste en obtener los valores críticos del proceso, que son la frecuencia de resonancia y la ganancia crítica, aplicando una perturbación en la entrada del proceso y observando la respuesta en la salida. Estos valores críticos se utilizan para calcular los parámetros del controlador PID utilizando una tabla proporcionada por Ziegler y Nichols, y luego se ajustan en el controlador y se prueba la respuesta del proceso. Si es necesario, se pueden ajustar manualmente o utilizar otro método de sintonización (Ruge, 2011).

Figura 3.

Sintonización controlador PID usando Ziegler - Nichols



Nota. Tomado de optimización de señal de control (Ruge, 2011)

A través de Ziegler y Nichols sugirieron un ajuste PID tras establecer los valores de K_p , T_i y T_d acorde a la siguiente tabla:

Tabla 1

Tabla de ecuaciones de Ziegler y Nichols ajuste PID

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{\tau}{KL}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{\tau}{KL}$	$\frac{L}{\tau}$	0
PID	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	$\frac{0.3}{2L}$	0.5 L

Nota. Tomada del libro de control y método de cálculo Ziegler y Nichols

Ecuaciones PID

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s \right) \quad (8)$$

$$G_c(s) = 1.2 \frac{\tau}{KL} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0,5Ls \right) \quad (9)$$

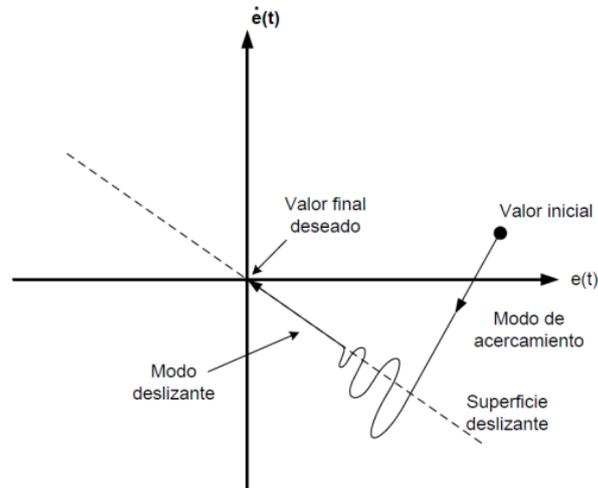
Control SMC (sliding mode controller)

(Vaidyanathan & Lien, 2017) mencionan que dentro de los problemas más comunes en el proceso de control y sintonización existe las no linealidades, la falta de exactitud en el

modelamiento, y carecía de robustez ante factores externos y perturbaciones. El control SMC permite que este sistema sea adaptable tanto para sistemas lineales como no lineales, este tipo de controlador se deriva de los controles de estructura variable.

Figura 4.

Comportamiento control SMC



Nota. interpretación gráfica SMC (F. De la Cruz, 2015)

En el control SMC una vez que las variables controladas tales como, el error y sus derivadas llegan a igualarse a 0. Entonces, $S(t)$ toma un valor constante y se reduce a cumplir la condición de la gradiente de la superficie igual a 0.

$$U_{smc}(t) = U_{c_{SMC}}(t) + U_{D_{SMC}}(t) \quad (10)$$

Diseño de la ley de control SMC

$$\text{Sistema: } \dot{x} = f(x, \dot{x}, u, t, \Delta) \quad \Delta < \beta$$

Modelo de espacio de estados

$$x = x_1$$

$$\dot{x} = \dot{x}_1 = \dot{x}_2$$

$$\dot{x} = \dot{x}_1 = \dot{x}_2 = f(x, \dot{x}, u, t, \Delta)$$

$$\text{Superficie deslizante } s = ax_1 + x_2 \quad a > 0$$

$$\text{Primera derivada de } s \rightarrow \dot{s} = a\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = ax_2 + f(x, \dot{x}, u, t, \Delta)$$

$$\dot{s} = -k|s|^\gamma \text{sgn}(s) \quad k > 0, 0 < \gamma < 1$$

$$ax_2 + f(x, \dot{x}, u, t, \Delta) = -k|s|^\gamma \text{sgn}(s)$$

Ley de control

$$u = -ax_2 - f(x, \dot{x}, u, t, \Delta) - k|s|^\gamma \text{sgn}(s) \quad (11)$$

Aproximación de Taylor del modelo FOPDT para el tanque

Para diseñar controladores en modos deslizantes, es importante aproximar este tiempo de retardo a un modelo y utilizar el SMC para compensar errores en la modelización de la planta. Por lo tanto, es necesario implementar la aproximación de Taylor en el modelo FOPDT.

De la Ecuación (12) se puede aproximar el retardo de tiempo del modelo FOPDT con la Ecuación (13) obteniéndose la Ecuación (14):

$$e^{-t_0 s} = \frac{1}{t_0 s + 1} \quad (12)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (13)$$

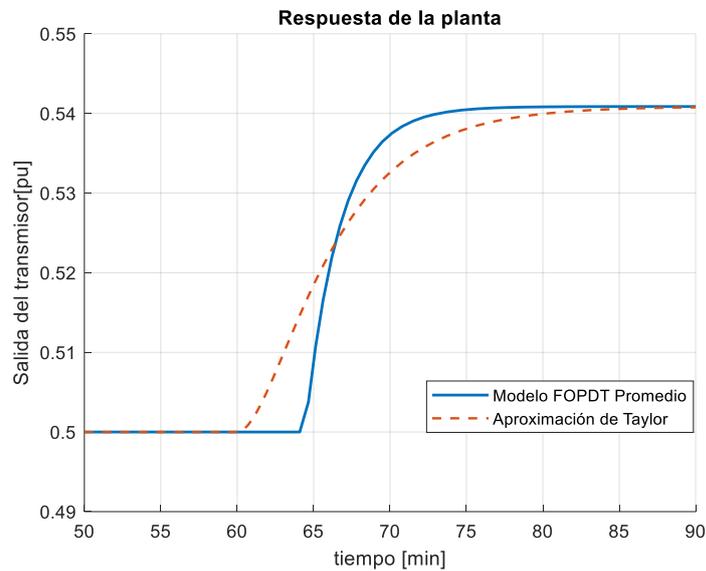
$$G_m(s) = \frac{K_m}{(\tau_m s + 1)(t_0 s + 1)} \quad (14)$$

Para el diseño del controlador en modos deslizantes clásico se emplea esta aproximación de Taylor.

En la Figura 5 se puede observar el modelo FOPDT promediado del caso de estudio y el modelo FOPDT promediado aplicado la aproximación de Taylor, para tal propósito se realiza un decremento en la señal de entrada a la planta $m(t)$ de un 10%, de esta forma se puede evidenciar de mejor manera la aproximación realizada al modelo

Figura 5.

Modelo FOPDT promediado y Aproximación de Taylor



Nota. Tomado de control de procesos (O. Camacho, 2020)

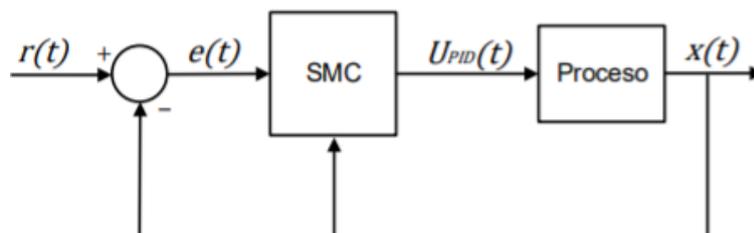
En la Figura 5 se observa que la aproximación de Taylor es buena en estado estacionario, sin embargo, tiene una cercanía no muy apegada al modelo FOPDT en estado transitorio; se aprovecha las ventajas del SMC para compensar estas incertidumbres en el modelado matemático.

Desarrollo de controlador en modos deslizantes

Para el diseño del controlador SMC, se parte del uso del modelo FOPDT aplicado la aproximación de Taylor y el esquema planteado en la Figura 6.

Figura 6.

Esquema de control por modos deslizantes clásico



Nota. Tomado de sistemas de control SMC (O. Camacho, 2020)

El diagrama de bloques presentado considera dos tipos de superficies de deslizamiento, como objeto de estudio de este trabajo de titulación. A continuación, se plantea el desarrollo del controlador en modos deslizantes considerando las dos superficies.

SMC con superficie integral

La superficie de deslizamiento para el desarrollo del controlador en modos deslizantes está en función del orden del sistema (n), de acuerdo con la Ecuación (14) que representa al modelo FOPDT aplicado la aproximación de Taylor y considerando la superficie integral, se obtiene:

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 \int_0^t e(t) dt \quad (15)$$

Expandiendo la Ecuación (15) y considerando que $\lambda_1 = 2\lambda$ y $\lambda_o = \lambda^2$, tenemos que:

$$S(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_o \int_0^t e(t) dt \quad (16)$$

En la Ecuación (16) podemos observar que la superficie de deslizamiento de tipo integral su estructura es similar al de un controlador de tipo PID, debido a esto la superficie es elegida como una de las que mejores prestaciones proporciona en el diseño de este tipo de controladores robustos. Aplicando la condición de deslizamiento del SMC a la Ecuación (16), tenemos que:

$$S(t) = \frac{d^2 e(t)}{dt^2} + \lambda_1 \frac{de(t)}{dt} + \lambda_o e(t) = 0 \quad (16)$$

En la Figura 6 se puede observar que el error del sistema está definido como la diferencia entre el valor de referencia o llamado set point $r(t)$ y la realimentación de la variable a controlar $Y(t)$.

$$e(t) = r(t) - Y(t) \quad (17)$$

Reemplazando y considerando que las variaciones de la referencia no existen en el estado estacionario $\frac{d^2 r}{dt^2} = 0$ y $\frac{dr}{dt} = 0$, se obtiene:

$$\frac{d^2Y(t)}{dt^2} = \lambda_o e(t) - \lambda_1 \frac{dY(t)}{dt} \quad (18)$$

Se aplica la transformada de Laplace inversa a la Ecuación (14), para obtener la ecuación diferencial del modelo FOPDT con la aproximación de Taylor, obteniéndose:

$$(\tau_m t_o) \frac{d^2Y(t)}{dt^2} + (\tau_m + t_o) \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) = K_m U(t) \quad (19)$$

Reemplazando la Ecuación (19) en la Ecuación (20) y despejando U(t), obtenemos:

$$U(t) = \frac{1}{K_m} \left[\tau_m t_o \lambda_o e(t) + (\tau_m + t_o - \tau_m t_o \lambda_1) \frac{dY(t)}{dt} + Y(t) \right]$$

$$\lambda_1 = \frac{t_o + \tau_m}{t_o \tau_m}$$

$$U_c(t) = \frac{1}{K_m} [\tau_m t_o \lambda_o e(t) + Y(t)]$$

$$U_{SMC}(t) = \frac{1}{K_m} [\tau_m t_o \lambda_o e(t) + Y(t)] + K_d \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \quad (20)$$

Los parámetros λ_o , λ_1 , K_d y δ son variables de sintonización de este tipo de controlador.

La ley de control para el controlador en modos deslizantes clásico empleando una superficie de deslizamiento integral, corresponde a la suma de las acciones de control una de tipo continua.

Ecuaciones de sintonización de los controladores

La sintonización de los parámetros del controlador en un sistema o proceso ayuda a establecer un punto de partida para lograr un buen rendimiento del controlador. La estabilidad del sistema, el rechazo de perturbaciones, el seguimiento de referencias, los tiempos de respuesta y las sobre oscilaciones son factores importantes para considerar en la búsqueda del equilibrio adecuado. Por lo tanto, se requiere un conjunto de ecuaciones de sintonización para cada tipo de controlador utilizado. En esta sección se explicarán los parámetros de sintonización para cada tipo de controlador, teniendo en cuenta que algunos parámetros pueden no ser necesarios debido a la

naturaleza de la superficie de deslizamiento, mientras que en otros casos sí lo son (Camacho & Smith, 2000).

