ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN CONTROL DUAL POR MODOS DESLIZANTES PARA CONTROL DE UN TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE pH

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN, TOMO I

ANA CAROLINA BASTIDAS GUERRA

ana.bastidas@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO, PhD.

oscar.camacho@epn.edu.ec

Quito, marzo 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Ana Carolina Bastidas Guerra declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

ANA CAROLINA BASTIDAS GUERRA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Ana Carolina Bastidas Guerra, bajo mi supervisión.

ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO,
PhD. DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

ANA CAROLINA BASTIDAS GUERRA

OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO

DEDICATORIA

Este proyecto de titulación es para mi madre, quien ha sido mi inspiración en aquellos momentos perecederos. Te lo dedico a ti ***MAMITA***, por tu gran ejemplo de persistencia y fuerza para continuar en este efímero paso por la vida con alegría. Este título es tuyo, porque he decidido vivir para dibujar una sonrisa en tu rostro y en tu alma, ***"te amo"***.

Este escrito es para ti, mi sensible negrita, continúa disfrutando de esos pequeños detalles a los cuales respondes retumbante, porque en cualquier momento esta gran oportunidad cesará, y solo habrán quedado aquellas acciones con propósito que hayas logrado conquistar. Si el regalo más preciado nos lo es entregado dentro de 10 años, espero volver a leer este fragmento y asentir con ternura, mientras gritamos la siguiente frase: ***"LO ALCANZAMOS, Y VALIÓ LA PENA EL ESFUERZO PARA SENCILLAMENTE SER".***

Este trabajo es para aquel ser humano que planifica y se esfuerza por alcanzar un proyecto, con buenas intenciones. En una sociedad donde se está perdiendo la sensibilidad humana, es necesario despertar esa consciencia, para que cada idea y acción sea pensada y ejecutada en pro de mejorar la vida de todo ser, porque todo es una cadena que se recicla.

Para ti, para que vivas con pasión, te tomes un tiempo y reflexiones. Con la intención de que, halles en el silencio preguntas que, sin importar su respuesta, te hagan sentir incómodo e incómoda y decidas emprender una gran búsqueda. Con el propósito de que, no te conformes, y no desperdicies tu vida en acciones triviales. Con la finalidad de que, llegues al futuro sin arrepentimientos, ni sentidos de culpa. Para que logres percibir los pequeños detalles de la vida, como una inmensa oportunidad de "SER". A fin de que seas ***"UNA VIDA BIEN APROVECHADA".***

Para ti, te dejo una pregunta:
Si eres lo que haces y no haces lo que eres, entonces, ¿quién eres?

AGRADECIMIENTO

En este momento recuerdo mis primeros días en la universidad, definitivamente fue un cambio intenso. Cada semestre incrementaba la incertidumbre, incomodidad e inconformidad del como funcionaban las cosas en mi entorno, de las circunstancias que marcaban mi realidad. Todo aquello fue motivo para emprender una búsqueda hacia algo desconocido. Hoy agradezco la oportunidad de haber recorrido ese camino, cada vivencia fue necesaria para ser quien soy ahora. Gracias querida Ana, por el ser maravilloso en quien te estas convirtiendo. Gracias por esa curiosidad que ha perpetuado nuestro ser. Te agradezco por tu buen corazón, porque aun cuando los tropiezos han sido enredosos tú has respondido con buena actitud y valentía. Por no conformarte y siempre buscar tu independencia, libertad y máxima expresión de vida. Porque en cada idea y acción involucras el bienestar de cada ser. Por esa forma tan bonita que tienes de percibir la vida, y esa ternura con la que te observas. Sobre todo, te agradezco porque en respuesta a los vaivenes de la vida has decidido que vale la pena ser una vida bien aprovechada, y tomar lo mejor de cada experiencia para crear ideas locas. Sencillamente, GRACIAS hermosa soñadora, porque has elegido buscar un equilibrio en cada escena de tu vida, en pro de extraer ese máximo potencial e iniciar con la etapa de **"ACCIÓN CON INTENCIÓN".**

Agradezco, a mis padres por su fuente creadora. Por ellos tengo la dicha de experimentar esta vida maravillosa. Gracias mamita Catalina Guerra y papito Marco Bastidas, porque soy un reflejo de sus mejores acciones.

Agradezco, a mi hermana Verónica Bastidas y Danny Catota por el apoyo durante mis últimos años de carrera universitaria, con su ayuda he sentido la calidez y abundancia de un hogar.

Agradezco, a mi segunda mamá Marisol Velastegui por enseñarme que la fe, permite alcanzar los sueños, y que familia no solo se deriva de un ADN compartido, sino de quien se involucra con lealtad y voluntad hacia cualquier ser humano.

Agradezco, a la señora Ligia Chamorro y su familia por haberme aceptado como un miembro más en su hogar. Por enseñarme hábitos esenciales para vivir más organizada, y ser consciente de que pese a las circunstancias se puede ser una mujer independiente.

Agradezco, a mi tía Rosa, porque me enseño el verdadero significado de humildad y servicio. Siempre la recordaré por su gran corazón y bondad con los más necesitados. ***Agradezco***, a mi tío Patricio y primo Brandon, porque con su carisma se ganan la voluntad de todos, las risas en las fiestas nunca faltan.

Agradezco, a mi tío Omar, porque fue una de las primeras personas que me escuchó en mi transición. Logró recordarme cuan valiosa era, y ayudarme a construir nuevas bases para mis decisiones futuras.

Agradezco, a mi tía Eufemia Guerra por recibirnos en su hogar varias veces, y compartir bellos momentos, risas, felicidad en las reuniones familiares.

Agradezco, a mi prima Jhoanna Vergara por ayudar a mi familia en los momentos difíciles. Por tú sinceridad y ejemplo de lucha constante y responsable.

Agradezco, a mi tía María José Guerra, por verme siempre con ojitos de cariño. Eres una buena persona. Gracias, por haber compartido momentos cálidos conmigo.

Agradezco, a mi gran amigo Gabriel Estupiñan por confiar en mí, y esas charlas de vida magistrales. Gracias por enseñarme que es posible tener una relación genuina, sin interés alguno. Mi primer amigo de la poli, y mi compañero en los futuros negocios.

Agradezco, a Erick Taco, mi gran amigo de carrera y compañero de tesis, hemos compartido una carrera juntos, experiencias de todo tipo, gracias por escucharme en mis momentos profundos.

Agradezco, a mi gran amigo Alex Rocha, por abrirme las puertas de su hogar, por ser el ejemplo de hijo que anhelo ser, y compartir tu conocimiento conmigo. Nutres mi vida con tus experiencias, y positivismo.

Agradezco, a mi gran amigo Mauricio Arias, por sensibilizarme con la vida y sobre todo por recordarme que vivimos para ser felices, trabajando para hacer realidad nuestros sueños. No dejaré para mañana lo que pueda hacer hoy.

Agradezco, a mi gran amigo Jaime Salazar, por enseñarme a vivir de forma des complicada; con alegría, grandes risas y serenidad ante toda circunstancia.

Agradezco, a mi amiga Evelin Catucuamba y Vladimir Vargas, son las personas más geniales con quienes pude sincronizar de una forma extraña pero mega divertida.

Agradezco, a mis amigas Brendita Tito y Karen Agila por estar pendientes de mi avance en esta etapa, sobre todo por escucharme cuando mi ser tornaba triste.

Agradezco, a Alejandro Quezada por haberme cuidado todos estos años. Me ayudaste a tu manera, fue bueno haber coincidido contigo. El aprendizaje es infinito, gracias.

Agradezco, a mis amigos de la UME. Gracias por esas experiencias inolvidables, fueron de mis mejores años de carrera junto a ustedes, siempre los llevaré en mi corazón.

Agradezco, a JCI porque me permitió, reafirmar mi ser servicial, y conocer personas excepcionales como, Luis Bravo. Gracias por tu amistad Luchito eres genial.

Agradezco, a mi director de tesis Dr. Oscar Camacho y al Dr. Marcelo Pozo, por el apoyo y motivación en este largo pero significativo camino. Cada palabra de aliento, aun cuando haya sido indirecta me sirvió mucho para continuar y culminar este largo viaje.

Agradezco, a la Escuela Politécnica Nacional, porque más que el conocimiento técnico impartido, fue un espacio de aprendizaje constante entorno a valores esenciales, que me permitieron concretar objetivos de vida y probarme a mí misma.

Agradezco, a cada ser que coincidió conmigo y en algún momento compartió una parte de su vida, a través de risas, buenas charlas, travesuras, conocimiento, camaradería, gracias.

Finalmente, agradezco a ***"Dios"*** por permitirme percibir con mis facultades completas esta vida. Este momento existe solo gracias a tu ***PERFECTA EXPRESIÓN*** en todo lo que me rodea; la humanidad, los animales, la naturaleza, el sistema solar, ***EL COSMOS***.

¡GRACIAS!

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA II
DEDICATORIA III
AGRADECIMIENTO IV
ÍNDICE DE CONTENIDO VII
RESUMEN VIII
ABSTRACT IX
1. INTRODUCCIÓN 1
1.1 OBJETIVO GENERAL 2
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 2
1.3 ALCANCE 3
1.4 MARCO TEÓRICO 3
1.4.1 SISTEMAS NO LINEALES 3
1.4.2 APROXIMACIÓN A SISTEMAS DE ORDEN REDUCIDO 4
1.4.3 FUNDAMENTOS DEL CONTROL POR MODOS DESLIZANTES (SMC) 7
1.4.4 FUNDAMENTOS DEL CONTROL DUAL 11
1.4.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES PID 12
1.4.6 PROCESO DE PRUEBA 14
2. METODOLOGÍA 15
2.1 MODELADO MATEMÁTICO DE LA PLANTA TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH 16
2.2 MODELADO EMPÍRICO 22
2.2.1 DETERMINACIÓN Y VALIDACIÓN DEL RANGO DE TRABAJO 22
2.2.2 VALIDACIÓN DEL PROCESO 25
2.3 ESQUEMA SMC CLÁSICO: CON SUPERFICIE TIPO PID 28
2.4 PROPUESTA DE CONTROL DUAL POR MODOS DESLIZANTES 32
2.4.1 DISEÑO DUAL-SMC TIPO PID/PD 33
3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 40
3.1 CONCLUSIONES 40
3.2 RECOMENDACIONES 40
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 41

RESUMEN

Este trabajo de titulación muestra el diseño y simulación de un controlador por modos deslizantes basado en la definición del control por modo dual (DUAL-SMC), aplicado a un proceso altamente no lineal. El presente trabajo constará de dos tomos en cuanto al desarrollo teórico. En el primer tomo se parte con los fundamentos teóricos del control SMC, así como del control Dual, además se detallan características sobre la dinámica compleja que presenta el proceso de prueba: tanque de neutralización de pH. Luego, en el marco metodológico se realiza el análisis, validación y modelado del proceso aplicando el método empírico, de forma que la caracterización de los parámetros del proceso sea lo más cercana al proceso real para una adecuada sintonización del controlador. Se diseña el controlador SMC con superficie PID el cual servirá para comparar el rendimiento del controlador propuesto. Finalmente, se sintoniza el control DUAL-SMC tipo PID/PD, y se muestran los resultados obtenidos en contraste con el SMC clásico.

PALABRAS CLAVE: controlador por modos deslizantes, procesos altamente no lineales, controlador dual, modelo de primer orden con tiempo muerto.

ABSTRACT

This document presents the design and simulation of sliding mode controller based on the definition of dual mode control (DUAL-SMC), applied to a highly non-linear process. The present document will consist of two volumes in terms of theoretical development. The first volume starts with the theoretical foundations of SMC control, as well as Dual control. In addition, characteristics are detailed on the complex dynamics that the test process presents pH neutralization tank. Then, in the methodological framework, the analysis, validation, and modeling of the process is carried out by applying the empirical method, so that the characterization of the process parameters is as close as possible to the real process for an adequate tuning of the controller. The SMC controller with PID surface is designed, which will serve to compare the performance of the proposed controller. Finally, the DUAL-SMC type PID/PD control is turned, and the results obtained in contrast to the classic SMC are shown.

KEYWORDS: sliding mode controller, highly nonlinear processes, dual controller, first-order model with dead time.

1. INTRODUCCIÓN

La alta tendencia a industrializar las actividades humanas a nivel mundial hace que el control de procesos siga evolucionando y que los ingenieros se topen con la necesidad de operar, controlar y modificar procesos industriales cada vez más complejos. Se diseñan sistemas de control, los cuales están constituidos por dispositivos que principalmente miden y manipulan variables, con el fin de cumplir con los objetivos específicos que permitan controlar el proceso de forma automática.

La creciente curva exponencial de la tecnología da apertura a una tendencia de industrialización del sector productivo en el país. Los posibles nuevos procesos pueden ser representados por modelos más complejos, lo que crea la necesidad de disponer de estructuras de control avanzadas. La mayoría de los procesos vigentes en la industria son representados matemáticamente por modelos no lineales, los cuales presentan una dinámica compleja, retardos de tiempo y errores por la instrumentación existente en el proceso. Actualmente, los esquemas PID son los que ocupan más del 90% [1] del control a nivel industrial, sin embargo, no resultan efectivos para procesos altamente no lineales como es el caso del proceso que se analizará en este trabajo de titulación, el tanque de neutralización de pH. Los parámetros en el modelado del sistema, tanque de pH, son variables, convirtiéndolo en uno de los procesos químicos no lineales más difíciles de controlar [2]. Se puede entonces validar el éxito de un control en el proceso mencionado.

Existen varias técnicas de control avanzado para procesos complejos de operar. El SMC es una técnica de control robusta, que dispone de una estructura que se desempeña según las especificaciones del sistema, sin tomar en cuenta las perturbaciones o variaciones paramétricas a las que esté expuesto [3]. Por ello, el SMC es usado para sistemas no lineales obteniéndose excelentes resultados. Por otro lado, el control Dual se basa en construir un nuevo esquema que tome las ventajas individuales de dos controladores, para mejorar el rendimiento y mantenga estable al proceso.

El Controlador SMC de Modo Dual es un estudio publicado recientemente (2020) en [4], donde se demostró ser mejor que un SMC clásico, en términos de rendimiento y estabilidad para procesos químicos no lineales. Este nuevo controlador fue probado para dos procesos químicos: tanque reactor y tanque de mezclado. Es por ello, que para el presente trabajo de titulación se parte de este estudio y se lo aplica al tanque de neutralización de pH.

