

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CONTROL DE SISTEMAS NO LINEALES CON RETARDOS DE
TIEMPO VARIABLES**

**DISEÑO Y SIMULACION DE TRES CONTROLADORES DE
TEMPERATURA EN CASCADA APLICADO A PROCESOS
QUIMICOS CON RETARDO DE TIEMPO VARIABLE Y
PERTURBACIONES**

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

ROBINSON RAÚL CISNEROS CALDERÓN

robinson.cisneros@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. DIEGO IVÁN PILAQUINGA ABADIANO, MSC

diego.pilaquinga@epn.edu.ec

DMQ, octubre 2022


CERTIFICACIONES

Yo, ROBINSON RAÚL CISNEROS CALDERÓN 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.



ROBINSON RAÚL CISNEROS CALDERÓN

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por ROBINSON RAÚL CISNEROS CALDERÓN, bajo mi supervisión.



ING. DIEGO IVÁN PILAQUINGA ABADIANO, MSC
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el producto resultante 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.

ROBINSON RAÚL CISNEROS CALDERÓN

DIEGO IVÁN PILAQUINGA ABADIANO

DEDICATORIA

A mis padres Raúl, Germania, mis hermanos Raúl y Kenny quienes incondicionalmente con todo su amor me apoyaron, creyeron en mí y en mis aptitudes, para poder cumplir este objetivo. A cada joven de nuestro país que ha pensado en abandonar sus estudios a causa de una discapacidad, sin saber que con mucho empeño, dedicación y paciencia esos sueños pueden convertirse en realidad. El ingenio, la imaginación y la persistencia son buenas herramientas para luchar por tus objetivos. Al personal médico y amigos que aportaron con un granito de arena poder hacer este sueño realidad. A mis compañeros de promoción quienes fueron un ejemplo a seguir y una inspiración, de quienes aprendí muchas virtudes que me ayudaron a salir adelante frente a cada dificultad.

AGRADECIMIENTO

Quiero dar gracias a Dios, por haberme dado una segunda oportunidad de vida, a la academia por abrirme las puertas del conocimiento, a mis padres y mis hermanos por haberme acompañado día a día en este difícil, pero no imposible camino, para ver este sueño hecho realidad. A la Ing. Yadira Bravo, Ing. Favio González, al PHD. Óscar Camacho, Ing. Diego Pilaquinga, a la Ing. Ana Rodas y a todas las autoridades y docentes, quienes pusieron fe y esperanza en mis capacidades para concluir mi formación académica.

El camino no ha sido fácil, por ser una persona con discapacidad, ha sido necesario superar obstáculos, reeditar procedimientos y actitudes, sin renunciar jamás a los derechos y oportunidades, de igualdad y compromiso. Para de esta manera acercarnos más a la excelencia desde una perspectiva diferente. A la Dirección de Bienestar Politécnico, a la Lcda. Jenny Tubón por su gran compromiso con su labor y excelente trabajo profesional. Al personal académico y compañeros de la FEON por sus muestras de solidaridad y apoyo con su granito de arena para ver hoy cristalizado mi anhelo. A toda mi familia y amigos por haber visto en mi un ejemplo de tenacidad y persistencia, para superar las adversidades, mi gratitud a toda la comunidad politécnica; por haber hecho realidad en mí el objetivo de llegar a la excelencia académica.

Finalmente, un agradecimiento especial a todos mis compañeros de clase por ser una luz que me guiaba para alcanzar el conocimiento.

Gracias, infinitas gracias.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	3
1.4.1 PROCESOS CON RETARDOS DE TIEMPO	3
1.4.2 Modelo de primer orden con retardo de tiempo	5
1.4.3 Identificación de parámetros en procesos con retardo de tiempo.....	5
1.4.4 Controlador feedback.....	6
1.4.5 Controlador PID	7
1.4.6 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES.....	8
1.4.7 Control SMC	9
1.4.7.1 Ley de control para el controlador SMC	10
1.4.7.2 Sintonización de controladores SMC.....	12