Ecuaciones de sintonización SMC

Para el control en modos deslizantes clásico las ecuaciones de sintonización se rigen al algoritmo de búsqueda de Nelder- Mead

Tabla 2

Parámetros de sintonización SMC

Controlador	Parámetros			
	$\lambda_o[\text{Tiempo}^{-1}]$	$\lambda_1[\text{Tiempo}^{-2}]$	$K_d[\text{pu}]$	$\delta[\text{pu}/\text{Tiempo}]$
SMC- Superficie	$\leq \frac{\lambda_1^2}{4}$	$\frac{\tau_m + t_o}{\tau_m t_o}$	$\frac{0.51}{ K_m } \left(\frac{\tau_m}{t_o}\right)^{0.76}$	0.68
Integral				$+ 0.12 K_m K_d\lambda_1$
SMC- Superficie	-----	$\frac{\tau_m + t_o}{\tau_m t_o}$	$\frac{0.51}{ K_m } \left(\frac{\tau_m}{t_o}\right)^{0.76}$	0.68
Diferencial				$+ 0.12 K_m K_d\lambda_1$

Nota. Tomado de Sliding mode controller (Camacho & Smith, 2000)

De acuerdo con la Tabla 4, existen cuatro parámetros de sintonización para los controladores en modos deslizantes clásico, sin embargo, dependiendo de la superficie estos pueden disminuirse a únicamente tres; debido a que en la consideración de una superficie de tipo diferencial el parámetro λ_o , no forma parte de la ley de control ni de la superficie como tal.

Matlab

MATLAB es un software de computación numérica y visualización utilizado en áreas como ingeniería, ciencias físicas y sociales, finanzas y biología. El programa proporciona una plataforma interactiva para la resolución de problemas matemáticos, la visualización de datos y la programación de algoritmos. Es una herramienta muy utilizada en la investigación y en la industria debido a su capacidad para trabajar con grandes conjuntos de datos y realizar cálculos complejos con rapidez y precisión. También cuenta con una amplia variedad de herramientas y bibliotecas para el análisis y

procesamiento de señales, la simulación de sistemas dinámicos, la optimización y el aprendizaje automático (MathWorks, MATLAB, s.f.).

Simulink

Es una herramienta desarrollada por MathWorks que forma parte de la suite de aplicaciones Matlab y permite crear y simular modelos de sistemas complejos, incluyendo sistemas eléctricos, físicos, mecánicos, aeroespaciales, de control, procesamiento de señales y sistemas robóticos, entre otros. La programación en Simulink se realiza visualmente mediante bloques gráficos, lo que hace que la creación y modificación de modelos sea rápida e intuitiva. Además, es considerada una herramienta de alto nivel debido a su similitud con los lenguajes de programación interpretativos. Los datos obtenidos en Simulink se pueden exportar o enlazar con otros productos de Matlab para un análisis más profundo e integración con otras herramientas de análisis y diseño (MathWorks, MATLAB & Simulink - MathWorks, s.f.).

Índices de desempeño

Los índices de desempeño en automatización son medidas cuantitativas que se utilizan para evaluar y comparar el rendimiento de los sistemas de control. Estos índices pueden ser utilizados para evaluar el comportamiento de un sistema de control en relación con su respuesta en tiempo real, su capacidad para seguir una referencia o consigna, y su capacidad para rechazar perturbaciones o ruido en la entrada del sistema (J. Smith, 2022).

Entre los índices de desempeño más comunes se encuentran el ITSE (Integral del Error Cuadrático) y el TVu (Tiempo de Subida al Valor Final), que miden la precisión y rapidez de la respuesta del sistema, respectivamente. Estos índices son útiles para evaluar y comparar diferentes algoritmos de control, así como para optimizar los parámetros de un controlador en particular. Otros índices de desempeño comunes incluyen el error en estado estacionario, el tiempo de asentamiento, la oscilación o sobreimpulso, entre otros. El ITSE (Integral del Error Cuadrático) mide la suma de los errores cuadráticos de seguimiento de la variable controlada a lo largo del tiempo. Cuanto menor

sea el valor de ITSE, mejor será el rendimiento del controlador en términos de seguimiento preciso de la variable controlada (González, 2020).

$$ITSE = \sum_{k=0}^{\infty} t * (e_k)^2 \quad (21)$$

Por otro lado, el TVu (Valor Absoluto Máximo del Error) mide el valor absoluto máximo de la diferencia entre la respuesta del sistema y la referencia en un período de tiempo determinado. Un valor menor de TVu indica una mejor capacidad del controlador para seguir la referencia sin grandes desviaciones.

$$TV_u = \sum_{k=1}^{\infty} |u_{k+1} - u_k| \quad (22)$$

Capítulo III

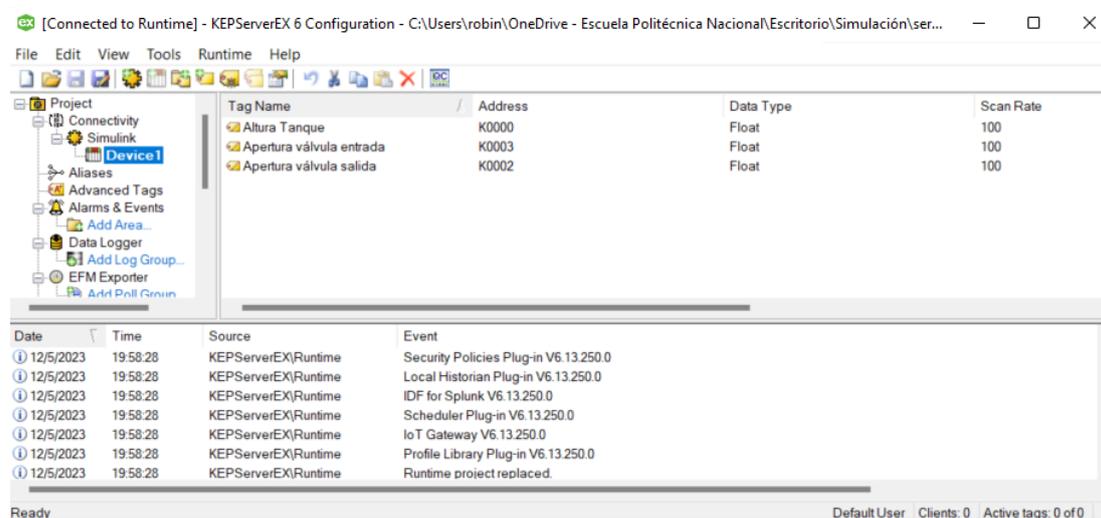
Diseño del sistema

Conexión OPC

La conexión OPC KepServer se ha usado como protocolo de comunicación para la integración de diferentes dispositivos y que permitan el intercambio de datos en tiempo real.

Figura 7.

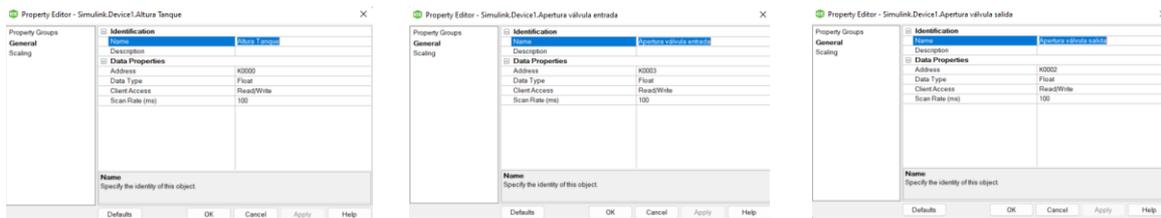
Conexión OPC KEPServer dispositivos



La figura 7 representa el diagrama de conexión OPC ha sido implementado utilizando un servidor OPC y representa la integración de dos softwares industriales: FactoryIO y Simulink. El objetivo de esta conexión es lograr la integración de ambos sistemas y permitir la comunicación entre ellos. En este proceso, se han considerado variables como la altura del tanque, la apertura de la válvula y la apertura de salida. Estas variables se han configurado en modo de lectura y escritura, lo que facilita tanto la visualización en tiempo real de los datos como la posibilidad de modificarlos y enviar nuevas consignas al sistema.

Figura 8.

Propiedades de las variables del dispositivo.



En la figura 8 se presenta la configuración de las variables del dispositivo, considerando todas aquellas de tipo FLOAT en modo read/write, lo cual posibilita el intercambio bidireccional de datos para la comunicación entre los softwares. Dichas variables incluyen la altura del tanque, la apertura de la válvula de entrada y la apertura de la válvula de salida, las cuales son utilizadas para el control del tanque presente en FactoryIO.

Figura 9.

Conexión OPC KEPServer

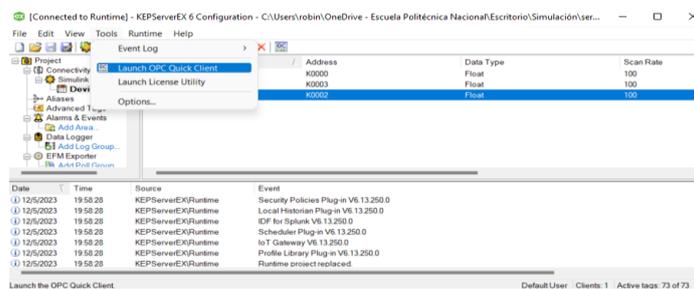
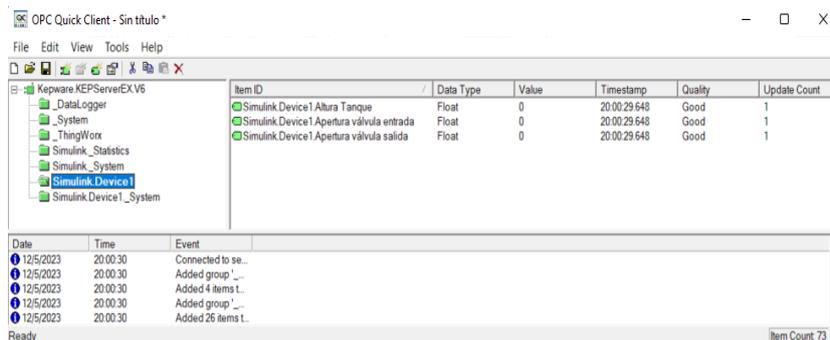


Figura 10.

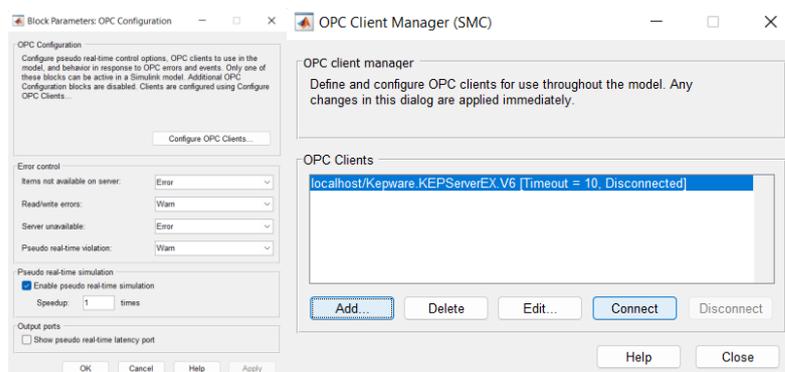
OPC Quick Client



En la figura 10 se muestran las variables que han sido configuradas como dispositivos en Simulink utilizando el OPC Quick Client. Este cliente permite visualizar el estado de la comunicación entre Simulink y FactoryIO, además de mostrar los valores de tipo float que se leen en Simulink.

Figura 11.

Configuración de parámetros OPC



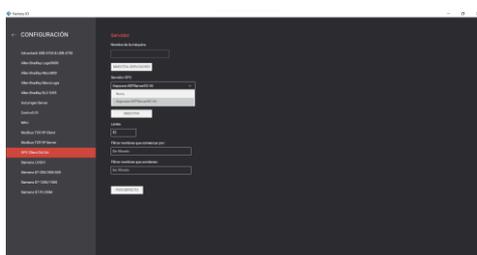
En la figura 11 se visualiza la selección de parámetros para la conexión entre los softwares Simulink y FactoryIO.