Se aplica entonces el controlador SMC de Modo Dual propuesto en Obando, Rojas, Camacho (2020) al proceso altamente no lineal, como es el caso del tanque de neutralización de pH. Sin embargo, este controlador se diseña utilizando la conmutación entre una superficie PID y PD, pero para el proceso químico altamente no lineal, es muy difícil mantener un buen rendimiento en seguimiento y sobre todo regulación (perturbaciones) sintonizando un PD. Con los resultados mencionados y para cumplir las condiciones de rendimiento se propone el diseño y simulación del controlador utilizando una conmutación entre una superficie PID y PI, lo que da como resultado una ley de control estable en la parte transitoria y de estado estacionario del sistema.

El tomo uno del presente proyecto, inicia con el marco teórico en donde se detalla la teoría base para el diseño del control DUAL-SMC. En el capítulo metodológico, se realiza el modelado matemático de la planta tanque de neutralización de pH, luego se realiza el análisis, validación y modelado del sistema, utilizando el modelado empírico. Finalmente, se detalla el diseño del controlador propuesto DUAL-SMC tipo PID/PD, y adicionalmente se muestran los resultados obtenidos en contraste con el controlador SCM tipo PID, al aplicarlo al proceso tanque de neutralización de pH.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseño y simulación de un control dual por modos deslizantes para seguimiento y regulación en un tanque de neutralización de pH.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar y determinar las características y ecuaciones matemáticas que representan el modelo de la planta no lineal: tanque de neutralización de pH.
- Estudiar los principios de diseño de la aproximación de sistemas no lineales con retardo a modelos de primer orden con tiempo muerto, de los principios del control por modos deslizantes (SMC) y del control por Modo Dual (DUAL).

1.3 ALCANCE

- Revisión bibliográfica de las características y ecuaciones matemáticas que representan el modelo de la planta no lineal: tanque de neutralización de PH, con el fin de modelar el sistema usando el método de linealización empírica y aproximarlo a un sistema de primer orden con tiempo muerto, con la técnica FOPDT.
- Estudio de los principios del control por modos deslizantes (SMC) y del control por Modo Dual (DUAL), para procesos aproximados a un sistema de primer orden con retardo.

1.4 MARCO TEÓRICO

En esta área se muestra la fase teórica del proyecto. Se inicia con el análisis y recopilación de la información base que sirve para plasmar el problema, además, de los fundamentos teóricos con los cuales se consigue diseñar y valuar una solución.

En primera etapa, se revisa que son los sistemas no lineales, y se expone como realizar la aproximación a sistemas de orden reducido basado en modelos empíricos. Luego, se muestra los principios del control por modos deslizantes, así como del control por modo dual. Con el objetivo de tener claro el comportamiento individual de las acciones de control de un controlador tipo PID, se detallan las características de cada acción de control, así como ciertas ventajas y puntos que se deben considerar para diseñar controles más robustos, como es el caso del control dual por modos deslizantes. Se finaliza con la explicación breve de las dificultades que presenta el proceso altamente no lineal tanque de neutralización de pH, el cual es objeto de estudio en este proyecto.

1.4.1 SISTEMAS NO LINEALES

Los sistemas de control están constituidos generalmente por componentes como sensores, actuadores, controladores y el proceso a controlar. La configuración esencial de un sistema de control se fundamenta en la definición de realimentación, la cual permite medir diferentes variables, con el fin de manipular y mantener el valor referencial. Para representar el proceso se hace un modelado matemático, el cual representa los fenómenos físicos y químicos que ocurren en el sistema real. Sin embargo, la mayoría de los procesos

vigentes en la industria son representados matemáticamente por modelos no lineales, los cuales presentan una dinámica compleja, esto implica que, los elementos que conforman el sistema operan bajo sus propios tiempos, es decir, al no haber una sincronía absoluta aparecerán retardos en el sistema [5]. También, existen errores por la instrumentación presente en el sistema.

Entonces, un sistema no lineal está constituido por un conjunto de ecuaciones diferenciales no lineales, como se muestra en la Ecuación (1.1), donde *f* es una función vectorial no lineal y *x* es el vector de estado *nx1,* luego *u* es la variable de entrada y *t* es el tiempo correspondiente a la dinámica del sistema no lineal [6].

$$\dot{x} = f(x, u, t) \tag{1.1}$$

La ley de control que aplica en el sistema es dependiente del vector de estado y el tiempo, como se muestra en la Ecuación (1.2).

$$u = g(x, t) \tag{1.2}$$

Las ecuaciones no lineales son aquellas que tienen un coeficiente exponencial diferente de uno, y esto infiere en el punto de equilibrio. Es decir que, el sistema presenta un fenómeno llamado caos, el cual provoca que la salida sea extremadamente sensible a las condiciones iniciales y no se pueda predecir la respuesta después de un lapso [6].

La dinámica de un sistema no lineal es compleja, por ello, para sistemas altamente no lineales donde la dinámica es muy variable, no se puede representar el sistema con un solo modelado matemático en todo el rango de control. Por esta razón, para el proceso altamente no lineal tanque de neutralización de pH propuesto en este trabajo de titulación se trabaja el control en un rango específico.

1.4.2 APROXIMACIÓN A SISTEMAS DE ORDEN REDUCIDO

El modelado de un proceso es una representación con ecuaciones matemáticas, donde se consideran los parámetros y variables de relevancia para el buen funcionamiento de este. Dependiendo el objetivo de estudio de un proceso, el modelado puede ser teórico si lo que se busca es representar el proceso lo más real posible, es decir, considerando detalles específicos de la planta, para un ingeniero de procesos es esencial profundizar en las propiedades y dinámicas físicas-químicas del proceso. Por otro lado, un ingeniero de control tiene por objetivo manipular ciertas variables de forma general, por ello es muy

común usar el modelado empírico para hacer control de procesos. Esto hace que se facilite el obtener modelos de entrada y salida que vienen del ajuste de ciertos datos, sin tener que caracterizarlos, es decir, que no se requiere hacer un análisis muy profundo del proceso para obtener sistemas aproximados a modelos de primer orden con retardo.

Para sintonizar un controlador es necesario identificar la dinámica del proceso y posteriormente sintonizarlo. Para construir modelos empíricos, se inicia haciendo pequeños cambios en las variables de entrada sobre el punto de operación nominal para cambiar la dinámica del proceso, y luego se registra los parámetros obtenidos de la respuesta del proceso, esto significa hacer pruebas experimentales [5] y con esa respuesta se construye el modelo aproximado a un sistema de primer orden. El modelado empírico implica perturbar al proceso para generar datos dinámicos, estimarlos y validar el modelo obtenido con el fin de acercarse al proceso real. Los métodos más utilizados por curva de reacción son: Ziegler y Nichols, y el método de dos puntos de Smith [7][8].

A continuación, se detalla el procedimiento para el diseño del método utilizado en el presente trabajo de titulación.

Método de dos puntos de Smith

El método de dos puntos, toma en cuenta dos puntos sobre la curva de reacción obtenida del sistema bajo condiciones iniciales, esta consideración garantiza que el modelado sea una buena representación del proceso real en estos dos puntos como mínimo [7].

Para el método de dos puntos de Smith, se realiza una estimación de las características dinámicas del proceso a lazo abierto. El objetivo es estimar los parámetros (K, τ y t_0) de un modelo de primer orden con retardo que aproxime de mejor manera las características de la respuesta.

En la Figura 1.1, se muestra los parámetros que se deben estimar a partir de la curva de reacción obtenida del proceso, para ello es necesario seguir el siguiente procedimiento:

- Iniciar con el control en manual.
- Esperar que la salida del sistema esté en estado estacionario.
- Provocar un salto en la variable a manipular
- Registrar la salida de la variable controlada hasta que alcance un nuevo estado estacionario.

- Obtener el valor de K como el cociente entre cambios de referencia.
- Medir en los instantes: t_1 al 28.3% y t_2 al 63.2%.
- Obtener τ y t_0.

A continuación, se muestran las ecuaciones que permiten obtener estos parámetros [7][8].

$$K = \frac{\Delta Salida}{\Delta Entrada} \tag{1.3}$$

$$\tau = \frac{3}{2} * (t_2 - t_1) \tag{1.4}$$

$$t_0 = (t_2 - \tau) \tag{1.5}$$

Con los parámetros obtenidos se arma la planta de primer orden con retardo, como se muestra en la Ecuación (1.6).

$$G(s) = \frac{Ke^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \tag{1.6}$$

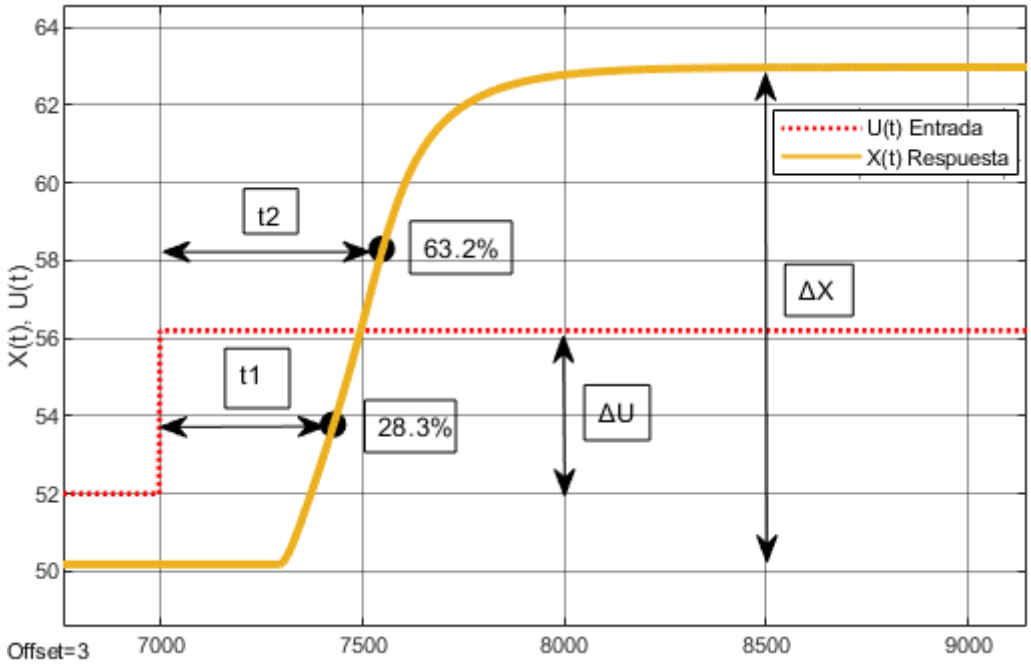


Figura 1.1. Curva de reacción para identificar el modelo de un proceso.

1.4.3 FUNDAMENTOS DEL CONTROL POR MODOS DESLIZANTES (SMC)

Dentro del área de control de procesos las técnicas de control robusto aplicado a procesos inestables se siguen desarrollando, cuando se conoce el proceso de un sistema se puede buscar técnicas de control adecuadas, el control por modos deslizantes es una técnica de control basada en modelo. El SMC se deriva del método de control por estructura variable [9]. Además, se considera un control robusto principalmente por su gran capacidad de estabilizar el sistema, al rechazar perturbaciones y ser insensible ante las incertidumbres, por la variación de los parámetros del modelo del proceso.

Para entender el funcionamiento del SMC primero es importante mencionar su origen.

Origen del SMC

Un sistema de estructura variable tiene la característica de ser muy útil frente a no linealidades e incertidumbre en la dinámica de sistemas de control, así como por su acción eficiente frente a la variación de los parámetros y aparición de perturbaciones [9]. Un SMC es un modo particular de operación de los sistemas de control de estructura variable (VSC) [3]. Los VSC representan a plantas físicas como: motores, conversores, y el de mayor complejidad en las industrias, como los procesos químicos [11]. El SMC fue propuesto y elaborado por primera vez por Emelyanov, alrededor del año 1967, inicialmente aplicado a un sistema lineal de segundo orden [10]. El SMC está aumentando su impacto a nivel industrial, debido al avance tecnológico en la microelectrónica y la electrónica de potencia, siendo usado en aplicaciones dentro de la robótica y el control de motores [10].

El VSC se caracteriza por tener un grupo de leyes de control de retroalimentación y una línea de conmutación de las estructuras independientes que lo forman, la cual debe alcanzar una superficie que trabaja según la dinámica que se busca obtener para una variable. El objetivo de este control es combinar los sistemas de forma que las propiedades brinden estabilidad, aun cuando sean inestables o su naturaleza sea oscilatoria. Entonces, el control de base es discontinuo, por lo cual la conmutación dependerá del número de estados de conmutación posibles que pueda tomar, lo que permite guiar el comportamiento del sistema en lazo cerrado hasta alcanzar la superficie previamente fijada, para luego deslizarse sobre ella y mantener la dinámica deseada [10].

Conceptos básicos del control por modo deslizante (SMC)

En general la técnica de control SMC es robusta, porque el sistema es forzado a llegar a una línea de conmutación y cuando esta es alcanzada se desliza hacia el origen, obteniendo así un sistema en Modo Deslizante [9]. Esto permite que se diseñe un controlador que se comporte con una dinámica deseada, es decir, que el control no depende de los parámetros del sistema original, logrando superar perturbaciones e incertidumbres del sistema.

El diseño del SMC se realiza desde una perspectiva de modelado empírico, esto hace que existan incertidumbres que surgen del conocimiento imperfecto de los modelos y la no linealidad de los sistemas, degradando el rendimiento del controlador. Bajo estas consideraciones, el SMC tiene una respuesta robusta, puesto que actúa correctamente frente a incertidumbres del sistema y la presencia de perturbaciones [12] [9].

Para entender como el controlador SMC sigue una trayectoria que le llevará a un régimen de estado deseado se parte de las dos etapas que se mencionan a continuación:

- Se setea la variable de interés en una condición inicial del proceso para luego mover la variable hasta la superficie deslizante previamente seleccionada, este movimiento se realiza bajo la dinámica deseada. A esta etapa se la conoce como ley de control de alcanzabilidad, o parte discontinua, la cual influye en la rapidez del sistema.

- Una vez que se alcance la superficie es necesario mantenerse en esta para que el sistema se comporte con la dinámica deseada y luego deslizarse hacia un estado final. Esta etapa se la conoce como condición deslizante o parte continua.

