

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 II**

ERICK RENÉ TACO JIMÉNEZ

erick.taco@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO, PhD.

oscar.camacho@epn.edu.ec

Quito, marzo 2022

CERTIFICACIONES

Yo, Erick Rene Taco Jiménez 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.

ERICK RENE TACO JIMENEZ

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Erick Rene Taco Jiménez, 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.

ERICK RENE TACO JÍMENEZ

ING. OSCAR EDUARDO CAMACHO QUINTERO

DEDICATORIA

Dedico el trabajo a mi madre Pilar Jiménez y mi hermano Ronald Vallejo, por toda su gran paciencia durante toda la carrera universitaria, además de ser una gran luchadora, es un gran ejemplo de constancia y trabajo de duro, siendo ellos en cada momento un apoyo incondicional.

A mis tíos que son personas muy valiosas, que me han apoyado en todo momento y quienes me han brindado valiosos consejos para la vida.

A mis amigos los que son personas en quien confiar, de las cuales he aprendido a luchar, tanto en tiempos buenos y malos, los cuales se convirtieron en una segunda familia.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi madre por todo su apoyo incondicional, cariño y comprensión durante toda la carrera.

Agradezco al Ing. Oscar Camacho, cuya dirección, colaboración y enseñanzas permitió el desarrollo del presente trabajo.

A mis amigos Francisco, Moisés, Ana, Darío, Bryan, Joel, David, Pablo, Juan y demás amigos, con quienes hemos compartido buenos momentos y experiencias inolvidables a lo largo de la carrera.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VI
ABSTRACT	VII
2. INTRODUCCIÓN.....	1
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	2
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	2
2.3 ALCANCE	3
3. METODOLOGÍA.....	3
3.1 PROPUESTA DE CONTROL DUAL POR MODOS DESLIZANTES.....	4
3.1.1 DISEÑO DUAL-SMCTIPO PID/PI.....	5
4. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	13
4.1 RESULTADOS	13
4.1.1 PRUEBAS DE SEGUIMIENTO Y REGULACIÓN EN EL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH DISMINUYENDO EL FLUJO DE CORRIENTE.	14
4.1.2 PRUEBAS DE SEGUIMIENTO Y REGULACIÓN EN EL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH AUMENTANDO EL FLUJO DE CORRIENTE.....	23
4.1.3 PRUEBAS DE SEGUIMIENTO EN EL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH ANTE UN A ENTRADA TIPO ESCALERA.....	31
4.1.4 ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE RENDIMIENTO OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE SEGUIMIENTO EN EL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH.....	36
4.2 CONCLUSIONES.....	38
4.3 RECOMENDACIONES	39
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

RESUMEN

El presente documento muestra el desarrollo de un controlador por modos deslizantes, basado en la definición del control por modo dual aplicado a un proceso altamente no lineal. El controlador propone mejorar el rendimiento del SMC clásico, atendiendo características de seguimiento de trayectorias y sobre todo mejorar la regulación del proceso altamente no lineal, con parámetros variables, como es el caso del tanque de neutralización de pH.

En el tomo II, se expone la metodología del diseño del controlador dual (DUAL-SMC) con una superficie tipo PI, lo que permite realizar un intercambio de superficies en el momento que se requiera para obtener una mejor respuesta. Partiendo del diseño se procede a una sintonización del controlador dual (DUAL-SMC) y se pone a prueba ante diferentes tipos de entradas que se encuentran dentro del rango de trabajo especificado en el tomo uno.

Finalmente, se realiza la comparación de las respuestas obtenidas del controlador dual (DUAL-SMC) con el controlador SMC clásico en la escala de pH, señal de control y señal del transmisor, tomado en cuenta algunos índices de rendimiento, mostrando los resultados y gráficos obtenidos antes las diferentes entradas.

PALABRAS CLAVE: proceso altamente no lineal, regulación, controlador por modos deslizantes, controlador dual.

ABSTRACT

In this present document it shows a sample of the development of a controller by sliding mode based on the definition of control by dual mode applying a process highly no linear. The controller proposed to improve the performance of the classic SMC, serving trajectory tracking features and overall improving the regulation of the highly no linear process, with variable parameters, like in the case of the pH neutralization tank.

In the volume II, it shows the methodology of the DUAL-SMC design with a PI kind of surface, which allows to perform an exchange of surface at the moment it requires to obtain a better response. Starting from the design, it proceeds to a synchronization with the DUAL-SMC controller, and it put to test in view of different entrees that are within the range of the job specified in the volume I.

Finally, the comparation between of the samples of the DUAL-SMC and the basic SMC controller is made in pH values, control signal and transmitter signal, taking into consideration the performance index archiving to reduce wildly reduce the on spikes in the response of the processes in front of the reference change and disturbance in any of the samples.

KEYWORDS: highly non-linear process, regulation, sliding mode controller, dual controller.

1. INTRODUCCIÓN

Los procesos dentro de la industria se vuelven más complejos conforme la tecnología va avanzando con los años. Se parte de un sistema básico compuesto por un sensor, controlador y actuador. Estando presentes en la industria en su mayoría procesos complejos, no lineales. Por un lado, se evalúan un mayor número de variables, lo que implica un incremento en la instrumentación, la cual no está libre de errores por retardo de tiempos o variación de los parámetros en el modelado. Siempre existirá una diferencia entre el modelo representado con un conjunto de ecuaciones matemáticas y la dinámica del proceso real cuando se utilizan técnicas de modelado empíricas.

Para controlar procesos no lineales la técnica de control con mayor impacto es el control robusto por modos deslizantes (SMC), esto debido a que puede estabilizar el sistema y tiene la capacidad de rechazar perturbaciones, y es insensible a las variaciones de los parámetros por deterioro de los elementos que componen el sistema [1]. Un ejemplo de sistema altamente no lineal es el tanque de neutralización de pH, con el cual se va a desarrollar en este proyecto de titulación, su alta no linealidad se debe a la variación de los parámetros según el rango de operación, por ello, se hace un control solo en un rango específico de Ph [2].

El SMC se fundamenta en diseñar una superficie deslizante en función de medir una variable de entrada. Constantemente el controlador va conmutando hasta alcanzar la superficie seleccionada. Finalmente, el sistema debe seguir la trayectoria manteniéndose sobre la superficie deslizante e interactuando con la dinámica previamente seleccionada hasta llegar al punto de equilibrio. Por otro lado, se toma el control Dual como la fusión de dos controladores aprovechando sus características individuales y mejorando en su conjunto el rendimiento del controlador y mantener la estabilidad en el sistema.

El Controlador SMC de Modo Dual es un controlador publicado recientemente (2020) en [3], donde se demostró tener una mejor respuesta que un SMC, considerando rendimiento y estabilidad para procesos químicos no lineales. El controlador fue aplicado en dos procesos químicos: tanque reactor y tanque de mezclado. Para el presente trabajo de titulación se parte de este estudio y se lo aplica al proceso altamente no lineal, tanque de neutralización de pH.

El controlador propuesto en [4], se diseña utilizando la conmutación entre una superficie PID y PD. Sin embargo, para el proceso químico altamente no lineal, es difícil sintonizar un buen controlador con alto rendimiento para realizar tareas de seguimiento de trayectorias

y sobre todo regulación (rechazo de perturbaciones). Por las razones mencionadas y para cumplir las condiciones de rendimiento se propone el diseño y simulación del controlador SMC de Modo Dual utilizando una conmutación entre una superficie PID y PI, lo que da como resultado una buena ley de control para la parte transitoria y la parte permanente del sistema.

En el presente tomo, se inicia con la metodología del diseño del controlador DUAL-SMC tipo PID-PI. En el diseño del controlador se considera algunos parámetros para la sintonización, como las superficies de funcionamiento, es decir, una superficie PID y una superficie PI, las mismas que forman parte de la estructura del controlador DUAL-SMC.

El controlador DUAL-SMC se conforma de dos switches, los mismos que permiten realizar un intercambio de las superficies del controlador, además, se considera en la sintonización una conmutación suave entre las leyes de control de las superficies PI/PID.

Al controlador diseñado se lo estimula con varios tipos de entradas diferentes y se prueba su funcionamiento ante diferente tipo de perturbaciones, para el análisis de seguimiento de referencia y regulación en señal en del trasmisor del controlador DUAL-SMC.

Para conocer la eficiencia del controlador DUAL-SMC se compara con un controlador clásico SMC, mediante los índices de rendimiento ISU e ISE, los cuales se relacionan con la señal de control y la cantidad de error respectivamente. Con el análisis de las respuestas obtenidas ante las pruebas de seguimiento, regulación y los valores de índices de rendimiento, es posible conocer el desempeño del controlador DUAL-SMC.

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

- Diseñar el esquema de control Dual por modos Deslizantes (DUAL-SMC), el cual combina los conceptos de un SMC con superficie PID y los conceptos del esquema de control proporcional-diferencial-integral, bajo los principios de un esquema Dual, para seguimiento de trayectoria y regulación del proceso no lineal: tanque de neutralización de pH.

- Simular el sistema no lineal: tanque de neutralización de pH, aplicando el control DUAL-SMC, usando el software computacional Simulink de Matlab.
- Comprobar y comparar los resultados, entre el esquema de control diseñado (DUAL-SMC) con un SMC clásico.

1.3 ALCANCE

- Diseño del esquema de control Dual por modos Deslizantes (DUAL-SMC), el cual combina los conceptos de un SMC con superficie PID y los conceptos del esquema de control proporcional-diferencial-integral, bajo los principios de un esquema Dual, para seguimiento de trayectoria y regulación de un proceso, tanque de neutralización de pH, para el cual se hará el control solo en un rango de 50 a 60 (%) de la variable manipulada.
- Simulación de los esquemas de control diseñados usando el software computacional Simulink de Matlab realizando las siguientes pruebas: cambios de referencia tipo paso, y perturbaciones con el fin de constatar la robustez y el rendimiento del esquema de control.
- Comprobación y comparación del rendimiento del esquema de control diseñado (DUAL-SMC) con un SMC clásico, analizando para ello los valores obtenidos con los siguientes índices de desempeño: ISE, ISU, máximo sobre pico y tiempo de establecimiento.

2. METODOLOGÍA

El trabajo se construye mediante la investigación cuantitativa, la misma que parte como eje central del estudio del control por modos deslizantes, DUAL-SMC, el cual se encuentra desarrollado en [5]. El presente trabajo se desarrolla con el diseño del controlador DUAL-SMC, con el cual se realizarán diferentes tipos de pruebas, tanto para seguimiento de trayectoria como para regulación, además, se utilizará algunos índices de desempeño que permite cuantificar la eficiencia del controlador DUAL-SMC usando un método deductivo.

Para el desarrollo del proyecto de titulación fue necesario recopilar la información de fuentes principales como libros y publicaciones técnicas. También, se usaron fuentes secundarias como trabajos de titulación, artículos académicos, papers científicos.

El trabajo de titulación tomo dos, parte con el diseño del controlador DUAL-SMC con superficie tipo PI. El diseño inicia con el modelo matemático de la planta: tanque de neutralización de pH, el modelo se obtuvo en el tomo uno, usando el método empírico.

Luego, es necesario crear el esquema de control DUAL-SMC con una superficie PI con la que se diseña el esquema de control, el mismo que es puesto a prueba ante varios tipos de entradas. Además, se realiza un análisis y comparación de las respuestas obtenidas.

Finalmente, se desarrolla la propuesta del controlador dual por modos deslizantes.

2.1 PROPUESTA DE CONTROL DUAL POR MODOS DESLIZANTES

Se realiza la propuesta partiendo del controlador dual por modos deslizantes desarrollado en [5], en el cual se utilizan dos superficies deslizantes; PID y PI. 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 PI.
- 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 PI/PID.
- Obtener una conmutación suave entre las leyes de control de las superficies PI/PID.

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

2.1.1 DISEÑO DUAL-SMCTIPO PID/PI

Se parte por definir la superficie deslizante para el presente diseño, esta es PI, la cual se toma de [6][7] y se expresa en la Ecuación (2.1).

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^n e(t) \quad (2.1)$$

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 (2.1), se obtiene lo desarrollado en la Ecuación (2.3).

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^2 \int e(t) dt \quad (2.2)$$

$$S(t) = \left(\frac{d^2}{dt^2} + 2\lambda \frac{d}{dt} + \lambda^2 \right) \int e(t) dt \quad (2.3)$$

Sea: $\lambda_1 = 2\lambda$ y $\lambda_0 = \lambda^2$, además descartando la parte derivativa, se obtiene la superficie de deslizamiento dada por lo descrito en la Ecuación (2.4).

$$S_2(t) = \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int e(t) dt \quad (2.4)$$

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 (2.5).

$$U_{PI}(t) = U_{D2}(t) + U_{eq2}(t) \quad (2.5)$$

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:

$$U_{D2}(t) = K_D \text{sign}(S_2(t)) \quad (2.6)$$

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 (2.7).

$$U_{D2}(t) = K_D \frac{S_2(t)}{|S_2(t)| + \delta_2} \quad (2.7)$$

La segunda condición de la acción de control es la parte continua $U_{eq2}(t)$, 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 (2.8).

$$\frac{dS_2(t)}{dt} = \dot{S}_2(t) = 0 \quad (2.8)$$

Derivando la superficie que se estableció en la Ecuación (2.9), se obtiene:

$$\dot{S}_2(t) = \lambda_1 \dot{e}(t) + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (2.9)$$

Donde el error del sistema se define con la Ecuación (2.10).

$$e(t) = r(t) - x(t) \quad (2.10)$$

Se obtiene la Ecuación (2.11), al reemplazar el error en la Ecuación (2.9).

$$\dot{S}_2(t) = \lambda_1 (\dot{r}(t) - \dot{x}(t)) + \lambda_0 (r(t) - x(t)) = 0 \quad (2.11)$$

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 (2.12).

$$-\lambda_1 \dot{x}(t) - \lambda_0 x(t) = 0 \quad (2.12)$$

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 (2.13).

$$G_p(s) = \frac{K}{(\tau s + 1)(1 + t_0 s)} = \frac{X(s)}{U(s)} \quad (2.13)$$

$$K U(s) = X(s)(\tau \cdot t_0 \cdot s^2 + (\tau + t_0)s + 1) \quad (2.14)$$

La representación en el dominio del tiempo se expresa en la Ecuación (2.15).

$$\frac{d^2 x(t)}{dt^2} + \frac{\tau + t_0}{\tau t_0} \frac{dx(t)}{dt} + \frac{1}{\tau t_0} x(t) = K \frac{U(t)}{\tau t_0} \quad (2.15)$$

Se suma la Ecuación (2.12) con la Ecuación (2.15), para obtener la ley de control de deslizamiento como se indica en la Ecuación (2.16).

$$U_{eq2}(t) = \frac{\tau \cdot t_0}{K} \left[\left(\frac{1}{\tau t_0} - \lambda_0 \right) x(t) \right] \quad (2.16)$$

La ley de control total responde a la Ecuación (2.17).

$$U_{PI}(t) = K_D \frac{S_2(t)}{|S_2(t)| + \delta_2} + \frac{x(t)}{K} - \frac{\tau \cdot t_0 \cdot \lambda_0}{K} x(t) \quad (2.17)$$

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 (2.18) y (2.19).

$$\lambda_1 = \frac{\tau + t_0}{\tau t_0} \quad (2.18)$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1^2}{4} \quad (2.19)$$

Los parámetros que conforman la parte discontinua del controlador se consiguen de las Ecuaciones (2.20) y (2.21).

$$K_D = \frac{0.51}{|K|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} \quad (2.20)$$

$$\delta_2 = 0.68 + 0.12 |K| K_D \lambda_1 + \dots \quad (2.21)$$

Se obtienen los siguientes valores:

$$\lambda_1 = \frac{\tau + t_0}{\tau t_0} = 0.5408 \quad (2.22)$$

$$\lambda_0 = \frac{\lambda_1^2}{4} = 0.07313 \quad (2.23)$$

$$K_D = \frac{0.51}{|K|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} = 0.7244 \quad (2.24)$$

$$\delta_2 = 0.68 + 0.12|K|K_D\lambda_1 = 1.0968 \quad (2.25)$$

Para el desarrollo de la propuesta de control, se parte de la técnica de control avanzado tipo SMC, mencionado en el apartado 2.3, del capítulo metodológico, en el tomo uno. Considerando que en este trabajo de titulación se manipulará un proceso químico altamente no lineal, donde la principal necesidad es mantener un buen rendimiento del control y proveer estabilidad al proceso aun cuando el sistema se exponga a variaciones de los parámetros o presencia de perturbaciones.