Software FactoryIO

Se ha utilizado el tanque de llenado disponible en FactoryIO como punto de partida para modelar la planta y realizar su posterior control. Esta decisión se tomó debido a que el tanque de llenado ofrece una plataforma eficiente para implementar algoritmos de control y realizar pruebas en entornos virtuales.

Figura 12.

Conexión OPC con KEPServer en factoryIO



En la figura 12 se presenta la selección del servidor OPC que permite establecer la comunicación con el OPC client, facilitando así la operación de lectura/escritura con Simulink.

Figura 13.

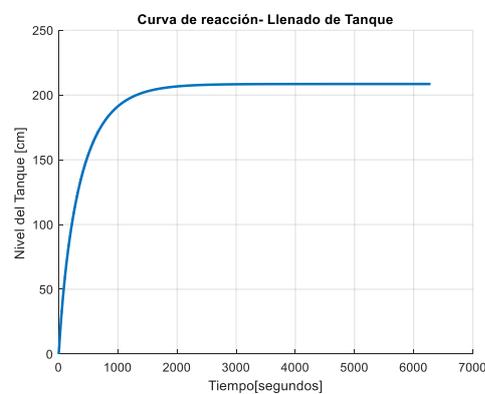
FactoryIO conexión OPC cliente en los sensores y actuadores

Curva de reacción del llenado del tanque Simulink – FactoryIO

La curva de reacción del llenado del tanque en la configuración Simulink-FactoryIO representa gráficamente el comportamiento del nivel del líquido en el tanque a lo largo del tiempo. Esta curva se obtiene mediante la simulación de la planta en un lazo abierto utilizando los softwares de simulación Simulink y FactoryIO.

Figura 15.

Curva de reacción del tanque de llenado



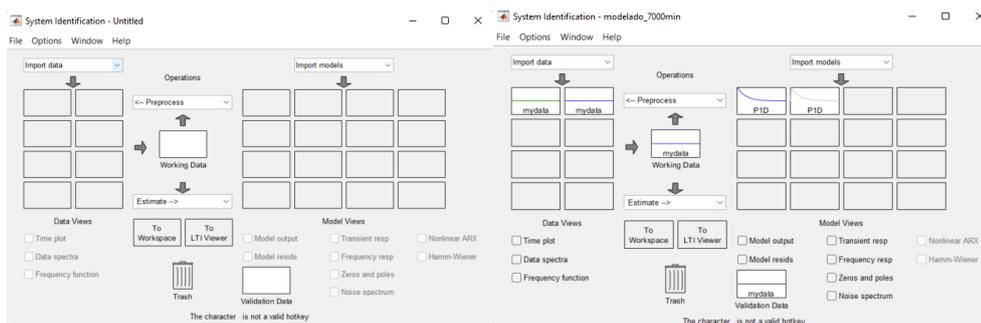
Durante la simulación, se establecen los parámetros de operación y se simula el comportamiento del tanque en un entorno virtual en el software FactoryIO. Los sensores capturan el nivel de líquido en el tanque y lo transmiten al software Simulink para su posterior análisis.

A partir de los datos obtenidos durante la simulación, se genera la curva de reacción del llenado del tanque, que muestra cómo varía el nivel del líquido en función del tiempo. Esta curva permite evaluar el comportamiento para posteriormente obtener su modelo con tiempo muerto.

Identificación de la planta y modelado

Figura 16.

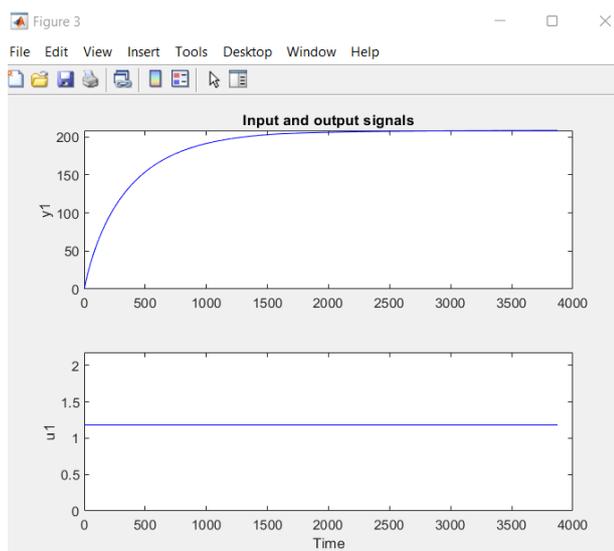
Función IDENT matlab pra el modelado de la planta



En la figura 16 se visualiza el sistema de identificación ident de Matlab a través del cual se importan los datos para obtener el modelo de la planta luego de la visualización y simulación de su comportamiento de lazo abierto en un determinado tiempo.

Figura 17.

Grafico de comportamiento de la válvula de entrada y salida



En la gráfica 17 se puede visualizar el comportamiento de la válvula de entrada denominada y_1 en función del tiempo, mientras que como u_1 se visualiza la válvula de salida en función del tiempo. Es considerable que la válvula de salida se estableció a una apertura de 1v, tomando en consideración que la misma puede estar de 0 a 10 voltios. Esto permite desarrollar el comportamiento de la planta para obtener su modelado.

Modelo de la planta tanque de llenado FactoryIO

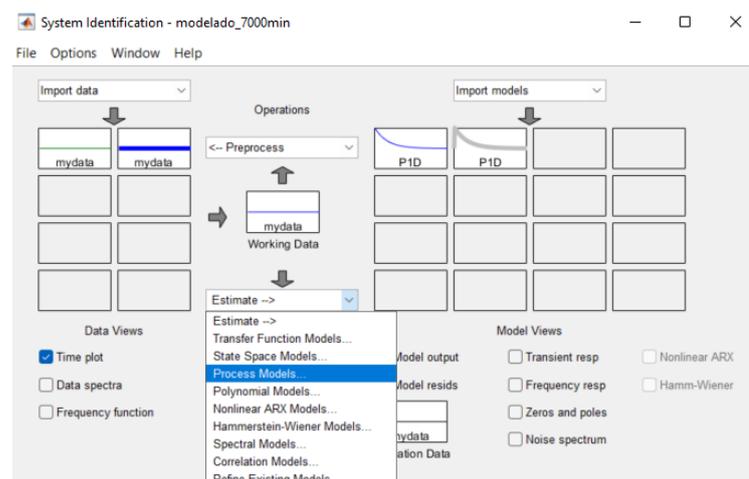
Para obtener el modelo matemático de la planta en MATLAB, se puede emplear la herramienta de identificación de sistemas. Esta herramienta permite llevar a cabo experimentos con la planta real o con un modelo de simulación, y mediante la recopilación de los datos de entrada y salida, identificar el modelo matemático que mejor se ajuste al comportamiento de la planta.

El proceso de identificación del modelo se lleva a cabo siguiendo una serie de pasos. En primer lugar, se deben recopilar los datos de la planta mediante la realización de experimentos y registrar los datos de entrada y salida de la planta. Luego, se importan los datos a MATLAB en un formato compatible con la herramienta de identificación de sistemas.

Una vez que los datos han sido importados, se selecciona el tipo de modelo que mejor se ajuste a las características de la planta y de los datos recopilados. Existen diferentes tipos de modelos disponibles, tales como modelos lineales, no lineales, ARX, ARMAX, entre otros.

Figura 18.

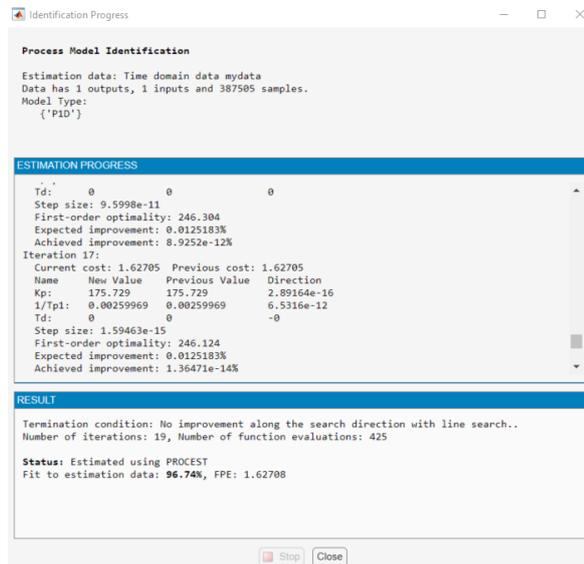
Modelado de la planta



En la figura 18 se configuran los parámetros de la herramienta de identificación de sistemas en función del tipo de modelo seleccionado y de los datos recopilados. Una vez que la herramienta ha sido configurada, se procede a la identificación del modelo mediante el análisis de los datos recopilados

Figura 19.

Estimación de la identificación del modelo de la planta.

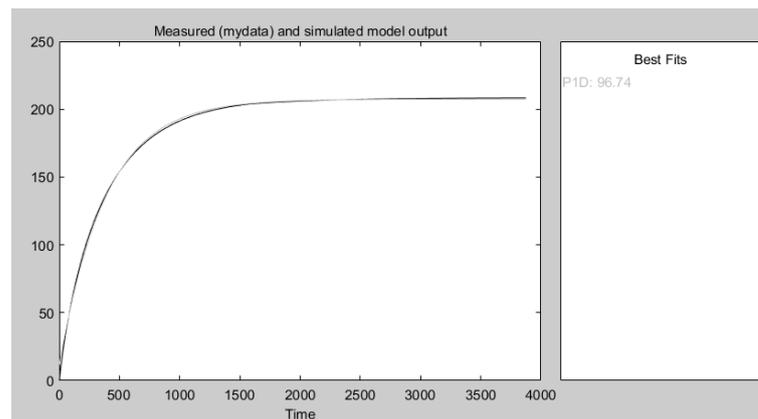


En la figura 19 se detalla el porcentaje de estimación de la planta, para el modelado de esta.

En la que se puede visualizar que tenemos un 96,74% de confianza, para lo cual el modelo a tomar será considerado para la posterior ejecución de los modelos de control de SMS Y PID.

Figura 20.

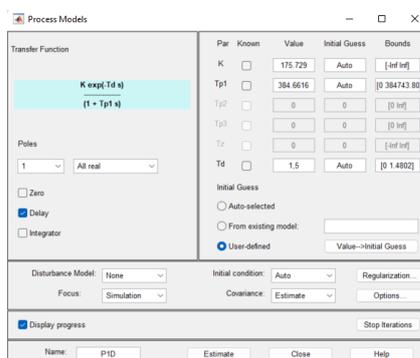
Curva de reacción del modelo identificado



En la figura 20 se muestra la curva de reacción del modelo indenticado al 96,74% de confianza el mismo que será utilizado para la posterior ejecución del controlador y selección del optimo para el modelo.

Figura 21.

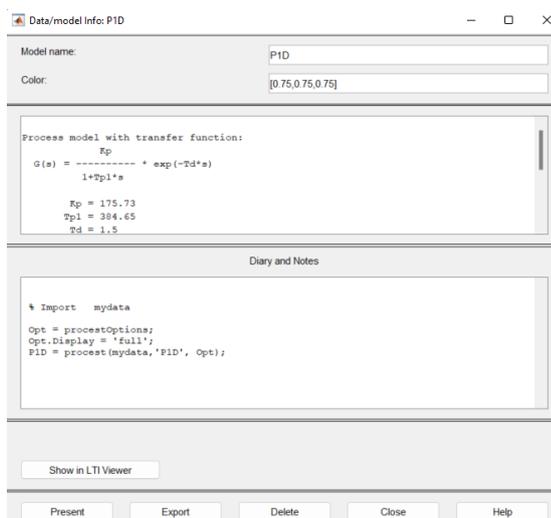
Modelo del proceso



En la figura 21 se muestran los valores estimados necesarios para obtener la función de transferencia con tiempo muerto. Estos valores se obtienen a partir del comportamiento de la planta en lazo abierto, el cual no ha permitido determinar la forma de comportarse de la planta de manera precisa. Es por eso que se han realizado estimaciones basadas en los datos disponibles para poder obtener la función de transferencia con tiempo muerto. Es importante destacar que estas estimaciones tienen un margen de error y que los valores finales de la función de transferencia pueden variar en función de los datos reales de la planta.