1.4.8	Controladores en cascada	13
1.4.9	Índice de desempeño ISE	13
2	METODOLOGÍA	15
2.1	Caso de estudio	15
2.1.1	Descripción de la planta.....	16
2.2	Validación del modelo	18
2.3	Diseño de controladores en cascada	19
2.3.1	Controlador PID-PID	20
2.3.1.1	PID interno	21
2.3.1.2	PID externo	23
2.3.2	Controlador SMC-PI.....	25
2.3.2.1	Controlador PI interno.	25
2.3.2.2	Diseño controlador SMC externo	26
2.3.3	Controlador SMC-SMC	28
2.3.3.1	Diseño Controlador SMC Interno	29
2.3.3.2	Controlador SMC Externo	32
3	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	34
3.1	Resultados	34
3.1.1	Controlador PID-PID	35
3.1.1.1	Prueba de seguimiento.....	36
3.1.1.2	Prueba con perturbaciones de agua caliente	37
3.1.1.3	Prueba con perturbaciones de agua fría.	38
3.1.1.4	Prueba con perturbaciones de agua fría y caliente.	39
3.1.2	Controlador SMC-PI.....	40
3.1.2.1	Prueba de seguimiento.....	41
3.1.2.2	Prueba con perturbación de agua caliente.	42
3.1.2.3	Prueba con perturbación de agua fría	43

3.1.2.4	Prueba con perturbación de agua fría y agua caliente.	45
3.1.3	Controlador SMC-SMC	46
3.1.3.1	Prueba de seguimiento.....	46
3.1.3.2	Prueba con perturbaciones de agua caliente	47
3.1.3.3	Prueba con perturbaciones de agua fría	49
3.1.3.4	Prueba con perturbaciones de agua fría y caliente	50
3.1.4	Comparación de desempeño de controladores	52
3.1.4.1	Prueba de seguimiento.....	52
3.1.4.2	Prueba de seguimiento con perturbaciones de agua caliente y agua fría.....	54
3.1.5	Índices ISE obtenidos	57
3.2	Conclusiones.....	60
3.3	Recomendaciones.....	61
4	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	63
5	ANEXOS.....	64
	Anexo I.....	64
	Anexo II	66
	Anexo III.....	67
	ANEXO IV	68

RESUMEN

En el presente Trabajo de Integración Curricular se diseñaron y simularon tres controladores en cascada: PID-PID, SMC-PI, SMC-SMC para controlar la temperatura de un tanque de mezclado, donde ingresan un flujo de agua caliente W_1 y un flujo de agua fría W_2 para obtener una mezcla con una temperatura controlada a 150°F, simulación realizada en el software Matlab Simulink. El tanque de mezclado utilizado es propuesto por Carlos A. Smith y Oscar Camacho [1].

El transmisor de temperatura está ubicado a 125 ft de del tanque, esto produjo retardos de tiempo. Se realizaron pruebas de seguimiento, cuyo resultado fue que los tres controladores siguieron correctamente a la temperatura de referencia. Además, fue sometido a variaciones del ingreso de W_1 y de W_2 de forma individual y simultánea, variaciones que actuaron como perturbaciones. La perturbación W_1 varía de 250-125 lb/min mientras que la perturbación W_2 utilizada cambió de 0-30 lb/min. Esta característica complicó el desempeño del controlador tipo PID-PID para alcanzar la referencia. Se observó en los resultados, que el controlador PID-PID perdió el control, mientras que los controladores SMC-PI y SMC-SMC alcanzaron la referencia cuando fueron sometidos a perturbaciones. Finalmente, en base al índice ISE se evaluó el desempeño de los tres controladores, determinándose que el mejor desempeño fue presentado por el controlador SMC-SMC.

PALABRAS CLAVE: Control, cascada, tanque, retardo, perturbaciones, SMC.

ABSTRACT

In this work, there are the design and simulation of three controllers in cascade system: PID-PID, SMC-PI, SMC-SMC, to control the mixing tank's temperature, where there are a cold fluid W_2 and a hot fluid W_1 that enter in the tank to obtain a mixture to 150°F. the simulation was performed in Matlab Simulink. The tank used was proposed by Oscar Camacho and Carlos Smith.[1].