El SMC clásico de superficie PID, presenta ventajas que permiten mejorar la respuesta transitoria del sistema, además de reaccionar rápidamente frente a perturbaciones con el objetivo de que el error en estado estable sea lo más pequeño posible.

El comportamiento de la superficie PID del SMC, se compone con los conceptos fundamentales de la parte integral y derivativa de un controlador básico. Donde la parte integral, permite llegar al punto de referencia y reducir el error a cero, esto se traduce en obtener un régimen de estado permanente óptimo. Por otro lado, la parte derivativa provee de rapidez al sistema lo que implica reducir el tiempo en que el sistema se establece, sin embargo, para procesos no lineales, hay que tomar en cuenta que la parte derivativa puede amplificar el error y desestabilizar el sistema si no se sintoniza correctamente [8].

Si bien la acción integral tiene una respuesta más lenta debido a que busca obtener una entrada continua al controlador, esto se toma por ventaja para hacer tareas de regulación, lo que implica un control menos sensible a perturbaciones. Para las tareas de seguimiento de trayectorias se aprovecha la estabilidad y buen rendimiento en términos de tiempos de respuesta del control SMC.

Considerando la superficie PID descrita en la Ecuación (2.26), correspondiente al capítulo metodológico del tomo I, y las propiedades descritas previamente, se amplía el esquema de control introduciendo los conceptos de un esquema dual, observar en la Figura 2.1 el diagrama del control dual por modos deslizantes (DUAL-SMC) con superficie PI/PID. El esquema mencionado se estructura internamente a través del funcionamiento de dos entradas que cierran el lazo de control; la primera señal de entrada es el error, este

interactúa con los parámetros de la superficie del controlador, la segunda señal es la respuesta obtenida a la salida del transmisor. A partir de las dos señales es posible componer un esquema de controlador DUAL-SMC con superficie tipo PI/PID.

El control DUAL-SMC se compone principalmente de dos switches, observar la Figura 2.1, los cuales permiten el intercambio de superficies del controlador, según el requerimiento de control en el proceso, con el fin de obtener las mejores características de respuesta de cada una de las superficies. En este controlador existe una conmutación continua entre una superficie PID y una superficie PI.

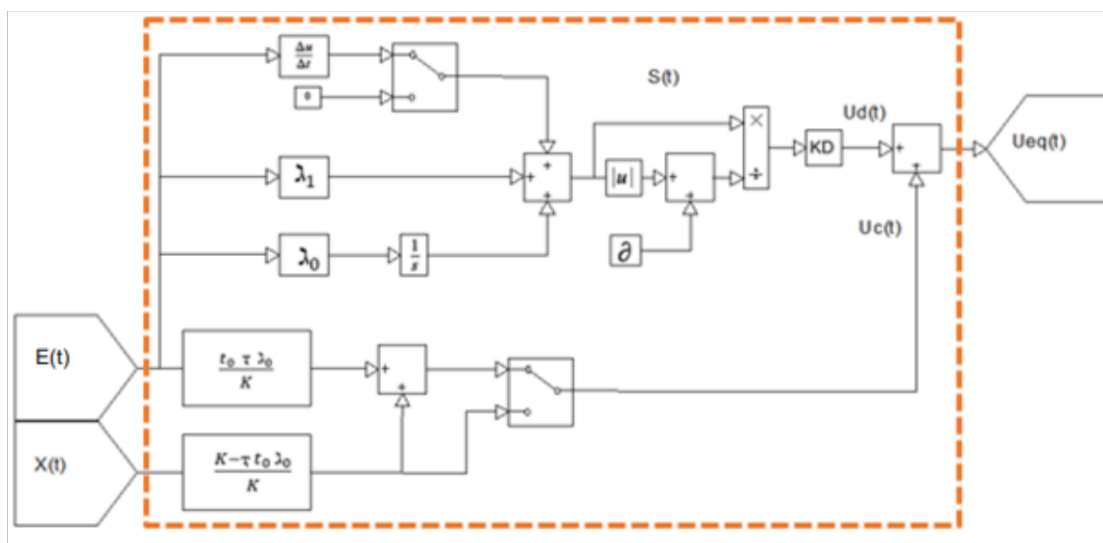


Figura 2.1. Diagrama de bloques del esquema del controlador DUAL-SMC tipo PI/PID.

Determinación de la relación ganancia alta/ganancia baja para las leyes de control de las superficies PI/PID

Para asegurar un buen rendimiento del sistema se halla una relación de ganancia alta para el controlador tipo PI, mientras para el controlador tipo PID la ganancia es baja. Para suavizar la conmutación entra ambas ganancias de las dos leyes de control se obtienen las ganancias no lineales de las superficies. Se calcula las ganancias como se muestra en [5]. El proceso de sintonización inicia obteniendo una ganancia general del controlador, la cual es dependiente del rango del error, el cual equivale a un 10% en la salida del transmisor de pH en el caso más crítico. Si la cantidad de error es alta, la ganancia aumenta y la señal de control se vuelve más agresiva, por otro lado, si el valor del error es bajo, la

ganancia disminuye y la señal de control se suaviza. Bajo las condiciones mencionadas se logra conmutaciones suaves entre las superficies y llegar a la referencia deseada reduciendo las oscilaciones que produce el cambio entre estas. Para el cálculo de la ganancia de las superficies se utilizó las siguientes ecuaciones.

$$K_{D1} = K_{D2} = K_{D0}(\rho + \gamma|e(t)|) \quad (2.26)$$

$$\rho + \gamma e_{max} = H; \quad \rho + \gamma e_{small} = L; \quad (2.27)$$

Donde la ganancia del sistema del PID con el cual funciona en todo el rango es la K_{D0} , la cual se obtiene del SMC PID. Además, el e_{max} es una estimación de un límite superior positivo para el error de salida del sistema y e_{small} es una constante positiva que define el límite de error donde la salida ingresa a la región de estado estable de la respuesta del sistema.

Por definición, el DUAL- SMC tiene dos posibilidades de transición [7] [8]: a) de la “región de estado estable” a la “región de estado transitorio” cuando se hace un cambio del punto de referencia, superando el valor del rango de error K, se identifica con un estado igual a 0; y b) de la “región de estado transitorio” a la “región de estado estable” cuando se mantiene debajo del límite del rango de error K, y se identifica con estado igual a 1, observar Figura 2.2.

Para que exista un funcionamiento correcto en el controlador DUAL-SMC, es necesario conocer las regiones de funcionamiento más eficientes, por lo que, tras ejecutar una serie de pruebas ante diferentes tipos de entradas, tomando en cuenta el rango límite de funcionamiento del proceso altamente no lineal, se logra conocer el rango de trabajo óptimo de K.

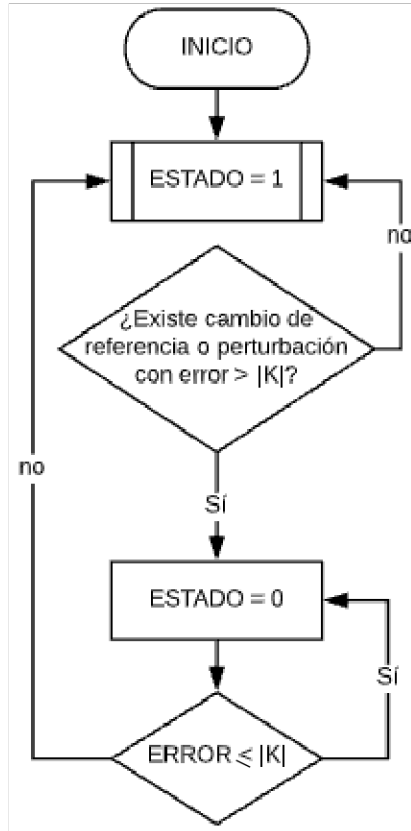


Figura 2.2. Diagrama de flujo del estado del switch del esquema DUAL-SMC.

Para comprender el comportamiento específico del controlador DUAL-SMC, se expone que cuando el sistema se encuentra en estado estable el controlador que prevalece es el tipo SMC con superficie PID, con el fin de responder efectivamente frente a perturbaciones. Por otra parte, cuando el proceso entra en régimen transitorio actúan las dos superficies PI/PID, en un rango limitado por K , donde K representa el punto óptimo para obtener las mejores características de ambas superficies.

Entonces, en estado transitorio el valor de K es el que limita el ancho de pulso en la conmutación, cuando el error es mayor al rango K , la superficie que actúa es el tipo PI para lograr una respuesta más suave, y sobre todo reducir los máximos sobrepicos, luego, en la parte final del transitorio, al obtener un error menor al rango K , entra en acción la superficie PID para asegurarse que llegue a la referencia, y haciendo un control robusto frente a perturbaciones en la parte estable.

Conmutación suave entre ambas leyes de control

La ley de control tiene dos opciones de cambio de la región estacionaria a la región transitoria cuando el error a la salida alcanza la banda de pequeños errores (e_{small} limitada)

en un momento t_{c2} . Por tanto, para obtener la conmutación suave se debe establecer condiciones no crecientes similares a las definidas en [5], donde:

$$\begin{cases} \Delta V_1(t_{c1}) = V_2(t_{c1}) - V_1(t_{c1}) \leq 0 \text{ al momento } t_{c1} \\ \Delta V_2(t_{c2}) = V_1(t_{c2}) - V_2(t_{c2}) \leq 0 \text{ al momento } t_{c2} \end{cases} \quad (2.28)$$

Operando las expresiones anteriores, se obtiene:

$$\Delta V_1(t_{c1}) = V_2(t_{c1}) - V_1(t_{c1}) = \frac{1}{2}S_2^2(t_{c1}) - \frac{1}{2}S_1^2(t_{c1}) \leq 0 \text{ al momento } t_{c1} \quad (2.29)$$

$$\Delta V_2(t_{c2}) = V_1(t_{c2}) - V_2(t_{c2}) = \frac{1}{2}S_1^2(t_{c2}) - \frac{1}{2}S_2^2(t_{c2}) \leq 0 \text{ al momento } t_{c2} \quad (2.30)$$

Luego

$$\left(\frac{de(t_{c1})}{dt} + \lambda_1 e(t_{c1}) + \lambda_0 \int e(t_{c1}) dt \right)^2 - \left(\frac{de(t_{c1})}{dt} + \lambda_1 e(t_{c1}) \right)^2 \leq 0 \text{ en } t_{c1} \quad (2.31)$$

$$\left(\frac{de(t_{c2})}{dt} + \lambda e(t_{c2}) \right)^2 - \left(\frac{de(t_{c2})}{dt} + \lambda_1 e(t_{c2}) + \lambda_0 \int e(t_{c2}) dt \right)^2 \leq 0 \text{ en } t_{c2} \quad (2.32)$$

Analizando las expresiones anteriores se obtiene un término integral cuadrático, lo que implica que no existe una solución trivial al término integral. Si se redefine la $S_1(t)$ se obtiene la Ecuación (2.33).

$$S_1^*(t) = S_1(t) + C^* = \frac{de(t)}{dt} + \lambda e(t) + C^* \quad (2.33)$$

Tomando en cuenta que $\dot{S}_1^*(t) = \dot{S}_1(t)$. Entonces, reemplazando $S_1(t)$ en las Ecuaciones (2.31) y (2.32) por la Ecuación (2.33), se obtienen las siguientes condiciones:

$$\left(\frac{de(t_{c1})}{dt} + \lambda_1 e(t_{c1}) + \lambda_0 \int e(t_{c1}) dt \right)^2 - \left(\frac{de(t_{c1})}{dt} + \lambda_1 e(t_{c1}) + C^* \right)^2 \leq 0 \text{ en } t_{c1} \quad (2.34)$$

$$\left(\frac{de(t_{c2})}{dt} + \lambda e(t_{c2}) + C^* \right)^2 - \left(\frac{de(t_{c2})}{dt} + \lambda_1 e(t_{c2}) + \lambda_0 \int e(t_{c2}) dt \right)^2 \leq 0 \text{ en } t_{c2} \quad (2.35)$$

Esto se cumple para la igualdad, si y solo si, se cumple lo siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda = \lambda_1 \\ C^* = \lambda_0 \int e(t_{c1}) dt = \lambda_0 \int e(t_{c2}) dt \end{array} \right. \quad (2.36)$$

Con ello se puede concluir que si el término integral permanece constante durante el estado transitorio entonces el cambio va a ser suave.

Los resultados del controlador propuesto se muestran en el siguiente capítulo.

3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos de la simulación del controlador propuesto para verificar su correcto funcionamiento. Se compara el resultado obtenido del controlador DUAL-SMC con el esquema del SMC clásico. Como se mencionó en el primer capítulo, el objetivo principal del controlador propuesto es comprobar la robustez de esquemas duales en sistemas con alta no linealidad sobre todo frente a perturbaciones.

Se analizan los resultados de la simulación para el proceso del tanque de neutralización de pH, mediante los valores de los índices de desempeño: ISU, para analizar la fuerza de la acción de control sobre el actuador y el ISE, para revisar la cantidad de error en función del tiempo. Por otro lado, para analizar el comportamiento de la parte transitoria, se obtienen los valores de máximo sobrepico (Mp) y el tiempo de establecimiento (ts).

Debido a que el producto es un sistema altamente no lineal, el proceso varía notablemente sus valores de pH dependiendo el rango de trabajo. Por esta razón, para el presente estudio se sintonizó un controlador Dual por Modos Deslizantes para el rango de 7 a 8.4 en términos adimensionales de pH.

En condiciones iniciales el proceso se encuentra en un valor de pH de 7.025 y el transmisor de pH se calibra para un rango de 50% a 60%.

A continuación, se presentan tres tipos de resultados del controlador

- Primero, ante la disminución del flujo de corriente.
- Segundo, ante el aumento del flujo de corriente.
- Tercero, ante la entrada tipo escalera.

3.1.1 PRUEBAS DE SEGUIMIENTO Y REGULACIÓN EN EL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH DISMINUYENDO EL FLUJO DE CORRIENTE.

La perturbación relevante que afecta el proceso es el flujo de corriente ácida q_1 . En el caso del flujo ácido el valor en condiciones iniciales del proceso es de 16,6 ml/s, si este valor disminuye implica que el valor de pH aumenta, lo que produce una saturación del proceso sin permitir la regulación de este. En la Figura 3.1 se muestra una perturbación relevante con el fin de verificar que el controlador realice la tarea de regulación sin descompensar la tarea de seguimiento.