Figura 22.

Datos del modelo para determinar la función de transferencia.



En la figura 22 se observa los datos para determinar la función de transferencia de la cual se reemplaza los valores en la ecuación 3 para obtener la función del modelo de la planta con tiempo muerto.

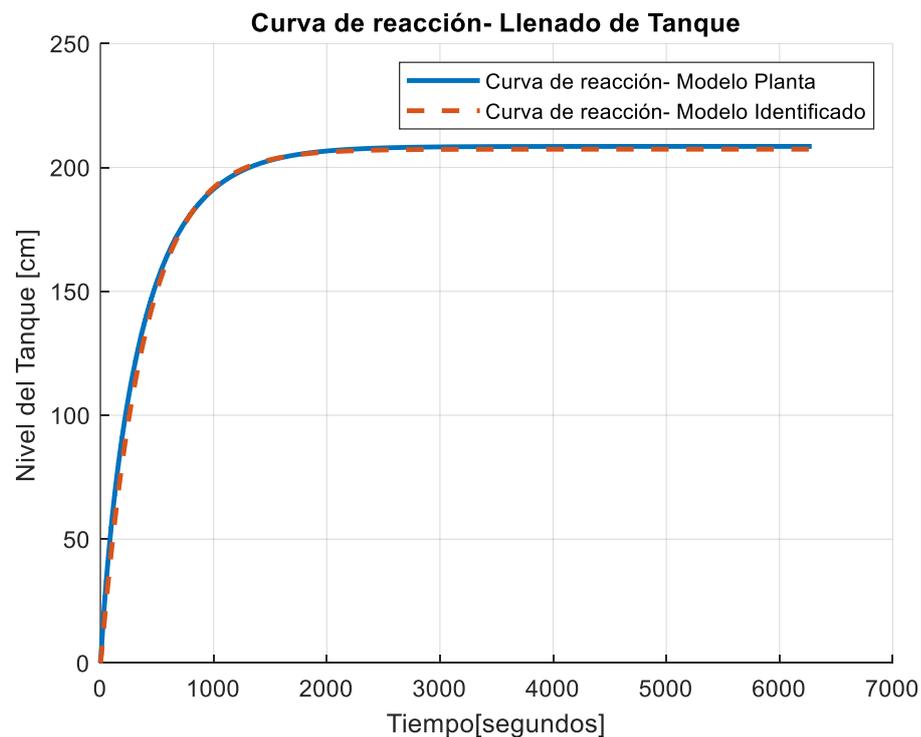
$$G_p = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_o s} \quad (23)$$

$$G_p = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{175.729}{384.6616s + 1} e^{-1.5s}$$

En la ecuación (23) se detalla la función de transferencia del modelo de la planta del tanque de llenado de FactoryIO.

Figura 23.

Curva de reacción modelo de planta vs modelo identificado



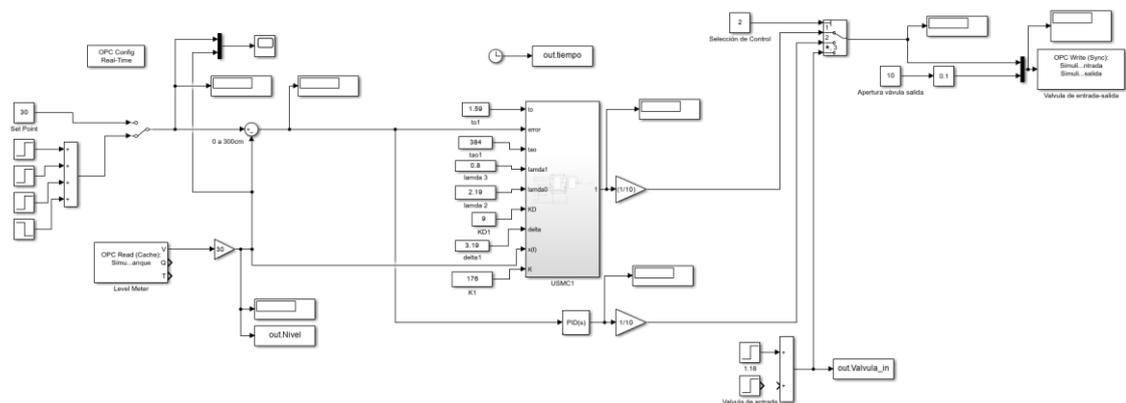
En la figura 23 se puede visualizar la curva de reacción del modelo de la planta en lazo abierto y el modelo de la planta indentificada, en la cual se puede visualizar que su comportamiento es similar.

Diseño de controladores en Simulink

El diseño de los controladores en Simulink de un tanque de llenado con tiempo muerto implica la utilización de herramientas de control y simulación para obtener un controlador óptimo que permita controlar el nivel del líquido en el tanque.

Figura 24.

Diseño de controladores PID/SMC en simulink

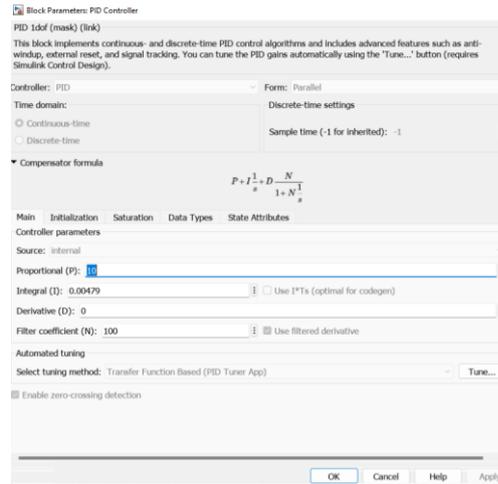


La figura 24 presenta el diseño global del controlador PID y SMC junto con las perturbaciones correspondientes. Esta figura será objeto de análisis detallado en los próximos puntos del proyecto, donde se brindará información relevante acerca de los distintos componentes y parámetros de los controladores, así como de la naturaleza y características de las perturbaciones que se presentan en el sistema.

Diseño de controlador del PID

Figura 25.

Control PID para el modelo de tanque de llenado con tiempo muerto



En la figura 25 se muestra las variables a configurar tras la sintonización acorde al comportamiento de la planta con el objetivo que el mismo presente una respuesta optima a las perturbaciones que se ejecutaran e la planta.

$$K_p = 1.2 \frac{\tau}{KL} \quad (24)$$

$$K_p = 1.2 \frac{584.6616}{56.729 * 1.5} = 1.751158204$$

$$T_i = 2L \quad (25)$$

$$T_i = 2(1.5) = 3$$

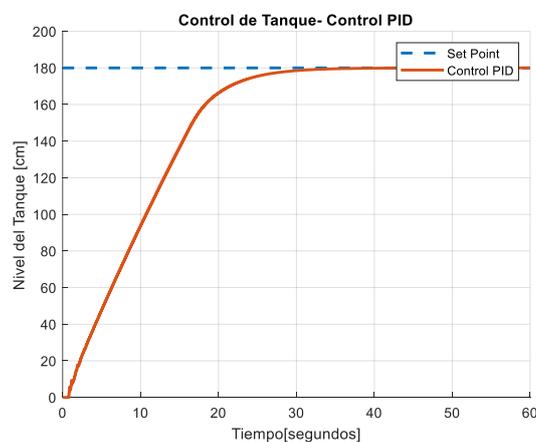
$$T_d = 0.5 L \quad (26)$$

$$T_d = 0.5 (1.5) = 0,75$$

A continuación, podemos observar el comportamiento del control PID acorde al modelo:

Figura 26.

Control de tanque - controlador PID



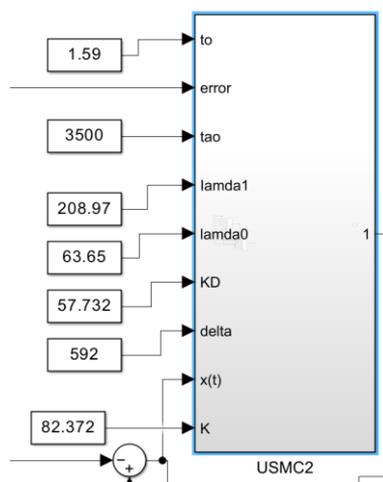
En la figura 26 se muestra la respuesta al lazo de control PID en la que se puede visualizar a la estabilidad del proceso después de un tiempo aproximado a 38 segundo lo que muestra una respuesta óptima para el tiempo de proceso que es llenado de un tanque.

Diseño de controlador SMC

El controlador SMC se basa en la aplicación de una función de conmutación que permite forzar el sistema a seguir una trayectoria predeterminada, eliminando así los efectos del tiempo muerto. Además, se agregó una función de deslizamiento que permitió mejorar la precisión del controlador y reducir el efecto de perturbaciones externas.

Figura 27.

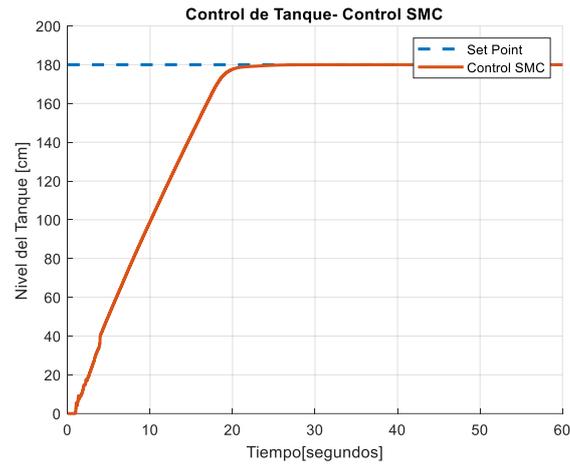
Control SMC



En la figura 27 En el desarrollo del proyecto se ha creado un subsistema específico para cada uno de los controladores, en el cual se ha incluido un diagrama de bloques con las consideraciones relevantes para cada caso, como la selección de la superficie de deslizamiento, los parámetros del modelo aproximado utilizado y las variables de sintonización empleadas. En cuanto al controlador SMC, el bloque correspondiente cuenta con una lógica de programación visual interna que permite una visión global del subsistema, el cual se encuentra tomado de una librería.

Figura 28.

Curva de comportamiento control SMC



En la figura 28 se observa el comportamiento de la curva de controlador SMC en la cual se muestra un acercamiento a un estado estable a partir del segundo 24 aproximadamente, acorde al comportamiento de la planta simulada en FactoryIO.

Cálculo de valores SMC superficie integral

$$\lambda_o[\text{Tiempo}^{-1}] \leq \frac{\lambda_1^2}{4} \quad (27)$$

$$\lambda_o[\text{Tiempo}^{-1}] \leq \frac{0.669^2}{4} = 0.11197$$

$$\lambda_1[\text{Tiempo}^{-2}] = \frac{\tau_m + t_o}{\tau_m t_o} \quad (28)$$

$$\lambda_1[\text{Tiempo}^{-2}] = \frac{384.66 + 1,5}{384.66 * 1,5} = 0,696 * 300 = 208.8$$

$$K_d[\text{pu}] = \frac{0.51}{|K_m|} \left(\frac{\tau_m}{t_o} \right)^{0.76} \quad (29)$$

$$K_d[\text{pu}] = \frac{0.51}{|82.372|} \left(\frac{384.66}{1.5} \right)^{0.76} = 0.1966 * 300 = 574.266$$

$$\delta \left[\frac{\text{pu}}{\text{Tiempo}} \right] = 0.68 + 0.12 |K_m| K_d \lambda_1 \quad (30)$$

$$\delta \left[\frac{\text{pu}}{\text{Tiempo}} \right] = 0.68 + 0.12 * |82.372| * 0.1966 * 0.669 = 1.914$$

Cálculo de índices de desempeño ITSE y TVu

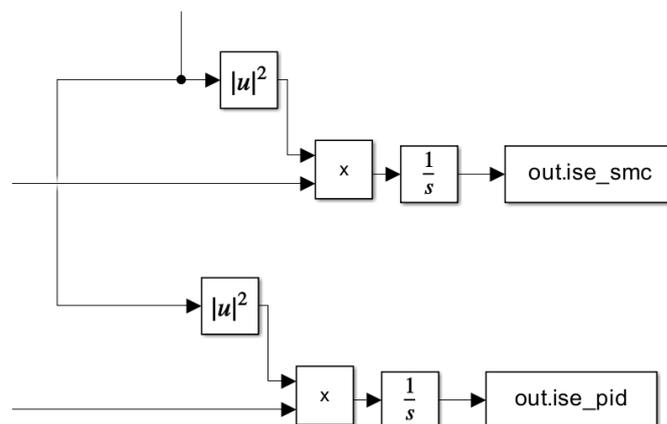
Índice de desempeño ITSE

Es una medida del tiempo que un sistema de control tarda en alcanzar su estado estable y la magnitud de la oscilación antes de alcanzar ese estado.