The temperature transmitter is to 125ft from the tank, this characteristic produces delays. Follow up test were performed, where the three controllers followed the reference temperature. In fact, the tank was subjected to income variations of W_1 and W_2 individually and simultaneously, changes that act like perturbations. W_1 perturbation changes from 250 to 125lb/min while W_2 perturbation changes from 0 to 30lb/min. This feature compromises the performance of PID-PID controller to reach the reference. It was observed in the results that PID-PID configuration lost the control. While SMC-PI and SMC-SMC reached temperature reference when they were subjected to perturbations (W_1 and W_2 simultaneously). Finally, the performance was evaluated using the index ISE for the three controllers determining that hat the best performance was obtained by SMC-SMC controller.

KEYWORDS: Cascade, Controller, SMC, mixing, thank

1 INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se realizará el diseño y simulación de tres controladores en cascada en las configuraciones: PID-PID, SMC-PI, SMC-SMC aplicadas sobre un tanque de mezclado de un flujo de agua fría y un flujo a agua caliente, tanque propuesto por Carlo A. Smith y Oscar Camacho [2], como propuesta para controlar la inestabilidad que puede estar presente en procesos de tipo químico que posean retardos de tiempo y perturbaciones.

Aquí se encontrarán conceptos de identificación de parámetros necesarios y sintonización de controladores. También se explicará el proceso con el que se puede sintonizar un controlador, mediante el uso de la curva de reacción de la variable controlada. Además, se explica cómo se puede sintonizar un controlador en cascada cuyo procedimiento se observa en el capítulo dos.

La simulación del proceso en cuestión se desarrollará en el software Matlab-Simulink. Se observarán los resultados de temperatura en el tanque que se obtendrán con los controladores que serán diseñados, al realizar pruebas de cambio de referencia, como también pruebas con perturbaciones.

Se podrá observar una gráfica de barras de los índices de desempeño ISE que se obtendrán en las pruebas de cambio de referencia y las pruebas con diferentes escenarios de perturbación que se harán.

Finalmente se mostrarán las conclusiones y recomendaciones que surgieron en la realización de este trabajo.

1.1 Objetivo general

Diseñar y Simular tres controladores de temperatura en cascada aplicado a procesos químicos con retardo de tiempo variable y perturbaciones (tanque de mezclado de agua fría-caliente).

1.2 Objetivos específicos

1. Realizar un estudio de las técnicas de identificación de parámetros en procesos con retardo de tiempo por el método de Alfaro y Smith, para determinar el método a utilizar para diseñar los controladores.
2. Implementar y validar el modelo del tanque de mezclado en el software Matlab-Simulink para verificar la validez de la simulación de la planta.
3. Diseñar y simular los controladores: PID-PID, SMC-PI, SMC-SMC en cascada, que

controlen la temperatura del tanque de mezclado.

4. Realizar pruebas a los controladores diseñados para definir la configuración con mejor desempeño para controlar la temperatura del tanque de mezclado.
5. Evaluar la respuesta de temperatura del tanque conseguida con los controladores diseñados, mediante el uso del ISE (índice de error cuadrático), para determinar la configuración con ISE más cercano a cero al tener las perturbaciones de agua fría y de agua caliente.

1.3 Alcance

- Se realizará la revisión bibliográfica de un modelo matemático de un tanque de mezclado de agua fría-caliente con retardo de tiempo y perturbaciones.
- Se realizará una revisión bibliográfica de controladores tipo SMC y PID aplicado a sistemas con retardo de tiempo, con el método de Dahlin, Smith y Alfaro.
- Se realizará una revisión bibliográfica del funcionamiento y sintonización de controladores feedback y en cascada.
- Se Implementará en Matlab-Simulink un modelo matemático de un tanque de mezclado de agua fría-caliente con retardo de tiempo y perturbaciones.
- Se diseñará y sintonizará tres controladores en cascada: PID-PID, SMC-PI, SMC-SMC aplicados al tanque de mezclado con retardo de tiempo y perturbaciones.
- Se implementará en Matlab-Simulink los tres controladores en cascada diseñados para validar el funcionamiento aplicado al control de temperatura en el tanque de mezclado.
- Se realizarán las pruebas de funcionamiento a los controladores diseñados:
 - Pruebas de seguimiento
 - Pruebas con perturbaciones de agua caliente
 - Prueba con perturbaciones de agua fría
 - Prueba con perturbaciones de agua fría y caliente
- Se validará el desempeño de los controladores diseñados con el uso del índice ISE.
- Se establecerán las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Procesos con retardos de tiempo