En la Figura 1.2, se muestra los movimientos que se deben realizar durante la operación de las fases del control SMC en el sistema. La línea que describe $S(t) = 0$ define la respuesta transitoria del sistema durante el Modo Deslizante. Durante el Modo Deslizante las dinámicas del sistema son de orden reducido respecto al modelo original [12].

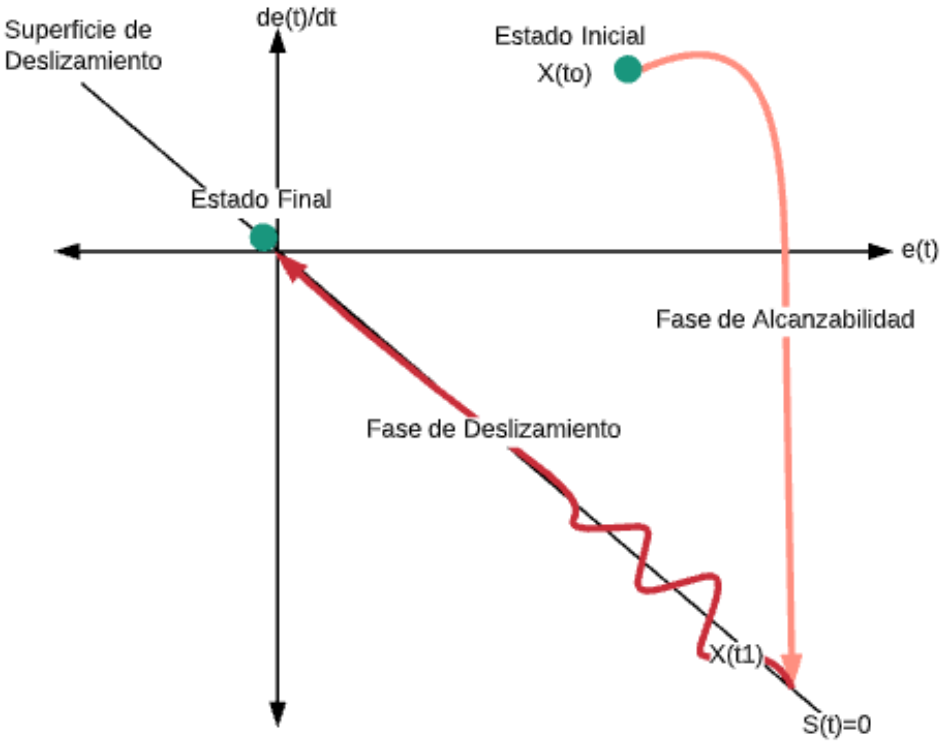


Figura 1.2. Comportamiento del modo deslizante [12].

En resumen, las consideraciones teóricas que se deben tener en cuenta para implementar un SMC son: primero, escoger la superficie deslizante que se ajuste a la dinámica deseada, segundo, alcanzar el plano deslizante rápidamente, tercero, mantener la trayectoria cerca de la superficie, y finalmente reducir el número de conmutaciones entre estructuras para lograr un buen manejo del estado de la superficie deslizante y alcanzar el punto de equilibrio.

La ley de control de un SMC con superficie deslizante está compuesta por dos componentes, una parte discontinua o también llamada de alcanzabilidad, y otra parte continua o también llamada deslizante, como se muestra en la Ecuación (1.7)(2.30).

$$U(t) = U_D(t) + U_{eq}(t) \tag{1.7}$$

Consideraciones de diseño del control por modo deslizante SMC

Para diseñar un control SMC se define cuatro pasos: el modelado del sistema, escoger la superficie deslizante, la selección de una lógica de conmutación y determinar del control discontinuo para garantizar un rango de trabajo [13].

- Modelado del sistema

Todo control basado en modelo siempre presentará imprecisiones, inexactitudes e incertidumbre, debido a que en el sistema la presencia de la instrumentación genera errores.

El modelo es una buena representación del proceso, pero el proceso constantemente puede salir del punto de equilibrio por el desgaste de los equipos, lo que causa una variación de los parámetros y por ende un cambio en el funcionamiento del proceso real.

Las inexactitudes del modelado las cuales causan problemas de desempeño del control pueden ser bien consideradas al realizar una buena linealización del sistema no lineal.

- Selección de superficie de control

La superficie deslizante determina la dinámica del sistema a lazo cerrado. La Superficie se diseña en función del comportamiento que quiero obtener del sistema en lazo cerrado, esta superficie es función de alguna variable que pueda medir a la entrada del sistema. La superficie se puede proponer cumpliendo que, uno de los términos sea función de una de las variables de salida del proceso para poder desarrollar el controlador.

La superficie de control $s(x) = 0$, representa las especificaciones de diseño, y la función de conmutación $s(x)$ es la que luego se hace cero.

En la Ecuación (1.8) se observa la superficie PID.

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^n \int e(t)dt \tag{1.8}$$

Donde los parámetros $n,\ \lambda$ ajustan el comportamiento dinámico del proceso a lazo cerrado.

- Lógica de conmutación

Se debe seleccionar una lógica de conmutación que asegure la alcanzabilidad de la trayectoria hasta la superficie escogida previamente, para luego asegurar deslizarse sobre ella con la dinámica esperada hasta alcanzar el punto de equilibrio.

Se debe cumplir las condiciones que se muestran a continuación, las cuales se basan en la estabilidad de Leapunov, y definen la rapidez del sistema para alcanzar la superficie.

$$\dot{S}(x) > 0 \; cuando \; S(x) < 0 \;\rightarrow \mathrm{u} = u^{-}(x) \tag{1.9}$$

$$\dot{S}(x) < 0 \; cuando \; S(x) > 0 \;\rightarrow \mathrm{u} = u^{+}(x) \tag{1.10}$$

$$o \; el \; equivalente \; S(x).\dot{S}(x) < 0 \tag{1.11}$$

- Determinación del control discontinuo

El modo deslizante es dependiente de la amplitud del control discontinuo. Los límites de u^+ y u^- se deben elegir en función de la región de trabajo deseada y las especificaciones [9].

La parte discontinua $U_D(x,t)$, también llamada condición de alcanzabilidad, se refiere a la rapidez con la que se va a alcanzar la superficie [12]. Donde:

$$U_D(t) = K_D sign(S(t)) \tag{1.12}$$

Uno de los inconvenientes de la función signo es que genera chattering, es decir, oscilaciones de alta frecuencia, efecto que disminuye la vida útil del elemento final de control. Como solución para suavizar la función signo y lograr disminuir el chattering, se utiliza la función sigmoide [13], la cual está descrita por la Ecuación (1.13).

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \tag{1.13}$$

La segunda condición de la acción de control es la parte continua $U_{eq}(t)$, o también llamada condición deslizante, la cual garantiza que se haya alcanzado la superficie y representa el comportamiento dinámico del sistema. La condición responde a lo que se muestra en la Ecuación (1.14).

$$\frac{dS(t)}{dt} = \dot{S}(t) = 0 \tag{1.14}$$

Finalmente, la ley de control de un SMC con superficie deslizante responde al conjunto de dos condiciones, como se muestra en la Ecuación (1.15)(2.30).

$$U(t) = U_D(t) + U_{eq}(t) \tag{1.15}$$

1.4.4 FUNDAMENTOS DEL CONTROL DUAL

El Control Dual fue propuesto por Shinskey y Weinstein en 1965. DeSantis (1994,2000), luego Saadi en 2014, presentó varias aplicaciones del Modo Dual, y Cho en 2008 lo utilizó para analizar el calor inicial en reactores por lotes en un proceso químico [4]. El nombre del modo dual proviene de un esquema de control que consta de dos estructuras de modos de control. Shinskey en 1988, realizó varias pruebas con diferentes controladores aplicados

en varios procesos, con el fin de analizar cual presentaba mejores características de respuesta, tales como, la velocidad máxima, la amortiguación crítica, control frente a perturbaciones, la insensibilidad al ruido, mínimo error [4].

Entonces, si un sistema de control puede satisfacer las características mencionadas anteriormente, también puede satisfacer los índices de rendimiento mínimo requeridos, sin importar el tipo de señal que alimente el sistema, ni la función de error que se utilice.

Se diseña un controlador según el tipo de proceso que se desee controlar, buscando obtener un control que cumpla con los objetivos mencionados, así como, mantener un alto rendimiento. Mientras más compleja sea la dinámica del proceso, cada controlador de forma individual no puede suplir un buen control del proceso, por lo que se combinan los controladores para incrementar el rendimiento y dar estabilidad al proceso.

Es decir, las propiedades de un control Dual basan su teoría en la fusión de las mejores características de diferentes controladores, para luego aprovechar sus propiedades en conjunto, expresándose como un solo controlador final lo suficientemente alto en rendimiento, de modo que realice tareas de seguimiento de trayectorias y regulación de procesos no lineales.

1.4.5 CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES PID

Los componentes proporcional, integral y derivativo de un controlador tipo PID, son la base del control de procesos. Para sintonizar los parámetros se puede hacer una serie de pruebas hasta alcanzar la respuesta deseada. Cada acción de control tiene un comportamiento específico sobre el proceso, se analiza y se implementa el control acorde a las necesidades que permitan mejorar el rendimiento del proceso.

1.4.5.1 ACCIÓN DE CONTROL PROPORCIONAL

La acción de control proporcional es un valor constante al cual se le conoce como ganancia. El control proporcional calcula un valor que está en proporción al error que se mide en un instante específico en el proceso a lazo cerrado [14]. Existe un rango proporcional que permite replicar el efecto de la entrada sobre la salida del sistema, es decir, que en términos matemáticos existe una relación de cambio debido al valor constante que multiplica a la entrada, obteniendo así el cambio esperado a la salida.

Implementando solo la acción de control proporcional no se puede eliminar el error completamente, entonces no se podrá llegar a la referencia deseada. Esto se debe a que

la banda proporcional es pequeña, lo que implica una operación muy rápida o agresiva del elemento final de control, llegando en ciertos casos a desgastarlo provocando fallos mecánicos bruscos.

Error en estado estacionario

Cuando se trabaja con los controladores PID industriales programados solo el control proporcional, para eliminar el error en estado estacionario, es común hallar un BIAS, el cual adiciona al lazo de control un valor extra, con el fin de alcanzar el punto de referencia [14], observar en la Figura 1.3.

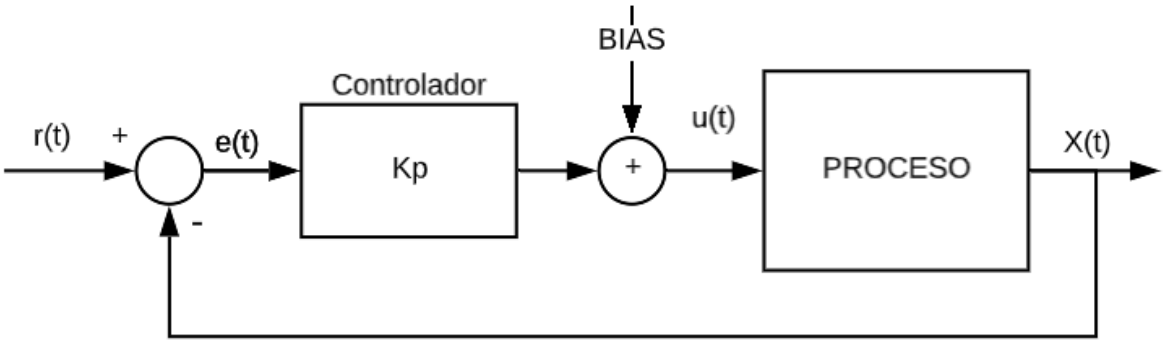


Figura 1.3. Diagrama de bloques del esquema de control proporcional considerando el BIAS.

Implementando el BIAS la banda proporcional se desplaza, es decir, que se hace más grande. Entonces, si el error es cero, la acción de control toma el valor del BIAS y evita así volverse CERO como en el control proporcional tradicional.

En resumen, la acción de control proporcional permite cumplir con las siguientes características:

- Acercar el sistema al valor seteado.
- Aumentar la velocidad de respuesta del sistema.
- Eliminar el error en estado estacionario con el BIAS.

1.4.5.2 ACCIÓN DE CONTROL INTEGRAL

La acción de control integradora toma los datos del error pasado, lo que significa, que el error se va acumulando a medida que el tiempo va avanzando [14]. En cada integración el proceso se va aproximando a la referencia, pero para procesos con una dinámica más compleja, la transición para alcanzar el set point puede volverse muy lenta. Para

contrarrestar el tiempo de acción del control integral se le agrega una ganancia integral para acelerar o atenuar la respuesta.

En conclusión, la acción integral del PID permite mantener el sistema en equilibrio sobre un valor de referencia constante, es decir, ajustar automáticamente el BIAS integrando el área bajo la curva del error medido en el proceso, con el fin de eliminar el error en estado estable.

Si se coloca una acción integral grande se puede obtener un error nulo, pero se debe tener cuidado con el valor de la ganancia integral, porque si se exagera en la cantidad de ganancia el sistema puede rápidamente volverse oscilatorio.

1.4.5.3 ACCIÓN DE CONTROL DERIVATIVO

La acción derivativa tiene una característica predictiva, puesto que permite al controlador anticiparse al comportamiento futuro que va a tener la señal de error, la cual posteriormente será receptada por el controlador PID [14]. La predicción se hace calculando la derivada del error en un instante de tiempo actual, es decir, se obtiene la tangente en un punto y se traza la proyección hacia el tiempo no transcurrido, marcando un posible comportamiento del error.

La acción derivativa, mejora la estabilidad del lazo de control, puesto que al tener características predictivas permite eliminar las oscilaciones de la variable controlada en el proceso. También, mejora la parte transitoria porque suaviza la acción de control, evitando así, tener un sobreimpulso en el sistema.

Una ventaja de introducir la acción derivativa en un controlador tipo PID, es que permite aumentar en mayor valor la ganancia proporcional y disminuir en gran cantidad la constante de tiempo integral, logrando así incrementar la velocidad de respuesta del controlador [14].

Para sintonizar la acción de control derivativa se debe tener mucho cuidado, debido a que si se aplica en sistemas altamente inestables puede amplificar las oscilaciones y el error.