En términos generales, el ITSE se utiliza para evaluar y comparar diferentes controladores y para ajustar los parámetros del controlador para mejorar el desempeño del sistema de control. Un valor más bajo de ITSE indica un mejor desempeño del controlador, ya que implica una respuesta más rápida y estable del sistema de control.

Figura 29.

Índice de desempeño ITSE



En la Figura 29 se observa la integración de los bloques en Simulink, debido a la versatilidad, facilidad y rapidez que brinda este entorno para el cálculo del índice de desempeño en distintos comportamientos de la planta y modos de funcionamiento. Los valores obtenidos se almacenan en "out.smc y out.pid" según el tipo de simulación y controlador que se esté llevando a cabo. Esta está acorde a la Ecuación (21) de la fórmula de cálculo del ITSE.

Índice de desempeño TVu

El índice de desempeño TVu es un indicador importante para evaluar la calidad del controlador utilizado en un sistema. Este índice mide el esfuerzo de control requerido por el

controlador en un intervalo de tiempo específico. Para calcular el índice de desempeño TVu de manera más eficiente y precisa, se ha desarrollado un código en Matlab que utiliza las variables almacenadas en la matriz principal. Este código invierte la matriz para obtener la integral del valor, lo que permite determinar el área bajo la curva y, por ende, el desempeño del sistema. Con esta técnica se acelera el proceso de cálculo y se obtiene un resultado con mayor índice de precisión.

```
Signal=out.salida_pid;  
[n, m]=size(Signal);  
T=zeros(n-1,m);  
for i=1:n-1  
T(i,1)=abs(Signal(i+1,1)-Signal(i,1));  
end  
TVu_pid1=sum(T)
```

Capítulo IV

Pruebas y resultados

Prueba de seguimiento

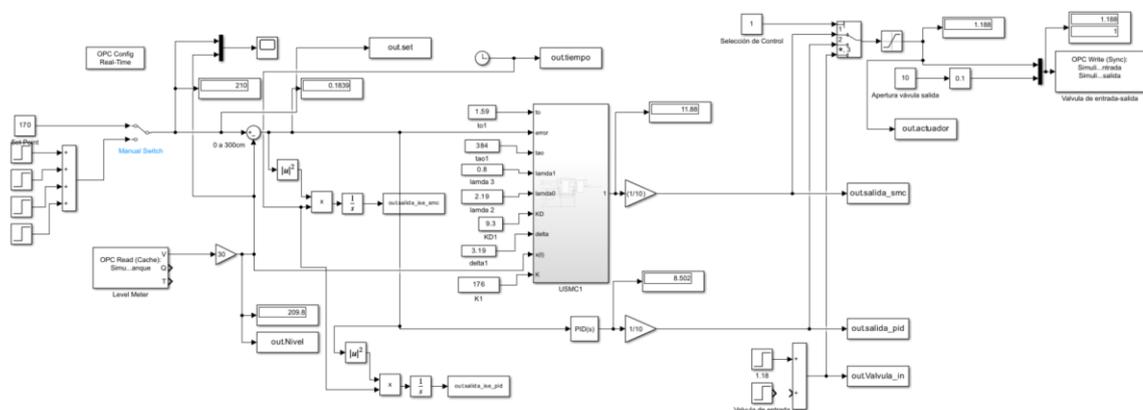
Se realizó una prueba de seguimiento en el sistema de control debido a que permite analizar la capacidad del controlador para seguir una referencia o setpoint deseado. En este tipo de prueba se introduce un cambio en la señal de referencia y se observa la respuesta del sistema para determinar si el controlador es capaz de seguir adecuadamente la trayectoria deseada. La prueba de seguimiento es útil para evaluar la precisión y la capacidad de respuesta del sistema de control en tiempo real.

Resultados controladores SMC

A continuación, se muestra el análisis y síntesis realizada al control SMC.

Figura 30.

Conexión simulink controlador SMC

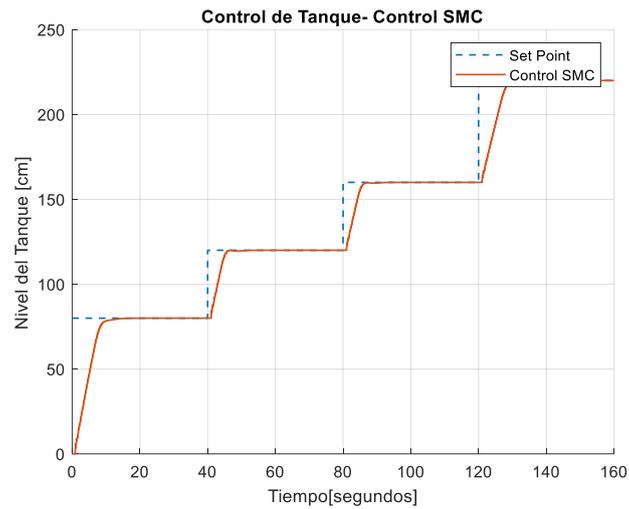


En la figura 30 se presenta el diagrama de bloques diseñado en Simulink para implementar los controladores SMC y PID en el sistema de control. La figura muestra los bloques principales de cada controlador, así como las señales de entrada y salida necesarias para su correcto funcionamiento. También se pueden observar bloques adicionales, como los encargados de la medición de variables del proceso y los bloques de representación gráfica para el monitoreo y

análisis de los resultados. Esta gráfica de bloques permite una visualización clara y detallada del sistema de control implementado y facilita la identificación de posibles problemas o áreas de mejora.

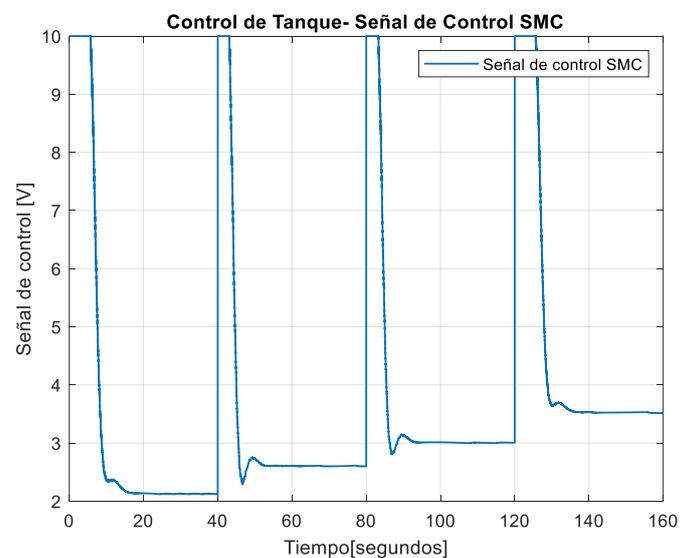
Figura 31.

Curva de reacción controlador SMC en función del tiempo



En la figura 31 se muestra el comportamiento del controlador SMC. El sistema logra alcanzar su estado estable. Además, es posible observar los tiempos de reacción del controlador y su forma de comportamiento.

Figura 32 Señal de control SMC válvula de entrada



En la figura 32 se observa la forma en que la válvula de llenado del tanque se comporta en función del modelo proporcionado por FactoryIO, el cual va de 0 a 10 voltios. Se puede apreciar que la forma de comportamiento es suave y se ajusta al funcionamiento de la simulación.

Índices de desempeño SMC

Tabla 3.

Resultados índices de desempeños ITSE y TVu en el controlador SMC

Índice de desempeño	Valor
TVu	89.9767
ITSE	1.9251e+06

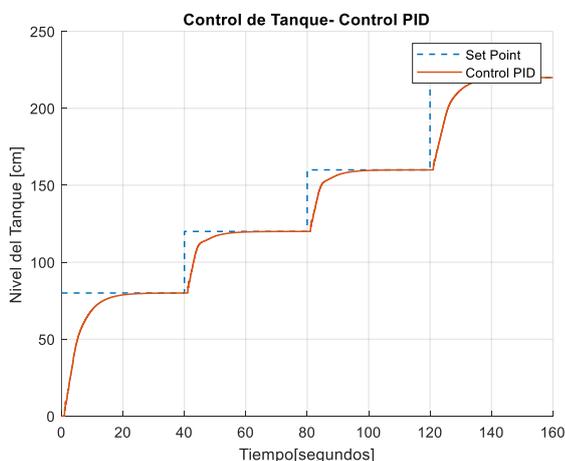
En la tabla 5 se muestra los índices de desempeño obtenidos tras la simulación en la cual se puede evidenciar que el TVu del sistema tiene un valor de 89.9767, así también se ha obtenido el índice de desempeño ITSE en el cual se puede observar que tiene un valor de 1.9251e+06 estos valores no muestran en la comparativa posterior cuál de los sistemas tiene un mejor rendimiento.

Resultados controlador PID

A continuación, se presenta el análisis y la síntesis que se llevó a cabo en el diseño del controlador PID. Se describen las diferentes etapas del proceso y se explican las gráficas tomadas en cada una de ellas para lograr un control óptimo del sistema

Figura 33.

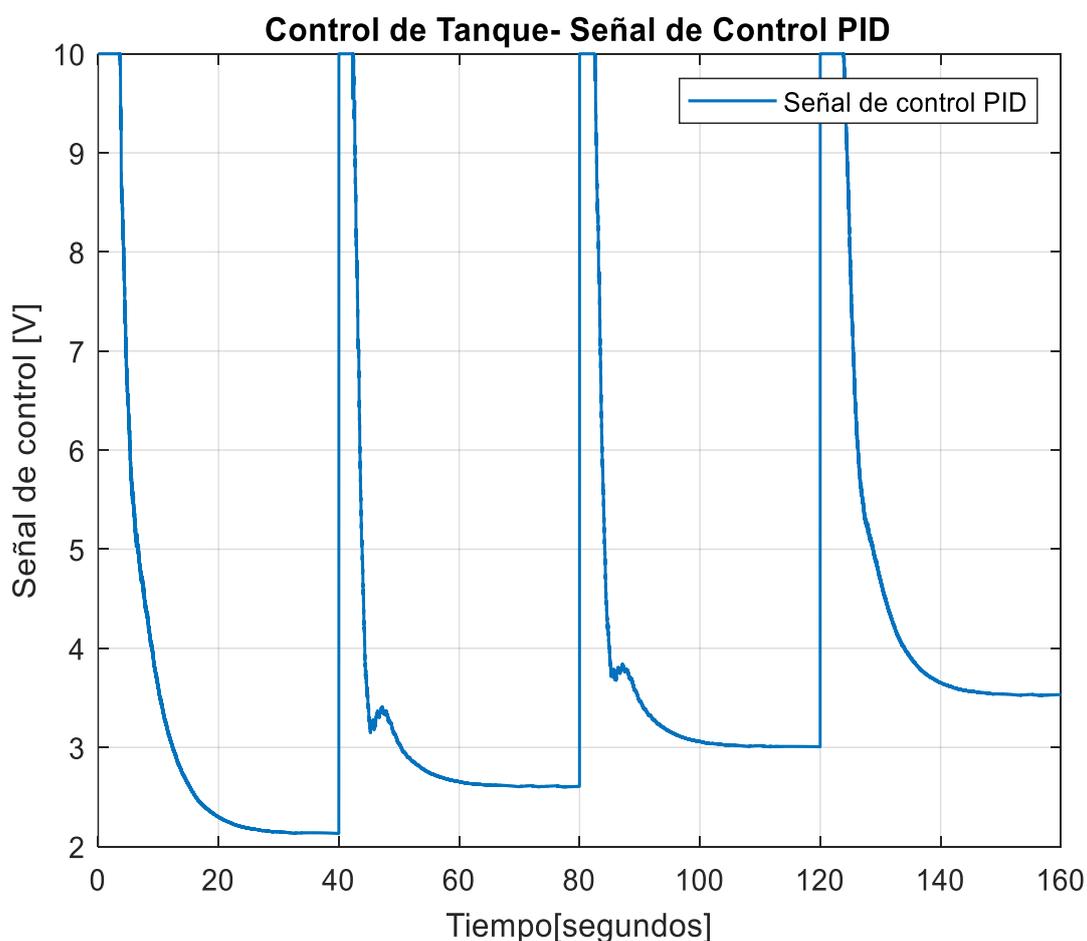
Curva de reacción controlador PID en función del tiempo



En la figura 33 muestra el comportamiento del controlador PID, éste logra alcanzar su estado estable. Además, es posible observar los tiempos de reacción del controlador y su forma de comportamiento, lo que permite analizar el desempeño del controlador en términos de su respuesta y estabilidad.