Existen procesos químicos industriales que se desarrollan en condiciones que requieren de un control para mantener la temperatura del proceso en la referencia deseada, para de esta manera desarrollar dicho proceso sin inconvenientes [2]. Procesos como el mencionado requieren el uso de controladores con buen desempeño, debido a que pueden estar sometidos a perturbaciones y tener retardos de tiempo, los mismos que afectan la sintonización de los controladores como es el caso de controles: PI, PD, PID; haciendo que estos pierdan el control o no puedan estabilizarse en la referencia deseada.

Para poder observar este problema se muestra el control PID aplicado a la siguiente planta que se muestra de la Figura 1.1:

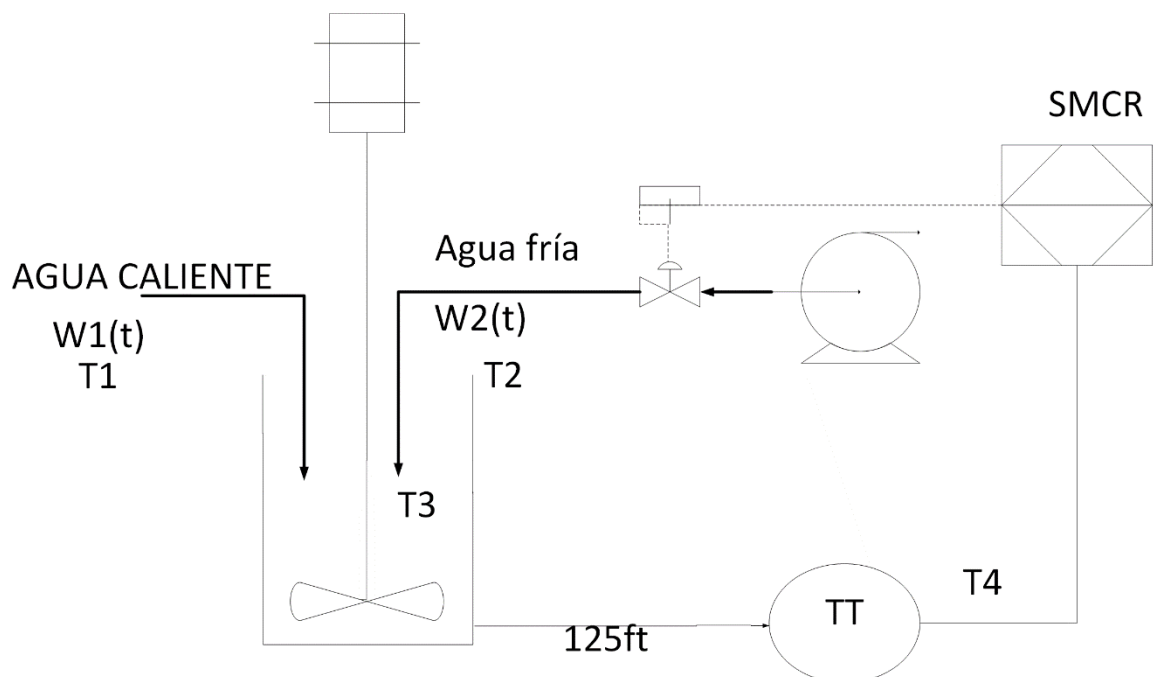


Figura 1.1. Diagrama P&ID tanque de mezclado [3].

Esta planta es un tanque de mezclado, el cual posee un ingreso de flujo de agua caliente W_1 y un ingreso de flujo de agua fría W_2 . La temperatura de la mezcla del tanque se mide con un transmisor de temperatura, el mismo que se encuentra a 125 ft de distancia del tanque de mezclado [3].