1.4.6 PROCESO DE PRUEBA

Las características de los procesos industriales son individuales, dependiendo la dinámica con la que operen, las características físicas-químicas, la naturaleza de las variables y parámetros que interfieren en la operación del proceso. Partiendo de que, la naturaleza de los procesos es la no linealidad, debido a que bajo ciertas condiciones el proceso puede responder de una forma, pero si se cambia de punto de operación el proceso tiene un

comportamiento totalmente diferente respecto a los parámetros del proceso: tiempo muerto, ganancia del proceso, constante de tiempo. Entonces, controlar procesos altamente no lineales resulta una tarea complicada dentro del área de control de procesos. Además, casi todos los procesos químicos son no lineales.

Las aplicaciones más simples, suelen ser sintonizadas con controladores tipo PID y sus derivaciones, sin problema. Pero el 90% de los procesos en la industria necesitan un control diferente, que sea capaz de dar una buena respuesta a sus características especiales [2].

Controlar procesos altamente no lineales resulta una tarea complicada dentro del área de control de procesos. En esta sección se presenta las características generales del proceso altamente no lineal; tanque de neutralización de pH.

En el caso particular del proceso en análisis, se busca neutralizar la corriente de ácido $q_1(t)$, controlando el flujo de la corriente básica $q_3(t)$, mientras otra solución $q_2(t)$ que amortigua la reacción que ocurre dentro del reactor, permanece constante, es decir, las tres corrientes se introducen dentro de un reactor de neutralización.

Para verificar el comportamiento altamente no lineal del proceso en [2], se realizaron pruebas, donde se introduce una señal a la válvula y se realizan cambios de paso de igual magnitud. Como resultado, pese a que cada cambio de paso tiene la misma magnitud, la respuesta del proceso es diferente en cada caso. Por ello, se debe trabajar el control del proceso por rangos determinados.

En el siguiente capítulo, se determina y valida el rango de funcionamiento del controlador propuesto en el presente proyecto.

2. METODOLOGÍA

El trabajo de titulación se desarrolla mediante la investigación cuantitativa, de tipo inductivo, utilizando como punto de referencia el estudio del control dual por modos deslizantes DUAL-SMC tomado de [4]. Se realizan varias pruebas y se analiza la mejor respuesta del controlador diseñado, tomando en cuenta los valores de indicadores que reflejan el buen rendimiento del control, para ello se usa el método deductivo.

La información se recopiló de fuentes principales como libros y publicaciones técnicas. También, se usaron fuentes secundarias como trabajos de titulación, artículos académicos, papers científicos.

El proyecto de titulación se realiza en cuatro etapas: la teórica, de diseño, de simulación, y finalmente la validación del controlador y análisis de resultados.

En el capítulo uno, se presentó la fase contextual del marco teórico. Tomando en cuenta la recopilación expuesta, se procede a desarrollar la metodología para el diseño del controlador propuesto en este trabajo de titulación. Se inicia con el modelado matemático de la planta para el tanque de neutralización de pH, para ello, se usa el método empírico. Luego, se diseña el esquema de control de un SMC con superficie PID, el cual se tomará como herramienta de comparación para el análisis de rendimiento de controlador propuesto. Finalmente, se desarrolla la propuesta del controlador dual por modos deslizantes.

2.1 MODELADO MATEMÁTICO DE LA PLANTA TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH

En el campo de la ingeniería, los procesos industriales pueden ser representados por un conjunto de características que describen el comportamiento del proceso o sistema real, a esto se le conoce como modelo. La descripción se vuelve aceptable cuando las variables que influyen en el proceso se relacionan con fenómenos como el principio de conservación de la energía, materia, principios termodinámicos, entre otros, entonces previo a construir un modelo matemático es necesario hacer un análisis más profundo de la dinámica del proceso.

Los modelos matemáticos se estructuran con parámetros y variables del sistema, las cuales son representadas por ecuaciones diferenciales. Los valores de los parámetros son hallados de forma empírica, a partir de los datos disponibles del comportamiento del proceso que se modela.

En el presente trabajo de titulación, se analiza la dinámica del proceso no lineal tanque de neutralización de pH tomando de [2], las características principales que lo describe se detallan a continuación.

El proceso se basa en que, dentro del reactor ocurre una reacción de neutralización de fluidos. Un flujo de corriente básica se manipula por medio de una válvula para ser mezclado con uno de corriente ácida, y obtener un flujo de salida con un valor de pH. El reactor cuenta con un retardo de tiempo altamente variable. El diagrama del proceso

tanque de neutralización de pH se muestra en la Figura 2.1. Tanque de neutralización de pH.

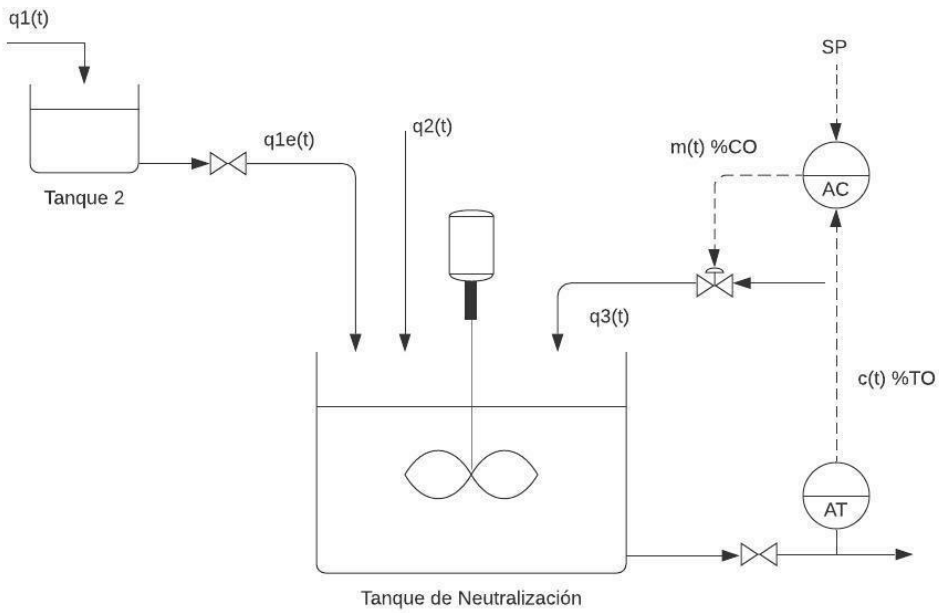


Figura 2.1. Tanque de neutralización de pH.

Para modelar este sistema se tomaron las siguientes consideraciones:

- El volumen del líquido es variable, sin embargo, no se desborda del reactor.
- La mezcla en el reactor es perfecta.
- El reactor y la tubería se encuentran bien aislados.
- Los iones de los compuestos químicos que participan están completamente solubles.
- La perturbación principal es el flujo de corriente ácida.

Las siguientes reacciones químicas ocurren dentro del reactor de neutralización de pH:

$$H_2\mathrm{CO}_3 \leftrightarrow HCO_3^- + H^+ \tag{2.1}$$

$$HCO_3^- \leftrightarrow \mathrm{CO}_3^{2-} + H^+ \tag{2.2}$$

$$H_2O \leftrightarrow OH^- + H^+ \tag{2.3}$$

Las correspondientes constantes de equilibrio son:

$$K_{a1} = \frac{[HCO_3^-][H^+]}{[H_2CO_3]} \tag{2.4}$$

$$K_{a2} = \frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]} \tag{2.5}$$

$$K_w = [H^+][OH^-] \tag{2.6}$$

Se usan dos reacciones invariantes W_ay W_b para cada flujo de entrada, con el fin de modelar el equilibrio químico. La reacción$W_a$es una cantidad que se relaciona con la carga de iones, luego, W_b se refiere a la concentración del ion CO_3^{2-}. A continuación, se muestran las reacciones invariantes:

$$W_{ai} = [H^+]_i - [OH^-]_i - [HCO_3^-]_i - 2[CO_3^{2-}]_i \tag{2.7}$$

$$W_{bi} = [H_2CO_3]_i + [HCO_3^-]_i + [CO_3^{2-}]_i \tag{2.8}$$

Donde la variable i representa los flujos que actúan en el proceso y va tomando valores desde 1 a 4.

Utilizando las ecuaciones de las constantes de equilibrio y de las reacciones invariantes, es posible expresar una ecuación que determina el nivel de pH, observar Ecuación (2.9).

$$W_b \frac{\frac{[HCO_3^-]}{[H^+](t)} + \frac{2K_{a1}K_{a2}}{[H^+](t)^2}}{1 + \frac{K_{a1}}{[H^+](t)} + \frac{K_{a1}K_{a2}}{[H^+](t)^2}} + W_a + \frac{K_w}{[H^+](t)} - [H^+](t) = 0 \tag{2.9}$$

$$pH(t) = -log[H^+](t) \tag{2.10}$$

Las ecuaciones matemáticas que representan la dinámica del proceso del tanque exotérmico se muestran a continuación.

Se detalla en la Ecuación (2.11), el balance de masa en el tanque 2;

$$q_1(t)\rho - q_{1e}(t)\rho = A_2\rho\frac{dh_2(t)}{dt} \tag{2.11}$$

en la Ecuación (2.12), la expresión de la válvula manual 2;

$$q_{1e}(t) = C_{V2}\sqrt{h_2(t)} \tag{2.12}$$

en la Ecuación (2.13), el balance de masa en el reactor de neutralización de pH;

$$q_{1e}(t)\rho + q_2(t)\rho + q_3(t)\rho - q_4(t)\rho = A_1\rho\frac{dh_1(t)}{dt} \tag{2.13}$$

en la Ecuación (2.14), la expresión de la válvula manual 4;

$$q_4(t) = C_{V4}(h_1(t))^n \tag{2.14}$$

en la Ecuación (2.15), la expresión para la reacción invariante W_a en base a la aplicación del balance de masa en cada especie de ion;

$$q_{1e}(t)W_{a1} + q_2(t)W_{a2} + q_3(t)W_{a3} - q_4(t)W_{a4}(t) = A_1\frac{d(h_1(t)W_{a4}(t))}{dt} \tag{2.15}$$

en la Ecuación (2.16), la expresión para la reacción invariante W_b en base a la aplicación del balance de masa en cada especie de ion;

$$q_{1e}(t)W_{b1} + q_2(t)W_{b2} + q_3(t)W_{b3} - q_4(t)W_{b4}(t) = A_1\frac{d(h_1(t)W_{b4}(t))}{dt} \tag{2.16}$$

en la Ecuación (2.17), el retardo de tiempo entre el reactor de neutralización de pH y la ubicación del sensor de pH;

$$pH'(t) = pH(t - t_o(t)) \tag{2.17}$$

en la Ecuación (2.18), el retardo de tiempo;

$$t_o(t) = \frac{LA\rho}{q_4(t)} \tag{2.18}$$

en la Ecuación (2.19), la expresión del transmisor de pH;

$$\frac{dc(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_T}[K_T pH'(t) - c(t)] \tag{2.19}$$

en la Ecuación (2.20), la expresión de la válvula de control;

$$\frac{dq_3(t)}{dt} = \frac{1}{\tau_V}[K_V m(t) - q_3(t)] \tag{2.20}$$

Donde:

A_1 : sección transversal del reactor de neutralización de pH, cm^2

A_2 : sección transversal del tanque, cm^2

A : sección transversal de la tubería, cm^2

$c(t)$: señal de salida del transmisor de pH en una escala de 0 a 100 %

C_{v2} : coeficiente del flujo de la válvula manual 2, (ml/s)/$\mathrm{cm}^{1/2}$

C_{v4} : coeficiente del flujo de la válvula manual 4, (ml/s)/$\mathrm{cm}^{0.607}$

$h_1(t)$: nivel del líquido en el reactor de neutralización de pH, cm

h_2 : nivel del líquido en el tanque 2, cm

K_T : ganancia del sensor de pH

K_V : ganancia de la válvula de control, (ml/s)/%C0

L : longitud de la tubería, cm

$m(t)$: salida del controlador de 0 a 100, %

n : coeficiente de la válvula manual 4

ρ : densidad de los flujos, ml/cm^3

$pH(t)$: potencial de hidrogeniones del líquido en el reactor, adimensional

$pH'(t)$: $pH(t)$considerando el retardo de tiempo t_o, adimensional

$q_{1e}(t)$: flujo de la corriente ácida de salida desde el tanque 2, ml/s

$q_1(t)$: flujo de la corriente ácida, ml/s

$q_2(t)$: flujo de la corriente buffer, ml/s

$q_3(t)$: flujo de la corriente básica, ml/s

$q_4(t)$: flujo de la corriente de salida, ml/s

$t_o(t)$: retardo de tiempo, s

τ_T : constante de tiempo del sensor de pH, s

τ_V : constante de tiempo de la válvula de control, s

Los valores de las variables en estado estacionario se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Estado estacionario de las variables del proceso y parámetros de diseño del tanque de neutralización de pH.

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
A_1	$207\ \mathrm{cm}^2$	q_3	$15.6\ \mathrm{ml/s}$
A_2	$42\ \mathrm{cm}^2$	q_4	$32.75\ \mathrm{ml/s}$
A	$6.01031\ \mathrm{cm}^2$	τ_T	$15\ \mathrm{s}$
c_0	$50.18\ \%$	τ_V	$6\ \mathrm{s}$
C_{v2}	$9.584\ (\mathrm{ml/s})/\mathrm{cm}^{1/2}$	$[q1]$	$0.003\mathrm{M}\ \mathrm{HNO_3}$
C_{v4}	$4.5861\ (\mathrm{ml/s})/\mathrm{cm}^{0.607}$	$[q2]$	$0.03\mathrm{M}\ \mathrm{NaHCO_3}$
h_1	$25.5\ \mathrm{cm}$	$[q3]$	$0.003\ \mathrm{M\ Na\ OH} +$ $0.00005\mathrm{M}\ \mathrm{NaHCO_3}$
h_2	$3\ \mathrm{cm}$	K_{a1}	$4.47\mathrm{x}10^{-7}$
K_T	$7.1429\ \%$	K_{a2}	$5.62\mathrm{x}10^{-11}$
K_V	$0.3\ (\mathrm{ml/s})/\%\mathrm{C0}$	K_w	$1\mathrm{x}10^{-14}$
L	$674.5\ \mathrm{cm}$	W_{a1}	$0.003\ \mathrm{M}$
m_0	$52\ \%$	W_{b1}	$0\ \mathrm{M}$
n	0.607	W_{a2}	$-0.03\ \mathrm{M}$
ρ	$1\ \mathrm{ml/cm}^3$	W_{b2}	$0.03\ \mathrm{M}$
$pH(t)$	7.025	W_{a3}	$-3.05\mathrm{x}10^{-3}\ \mathrm{M}$
Set point	7.025	W_{b3}	$5\mathrm{x}10^{-5}\ \mathrm{M}$
q_{1e}	$16.6\ \mathrm{ml/s}$	W_{a4}	$-4.36\mathrm{x}10^{-4}\ \mathrm{M}$
q_1	$16.6\ \mathrm{ml/s}$	W_{b4}	$-5.276\mathrm{x}10^{-4}\ \mathrm{M}$
q_2	1.55 $\mathrm{ml/s}$		

2.2 MODELADO EMPÍRICO

2.2.1 DETERMINACIÓN Y VALIDACIÓN DEL RANGO DE TRABAJO

Dentro de los objetivos del presente trabajo se mencionó que se diseñará un controlador para el proceso en un rango específico, el cual va de 50% a 60% de la señal de salida del transmisor de pH. Esto debido a que, el proceso es altamente no lineal, a continuación, se muestran las pruebas que se realizaron para cuantificar el comportamiento no lineal del proceso, con el fin de hallar el rango de trabajo expresado.