Figura 34.

Señal de control PID válvula de entrada



En la figura 34 se observa el comportamiento de la válvula de llenado del tanque en función del modelo proporcionado por FactoryIO, que varía de 0 a 10 voltios. Es evidente que la forma de comportamiento de la válvula es suave y se adapta bien al funcionamiento de la simulación, lo que permite un llenado adecuado del tanque. La suavidad del comportamiento de la válvula es una

característica importante, ya que permite evitar oscilaciones bruscas que podrían afectar el funcionamiento del sistema.

Índices de desempeño control PID

Tabla 4.

Resultado índices de desempeños ITSE y TVu en el controlador PID

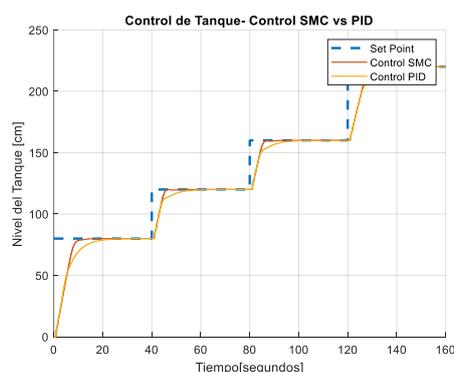
Índice de desempeño	Valor
TVu	133.7497
ITSE	2.0442e+06

En la Tabla 6 se encuentra los resultados de la simulación del controlador PID, donde se muestran los valores de los índices de desempeño obtenidos. El TVu del sistema se observa que alcanza un valor de 133.7497. Además, se calculó el índice de desempeño ITS, el cual presenta un valor de 2.0442e+06. Estos valores permiten posteriormente en la comparativa evaluar el esfuerzo de control requerido por el controlador en el tiempo y su capacidad para alcanzar el estado estable en el menor tiempo posible como se muestra en la Tabla 9.

Resultados controlador PID vs SMC

Los resultados obtenidos de la simulación y comparación entre los controladores PID y SMC en términos generales, se puede observar que ambos controladores logran alcanzar el estado estable del sistema, pero existen diferencias en cuanto a los valores de los índices de desempeño.

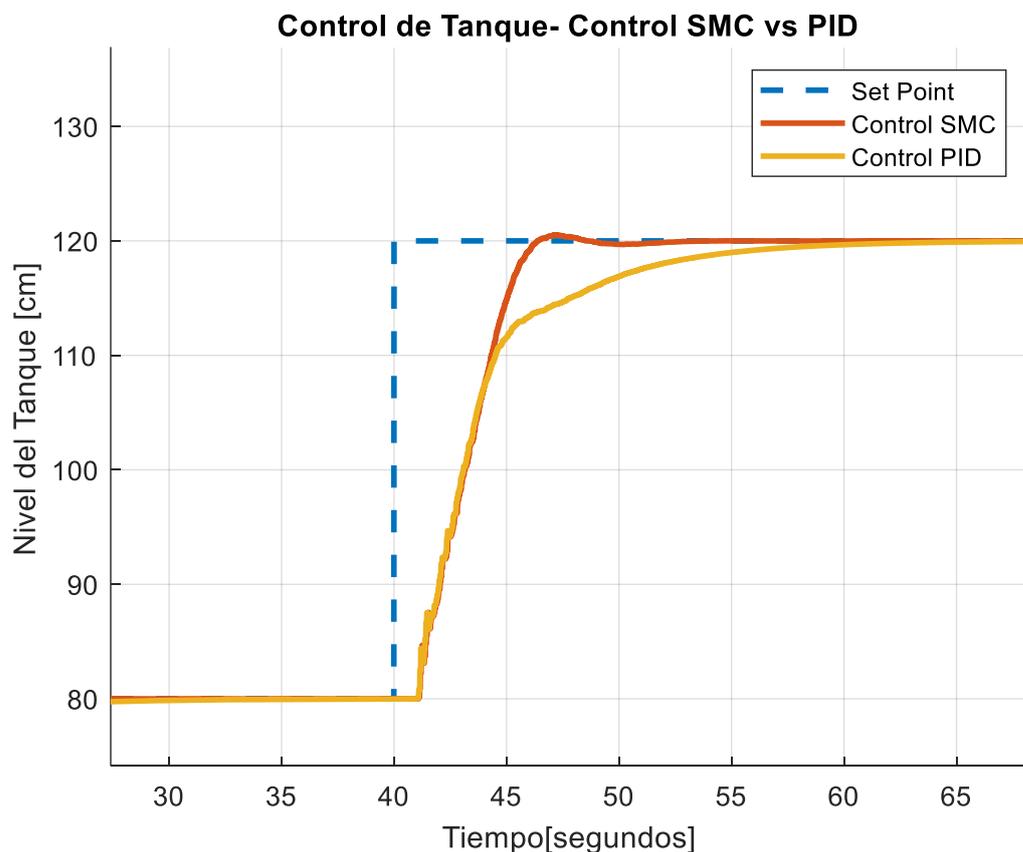
Figura 35 Curva de reacción comparación PID vs SMC



En la figura 35 se observa que durante la simulación y comparación de los controladores PID y SMC, se obtuvieron resultados que permiten observar de manera general que ambos controladores son capaces de llevar el sistema a su estado estable. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas en cuanto a los valores de los índices de desempeño obtenidos. Es importante mencionar que el comportamiento del SMC mostró ser más robusto en comparación con el PID.

Figura 36.

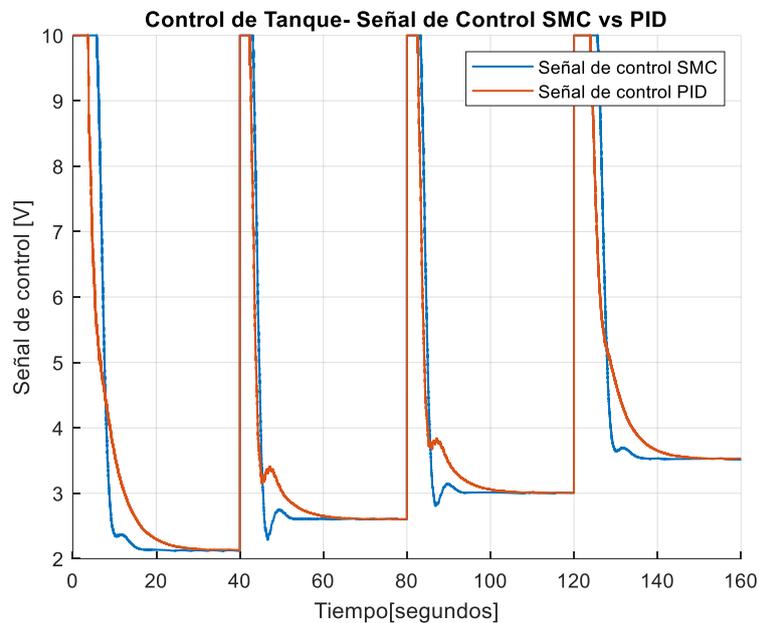
Curva de reacción comparación PID vs SMC acercamiento visual



En la figura 36 se presenta una visualización detallada de la respuesta del controlador SMC en comparación con el controlador PID en términos de tiempo de establecimiento. Se puede observar que el controlador SMC logra alcanzar el estado estable del sistema más rápidamente que el controlador PID. Este resultado sugiere que el controlador SMC tiene un mejor desempeño en

términos de velocidad de respuesta y capacidad de seguimiento de referencia en comparación con el controlador PID.

Figura 37 Señal de control del actuador SMC vs PID



En la figura 37, se aprecia que el controlador SMC muestra una respuesta más rápida y estable en comparación con el controlador PID. Se observa que el PID presenta oscilaciones antes de alcanzar su estado estable, mientras que el SMC logra mantenerse en estado estable sin oscilaciones notables.

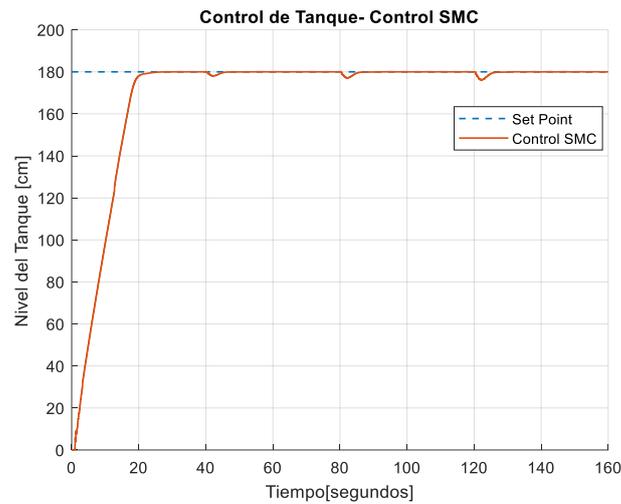
Prueba de regulación

Se realizó una prueba de regulación en el sistema de control, se llevó a cabo un procedimiento experimental para evaluar la capacidad de un sistema de control para mantener una variable de interés dentro de un rango deseado de valores, es decir, regularla. Esta prueba incluye en la aplicación de perturbaciones al sistema y la medición de la respuesta del controlador para ajustar los parámetros y mejorar su desempeño en la tarea de regulación. El objetivo final de la prueba es verificar la eficacia del sistema de control en la regulación de la variable deseada.

Controlador SMC

Figura 38.

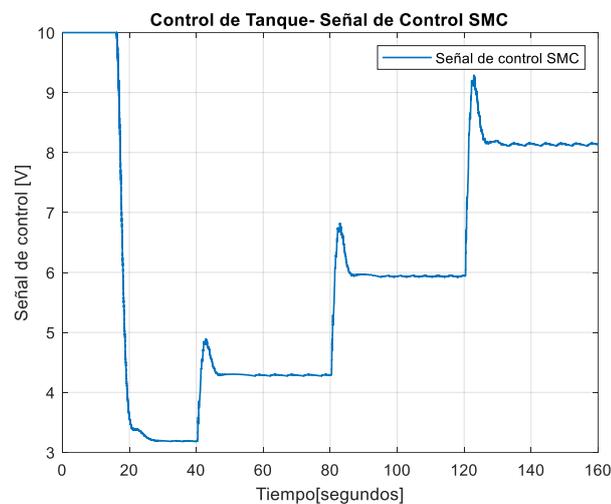
Gráfica de control con una variación 10% en la válvula de salida SMC



En la figura 38 se observa que el sistema activa su lazo de control para mantener la señal de entrada en el SetPoint, sin embargo, se observa cierta fluctuación en la salida debido a la apertura de la válvula. Es importante destacar que al tratarse de una válvula con una variación del 10% en su rango de apertura (0 a 10), para el último paso de la prueba la válvula de salida estaría cerca de alcanzar su nivel medio de apertura. Esto puede influir en la regulación del sistema y en la precisión de la respuesta del controlador.

Figura 39.