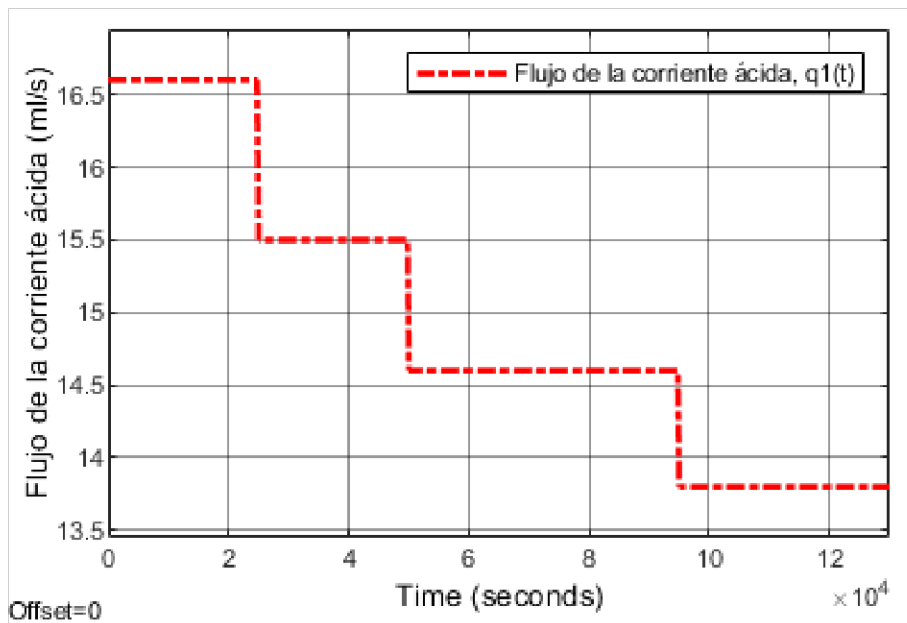


Figura 3.1. Flujo de la corriente ácida $q_1(t)$.

Control para Seguimiento de trayectoria

En la Figura 3.2 se observa la señal de entrada para realizar control de seguimiento en el sistema tanque de neutralización de pH, la cual cuenta con tres escalones de subida y dos de bajada, de diferente amplitud.

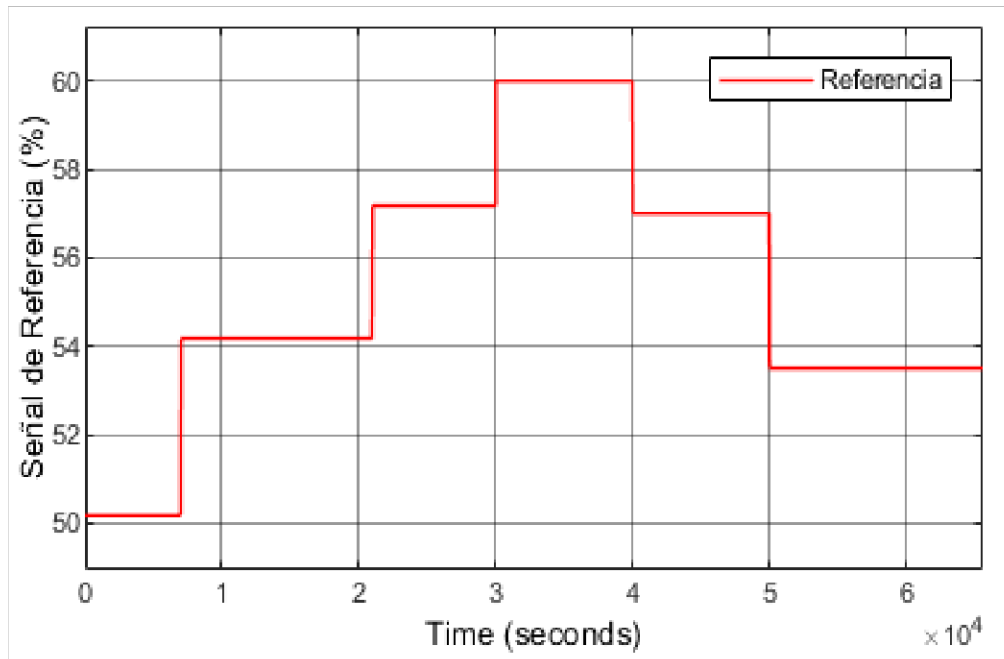


Figura 3.2. Señal de entrada con cambios de referencia.

En la Figura 3.3 se observan los cambios de referencia en el transmisor de pH deseado del producto. El valor inicial es de 50,18% se mantiene durante los primeros 7000 (s), momento en el cual se aumenta el valor de pH a 54,18%. Luego, a los 21000 (s) se incrementa la salida a 57,18%. En el tiempo 30000 (s) se realiza una subida de la salida a 60%. Después, a los 40000 (s) se disminuye la salida a 57% y finalmente, se realiza una bajada del pH hasta los 53,5% al tiempo 40000 (s). En los cambios de referencia con valores del transmisor de pH más altos del rango, se evidencia la no linealidad del proceso, debido a que la variación de la salida se vuelve más agresiva y presenta grandes sobrepicos, aun cuando actúa el controlador robusto SMC.

Al analizar la respuesta del SMC en la Figura 3.3, se evidencia que, en los cambios de referencia para los valores más altos dentro del rango de trabajo, el sistema reacciona de forma diferente que, en los valores más bajos, lo que permite constatar la alta no linealidad del proceso, puesto que presenta una respuesta más agresiva y grandes sobrepicos, pese

a estar con un esquema de control robusto como es el caso del control SMC. En contraste, se puede destacar claramente que la propuesta del controlador DUAL-SMC, reduce el sobrepico en todos los cambios de referencia producidos, tanto para disminución y aumento de los valores del transmisor de pH. Además, mejora el tiempo de establecimiento a partir del segundo cambio de referencia.

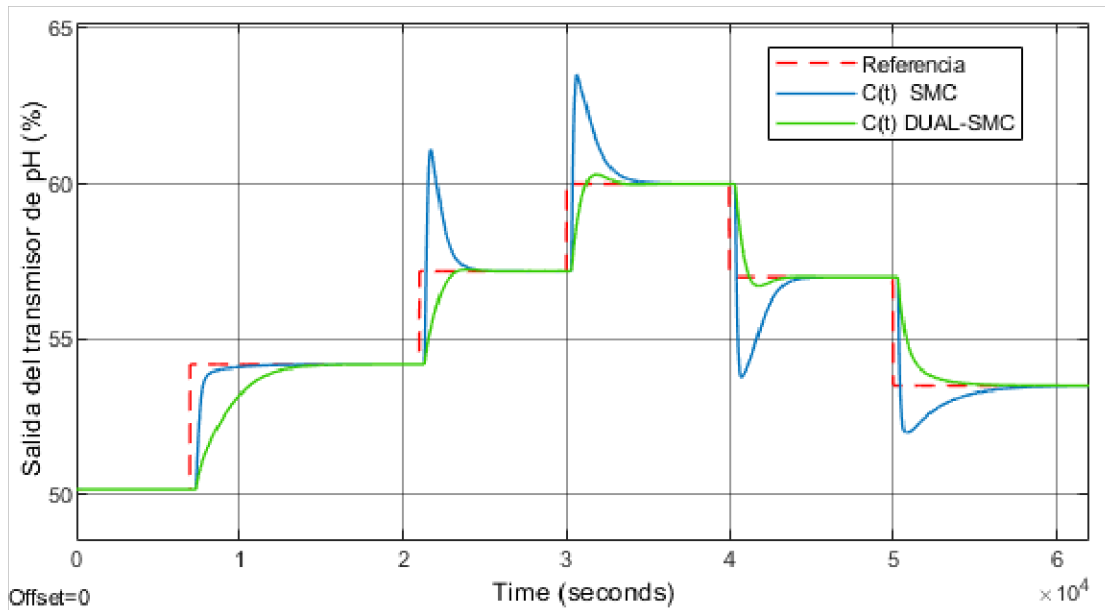


Figura 3.3. Salida del transmisor de pH ante cambios de referencia.

En la Figura 3.4, la respuesta del sistema ante cambios de referencia aplicando el controlador SMC, no presenta una respuesta oscilatoria, pero si muestra sobrepicos considerables. La respuesta es brusca debido a que pasa rápidamente el punto de consigna de pH, por ello se demora más tiempo en volver al valor en estado estable. Por otro lado, el DUAL-SMC alcanza la referencia paulatinamente, es decir tiene una respuesta suave, y en menor tiempo de establecimiento.

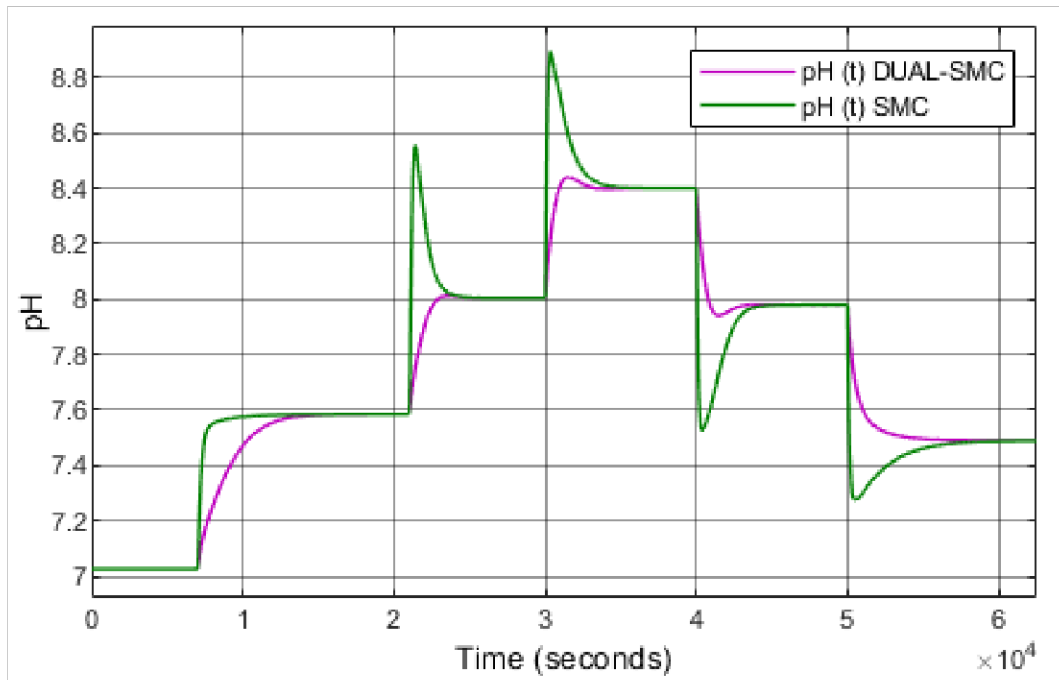


Figura 3.4. Respuesta del sistema ante cambio de referencia.

En la Figura 3.5, el controlador SMC muestra una señal de control agresiva por la presencia de sobrepicos, los cuales pueden generar mal funcionamiento en los actuadores, mientras que el controlador DUAL-SMC produce una acción de control amigable con el actuador, puesto que, tiene una respuesta suave reduciendo en gran magnitud la presencia de sobrepicos.

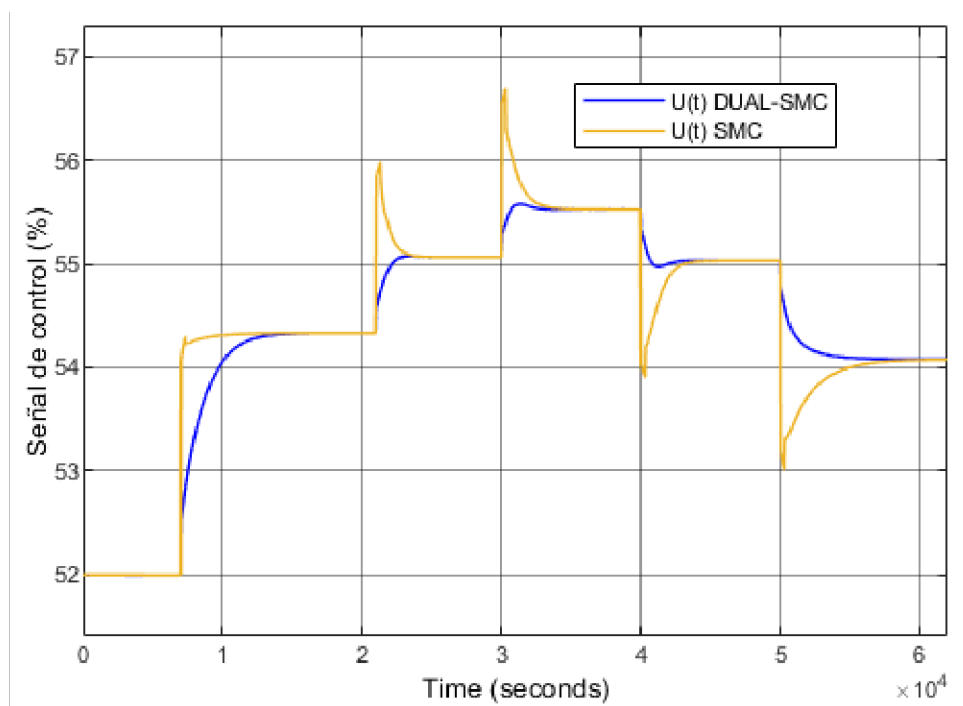


Figura 3.5. Salida de las acciones de control ante cambios de referencia.

Para comprobar y comparar los resultados obtenidos entre el esquema de control SMC y el esquema DUAL-SMC, observar la Figura 3.6. Se analiza los valores de los índices de desempeño ISU, ISE. Para las características transitorias se toma en cuenta los $Mp1$, $Mp2$ y $ts1$, $ts2$ en los cambios de referencia de los valores de 57,18% y 60% de la señal de salida del transmisor del pH en los tiempos 30000 (s) y 40000 (s) respectivamente. El tiempo de establecimiento $ts1$ para el control SMC es de 6383,131 (s), mientras para el control DUAL-SMC corresponde a 4855,77 (s). Luego el tiempo de establecimiento $ts2$ para el controlador SMC es de 3831,66 (s) mientras para el controlador DUAL-SMC es de 2745,68 (s).

Analizando los valores obtenidos en la gráfica de la Figura 3.6, se puede notar que para el esquema propuesto tiene valores más bajos en cuanto a ISE e ISU, esto implica que para cada cambio de referencia el controlador alcanza el valor deseado de pH de forma gradual, mientras el esquema SMC muestra una respuesta brusca, ya que se dispara de manera precipitada. Esto se refleja además en la acción de control, donde para el controlador SMC se tiene un pico alto, el cual puede llegar a dañar el elemento final de control.

En cuanto a los valores de $Mp1$ y $Mp2$ para el controlador DUAL-SMC se ve que tiene valores más bajos frente al controlador tipo SMC, esto implica que para cada cambio de referencia el controlador propuesto tiene una respuesta más suave al eliminar los máximos sobrepicos en comparación al SMC. Por otro lado, también los tiempos en que el sistema se establece en el valor referencial $ts1$ y $ts2$ para el controlador DUAL-SMC son menores.