El método consiste en realizar una secuencia de pruebas al proceso en condiciones de lazo abierto, y con ello se calculan los parámetros K, τ y t_0, los cuales permiten caracterizar al proceso en cada prueba. En la Figura 2.2, se muestra una señal tipo escalera, la cual consta de una serie de pasos de 4.2% que cambian de forma ascendente y descendente, esto representa una secuencia de cambios en la señal que ingresa a la válvula m(t), cuando la válvula aumenta del 10% al 90% en su apertura.

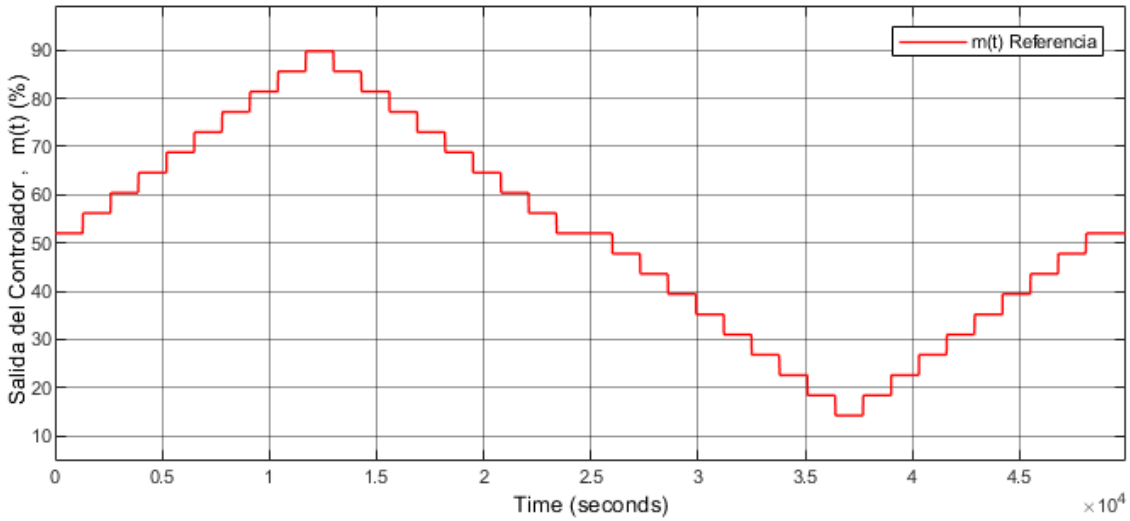


Figura 2.2. Secuencia m(t), cambios de referencia para hallar el rango de control.

En la Figura 2.3, se muestra la señal de salida del sistema en términos de pH, sin hacer un control. La respuesta no sigue la referencia, lo cual es obvio porque la respuesta representa el comportamiento real del proceso sin control.

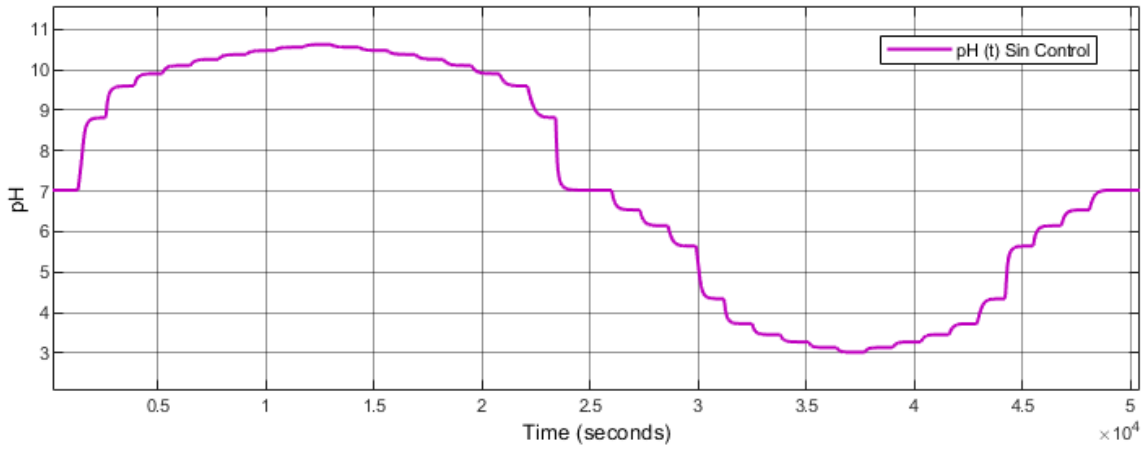


Figura 2.3. Señal de salida de pH sin control.

En la Figura 2.4, se contrasta la referencia con la señal de salida del transmisor de pH, la cual también representa el comportamiento real del proceso sin control, pero, en todo el rango de operación.

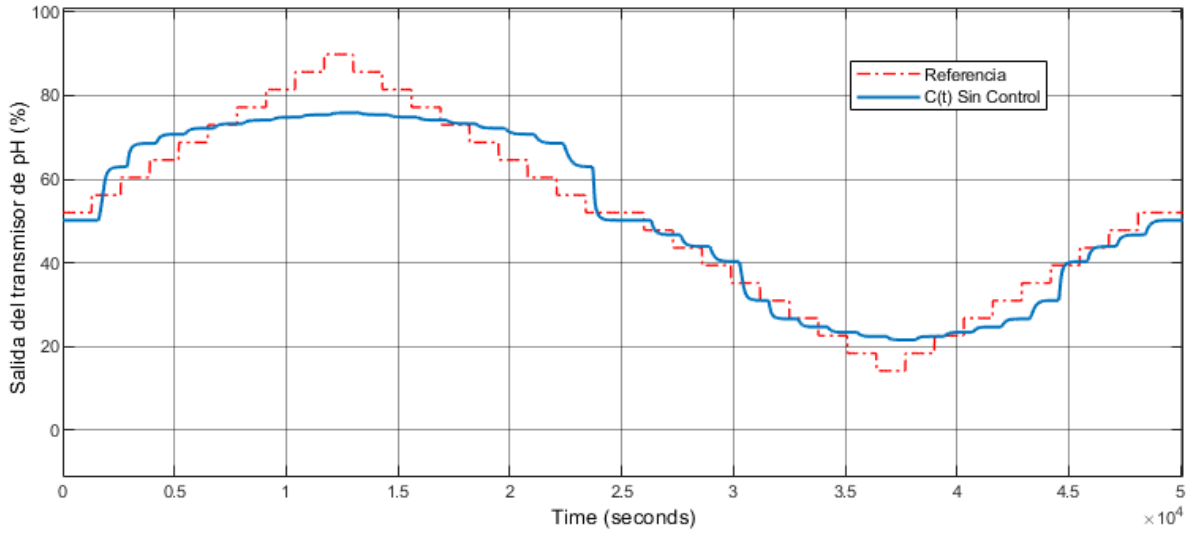
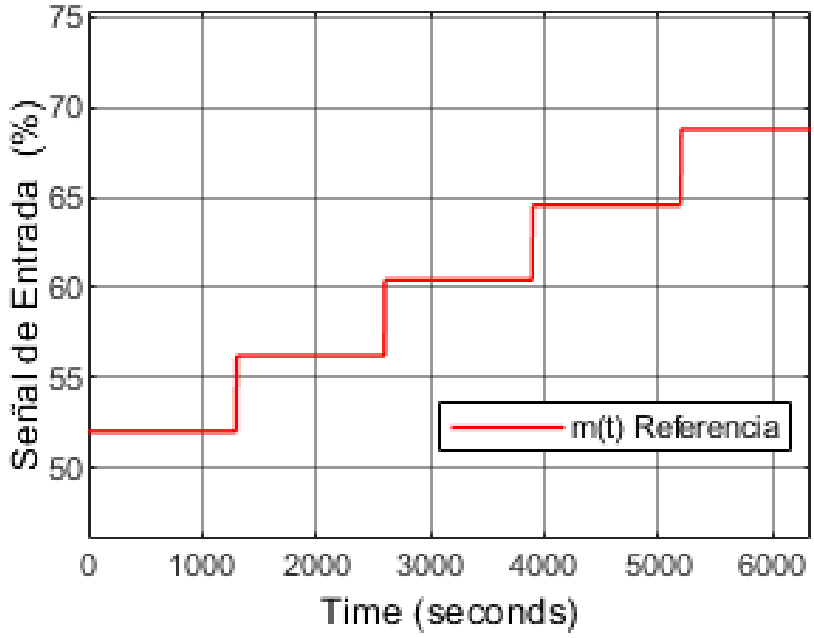
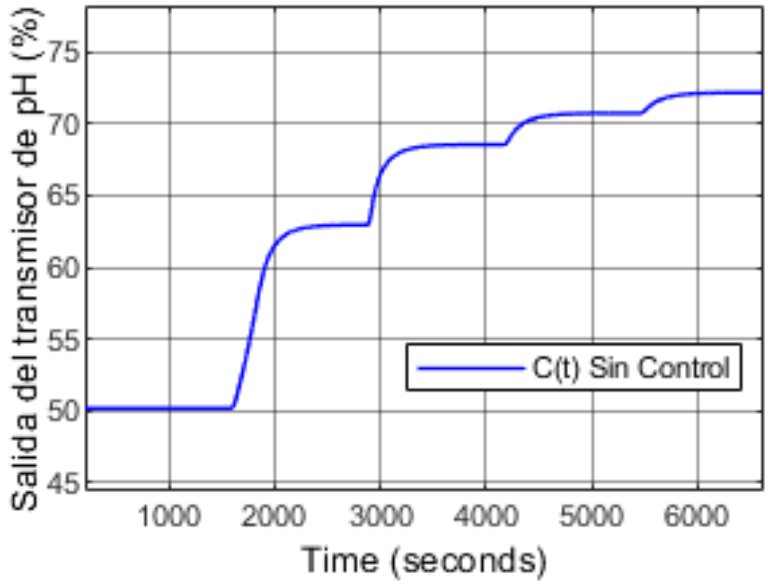


Figura 2.4. Señal de salida del transmisor, comparación.

En la Figura 2.5, es evidente el comportamiento altamente no lineal del proceso, puesto que la caracterización cambia totalmente, y al darle un rango estrecho de referencia, se puede observar que las amplitudes del proceso real para cada cambio son diferentes. Con ello se comprueba que, se debe seleccionar solo un rango de trabajo para aplicar un control sobre la planta.



a)



b)

Figura 2.5. a) Señal de referencia y b) Señal de transmisor de pH sin control.

Se observa en la Figura 2.6, que la gráfica de color verde, la cual representa a la aproximación de primer orden del sistema, coincide con el proceso real en el primer paso, lo cual corresponde al rango de 50% a 63%. Por términos prácticos, se seleccionó un rango de 50% a 60% para diseñar el controlador propuesto. En los pasos siguientes, tanto la aproximación como la señal que representa el comportamiento del sistema real, no coinciden. Por ello, la importancia de analizar el proceso en rangos específicos y, con parámetros que caracterizan el sistema de forma variable.

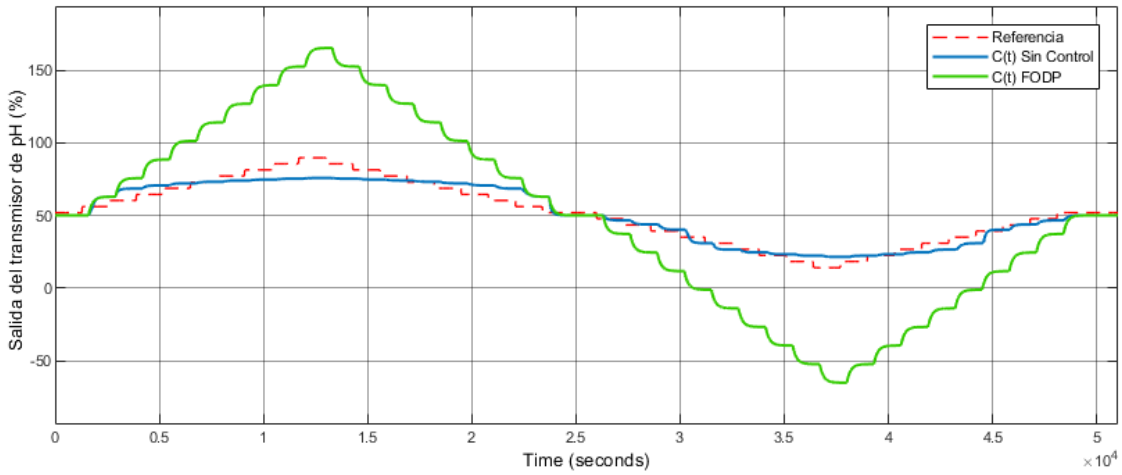


Figura 2.6. Salida del transmisor de pH, aproximación FODP.

Tomando en cuenta el rango de trabajo determinado en esta sección se procede a validar la señal de respuesta con la aproximación que más se acerca al comportamiento del proceso real.

2.2.2 VALIDACIÓN DEL PROCESO

Al implementar controladores basados en modelos se debe tener en cuenta que todos tienen inexactitudes e imprecisiones, esto se traduce en que el modelo diseñado se separa del proceso real, provocando problemas con el desempeño del controlador. Por ello, el uso del control por modos deslizantes se lo ha venido realizando desde una perspectiva empírica, a través de investigaciones aplicadas en variedad de procesos industriales, lo que ha permitido que pese a las diferencias entre el modelo y el proceso real se tenga una correcta dinámica del controlador.