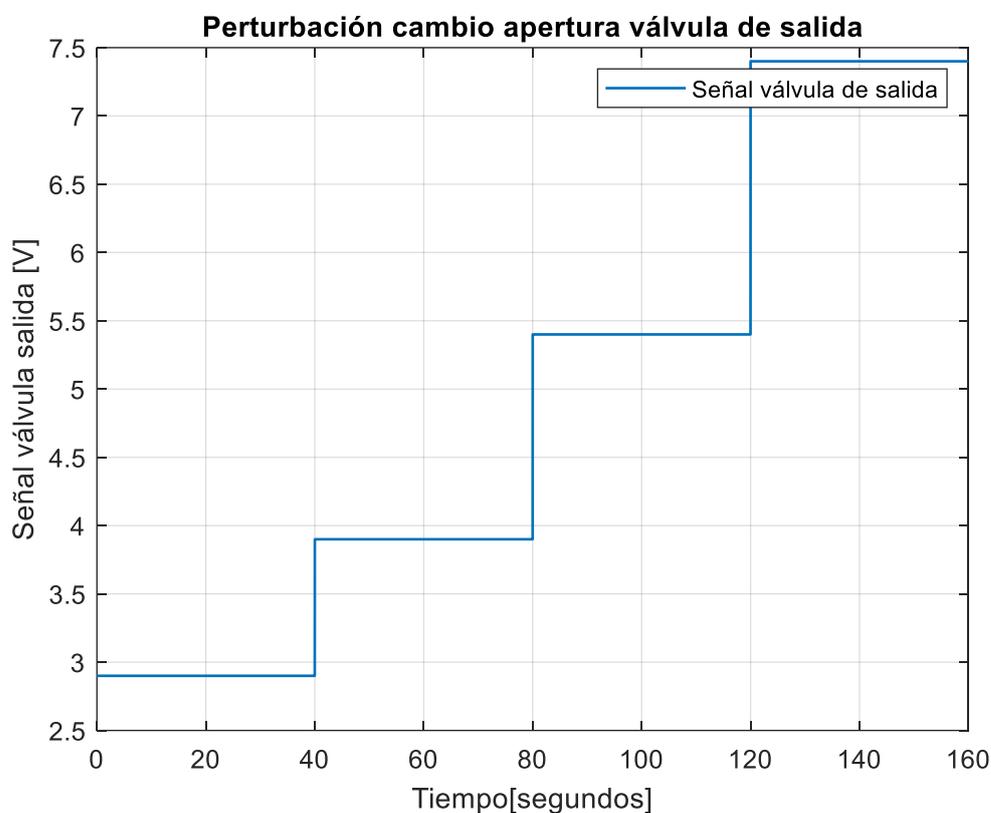
Gráfica del actuador - control con una variación 10% en la válvula de salida



En la gráfica 39 se aprecia el comportamiento del actuador de la válvula de salida, en el que se observa una tendencia hacia su estado estable, pero con una leve fluctuación debido a la respuesta del controlador. Esta fluctuación puede deberse a diversos factores como el tiempo de retardo de la válvula o la precisión del sensor utilizado para medir la posición de la válvula. En general, la gráfica muestra un comportamiento adecuado del actuador y una tendencia hacia su estado estable.

Figura 40.

Señal de la válvula de salida con una perturbación del 10% SMC



En la figura 40 se observa con mayor detalle el comportamiento de la válvula de salida en respuesta a la aplicación de funciones escalón para generar una perturbación del 10% en el sistema. La gráfica muestra cómo la válvula responde a las perturbaciones en el sistema.

Tabla 5.

Índice de desempeño controlador SMC prueba de regulación

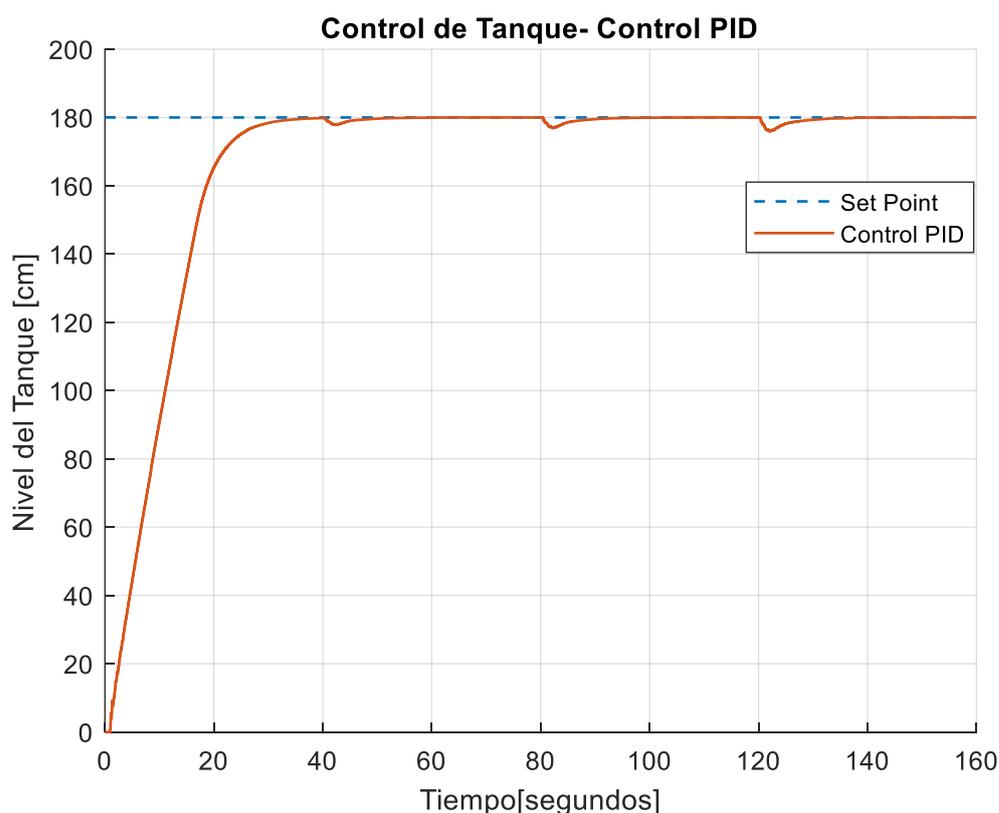
Índice de desempeño	Valor
TVu	42.2665
ITSE	9.2069e+05

En la tabla 7 se pueden observar los resultados de la simulación del controlador PID, donde se presentan los valores de los índices de desempeño obtenidos. Se puede observar que el TVu del sistema alcanza un valor de 42.2665. Además, se calculó el índice de desempeño ITSE, que muestra un valor de 9.2069e+05. Estos valores son de gran importancia para evaluar el esfuerzo de control requerido por el controlador en un lapso de tiempo determinado, así como su capacidad para lograr el estado estable de forma rápida y eficiente.

Controlador PID

Figura 41.

Gráfica de control con una variación 10% en la válvula de salida PID

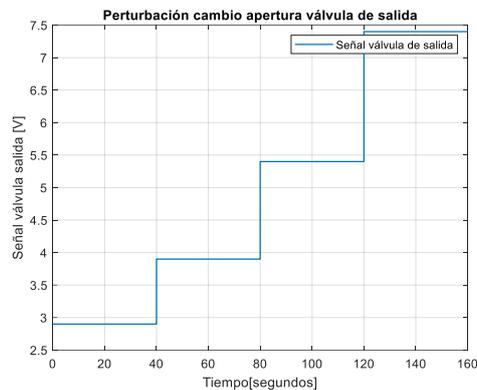


En la gráfica 41 se muestra claramente la respuesta del controlador PID ante una perturbación de tipo escalón en la válvula de salida. Se puede apreciar cómo la línea de control

presenta una estabilidad significativa en el sistema, el sistema de control sufre ciertos cambios acorde a las variaciones en tiempo sin embargo su forma de compensación actúa de inmediato.

Figura 42.

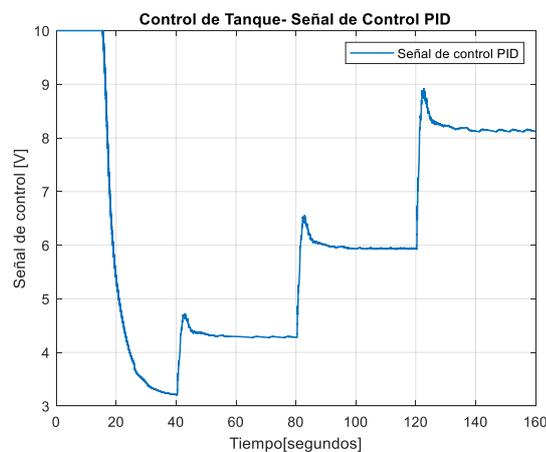
Señal de la válvula de salida con una perturbación del 10% PID



En la figura 42 se muestra un análisis minucioso del comportamiento de la válvula de salida ante la aplicación de funciones escalón que ocasionan una perturbación del 10% en el sistema. La gráfica facilita la visualización de cómo la válvula responde a las perturbaciones en el sistema y evidencia un comportamiento más estable y preciso en comparación con pruebas anteriores.

Figura 43.

Gráfica del actuador - control con una variación 10% en la válvula de salida PID



En la gráfica 43 se observa el comportamiento del control PID ante una perturbación en la válvula de salida. Se aprecia una oscilación que frena al sistema alcanzar su estado estable, lo que se

traduce en un desempeño deficiente del controlador. Esto se debe a que la perturbación provoca un cambio en el comportamiento de la planta, lo que afecta la capacidad del controlador para mantener la salida en el punto deseado.

Tabla 6.

índice de desempeño

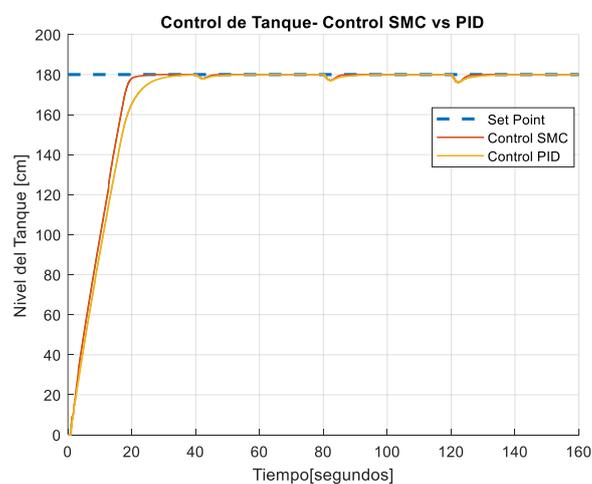
Índice de desempeño	Valor
TVu	60.6834
ITSE	1.1244e+06

La tabla 8 muestra los resultados de la simulación del controlador PID, en la cual se pueden apreciar los valores de los índices de desempeño obtenidos. En particular, se destaca que el TVu del sistema logra alcanzar un valor de 60.6834. Asimismo, se calculó el índice de desempeño ITS, que presenta un valor de 1.1244e+06. Estos resultados permiten evaluar el esfuerzo de control requerido por el controlador en un intervalo de tiempo determinado, así como su habilidad para alcanzar el estado estable de manera eficaz y en el menor tiempo posible. Es importante destacar que estos índices de desempeño son indicadores claves para la evaluación del desempeño del controlador en el posterior cuadro comparativo Tabla 9.

Comparación controlador PID vs SMC

Figura 44.