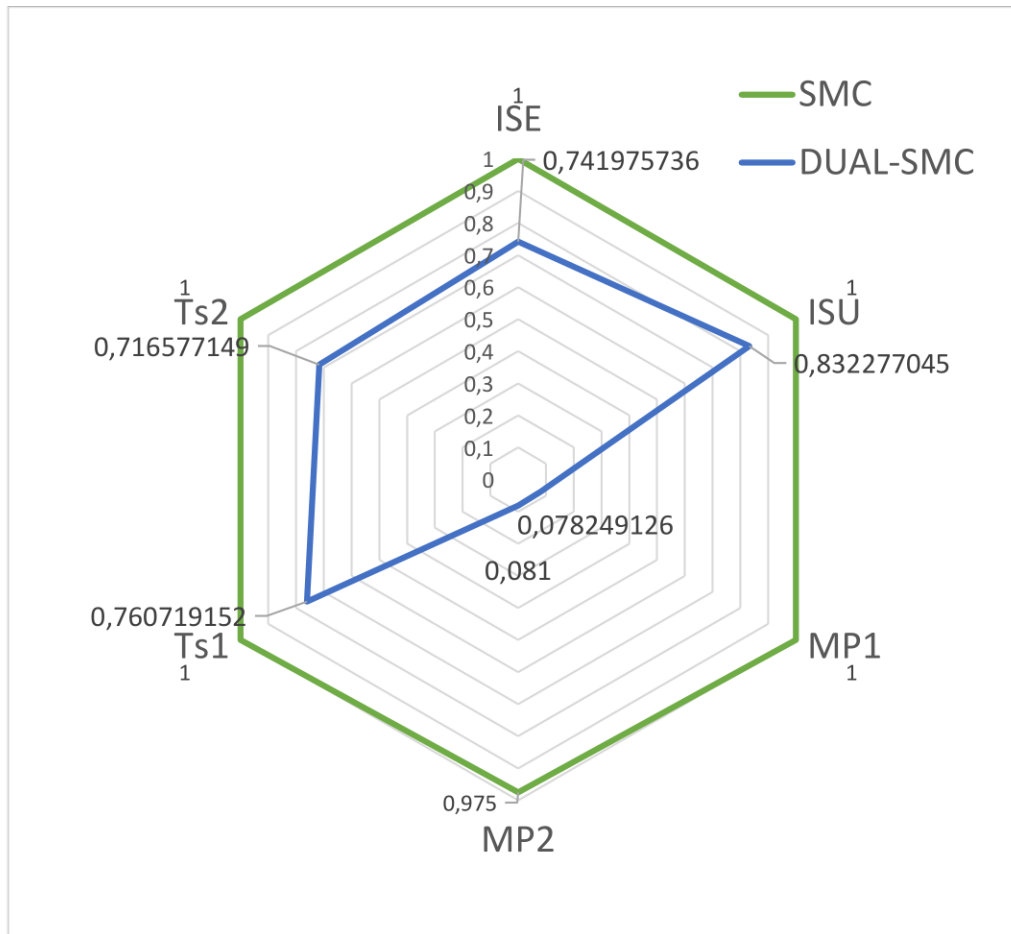


Figura 3.6. Gráfica radial de índices de desempeño y características transitorias del sistema frente a cambios de referencia.

Control para regulación

En la Figura 3.7, se muestra la salida del sistema frente a perturbaciones. Durante el lapso de 25000 (s), 50000 (s) y 95000 (s) aparecen tres perturbaciones del flujo de la corriente ácida, el cual pese a disminuir su valor logra ser compensado con la acción del control DUAL-SMC con el fin de regular y mantener en la referencia óptima para cada intervalo de tiempo, mientras el control SMC a partir de la segunda perturbación ya no realiza la tarea de regulación.

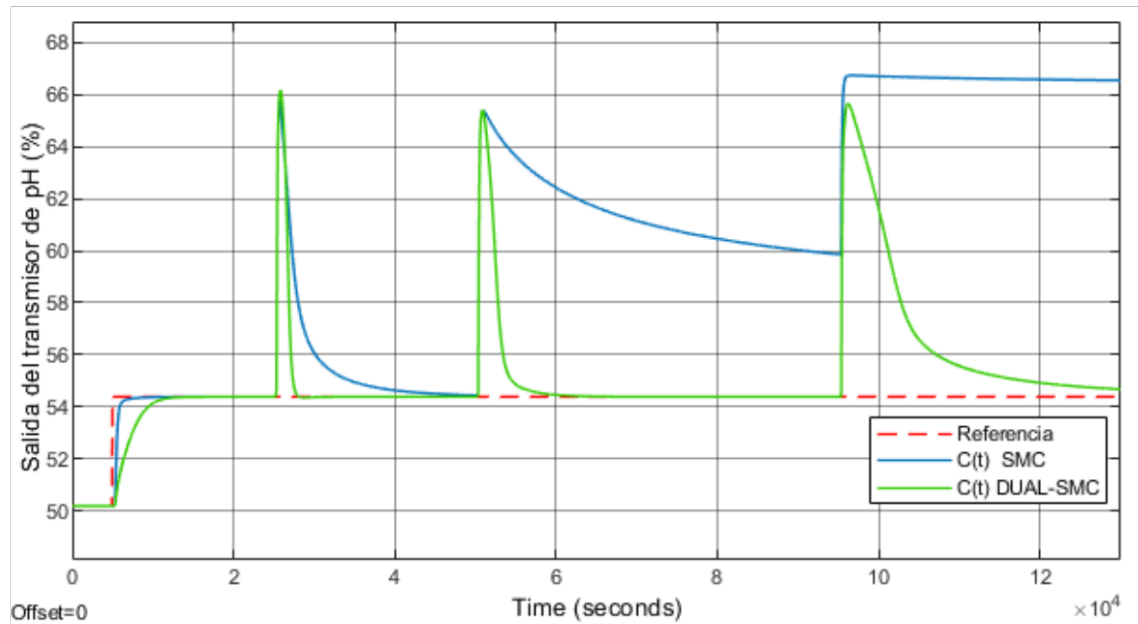


Figura 3.7. Salida del proceso ante perturbaciones.

En la Figura 3.8, se visualiza la respuesta ante perturbaciones en términos de pH. Tras aplicar las perturbaciones del flujo de la corriente ácida, el sistema tiende a incrementar el tiempo de retardo, lo cual implica mayor dificultad para el control. Sin embargo, la robustez del esquema de control DUAL-SMC es capaz de solventarlo pese al nivel de dificultad.

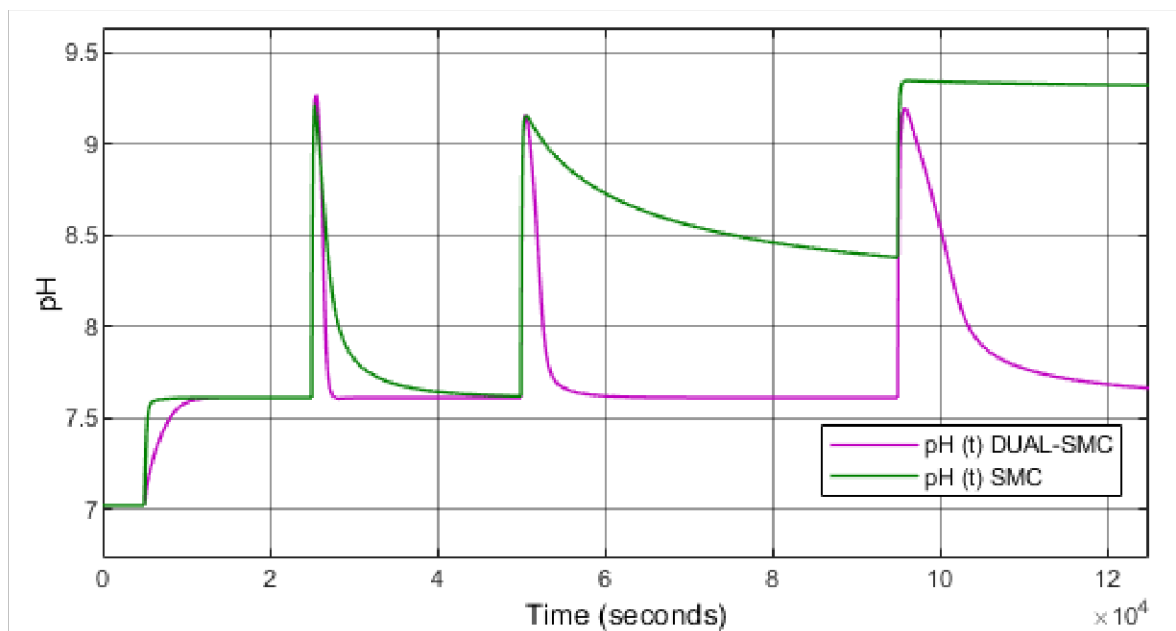


Figura 3.8. Respuesta del sistema ante perturbaciones.

En la Figura 3.9, se puede verificar que la señal de control de SMC luego de aparecer la segunda perturbación en 50000 (s) ya no responde, mientras el control DUAL-SMC ejerce un buen control por medio de la regulación al valor de correcta operación.

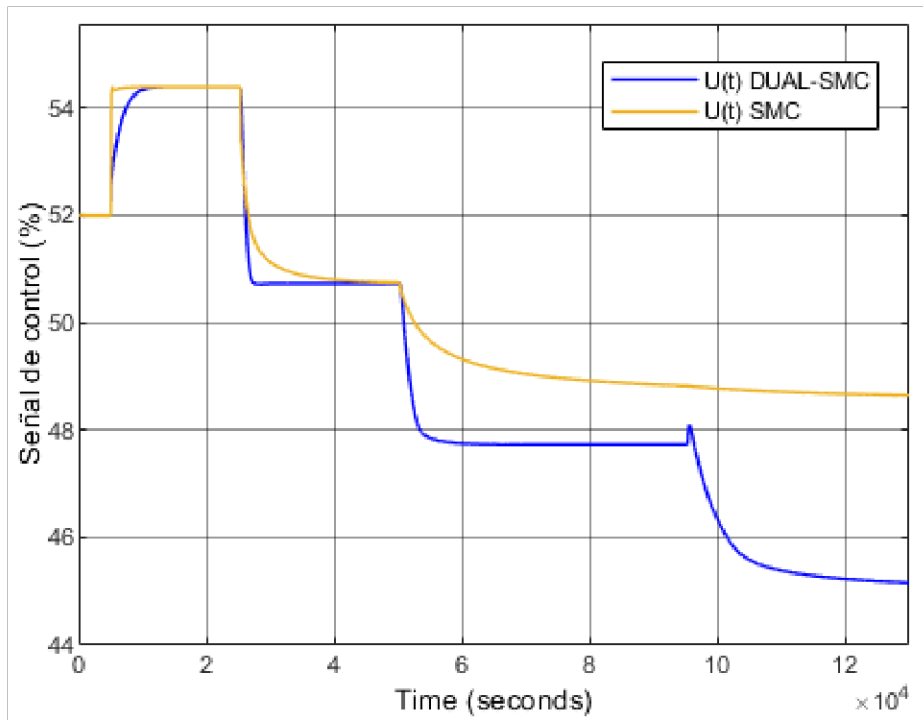


Figura 3.9. Salida de las acciones de control ante perturbaciones.

En la Figura 3.10, cuando el sistema se encuentra en estado estable, es decir que el error está por debajo del valor K el cual es igual al 1% del error máximo, actúa el controlador SMC con superficie PID, el cual regula las perturbaciones, mientras que si sobrepasa esta brecha (condición K) se conmuta a una superficie PI, obteniendo así una respuesta más suave al mejorar la respuesta transitoria, reduciendo los máximos sobrepicos y el tiempo de establecimiento.

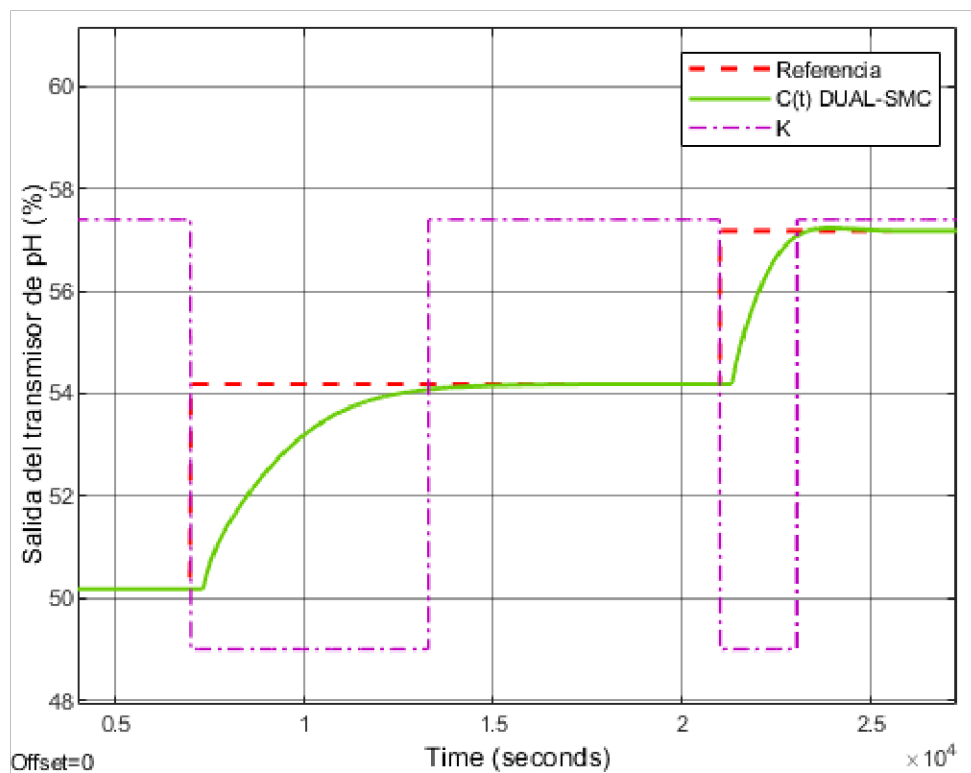


Figura 3.10. Comportamiento de la condición K en la respuesta del sistema con controlador DUAL-SMC.

Para cuantificar el rendimiento del controlador SMC-DUAL frente al SMC clásico para tareas de regulación, se analiza los valores de los índices de desempeño ISU, ISE, y las características transitorias tomando en cuenta los ts_1 , ts_2 y ts_3 de las perturbaciones en los valores de 15,5 (ml/s), 14,6 (ml/s) y 13,8 (ml/s) del flujo de la corriente ácida, en los tiempos 25000 (s), 50000 (s), 95000 (s), respectivamente.

Analizando los resultados obtenidos en la gráfica de la Figura 3.11, se nota que el valor de ISU del controlador DUAL-SMC es mayor en comparación al controlador SMC, debido a que el controlador es robusto para regulación, y responde de forma efectiva ante toda la perturbación en que se sometió el sistema, en cambio, el controlador SMC presenta una reacción lenta ante la primera perturbación, y para las siguientes ya no responde adecuadamente, tampoco refleja una señal de control, por esta razón, se observa que tiene una cantidad de error elevada la cual se refleja en el índice ISE para el controlador SMC. Por otro lado, algo a destacar es que para el controlador tipo DUAL-SMC presenta un ts_1 , ts_2 y ts_3 considerablemente menores, lo que indica que el controlador tiene una respuesta rápida ante perturbaciones.