La válvula inicialmente se encuentra en la posición de 52 [%], luego, a la entrada se le aplica un incremento de 4.2 [%], de modo que se tiene una Δu al instante de tiempo 7000 [s], observar la Figura 2.7.

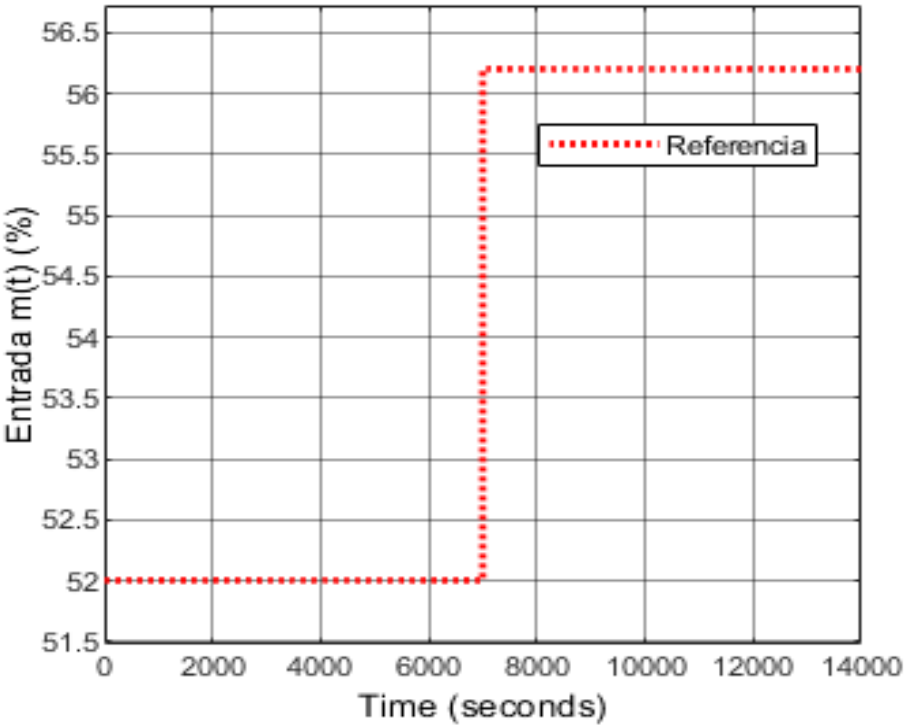


Figura 2.7. Entrada tipo paso con incremento de 4.2% al proceso.

Como se ha mencionado anteriormente, el tanque de neutralización de pH es un proceso altamente no lineal, lo que implica que las respuestas difieran en gran magnitud cuando se aplica un incremento negativo y positivo a la entrada del proceso. Es por ello, por lo que se modela el sistema considerando un solo paso positivo.

Primero, se realiza la validación de los resultados. En la Figura 2.8, se compara las dos gráficas obtenidas: la salida del sistema no lineal y la aproximación al modelo FOPDT $G(s)$, al parecerse mucho las dos gráficas se puede concluir que se obtiene una respuesta próxima al sistema real.

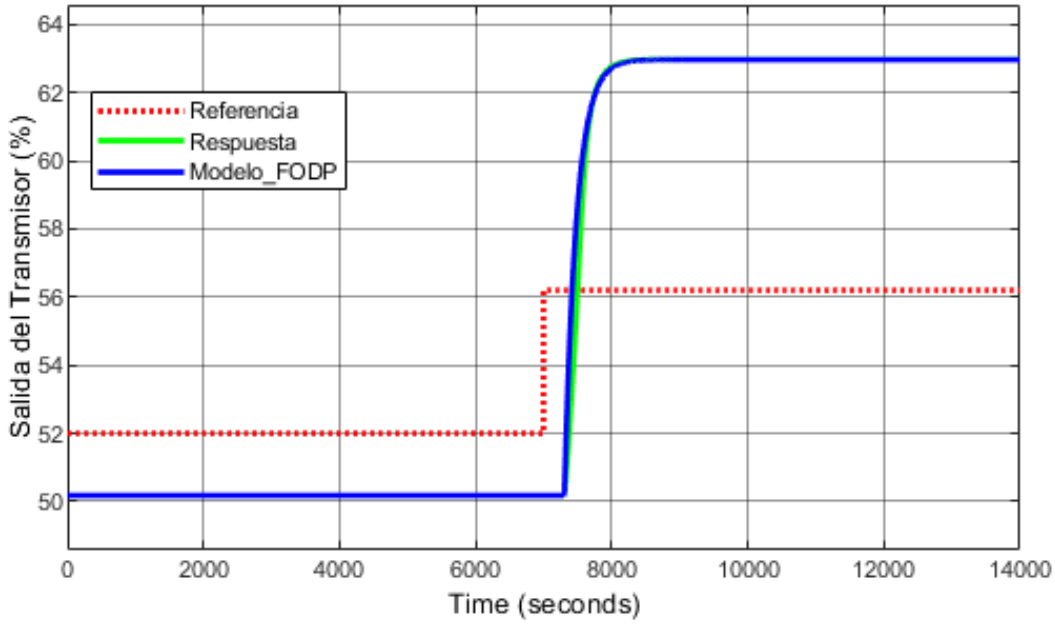


Figura 2.8. Validación respuesta no lineal con aproximación FOPDT.

De la Figura 2.8, se consiguen los valores de $t1$ y $t2$, con los cuales en la Ecuación (2.21), se detalla el cálculo de la ganancia K y para el cálculo se consideran las ecuaciones descritas en la sección 1.4.2 del capítulo uno;

$$t1 = 429.787$$

$$t2 = 549.022$$

$$K = \frac{62.958 - 50.163}{56.2 - 42} = \frac{12.795}{4.2} = 3.0464 \tag{2.21}$$

en la Ecuación (2.22), el cálculo de la constante de tiempo τ;

$$\tau = 1.5(119.235) = 178.1345 \tag{2.22}$$

en la Ecuación (2.23), el cálculo del retardo de tiempo t_0;

$$t_0 = (549.022 - 178.1345) = 370.88 \tag{2.23}$$

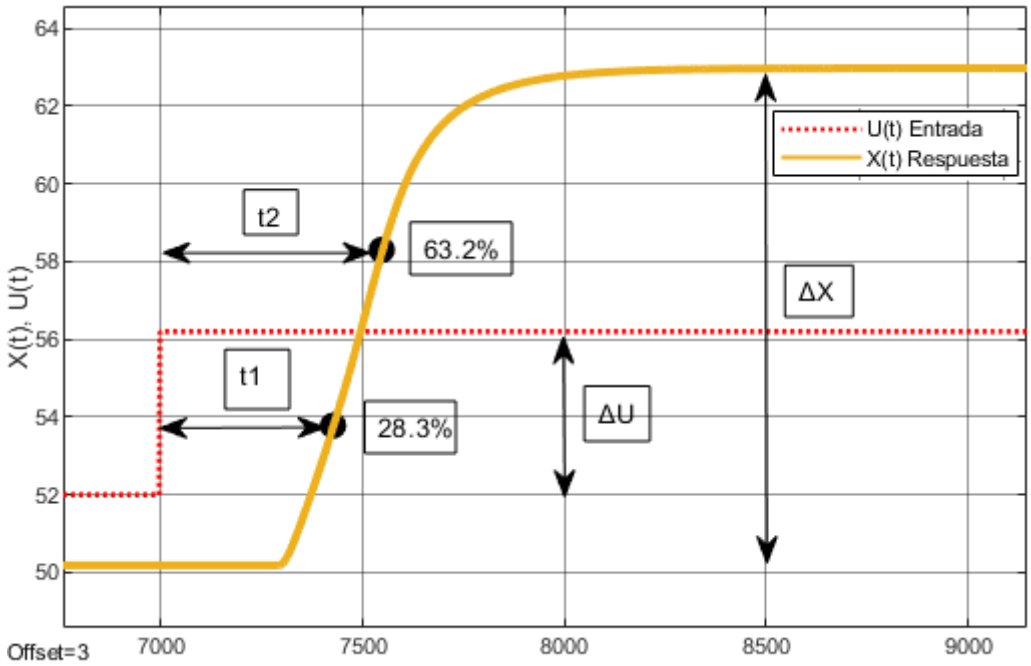


Figura 2.9. Salida del proceso ante variación del 4.2%.

En la Figura 2.9, se observa la señal de referencia ΔU de la cual se toma su valor de amplitud para hallar el valor de la ganancia o también llamada constante K. Por otro lado, de la amplitud de la señal de salida del proceso ΔX, también se toma su valor para hallar la ganancia K.

Finalmente, con los tres parámetros hallados: K, τ y t_0, observar Figura 2.9, se estructura la ecuación aproximada al modelo FOPDT aplicando el cambio de referencia positivo, obteniendo la función de transferencia $G(s)$ que se muestra en la Ecuación (2.24).

$$G(s) = \frac{3.0464\, e^{-370.88s}}{178.1345s + 1} \tag{2.24}$$

2.3 ESQUEMA SMC CLÁSICO: CON SUPERFICIE TIPO PID

En el presente proyecto se propuso comprobar la efectividad del control propuesto al compararlo con un esquema de control clásico SMC. Para ello, se inicia con el diseño del SMC con una superficie PID, el cual será objeto de comparación para análisis de resultados, en el capítulo de resultados.

Bajo los principios teóricos expuestos en el capítulo uno, el primer paso en el diseño de un esquema SMC es la selección de la superficie deslizante, la cual determina la dinámica que toma el sistema a lazo cerrado. La superficie llamada $S(t)$ durante el desarrollo de

este apartado, permite la mejora en términos de estabilidad y desempeño para cumplir la condición de seguimiento de trayectorias.

Generalmente se define la superficie deslizante por lo expresado en la Ecuación (2.25).

$$S(t) = e^{n-1} + \lambda_n \cdot e^{n-2} + \cdots + \lambda_1 \dot{e} + \lambda_0 e \tag{2.25}$$

La superficie deslizante seleccionada para el presente diseño es PID, la cual se toma de [12][15] y se expresa en la Ecuación (2.26).

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^n \int e(t)dt \tag{2.26}$$

El sistema del tanque de neutralización de pH es representado por un modelo de segundo orden, entonces reemplazando n igual a dos en la Ecuación (2.26), se obtiene lo desarrollado en la Ecuación (2.28).

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^2 \int e(t)dt \tag{2.27}$$

$$S(t) = \left(\frac{d^2}{dt^2} + 2\lambda\frac{d}{dt} + \lambda^2\right) \int e(t)dt \tag{2.28}$$

Sea: $\lambda_1 = 2\lambda$ y $\lambda_0 = \lambda^2$, la superficie de deslizamiento está dada por lo descrito en la Ecuación (2.29).

$$S(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int e(t)dt \tag{2.29}$$

Una vez obtenida la superficie con la cual se va a alcanzar la referencia, es necesario definir la acción de control que va a permitir el movimiento desde la condición inicial del proceso hasta la superficie deslizante escogida anteriormente.

La ley de control de un SMC con superficie PID responde al conjunto de dos condiciones, como se muestra en la Ecuación (2.30).

$$U_{PID}(t) = U_D(t) + U_{eq}(t) \tag{2.30}$$

La parte discontinua $U_D(x,t)$, también llamada condición de alcanzabilidad, se refiere a la rapidez con la que se va a alcanzar la superficie. Donde:

$$U_D(t) = K_D sign(S(t)) \tag{2.31}$$

Uno de los inconvenientes de la función signo es que genera chattering, es decir, oscilaciones de alta frecuencia, efecto que disminuye la vida útil del elemento final de control. Por ello, como solución para suavizar la función signo y lograr disminuir el chattering, se utiliza la función sigmoide, la cual está descrita por la Ecuación (2.32).

$$U_D(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} \tag{2.32}$$

La segunda condición de la acción de control es la parte continua $U_{eq}(t)$, o también llamada condición deslizante, la cual garantiza que se haya alcanzado la superficie y representa el comportamiento dinámico del sistema. La condición responde a lo que se muestra en la Ecuación (2.33).

$$\frac{dS(t)}{dt} = \dot{S}(t) = 0 \tag{2.33}$$

Derivando la superficie que se estableció en la Ecuación (2.29)(2.34), se obtiene:

$$\dot{S}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_0 e(t) = 0 \tag{2.34}$$

Donde el error del sistema se define con la Ecuación (2.35).

$$e(t) = r(t) - x(t) \tag{2.35}$$

Se obtiene la Ecuación (2.36), al reemplazar el error en la Ecuación (2.35).

$$\dot{S}(t) = \left(\ddot{r}(t) - \ddot{x}(t)\right) + \lambda_1\left(\dot{r}(t) - \dot{x}(t)\right) + \lambda_0 e(t) = 0 \tag{2.36}$$

Considerando que las referencias con las que se probará el sistema no son suaves, por ejemplo, una referencia tipo paso, las derivadas se hacen cero, se obtiene así la Ecuación (2.37).

$$-\ddot{x}(t) - \lambda_1 \dot{x}(t) + \lambda_0 e(t) = 0 \tag{2.37}$$

A partir de la planta de primer orden obtenida para el proceso, se puede convertir un modelo utilizando la aproximación de Taylor a un sistema de segundo orden, como se indica en la Ecuación (2.38).

$$G_p(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)(1 + t_0 s)} = \frac{X(s)}{U(s)} \tag{2.38}$$

$$K\,U(s) = X(s)(\tau . t_0 . s^2 + (\tau + t_0)s + 1) \tag{2.39}$$

La representación en el dominio del tiempo se expresa en la Ecuación (2.40)(2.40).

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{\tau + t_0}{\tau\, t_0}\frac{dx(t)}{dt} + \frac{1}{\tau\, t_0}\, x(t) = K\frac{U(t)}{\tau\, t_0} \tag{2.40}$$

Se suma la Ecuación (2.37) con la Ecuación (2.40), para obtener la ley de control de deslizamiento como se indica en la Ecuación (2.41).

$$U_{eq}(t) = \frac{x(t)}{K} + \frac{\tau\, t_0 \lambda_0}{K} e(t) \tag{2.41}$$

La ley de control total responde a la Ecuación (2.42).

$$U_{PID}(t) = K_D \frac{S(t)}{|S(t)| + \delta} + \frac{x(t)}{K} + \frac{\tau\, t_0 \lambda_0}{K} e(t) \tag{2.42}$$

Los valores de los parámetros descritos en la ley de control son calculados en base a las ecuaciones de sintonización establecidas en el algoritmo de búsqueda de Nelder-Mead.