El flujo másico de agua caliente cambia desde 250 hasta 125 lb/min y el flujo másico de agua fría cambia de 0 hasta 30 lb/min. Estos cambios mencionados en la densidad de los

flujos de agua caliente y agua fría que ingresan en el tanque producen retardos de tiempo variables en la planta mostrada de la Figura 1.1.

En [2] se ilustra el problema que aplica el retardo de tiempo en la medición de temperatura al utilizar controladores PID clásicos, allí se sintonizó un controlador PID a lazo abierto donde los parámetros obtenidos de la curva de reacción fueron: una ganancia de -0.78, una constante de tiempo τ de 2.32 y un retardo de 2.97 parámetros con los que se sintonizó un controlador PID en feedback por el método de Dahlin. También diseñaron un controlador por modos deslizantes difuso y se comparó su respuesta de ante perturbaciones.

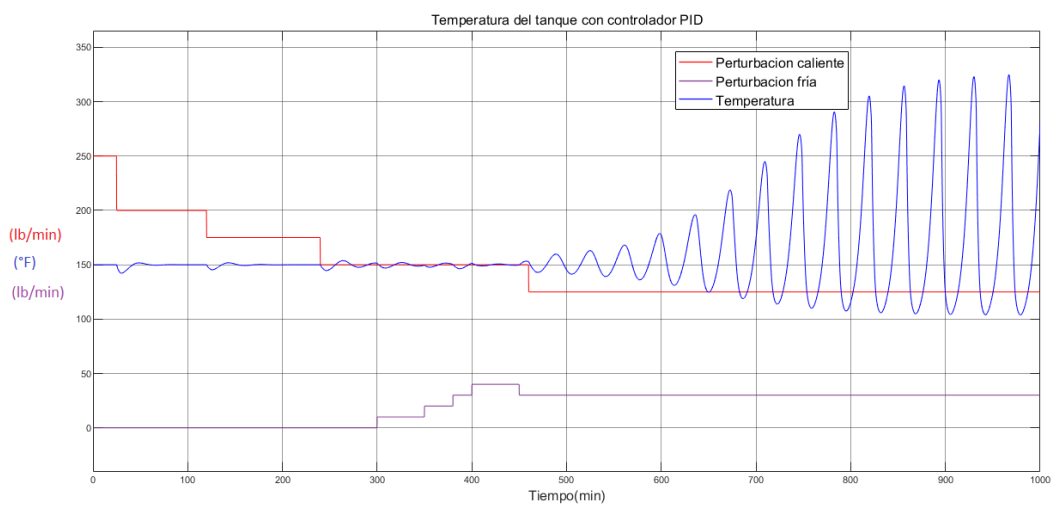


Figura 1.2. Temperatura tanque de mezclado con controlador PID y CMD [3].

En la Figura 1.2. se observa a la a la variación de flujo másico de agua caliente en y la variación de flujo másico de agua fría en lb/min y la respuesta de temperatura obtenida en el tanque de mezclado con un controlador PID en feedback en °F, se puede apreciar que cada perturbación de agua caliente produce un descenso de temperatura de 8 °F aproximadamente y el controlador PID logra mantener la temperatura de consigna a los 150°F después de alcanzar su máximo sobre impulso, comportamiento repetitivo hasta la cuarta perturbación caliente a partir del minuto 480, donde el efecto de tiempo en la medición de temperatura del tanque provoca que se pierda el control de la temperatura evidenciando que un controlador PID en feedback no posee el desempeño necesario para estabilizar este tipo de procesos con retardos de tiempo y perturbaciones.

1.4.2 Modelo de primer orden con retardo de tiempo

Gran parte de los procesos industriales tienen un comportamiento no lineal, motivo por el que resulta complejo encontrar el modelo matemático que permita trabajar con procesos que posean esta característica. Motivo por el que se puede recurrir a un modelo FOPDT (First Order Plus Delay Time) que es un modelo de primer orden más tiempo muerto que permite obtener una aproximación del proceso no lineal que posea un punto de estado estacionario flexible a un modelo FOPDT.[4]

Al utilizar un modelo de orden reducido para modelar el comportamiento de la planta, se asegura que los controladores posean también un orden similar, lo que facilita su implementación.