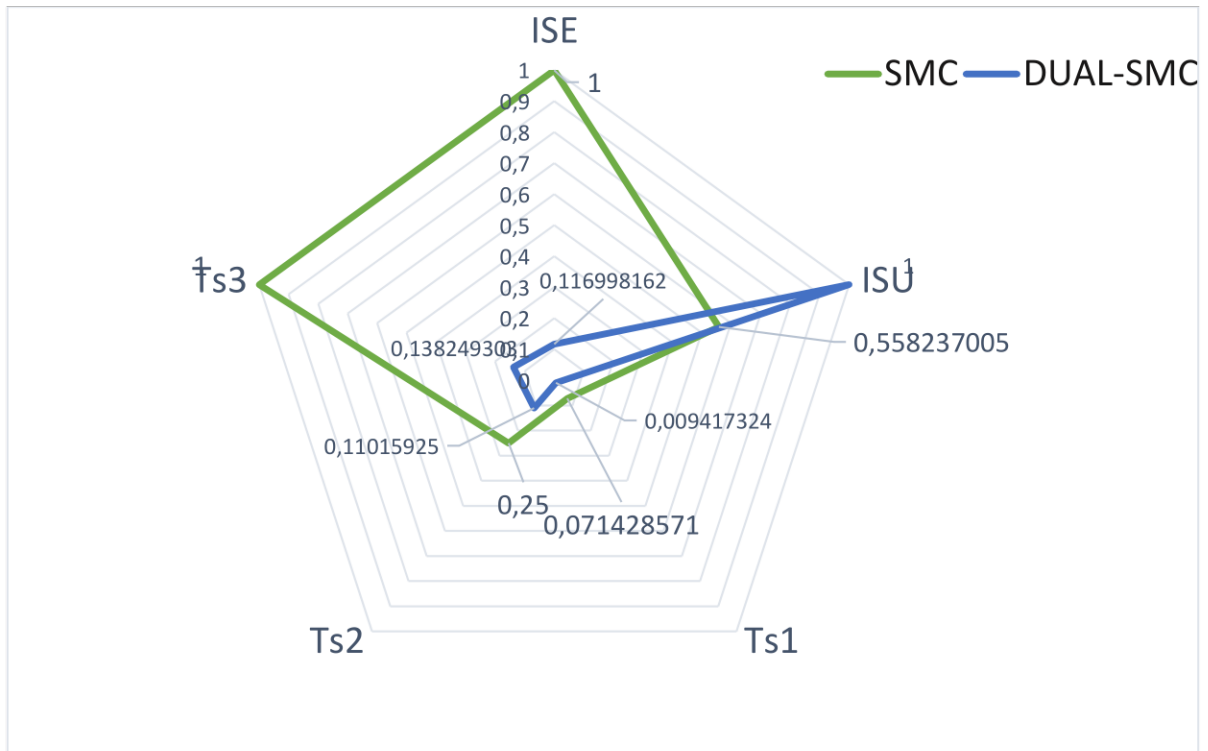


Figura 3.11. Gráfica radial de índices de desempeño y características transitorias del sistema ante perturbaciones.

3.1.2 PRUEBAS DE SEGUIMIENTO Y REGULACIÓN EN EL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH AUMENTANDO EL FLUJO DE CORRIENTE.

En esta sección se realizan las pruebas de seguimiento y regulación incrementando el flujo de corriente ácida. En la Figura 3.12, se muestra una perturbación relevante aumentando el flujo de corriente ácida, con el fin de verificar que el controlador realice la tarea de regulación sin descompensar la tarea de seguimiento.

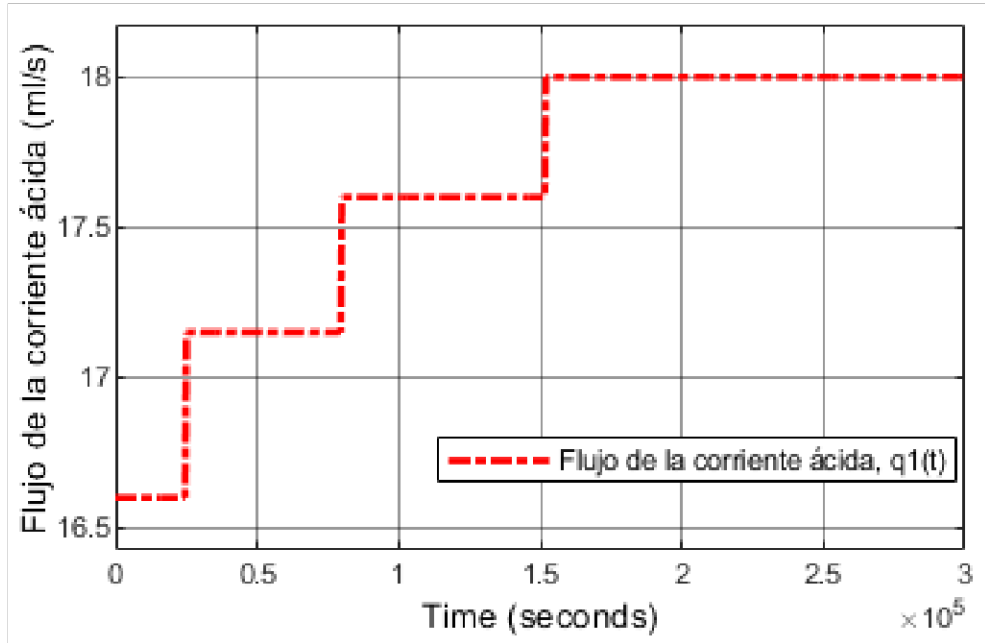


Figura 3.12. Flujo de la corriente ácida $q_1(t)$.

Control para Seguimiento de trayectoria

En la Figura 3.13, se observa la señal de entrada para realizar control de seguimiento en el sistema tanque de neutralización de pH, la cual cuenta con tres escalones de bajada y dos de subida, de diferente amplitud.

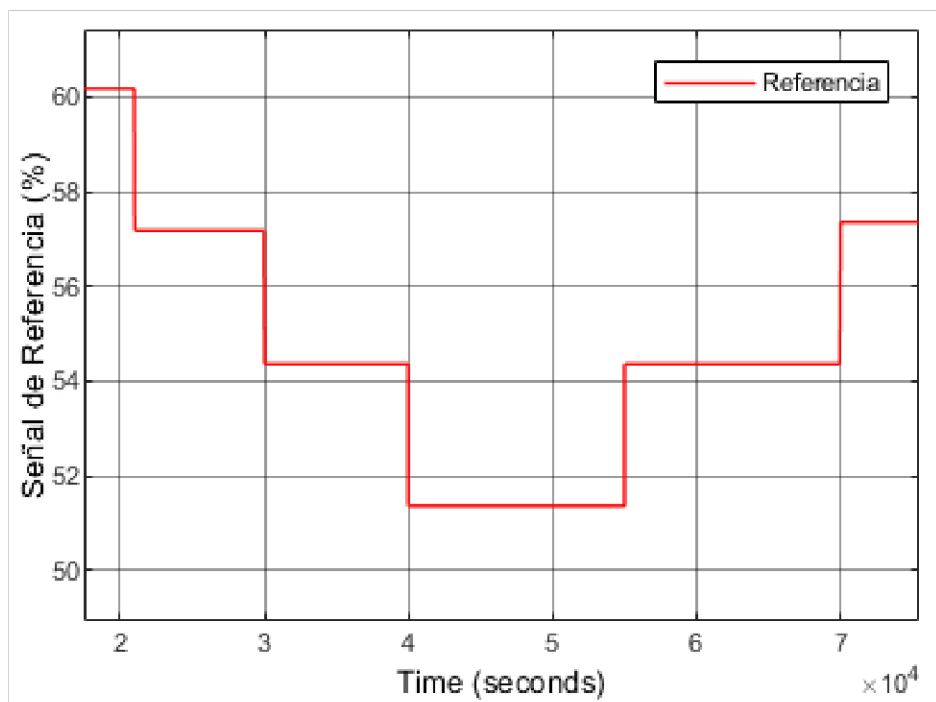


Figura 3.13. Señal de entrada con cambios de referencia.

En la Figura 3.14, se observan los cambios de referencia en la salida del transmisor de pH deseado del producto. El valor inicial es de 60,18% se mantiene durante los primeros 21000 (s), momento en el cual se disminuye el valor de pH a 57,18%. Luego, a los 30000 (s) se disminuye la salida a 54,36%. En el tiempo 40000 (s) se realiza una disminución de la salida a 51,36%. Después, a los 55000 (s) se incrementa la salida a 54,36% y finalmente, se realiza una subida del pH hasta los 57,36% al tiempo 70000 (s). En los cambios de referencia con valores cercanos a los extremos del rango de salida del transmisor de pH, se evidencia que la variación de la salida se vuelve más agresiva y presenta grandes sobrepicos para el caso del SMC. En comparación la propuesta del controlador DUAL-SMC reduce el sobrepico en todos los cambios de referencia producidos, tanto para disminución y aumento de los valores del transmisor de pH. Además, mejora el tiempo de establecimiento, porque la respuesta es más suave en los cambios de referencia que se sitúan alrededor del 60% dentro del rango de trabajo, mientras para los cambios de referencia que se aproximan más al 50% la respuesta se vuelve un poco más lenta puesto que el establecimiento en la referencia es progresivo.

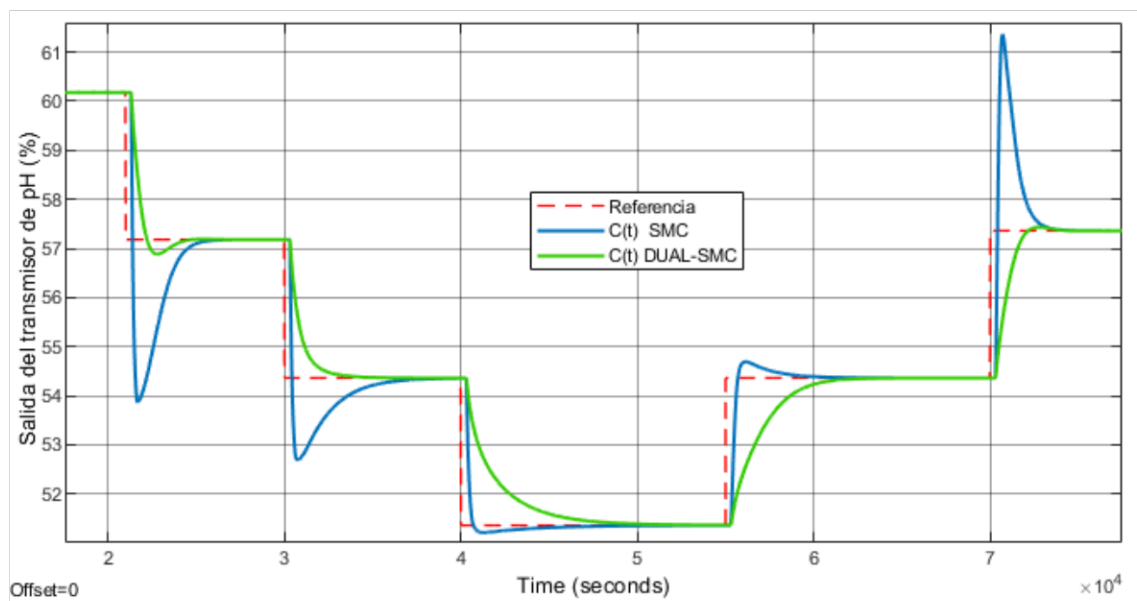


Figura 3.14. Salida del transmisor de pH ante cambios de referencia.

En la Figura 3.15, se muestra la respuesta del sistema ante cambio de referencia en términos de pH. La respuesta del control DUAL-SMC presenta mejor tiempo de establecimiento, y reduce los sobrepicos puesto que el alcance de la referencia es paulatino, permitiendo suavizar la respuesta.

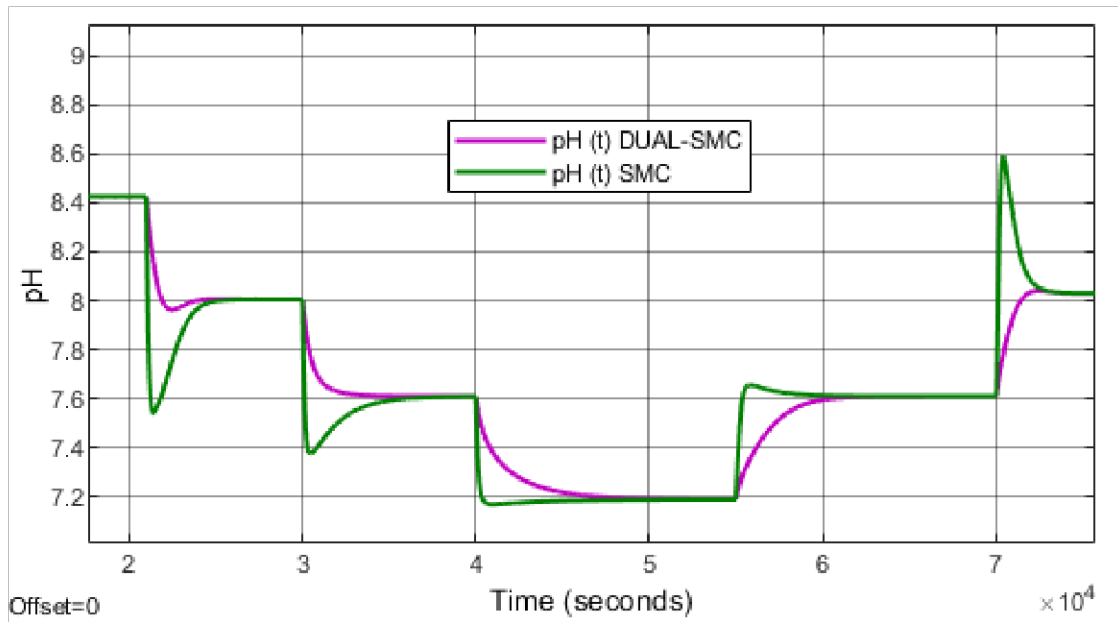


Figura 3.15. Respuesta del sistema ante cambio de referencia.

En la Figura 3.16, se visualiza la respuesta de la señal de control, donde para el controlador SMC se muestra una señal de control agresiva, por la presencia de sobrepicos, los cuales generan desgaste en los actuadores, ya futuro generar el deterioro de los equipos, mientras que el controlador DUAL-SMC produce una acción de control que preserva la vida útil del actuador, debido a que, tiene una respuesta más suave, reduciendo en gran magnitud la presencia de sobrepicos.

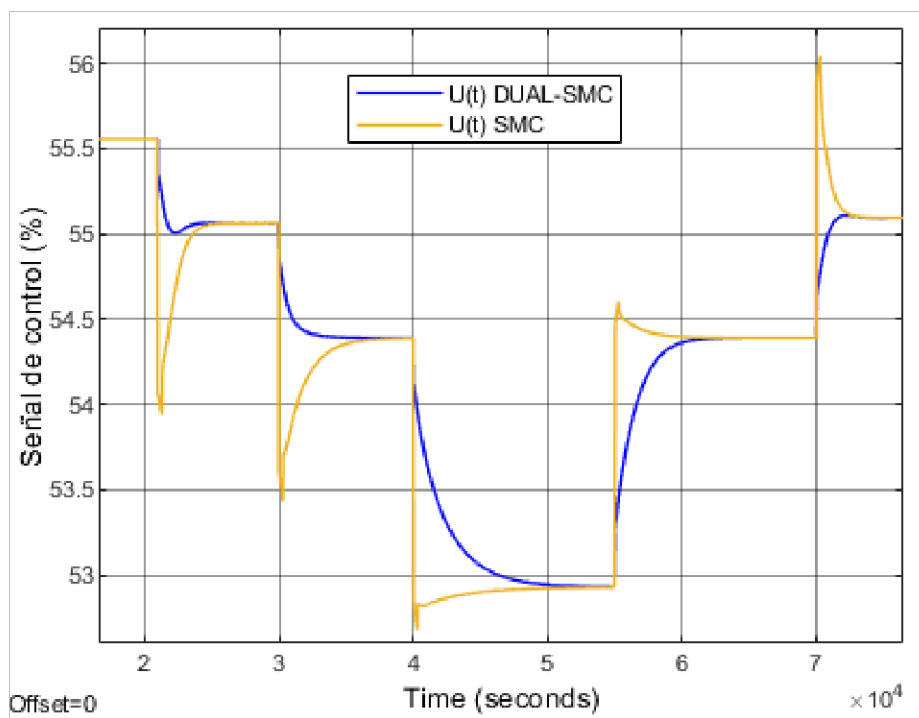


Figura 3.16. Salida de las acciones de control ante cambios de referencia.