Los parámetros que describen la parte continua del controlador se obtienen de las Ecuaciones (2.43) y (2.44).

$$\lambda_1 = \frac{\tau + t_0}{\tau\, t_0} \tag{2.43}$$

$$\lambda_0 = \frac{{\lambda_1}^2}{4} \tag{2.44}$$

Los parámetros que conforman la parte discontinua del controlador se consiguen de las Ecuaciones (2.45) y (2.46).

$$K_D = \frac{0.51}{|K|}\left(\frac{\tau}{t_0}\right)^{0.76} \tag{2.45}$$

$$\delta = 0.68 + 0.12|K|K_D\lambda_1 + \cdots \tag{2.46}$$

Se obtienen los siguientes valores:

$$\lambda_1 = \frac{\tau + t_0}{\tau\, t_0} = 0.5408 \tag{2.47}$$

$$\lambda_0 = \frac{{\lambda_1}^2}{4} = 0.07313 \tag{2.48}$$

$$K_D = \frac{0.51}{|K|}\left(\frac{\tau}{t_0}\right)^{0.76} = 0.7244 \tag{2.49}$$

$$\delta = 0.68 + 0.12|K|K_D\lambda_1 = 1.0968 \tag{2.50}$$

En la Figura 2.10, se muestra el diagrama de bloques que reproduce la estructura del controlador por modos deslizantes, además, se observa que la superficie deslizante que determina la acción de control sobre el proceso puede ser tipo PID, PI o PD. Este sistema clásico SMC, es el que se utilizará como base para comparar con el diseño DUAL-SMC propuesto en este trabajo de titulación.

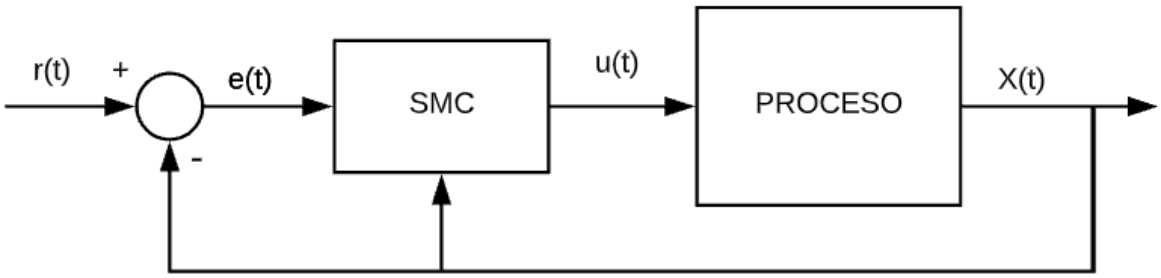


Figura 2.10. Diagrama de bloques del esquema de control por modos deslizantes clásico.

En el diagrama de bloques de la Figura 2.10, el esquema del control por modos deslizantes tiene una acción de control $\mathrm{U}(t)$, la cual va a estar definida de tres maneras; primero, si se considera la superficie PID la llamamos $U_{PID}(t)$, segundo, si se considera la superficie deslizante PI la llamamos $U_{PI}(t)$, y tercero, si se considera la superficie PD la llamamos $U_{PD}(t)$.

2.4 PROPUESTA DE CONTROL DUAL POR MODOS DESLIZANTES

Se realiza la propuesta partiendo del controlador dual por modos deslizantes desarrollado en [4], en el cual se utilizan dos superficies deslizantes; PID y PD. La presencia de las dos superficies y una sola salida controlada hace que la salida deseada en un punto de operación no sea fija, esto se debe a que las acciones de control y las ganancias para cada

superficie tienen una relación variable. En cuanto a las ganancias, se debe colocar una mayor ganancia en las señales con errores grandes y una menor ganancia en las señales con errores pequeños. En este proyecto de titulación se sintoniza el mismo controlador, pero para el proceso altamente no lineal tanque de neutralización de pH. En el diseño del controlador se deben cumplir los siguientes objetivos:

- Para la región transitoria se debe obtener una ley estable de control de modo deslizantes con superficie PD.
- Para la región de estado estable se debe obtener una ley estable de control de modo deslizantes con superficie PID.
- Obtener una relación adecuada de alta ganancia/baja ganancia para obtener una respuesta suave entre las leyes de control de las superficies PD/PID.
- Obtener una conmutación suave entre las leyes de control de las superficies PD/PID.

Para poder construir el esquema del controlador propuesto, se inicia con el diseño del SMC-PD para la sintonización de la superficie deslizante en el controlador DUAL-SMC. A continuación, se detalla el diseño del SMC con superficie PD.

2.4.1 DISEÑO DUAL-SMC TIPO PID/PD

Se parte por definir la superficie deslizante para el presente diseño, esta es PD, la cual se toma de [12][15] y se expresa en la Ecuación .

$$S_1(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{n-1} e(t) \tag{2.51}$$

El sistema del tanque de neutralización de pH es representado por un modelo de segundo orden, entonces reemplazando n igual a dos en la Ecuación (2.51), se obtiene lo desarrollado en la Ecuación (2.53).

$$S_1(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{1} e(t) \tag{2.52}$$

$$S_1(t) = \left(\frac{de(t)}{dt} + \lambda e(t)\right) \tag{2.53}$$

Una vez obtenida la superficie con la cual se va a alcanzar la referencia, es necesario definir la acción de control que va a permitir el movimiento desde la condición inicial del proceso hasta la superficie deslizante escogida anteriormente.

La ley de control de un SMC con superficie PD responde al conjunto de dos condiciones, como se muestra en la Ecuación (2.54).

$$U_{PD}(t) = U_{D1}(t) + U_{eq1}(t) \tag{2.54}$$

La parte discontinua $U_D(x,t)$, también llamada condición de alcanzabilidad, se refiere a la rapidez con la que se va a alcanzar la superficie. Donde:

$$U_{D1}(t) = K_D sign(S_1(t)) \tag{2.55}$$

Uno de los inconvenientes de la función signo es que genera chattering, es decir, oscilaciones de alta frecuencia, efecto que disminuye la vida útil del elemento final de control. Por ello, como solución para suavizar la función signo y lograr disminuir el chattering, se utiliza la función sigmoide, la cual está descrita por la Ecuación (2.56).

$$U_{D1}(t) = K_D \frac{S_1(t)}{|S_1(t)| + \delta_1} \tag{2.56}$$

La segunda condición de la acción de control es la parte continua $U_{eq}(t)$, o también llamada condición deslizante, la cual garantiza que se haya alcanzado la superficie y representa el comportamiento dinámico del sistema. La condición responde a lo que se muestra en la Ecuación (2.57).

$$\frac{dS(t)}{dt} = \dot{S}(t) = 0 \tag{2.57}$$

Derivando la superficie que se estableció en la Ecuación (2.58), se obtiene:

$$\dot{S}(t) = \ddot{e}(t) + \lambda \dot{e}(t) = 0 \tag{2.58}$$

Donde el error del sistema se define con la Ecuación (2.59).

$$e(t) = r(t) - x(t) \tag{2.59}$$

Se obtiene la Ecuación (2.60), al reemplazar el error en la Ecuación (2.58).

$$\dot{S}(t) = \left(\ddot{r}(t) - \ddot{x}(t)\right) + \lambda\left(\dot{r}(t) - \dot{x}(t)\right) = 0 \tag{2.60}$$

Considerando que las referencias con las que se probará el sistema no son suaves, por ejemplo, una referencia tipo paso, las derivadas se hacen cero, se obtiene así la Ecuación (2.61).

$$-\ddot{x}(t) - \lambda\dot{x}(t) = 0 \tag{2.61}$$

A partir de la planta de primer orden obtenida para el proceso, se puede convertir un modelo utilizando la aproximación de Taylor a un sistema de segundo orden, como se indica en la Ecuación (2.62).

$$G_p(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)(1 + t_0 s)} = \frac{X(s)}{U(s)} \tag{2.62}$$

$$K\,U(s) = X(s)(\tau.t_0.s^2 + (\tau + t_0)s + 1) \tag{2.63}$$

La representación en el dominio del tiempo se expresa en la Ecuación (2.64).

$$\frac{d^2x(t)}{dt^2} + \frac{\tau + t_0}{\tau\,t_0}\frac{dx(t)}{dt} + \frac{1}{\tau\,t_0}\,x(t) = K_1\frac{U(t)}{\tau\,t_0} \tag{2.64}$$

Se suma la Ecuación (2.61)(2.37) con la Ecuación (2.64)(2.40), para obtener la ley de control de deslizamiento como se indica en la Ecuación (2.65).

$$U_{eq1}(t) = \frac{\tau.t_0}{K}\left[\frac{x(t)}{\tau\,t_0}\right] \tag{2.65}$$

La ley de control total responde a la Ecuación (2.66).

$$U_{PD}(t) = K_D\frac{S_1(t)}{|S_1(t)| + \delta_1} + \frac{x(t)}{K} \tag{2.66}$$

Los valores de los parámetros descritos en la ley de control son calculados en base a las ecuaciones de sintonización establecidas en el algoritmo de búsqueda de Nelder-Mead.

El parámetro que describe la parte continua del controlador se obtiene de la Ecuación (2.67).

$$\lambda = \frac{\tau + t_0}{\tau\,t_0} \tag{2.67}$$

Los parámetros que conforman la parte discontinua del controlador se consiguen de las Ecuaciones (2.68) y (2.69).

$$K_D = \frac{0.51}{|K|}\left(\frac{\tau}{t_0}\right)^{0.76} \tag{2.68}$$

$$\delta_1 = 0.68 + 0.12|\mathrm{K}|K_D\lambda + \cdots \tag{2.69}$$

Se obtienen los siguientes valores:

$$\lambda = \frac{\tau + t_0}{\tau\, t_0} = 0.5408 \tag{2.70}$$

$$K_D = \frac{0.51}{|\mathrm{K}|}\left(\frac{\tau}{t_0}\right)^{0.76} = 0.7244 \tag{2.71}$$

$$\delta_1 = 0.68 + 0.12|\mathrm{K}|K_D\lambda = 1.0968 \tag{2.72}$$

En la Figura 2.11, se muestra el diagrama de bloques que reproduce la estructura interna del controlador DUAL-SMC con superficie PD/PID.

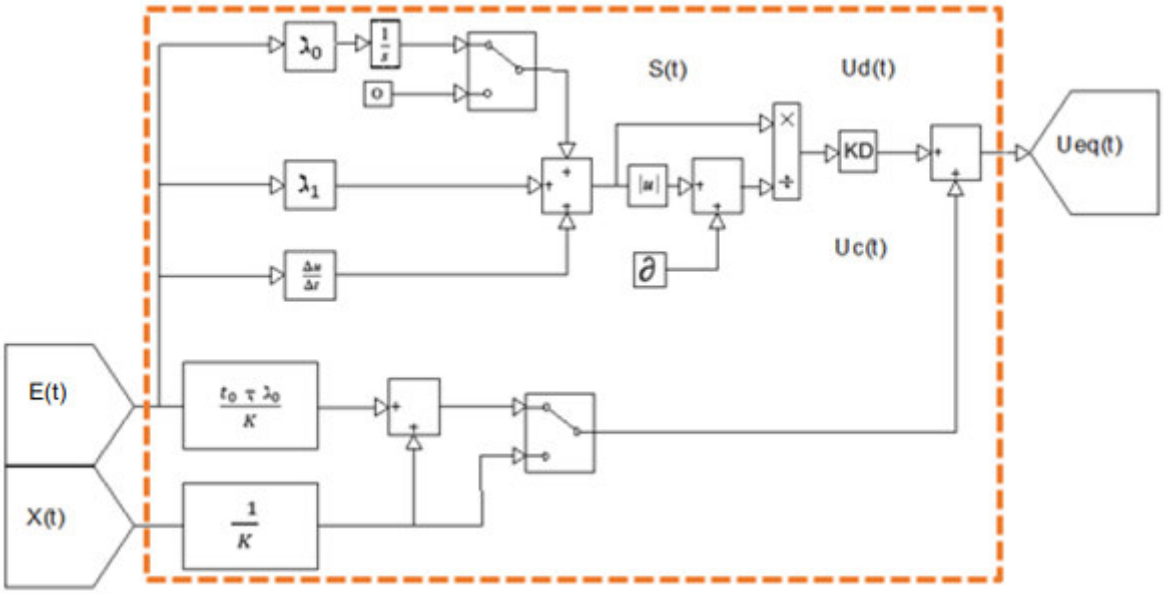


Figura 2.11. Diagrama de bloques del esquema del controlador DUAL-SMC tipo PD/PID.

En la Figura 2.12, se muestra la respuesta de la salida del proceso que se obtuvo al ingresar una entrada paso al sistema. Como se puede observar el controlador DUAL-SMC con superficies PD/PID sintonizado presenta considerables oscilaciones de inicio para

luego estabilizarse. Sin embargo, presenta un error puesto que no alcanza el valor de la referencia. Por otro lado, el esquema clásico SMC controla de forma adecuada al proceso, puesto que llega a la referencia rápidamente, la respuesta es suave, no tiene máximos sobrepicos y no presenta oscilaciones, es decir da estabilidad al sistema.