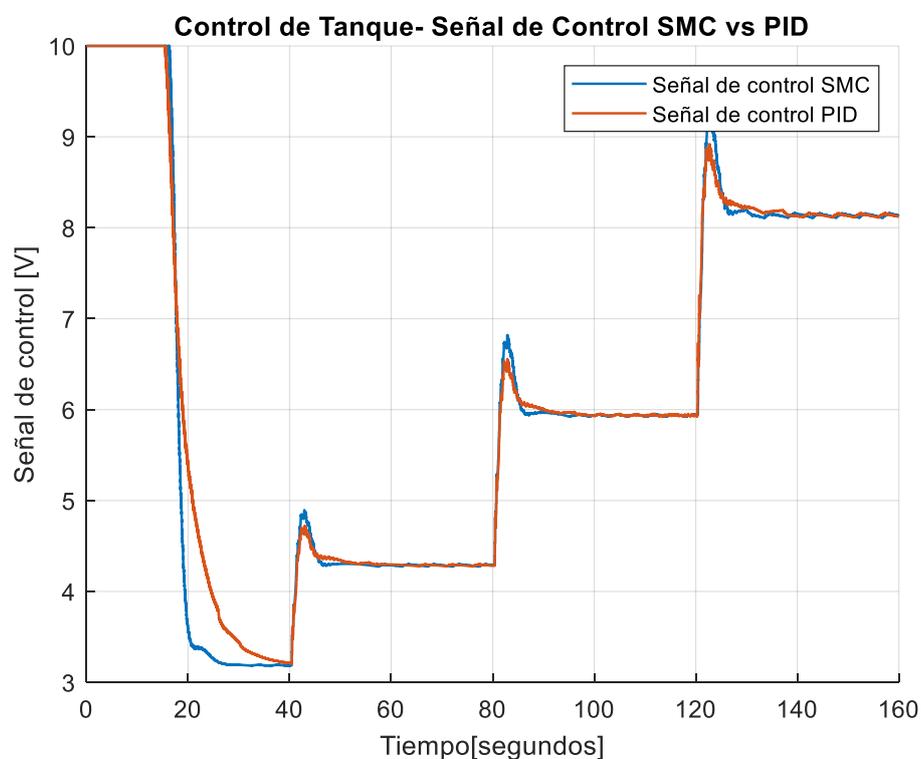
Comparación PID vs SMC prueba de regulación



La figura 44 muestra la comparación entre las respuestas de los controladores SMC y PID. Se puede notar que la respuesta más adecuada es la del controlador SMC. Además, el PID muestra una respuesta en el tiempo que se aleja de la esperada, lo que significa que su respuesta a alcanzar su estado estable aumenta con el tiempo, debido a que su retroalimentación recibe señales distintas a las previstas.

Figura 45.

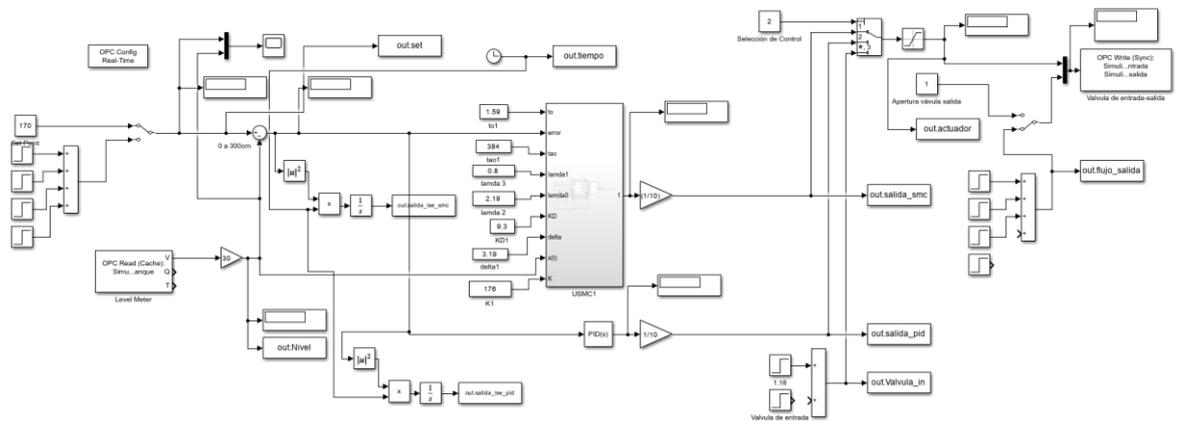
Señal de control comparación PID vs SMC prueba de regulación



La figura 45 muestra las señales de control del actuador generadas por los controladores PID y SMC. Se puede observar que el controlador SMC presenta una respuesta satisfactoria, mientras que el controlador PID presenta cambios oscilatorios bruscos que podrían llevar a una falla en el actuador si se implementara en un sistema real. Es importante tener en cuenta que el controlador SMC logra una respuesta más suave sin muchos desgastes de energía y estable en comparación con el controlador PID.

Figura 46.

Modelo de bloques simulink SMC, PID, y perturbaciones.



Cuadro comparativo de los indicadores de desempeño

Tabla 7.

Comparaciones índices de desempeño SMC vs PID

	PRUEBA DE SEGUIMIENTO			PRUEBA DE REGULACIÓN		
	PID	SMC	$I_{SMC} - I_{PID}$	PID	SMC	$I_{SMC} - I_{PID}$
TVu	1,34E+06	9,00E+05	-437.730	6,07E+05	4,23E+05	-1,84E+05
ITSE	2,04E+10	1,93E+10	-1,93E+09	1,12E+10	9,21E+09	-2,04E+09

En la Tabla 9 se muestra los índices de desempeño obtenidos para el controlador SMC y PID en la prueba de seguimiento y regulación, valores que están ligados al comportamiento de la planta y tanto el TVu como ITSE son inferiores para el control SMC por lo que presenta un mejor desempeño en términos de la variación temporal de la señal de control puesto que un valor más bajo de TVu indica una menor variación en la señal de control, lo que implica una mayor estabilidad y suavidad en el control del sistema. Además se puede decir que el controlador SMC presenta un mejor desempeño en términos del error cuadrático medio integrado (ITSE) puesto que el ITSE es un índice que evalúa el error acumulado entre la señal de referencia y la respuesta del sistema a lo largo del tiempo. Un valor más bajo de ITSE indica un menor error acumulado y, por lo tanto, un mejor seguimiento de referencia.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

La recopilación de información bibliográfica sobre la modelización de sistemas no lineales con retardo y los fundamentos del controlador en modo deslizante, proporciona una base sólida para el diseño y desarrollo de controladores eficientes para procesos industriales, lo que permite mejorar la calidad del control y la eficiencia de los procesos en general.

El diseño y sintonización de un controlador por modos deslizantes está ligado al comportamiento de los índices de desempeño ITSE y TVu. Estos índices evalúan la eficiencia del controlador en el sistema, ajustar adecuadamente el controlador con base en estos índices fue esencial para lograr una respuesta óptima, estabilidad y rechazo a perturbaciones en el sistema.

Se realizó pruebas de llenado del tanque y el controlador diseñado cumple con los requisitos de desempeño, proporciona un seguimiento de referencia preciso, rechaza las perturbaciones y mantiene la estabilidad del sistema. Además, el controlador demuestra robustez ante variaciones y cambios en las condiciones del proceso, estos resultados validan el diseño y la sintonización del controlador para su implementación en un entorno real.

Se realizó pruebas comparativas entre el esquema de control propuesto SMC y el controlador PID en un sistema dinámico, se constata que la implementación del esquema SMC mejora significativamente el rendimiento y robustez del sistema en términos de los índices de desempeño ITSE y TVu, así como en la reducción del sobre-pico y el tiempo de asentamiento respondiendo ante perturbaciones y cambios en la referencia, lo que indica que su implementación puede ser una alternativa viable para mejorar el rendimiento y la estabilidad de sistemas dinámicos.

Recomendaciones

Continuar investigando y explorando diferentes métodos y técnicas de control para mejorar aún más el rendimiento de los sistemas dinámicos no lineales además de considerar la posibilidad de

investigar y comparar diferentes técnicas de control, como la retroalimentación lineal, la teoría del control borroso y la inteligencia artificial, para determinar cuál es la más adecuada para cada caso específico.

Una recomendación importante basada en los resultados obtenidos en la simulación y las pruebas del controlador es realizar una validación experimental en un sistema real para verificar el comportamiento y desempeño del controlador en condiciones reales de operación. Además, se sugiere evaluar el desempeño del controlador frente a perturbaciones y cambios de referencia más agresivos para determinar los límites de operación del controlador. También se puede considerar la implementación de técnicas de control adicionales, como el control predictivo, para mejorar aún más el rendimiento del sistema.

Es necesario profundizar en el análisis de las ventajas y desventajas de cada esquema de control para determinar en qué situaciones es más apropiado implementar uno u otro. También se puede investigar sobre posibles mejoras en la implementación del esquema SMC para obtener un mejor desempeño y evaluar su viabilidad en diferentes tipos de sistemas dinámicos. Asimismo, sería interesante comparar el esquema SMC con otros esquemas de control avanzados, como el control predictivo y el control difuso, para conocer las diferencias en su desempeño y elegir el más adecuado para cada aplicación específica.

Bibliografía

- O. Camacho, R. R. (2020). Control por modo deslizante. *EPN*, 305-335.
- C. B. Kadu, C. Y. (2016). Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System. *ELSEVIER*, 737 - 746.
- Camacho, O., & Smith, C. A. (2000). Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes. *ISA transactions*, 2, 205-218.
- Campoverde Robles, M. G., & Guayasamín Pico, R. M. (2018). Diseño, simulación y comparación de tres controladores predictivos: control predictivo generalizado, control por matriz dinámica y predictor de Smith robusto, aplicados a un reactor de agitación continua y un tanque de mezclado con retardo. *Bachelor's thesis*.
- Eker, I. (2006). Sliding mode control with PID sliding surface and experimental application to an electromechanical plant. *ISA transactions*, 45(1), 109 - 118.
- F. De la Cruz, O. C. (2015). Controlados de modos deslizantes basado en predictor de Smith y Modelo de segundo orden para procesos con elevado retardo. *Politécnica*, 35(2), 1-7.
- Firmansyah, R., Anwari, M., Boucekara, H., Milyani, A., Rawa, M., & Seedahmed, M. a. (2022). Control of Boost Converter Using Observer-Based Backstepping Sliding Mode Control for DC Microgrid. *Frontiers in Energy*. doi:10. 828978. 10.3389/fenrg.2022.828978
- Gaviño, R. H. (2019). *Introducción a los sistemas de control*. Naucalpan de Juárez: Pearson.
- González, A. y. (2020). Performance Indices in Control Systems. En *Advances in Control Systems*. Springer, 87-105.
- Herrera, M., Camacho, O., Leiva, H., & Smith, C. (2020). An approach of dynamic sliding mode control for chemical processes. *Journal of Process*, 112-120.

- J. Smith. (2022). Performance Indices in Automation. In *Control Systems Handbook*. Springer, 123-145.
- Manurung, A., Yoon, J., & Park, H. S. (2010). Speed adaptation control of a small-sized treadmill with state feedback controller. In *2010 3rd IEEE RAS & EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics* (págs. 15-20). IEEE.
- MathWorks. (s.f.). *MATLAB*. Obtenido de <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>
- MathWorks. (s.f.). *MATLAB & Simulink - MathWorks*. Obtenido de Simulink:
<https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
- Nise, N. S., & Romo, J. H. (2002). *Sistemas de control para ingeniería*. Patria.
- Ruge, I. A. (2011). Optimización de señal de control en reguladores PID con arquitectura antireset Wind-Up. *Scielo*, 31.
- Sarmiento, F. H., & Soto, D. M. (2020). Sintonización de controlador PID utilizando Quorum Sensing (QS) bacterial. *Tecnura: Tecnología y Cultura*, 24(64), 13-22.
- Slotine, J. J. (1984). Sliding controller design for non-linear systems. *International Journal of control*, 2, 421-434.
- T. E. Martin. (2015). Empirical Model identification. *Process Control Des. Process. Control Syst. Dyn. Perform*, 179-181.
- Torres Herrera, J. D. (2019). Diseño y simulación de algoritmos anti-windup para control modo deslizante aplicados a sistemas aproximables a un sistema de primer orden con retardo. *Bachelor's thesis*.
- Vaidyanathan, S., & Lien, C. H. (2017). Applications of sliding mode control in science and engineering. Springer, 709.

Vile, L., Alwi, H., & Edwards, C. (2019). Fault Tolerant Control of a Blended Wing Body Aircraft using Priority Weighted Control Allocation and Sliding Modes. *In 2019 American Control Conference (ACC)*. IEEE. doi:3758-3763

Anexos