Para comprobar y comparar los resultados obtenidos entre el esquema de control SMC y el esquema DUAL-SMC, observar la Figura 3.17, se analiza los valores de los índices de desempeño ISU, ISE. Para las características transitorias se toma en cuenta los $Mp1$, $Mp2$ y $ts1$, $ts2$ en los cambios de referencia de los valores de 57,18% y 57,36% de la señal de salida del transmisor del pH en los tiempos 21000 (s) y 70000 (s) respectivamente. El tiempo de establecimiento $ts1$ para el control SMC es de 3706,053 (s), mientras para el control DUAL-SMC corresponde a 2539,266 (s). Luego el tiempo de establecimiento $ts2$ para el controlador SMC es de 4909,918 (s) mientras para el controlador DUAL-SMC es de 4348,913 (s).

Analizando los valores obtenidos en la gráfica de la Figura 3.4. se puede notar que para el esquema propuesto tiene valores más bajos en cuanto a ISE e ISU, esto implica que para cada cambio de referencia el controlador alcanza el valor deseado de pH de forma gradual, mientras el esquema SMC muestra una respuesta brusca, ya que se dispara de manera precipitada. Esto se refleja además en la acción de control, donde para el controlador SMC se tiene un pico alto, el cual puede llegar a dañar el elemento final de control.

En cuanto a los valores de $Mp1$ y $Mp2$ para el controlador DUAL-SMC se ve que tiene valores más bajos frente al controlador tipo SMC, esto implica que para cada cambio de referencia el controlador propuesto tiene una respuesta más suave al eliminar los máximos sobrepicos en comparación al SMC. Por otro lado, también los tiempos en que el sistema se establece en el valor referencial $ts1$ y $ts2$ para el controlador DUAL-SMC son menores.

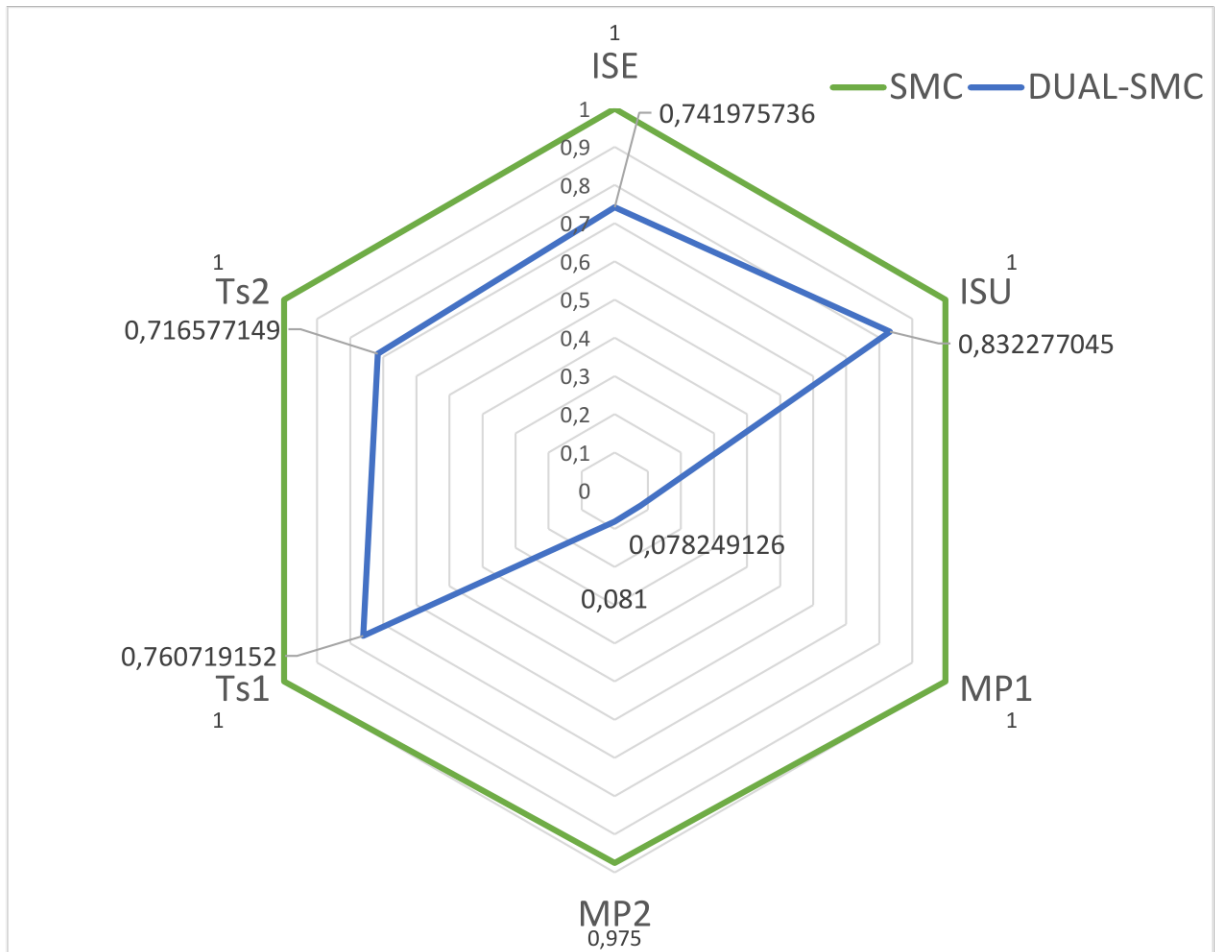


Figura 3.17. Gráfica radial de índices de desempeño y características transitorias del sistema frente a cambios de referencia.

Control para regulación

En la Figura 3.18, se muestra la salida del sistema frente a perturbaciones. Durante el lapso de 25000 (s), 80000 (s) y 152000 (s) aparecen tres perturbaciones del flujo de la corriente ácida, el cual pese a disminuir su valor logra ser compensado con la acción del control DUAL-SMC con el fin de regular y mantener en la referencia óptima para cada intervalo de tiempo, mientras el control SMC a partir de la segunda perturbación ya no realiza la tarea de regulación.

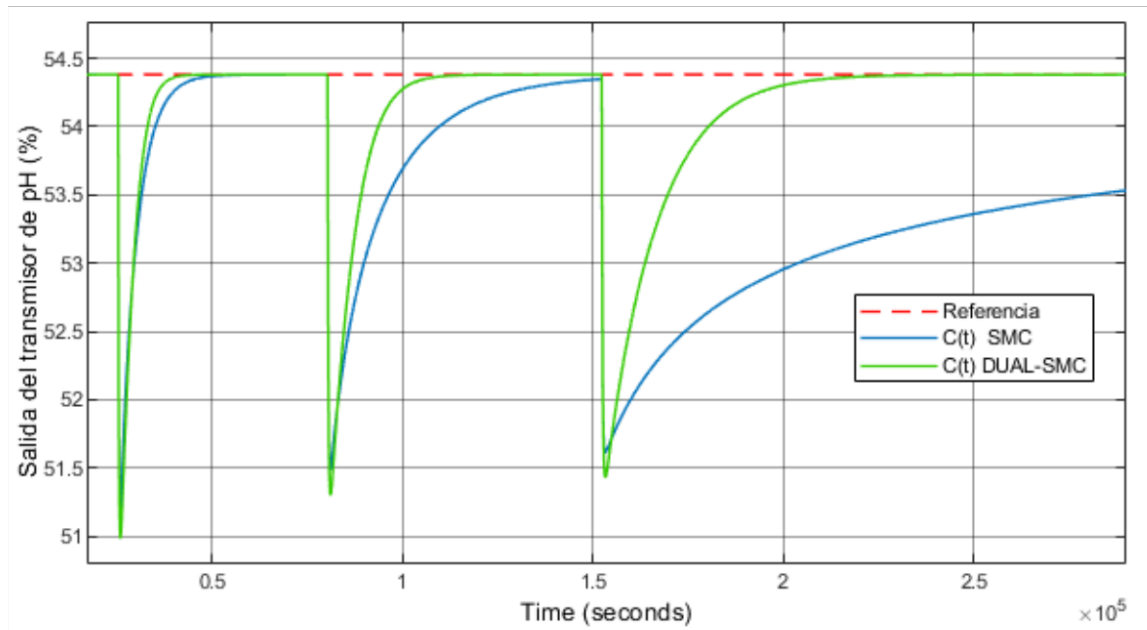


Figura 3.18. Salida del proceso ante perturbaciones.

En la Figura 3.19, se visualiza la respuesta ante perturbaciones en términos de pH. Tras aplicar las perturbaciones del flujo de la corriente ácida, para la tercera perturbación el control SMC no actúa frente a la perturbación, mientras el control DUAL-SMC funciona para las tres perturbaciones propuestas.

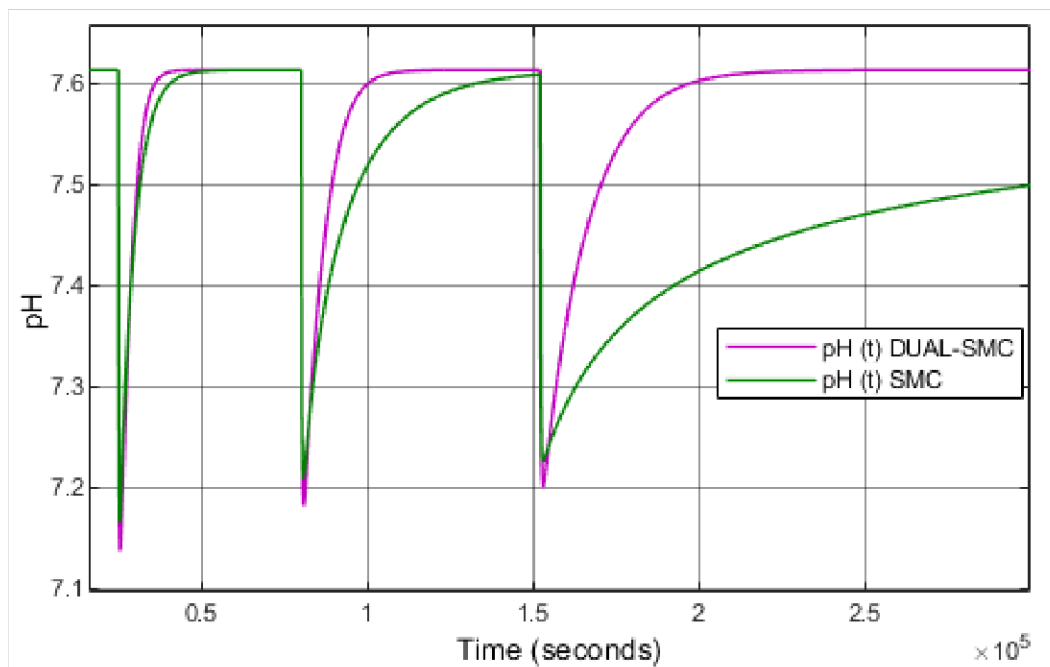


Figura 3.19. Respuesta del sistema ante perturbaciones

En la Figura 3.20, se puede verificar que la señal de control de SMC luego de aparecer la segunda perturbación ya no responde, mientras el control DUAL-SMC ejerce un buen control por medio de la regulación al valor de correcta operación.

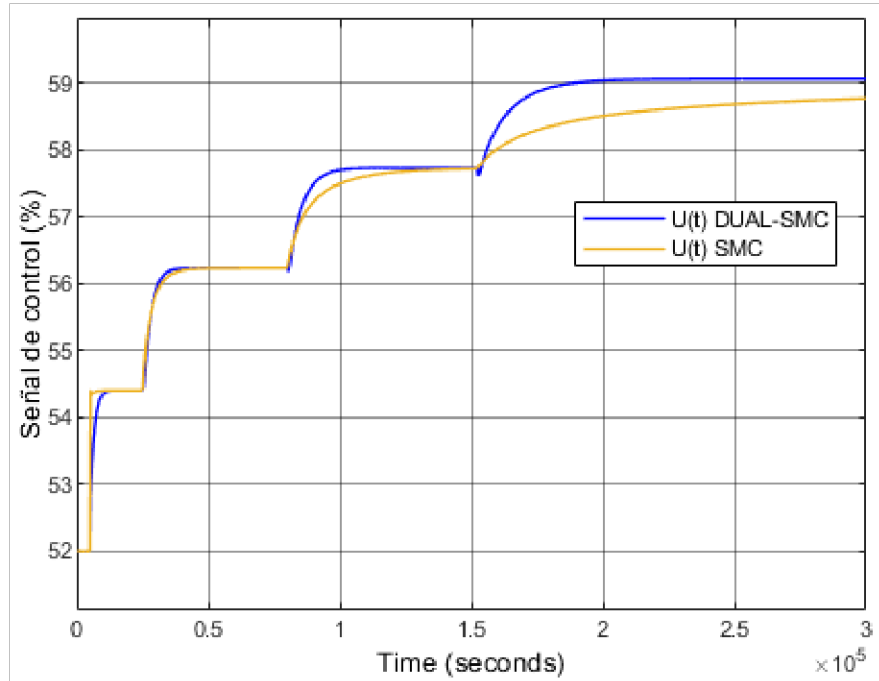


Figura 3.20. Salida de las acciones de control ante perturbaciones.

En la Figura 3.21, cuando el sistema se encuentra en estado estable, es decir que el error está por debajo del valor K el cual es igual al 1% del error máximo, actúa el controlador SMC con superficie PID, el cual regula las perturbaciones, mientras que si sobrepasa esta brecha (condición K) se conmuta a una superficie PI, obteniendo así una respuesta más suave al mejorar la respuesta transitoria, reduciendo los máximos sobrepicos y el tiempo de establecimiento.

Para cuantificar el rendimiento del controlador SMC-DUAL frente al SMC clásico para tareas de regulación, se analiza los valores de los índices de desempeño ISU, ISE, y las características transitorias tomando en cuenta los ts_1 , ts_2 y ts_3 de las perturbaciones en los valores de 14,6 (ml/s), 13,6 (ml/s) y 12,6 (ml/s) del flujo de la corriente ácida, en los tiempos 20000 (s), 40000 (s), 75000 (s), respectivamente.

Analizando los resultados obtenidos en la gráfica de la Figura 3.21, se nota que el valor de ISU del controlador DUAL-SMC es mayor en comparación al controlador SMC, debido a que el controlador es robusto para regulación, y responde de forma efectiva ante toda la perturbación en que se sometió el sistema, en cambio, el controlador SMC presenta una reacción lenta ante la primera perturbación, y para las siguientes ya no responde

adecuadamente, tampoco refleja una señal de control, por esta razón, se observa que tiene una cantidad de error elevada la cual se refleja en el índice ISE para el controlador SMC. Por otro lado, algo a destacar es que para el controlador tipo DUAL-SMC presenta un ts_1 , ts_2 y ts_3 considerablemente menores, lo que indica que el controlador tiene una respuesta rápida ante perturbaciones.