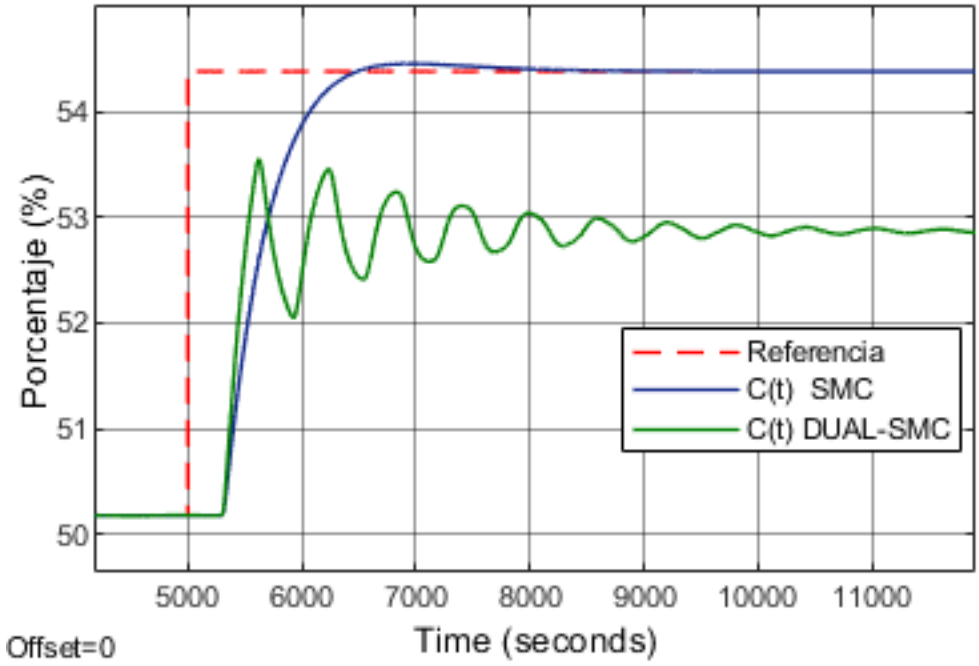


Figura 2.12. Salida del proceso ante cambios de una entrada paso.

Se realizaron varios cambios de referencia en la entrada, observar Figura 2.13. Donde las oscilaciones no llegan a estabilizarse previo al inicio del siguiente paso. En el primer y último cambio de referencia se estabiliza la respuesta, pero sigue presentando un error en estado estable. En contraste, el controlador tipo SMC ejerce un buen control ante los cambios de referencia, pero en el segundo, tercero y cuarto cambio presenta un máximo sobrepico representativo.

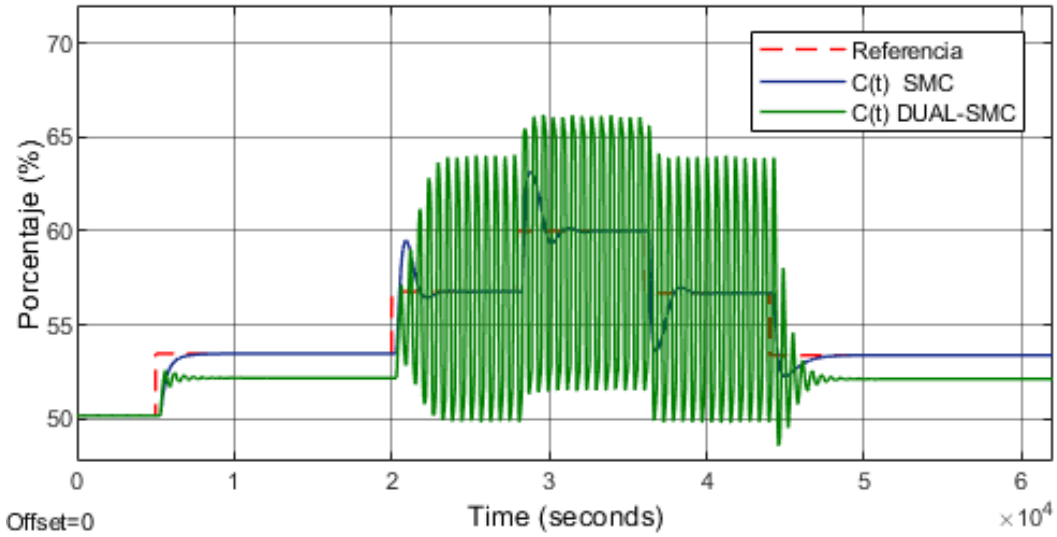


Figura 2.13. Salida del proceso ante cambios de referencia.

En la Figura 2.14, se muestra la perturbación aplicada al sistema, la cual representa a la corriente ácida.

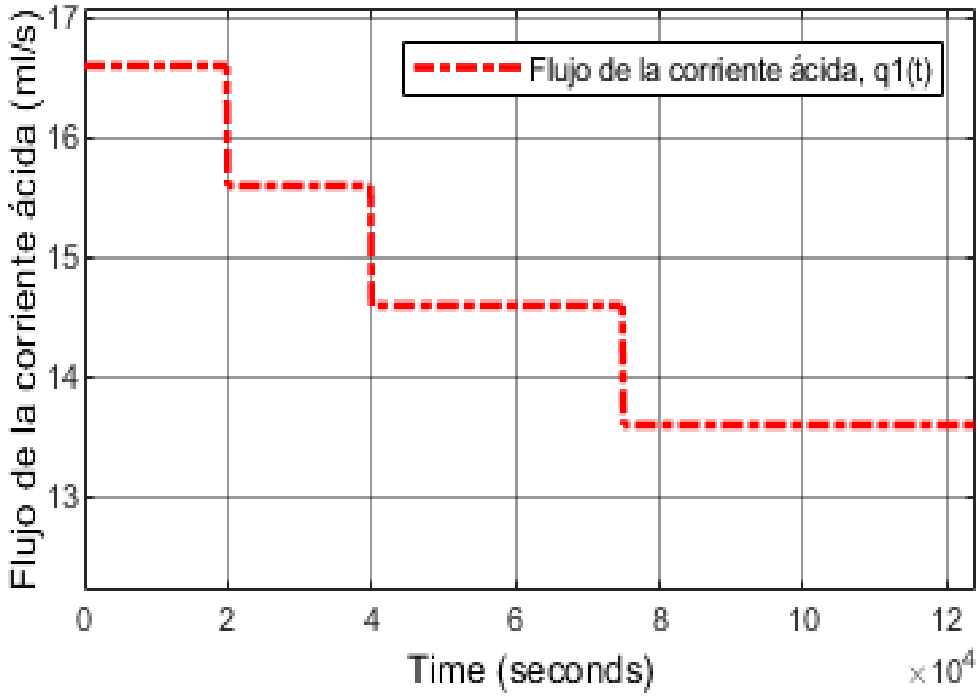


Figura 2.14. Perturbación, flujo de la corriente ácida $q_1(t)$.

Finalmente, se configuró las perturbaciones que se observan en la Figura 2.15, obteniendo oscilaciones más significativas, y a partir de la segunda perturbación tanto el controlador propuesto DUAL-SMC como el SMC ya no realizan la tarea de regulación.

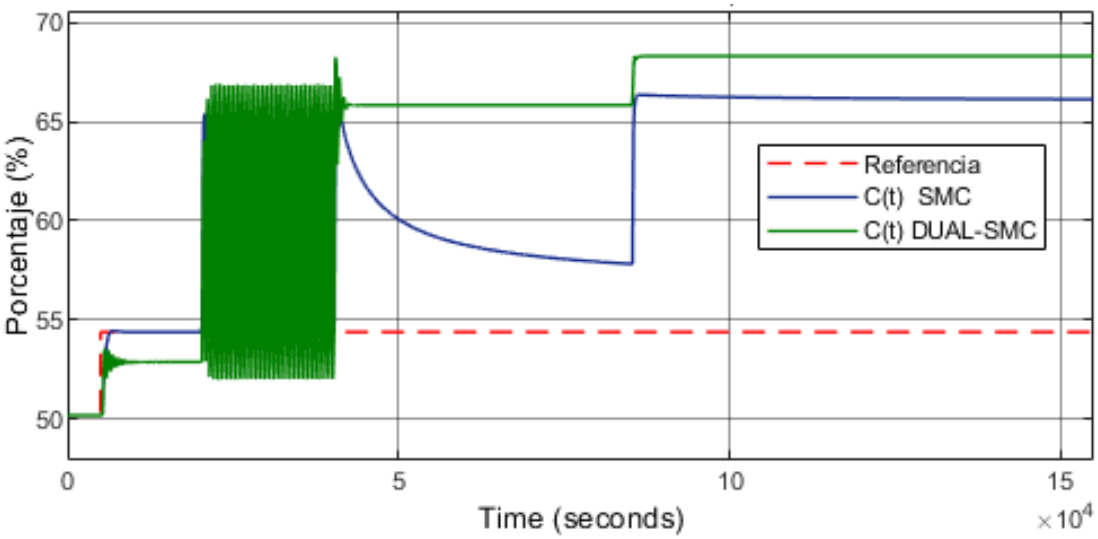


Figura 2.15. Salida del proceso ante perturbaciones.

Además, en las tres pruebas mencionadas se observa que el controlador propuesto no alcanza la referencia, lo que indica que no alcanza a reducir el error. En cuanto al SMC clásico, tiene una mejor respuesta ante la entrada paso y el cambio de referencia, sin embargo, es notorio su deficiencia frente a perturbaciones.

Con lo expuesto en el anterior párrafo se puede mencionar que para un proceso químico altamente no lineal como es el caso del tanque de neutralización de pH, no es viable el controlador DUAL-SMC con superficie PD-PID, lo cual es razonable, debido a que el PD es bueno para mejorar respuestas transitorias, pero no es efectivo para sistemas inestables, porque amplifica las oscilaciones y el error.

En la industria química el 90% de los controladores son de tipo PI, y solo el 10% restante usa entre PID y PD [16]. Entonces, tomando en cuenta la efectividad del control PI para fines prácticos, y considerando las características especiales que presentes en el proceso altamente no lineal, tanque de neutralización de pH, se toma a consideración la implementación de una superficie PI para suplir las necesidades de control.

Finalmente, tras los resultados expuestos en este apartado la propuesta es rediseñar el controlador DUAL-SMC con superficie PID-PD. Para ello, se cambia la superficie deslizantes PD por una PI. El diseño del SMC-PI se muestra en el tomo dos del presente proyecto de titulación.

En el tomo dos del presente proyecto se parte del diseño del controlador SMC con superficie PI, el cual se fusiona con la superficie PID ya diseñada, para acoplarlo con las

definiciones del control DUAL. Finalmente, se configura en la misma estructura del controlador DUAL-SMC las dos superficies.

3. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 CONCLUSIONES

- Se analizó y determinó las características y ecuaciones matemáticas que representan el modelo de la planta, tanque de neutralización de pH.
- Se estudió los principios del control SMC, control DUAL y validó el proceso altamente no lineal: tanque de neutralización de pH. Aplicando el método empírico se obtuvo un modelo de primer orden con tiempo muerto, para un rango específico de 50% a 60% de la señal del transmisor de pH.
- Se diseñó un esquema de control Dual por modos deslizantes, el cual combina los conceptos de un SMC con superficie PID y los conceptos de un control proporcional-derivativo, bajo los principios de conmutación del esquema Dual, se determinó que no es factible implementar este controlador puesto que, la naturaleza del proceso responde rápidamente ante cualquier cambio de referencia y perturbaciones, además, la parte diferencial amplifica el error de posición, provocando inestabilidad en el proceso.

3.2 RECOMENDACIONES

- Siempre que se trabaje con procesos no lineales, se debe verificar el funcionamiento del proceso en el mayor número de puntos posibles, dentro del rango de operación, con el fin de estimar la variación de la no linealidad y con ello elegir el rango de trabajo óptimo para realizar un control.
- Para procesos químicos como el tanque de neutralización de pH, no se recomienda implementar controladores con acción derivativa, ya que la respuesta del sistema es oscilante, tarda mayor tiempo en estabilizarse y además amplifica el error de posición.

4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] L. F. Lozano-Valencia, L. F. Rodríguez-García, y D. Giraldo-Buitrago, “Diseño, implementación y validación de un controlador PID autosintonizado”, *TecnoLógicas*, núm. 28, p. 33, 2012, doi: 10.22430/22565337.12.

[2] E. J. Iglesias Sanchez, “Using fuzzy logic to enhance control performance of sliding mode control and dynamic matrix control”, *Grad. Theses Diss.*, 2006.

[3] B. B. Musmade, R. K. Munje, y B. M. Patre, “Design of sliding mode controller to chemical processes for improved performance”, *Int. J. Control Autom.*, vol. 4, núm. 1, pp. 15–32, 2011.

[4] O. Camacho, C. Obando, y R. Rojas, “Dual-Mode Sliding Mode Controller for Non-Linear Chemical Processes”, *J. Process Control*, 2021.

[5] D. E. Seborg y Thomas F. Edgar, *Process Dynamics and Control Third Edition Dale*. 2011.

[6] J.-J. Slotine y W. Li, *Applied NoLinear Optimal Control*. 1991.

[7] V. M. Alfaro Ruíz, “Identificación De Procesos Sobreamortiguados Utilizando Técnicas De Lazo Cerrado”, *Rev. Ing.*, vol. 11, núm. 1–2, 2011, doi: 10.15517/ring.v11i1-2.604.

[8] G. Barton, “Process control: Designing processes and control systems for dynamic performance”, *J. Process Control*, vol. 6, núm. 4, p. 263, 1996, doi: 10.1016/s0959-1524(96)90017-7.

[9] R. Mantz, “Control por Modos Deslizantes | Tomo 1. Modos deslizantes de primer orden: Fundamentos y aplicaciones”, p. 219, 2020.

[10] B. M. y S. M. J., “Implementación de un controlador robusto de estructura variable mediante FPGA”, *Rev. Tecnol. y Desarro.*, vol. 2, núm. 1996–8085, pp. 2–5, 2004.

[11] C. A. Obando martínez, “Diseño Y Simulación De Un Controlador Por Modos Deslizantes Basado En Una Superficie Híbrida Para Seguimiento En Procesos No Lineales”, p. 86, 2020.

[12] O. Camacho y C. A. Smith, “Sliding mode control: An approach to regulate nonlinear chemical processes”, *ISA Trans.*, vol. 39, núm. 2, pp. 205–218, 2000, doi: 10.1016/s0019-0578(99)00043-9.

[13] S.-C. Tan, Y.-M. Lai, y C. K. Tse, *Sliding Mode Control of Switching Power Converters*. 2012.

[14] Castaño S, "▷ Acción de Control Integral - Control PID - [enero, 2022]", *Castaño S.*, 2019. https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/accion-de-control-integral-control-pid/ (consultado ene. 10, 2022).

[15] C. Obando, D. Chávez, P. Leica, y O. Camacho, "Sliding mode controller based on a hybrid surface for tracking improvement of non-linear processes", *IFAC-PapersOnLine*, vol. 53, núm. 2, pp. 11747–11752, 2020, doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.679.

[16] C. Smith y A. Corripio, *Control automático de procesos: Teoría y práctica*. 1991.