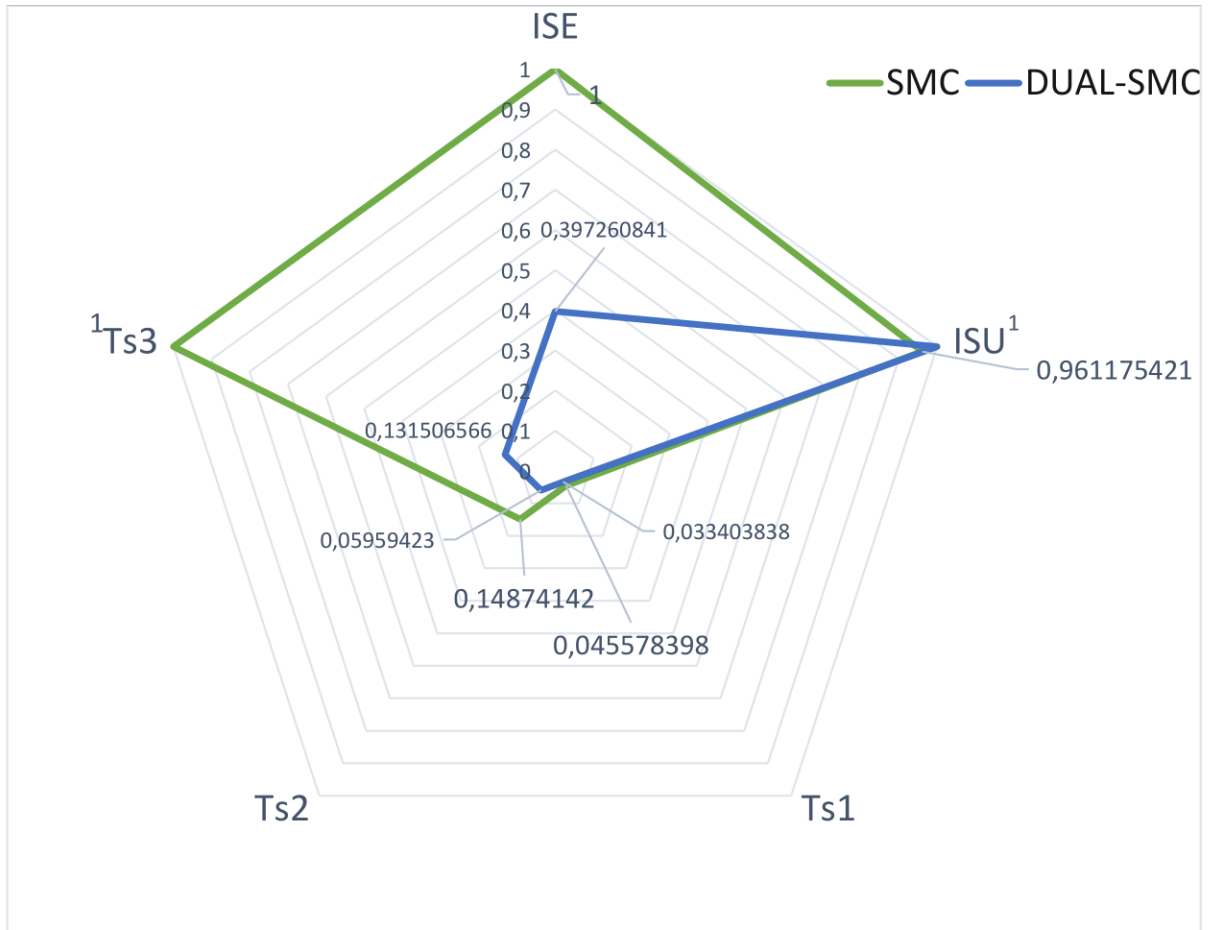


Figura 3.21. Gráfica radial de índices de desempeño y características transitorias del sistema ante perturbaciones.

3.1.3 PRUEBAS DE SEGUIMIENTO EN EL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH ANTE UN A ENTRADA TIPO ESCALERA

Para verificar el funcionamiento del controlador implementado en el proceso altamente no lineal, se lo estimula con una entrada tipo escalera como se muestra en la Figura 3.22.

Como se identificó en la sección de modelado empírico del capítulo metodológico, se utilizó una señal tipo escalera en toda la disposición del proceso para verificar su alta no

linealidad. Se analiza una entrada del mismo tipo, pero con diferente amplitud, puesto que se encuentra dentro del rango de diseño limitado para el presente trabajo, el cual corresponde a un rango de trabajo que va desde 50% hasta 60% de la salida del controlador.

Con el análisis de este tipo de entrada nos permite observar la respuesta que presenta el controlador en todo el rango de funcionamiento, además es posible apreciar la forma con la que responde el sistema tanto en el momento en que presenta escalones en aumento y disminución.

Por la forma de la entrada es posible analizar cómo actúa el controlador cuando se acerca a los límites del rango establecido, donde se aprecia de mayor forma la alta no linealidad de la planta de pH.

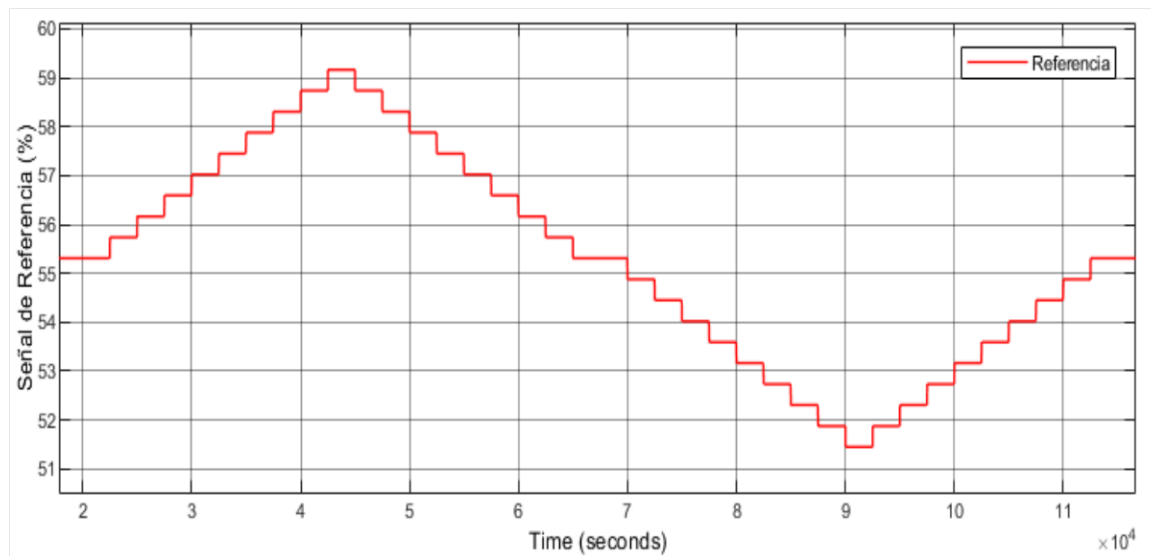


Figura 3.22. Señal de entrada tipo escalera.

En la Figura 3.23, es posible observar cómo actúan los controladores ante la entrada tipo escaleras.

Se observa que la respuesta del control SMC tiene una gran cantidad de sobre picos, en especial en la parte ascendente del semiciclo positivo de la señal tipo escaleras. Además, aunque que se presenta la misma variación de módulo en cada uno de los pasos, el proceso actúa de forma diferente, esto quiere decir que, cuanto mayor sea el valor de la referencia dentro del rango de trabajo, entonces la respuesta es más agresiva, puesto que los sobrepicos son notorios. Por otro lado, al analizar el controlador DUAL-SMC diseñado se verifica claramente que existe una gran reducción de los sobrepicos en toda la señal

tipo escalera, porque se tiene una respuesta más suave, y el tiempo de establecimiento se reduce considerablemente en contraste con el SMC.

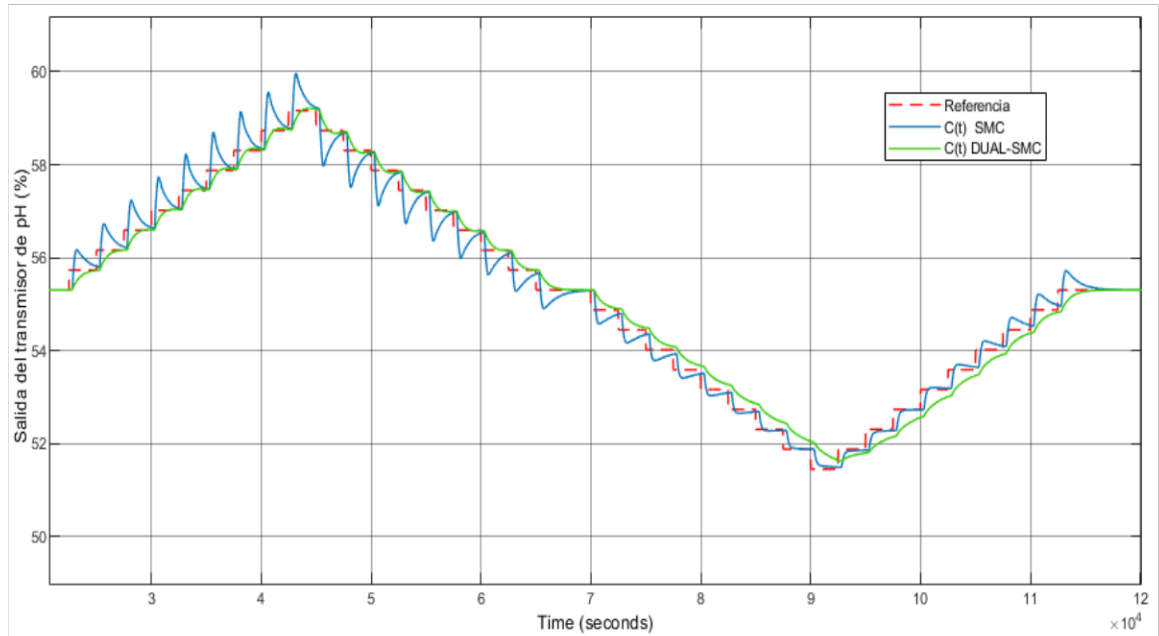


Figura 3.23. Salida del transmisor de pH ante señal tipo escalera.

En la Figura 3.24, es posible observar de forma más clara que la respuesta obtenida con el controlador propuesto DUAL-SMC, tiene una respuesta más suave, la misma que sigue sin problema los cambios de referencia en cada paso.

Analizando toda la gráfica, la señal de color morado corresponde a la respuesta obtenida en el tanque de neutralización de pH sin aplicar un control y considerando solo el rango de trabajo establecido inicialmente. Es posible apreciar que la respuesta ante cada escalón presenta una caracterización diferente, en cuanto a velocidad de respuesta y ganancia, este comportamiento se nota tanto en la disminución como en el aumento de la señal de referencia. Con lo mencionado anteriormente se puede verificar la eficacia del controlador propuesto para todo el rango de trabajo. Por otro lado, se comprueba que la respuesta del controlador presenta un tiempo de establecimiento diferente para cada uno de los escalones.

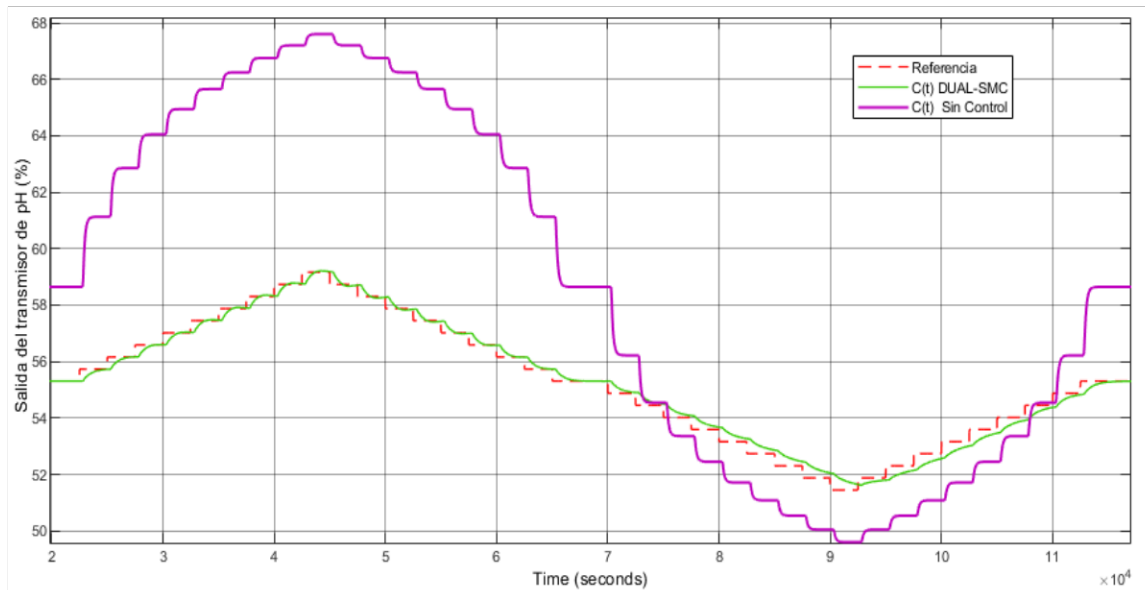


Figura 3.24. Salida del transmisor de pH, comparación señal sin control.

Una vez que se obtuvo las respuestas en el transmisor de pH, se procede a verificar los resultados del transmisor en términos de pH. En la Figura 3.25, se observa una respuesta con forma similar a la respuesta obtenida en la gráfica del transmisor de pH, donde se evidencia la efectividad del controlador propuesto en contraste con el control SMC. La reducción de sobrepicos es considerable y la velocidad de respuesta es suave.

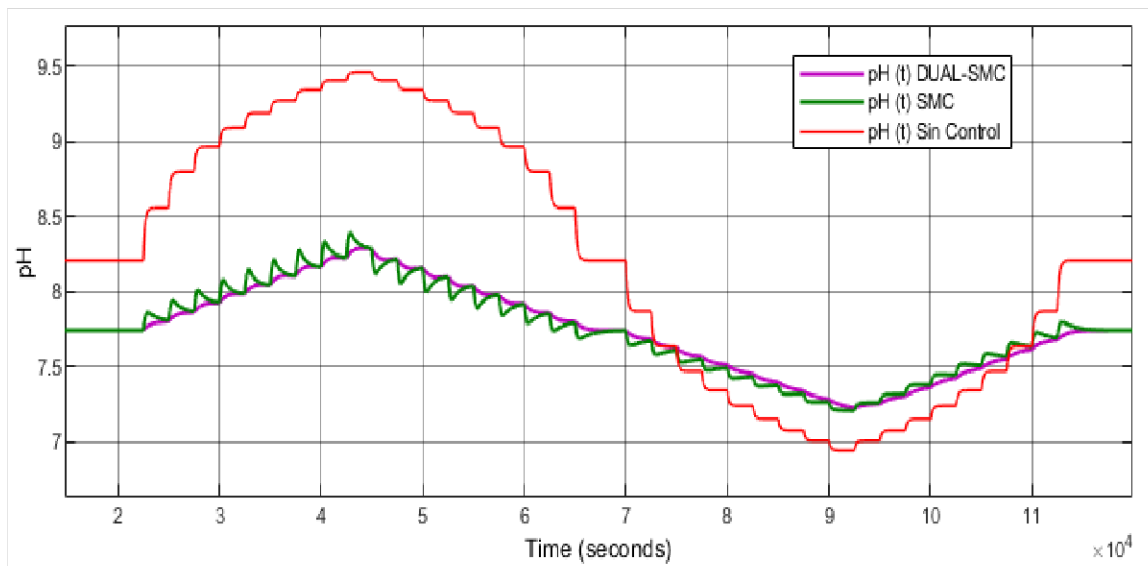


Figura 3.25. Respuesta del sistema en términos de pH.

Al analizar la señal de control obtenida en la Figura 3.26, se observa que el controlador SMC presenta un sobrepico en la señal de control para cada uno de los pasos tanto en aumento como en disminución de la referencia. Al comparar la respuesta obtenida con el control DUAL-SMC, es notorio la mejora del rendimiento del controlador propuesto,

tomando en cuenta que no presenta sobrepicos en cada uno de los escalones, lo que permite obtener una señal de control suave, preservando así el buen funcionamiento y mayor vida útil del actuador.

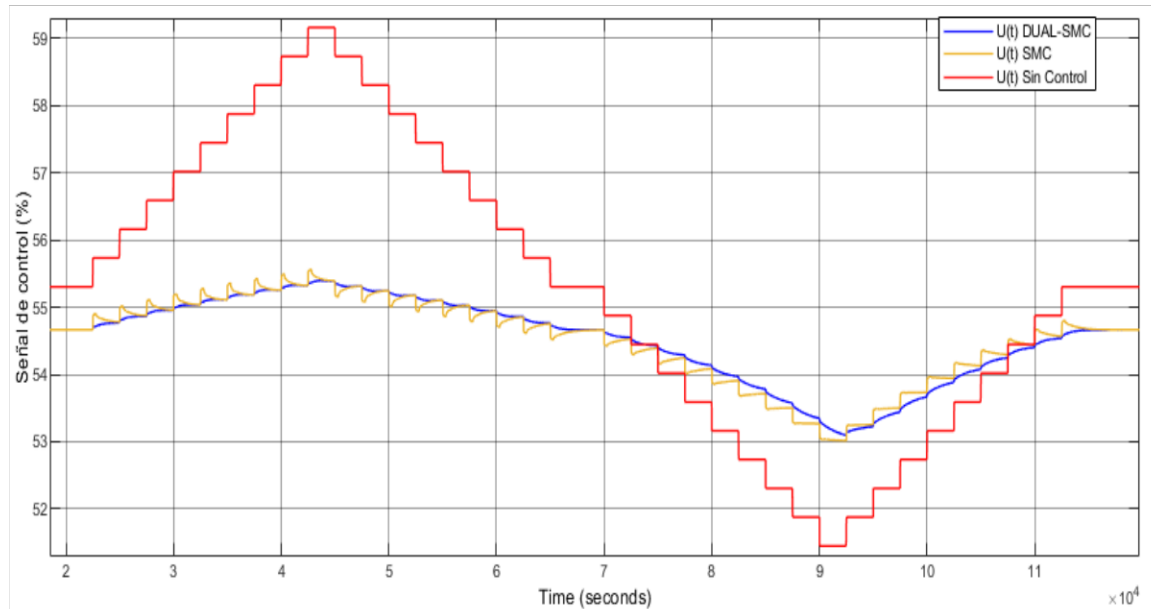


Figura 3.26. Salidas de las acciones de control ante señal tipo escalera.

Además, para observar de mejor forma la eficiencia y la suavidad obtenida en el controlador implementado, es necesario analizar los índices de desempeño obtenidos con la entrada tipo escalera, observar la Figura 3.27.

Analizando el índice ISU, el cual se encuentra relacionado con la señal de control del proceso, es notorio que existe una gran diferencia entre los resultados obtenidos entre el control SMC y el control DUAL-SMC. El controlador DUAL-SMC es un 60% más eficiente que el controlador SMC. El índice de rendimiento indica que el controlador SMC presenta una señal de control más agresiva, estos valores se respaldan observando la Figura 3.26, donde se aprecia que el control DUAL-SMC consigue eliminar los sobrepicos en casi todos los escalones, lo que indica que la acción de control es suave.

El índice perteneciente al ISE permite cuantificar la cantidad de error que se va produciendo en el funcionamiento del proceso, para este caso tenemos una reducción del 26% al comparar el control propuesto DUAL-SMC con el control SMC, lo que ratifica la eficiencia del controlador DUAL-SMC, es decir, en el funcionamiento del proceso existe un mayor tiempo de simulación y mayor error. Este error se debe en gran parte a los sobrepicos producidos por el control SMC en cada uno de los escalones, por lo que la respuesta se encuentra más alejada de la referencia, además, por estas razones también incrementa el

tiempo de establecimiento en la mayoría de las respuestas frente a los escalones de entrada.

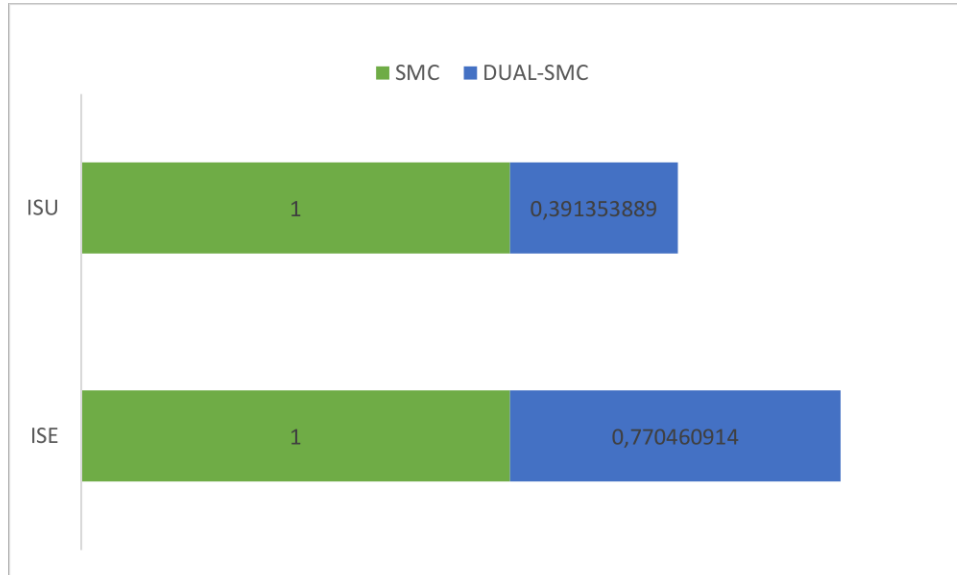


Figura 3.27. Índices de desempeño del sistema con los controladores.

3.1.4 ANÁLISIS DE LOS ÍNDICES DE RENDIMIENTO OBTENIDOS EN LAS PRUEBAS DE SEGUIMIENTO EN EL TANQUE DE NEUTRALIZACIÓN DE PH

Para la verificación del funcionamiento y la eficacia del controlador diseñado DUAL-SMC es necesario comparar los resultados obtenidos ante las diferentes entradas.

Al analizar la Figura 3.28, se observa los resultados del índice de rendimiento ISE, ante los tres tipos de entradas en la prueba de seguimiento, los valores obtenidos en cada prueba contienen magnitudes diferentes, las respuestas presentan una forma individual tanto en términos de magnitud como en términos de tiempo de establecimiento para cada escalón.

De esta forma analizando la Figura 3.28, se observa claramente que para el índice ISE, el cual hace referencia al error, el control DUAL-SMC presenta un valor menor en todas las pruebas. En el mejor de los casos fue para la prueba ante una entrada positiva, donde el porcentaje de mejoría es de aproximadamente un 60% respecto al control SMC. Por otro lado, en el peor de los casos fue para la prueba ante una prueba tipo escalera, donde el porcentaje de mejoría es de aproximadamente un 20% respecto al control SMC. Lo que significa que el control DUAL-SMC presenta una mayor eficiencia, reduciendo el tiempo de establecimiento, generando una respuesta más rápida y reduciendo la magnitud del error.

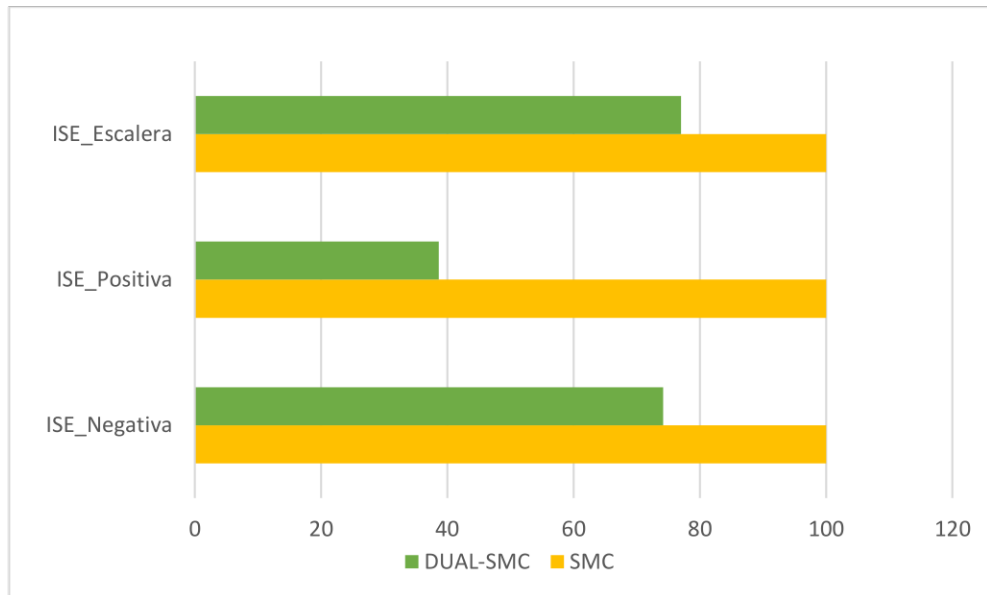


Figura 3.28. Comparación de índices de desempeño del sistema tipo ISE.

En la Figura 3.29, se observa los resultados del índice de rendimiento ISU para los tres tipos de entradas ante las pruebas de seguimiento de trayectoria, el resultado obtenido en cada una de las pruebas presenta magnitudes diferentes, debido a que cada uno de los escalones se encuentra en una posición específica tanto en el eje de amplitud como en el eje del tiempo de cada escalón.

Al analizar la Figura 3.29, se puede observar que el controlador DUAL-SMC presenta valores menores en el índice ISU en comparación con el control SMC. Este índice de rendimiento se relaciona con la fuerza de la respuesta de la señal de control. Esto quiere decir que el control DUAL-SMC tiene un mejor rendimiento porque reduce los sobrepicos, obteniendo una respuesta más suave. En cuanto al controlador SMC, los sobrepicos se reflejan en mayor escala tanto en la señal de control como en la señal del transmisor.

La máxima reducción de sobrepicos se obtiene con el control DUAL-SMC en la prueba ante la entrada tipo escalera, puesto que se da una reducción de más del 50% en el ISU, es decir, el control DUAL eliminó una mayor cantidad de sobrepicos en comparación a las otras pruebas en las cuales se obtuvo solo entre un 15% a 30% de reducción del ISU por parte control DUAL en comparación al control SMC.

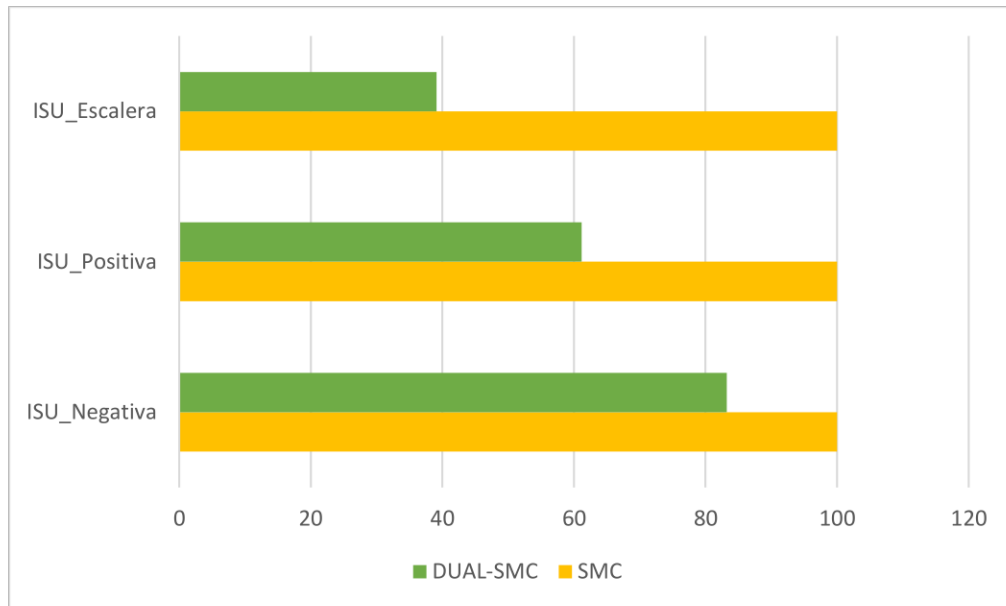


Figura 3.29. Comparación de índices de desempeño del sistema tipo ISU.

3.2 CONCLUSIONES

- Se logró diseñar y simular un esquema de control dual por modos deslizantes para control de un tanque de neutralización de pH.
- Se diseñó un control SMC con superficie PID mediante el análisis en varios puntos de la respuesta de la señal del transmisor del controlador, luego se buscó el ramal con mayor inestabilidad en la estructura de la superficie SMC y finalmente con criterios de diseño basados en la definición del control proporcional, derivativo e integral se modificaron los valores hasta conseguir una sintonización adecuada ante el alta no linealidad del proceso en estudio.
- 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-integral, bajo los principios de conmutación del esquema Dual, logrando un mejor rendimiento tanto en tareas de regulación como en cambios de referencia. En la metodología de diseño se utilizó la relación de una ganancia alta para la superficie PI y una ganancia baja para la superficie PID, para mejorar la parte transitoria, además, se calculó una ganancia total del controlador dependiente del error con lo que se logró mejorar el rendimiento al realizar tareas de regulación

y mantener estable la conmutación de las superficies. Con lo mencionado se pudo comprobar que un esquema dual puede funcionar para un proceso con altas no linealidades. La mejora se respalda en los valores mostrados en los índices de desempeño ISU, ISE, Mp y ts.

- Se simuló el proceso altamente no lineal aplicando los controles diseñados, en el que se comparó las respuestas del esquema SMC contra el controlador DUAL-SMC. Con ello se pudo comprobar la mejora del rendimiento del controlador propuesto al comparar los valores de los índices de desempeño y las características de la respuesta transitoria tanto en pruebas de regulación como seguimiento de trayectoria.
- Se comprobó mediante el análisis de resultados que el controlador DUAL-SMC con superficie PD aplicado al sistema de pH no es viable, debido a que el sistema es altamente no lineal y la parte diferencial amplifica las oscilaciones dificultando ejecutar un adecuado control al proceso.
- Con el análisis de los índices de rendimiento para seguimiento de referencia, se comprobó la eficacia del controlador DUAL-SMC, obteniendo una menor cantidad de error comparado con el controlador SMC en términos del índice de rendimiento ISE, además la reducción de los sobrepicos en la respuesta de cada escalón de entrada, lo que refleja una señal de control más suave y conveniente para preservar la vida útil del actuador del proceso, esto se concluyó tras obtener un valor menor del índice de rendimiento ISU para todos los tres tipos de entradas.

3.3 RECOMENDACIONES

- Cuando se trabaja con procesos altamente no lineales como el presentado en este proyecto, no se debe hacer variaciones drásticas del punto de operación porque el modelo va a cambiar mucho, por ello, se recomienda establecer un rango específico de trabajo, realizando incrementos positivos o negativos hasta adecuar un rango óptimo.
- Conociendo los problemas debido al comportamiento de un proceso altamente no lineal y verificando la funcionalidad del controlador propuesto en este proyecto, se podría hacer una extensión de los resultados en más puntos de operación, para lo

cual se recomienda incluir algunos aspectos del control adaptativo dentro del sistema y con ello diseñar esquemas duales adaptativos.

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] O. Camacho, C. Obando, y R. Rojas, “Dual-Mode Sliding Mode Controller for Non-Linear Chemical Processes”, *J. Process Control*, 2021.
- [4] 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.
- [5] C. Obando, R. Rojas, y O. Camacho, “Dual-Mode Sliding Mode Controller for Non-Linear Chemical”.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.