El modelo de primer orden con retardo se puede definir como:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (1.1)$$

1.4.3 Identificación de parámetros en procesos con retardo de tiempo

Uno de los métodos de identificación de parámetros en procesos con retardo de tiempo es el método de Alfaro. Con este método de identificación de se obtiene una buena aproximación debido a que, en identificación de procesos sobre amortiguados, hace la aproximación con un punto hacia arriba en la curva de reacción (75 %) y un uno hacia abajo de la misma (25 %) lo cual sumado a las constantes para identificación de parámetros que se observan en la Tabla 1.1 y aplicadas a las ecuaciones (1.2) y (1.3), se utilizan para encontrar los valores de la constante de tiempo τ y el retardo t_0 [3].

$$\tau = at_1 + bt_2 \quad (1.2)$$

$$t_0 = ct_1 + dt_2 \quad (1.3)$$

Tabla 1.1. Métodos, Porcentajes de Análisis y Constantes a, b, c, d. [4]

Método	% $P_1(t_1)$	% $p_2(t_2)$	a	b	c	d
Alfaro	25%	75%	-0.910	0.910	1.262	-0.262
Broida	28%	40%	-5.500%	5.500	2.800	-1.800
Cheng y Yang	33%	67%	-1.400	1.400	1.540	-0.540
Ho et al	35%	85%	-0.670	0.670	1.300	-0.290
Smith	28.3%	63.2%	-1.500	1.500	1.500	-0.500

También se sabe que:

$$K_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (1.4)$$

Donde:

K_p = Ganancia = Variación en la respuesta de salida ante una entrada paso sobre la variación en la entrada

Δy = Variación en la salida

Δu = Variación en la entrada

Para los métodos de identificación que usan dos puntos de la curva se puede trabajar con:

$$t_1 = t_0 + \tau/3 \quad (1.5)$$

$$t = t_0 + \tau \quad (1.6)$$

$$\tau = 1,5(t_2 - t_1) \quad (1.7)$$

$$t_0 = (t_2 - \tau) \quad (1.8)$$

Donde:

t = tiempo

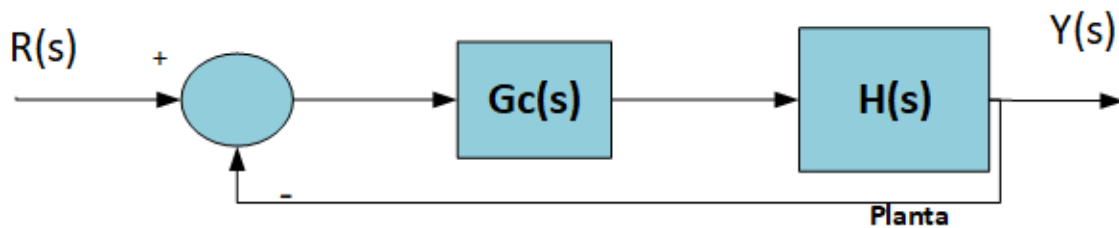
t_0 = retardo

τ = Constante de tiempo

1.4.4 Controlador feedback

El control feedback, conocido también como control por realimentación o control realimentado, es aquel que tiene el objetivo de disminuir el error entre la referencia y la variable controlada, motivo por el que se conecta en lazo cerrado. Así el control en feedback produce un error restando la referencia de entrada de la salida del transmisor de la variable controlada, error que hará que el controlador produzca una salida $y(s)$ hasta que dicha resta sea cero[5].

En la Figura 1.3 se puede apreciar los elementos que forman parte del lazo de control en un control feedback o retroalimentado, en este se puede apreciar la ubicación que tiene la planta y el controlador con un controlador en feedback.



<Figura 1.3. Esquema conexión controlador feedback [3].

En la Figura 1.3 se puede observar el esquema de conexión de un control feedback, donde $G_c(s)$ representa al controlador, $H(s)$ a la planta, $R(s)$ es la referencia, y $y(s)$ es la variable controlada.

Uno de los métodos de sintonización de un controlador, es analizando la curva de reacción a lazo abierto (sin la realimentación), es decir excitando directamente la entrada de la planta y analizando la variable controlada. Con ello se obtienen los parámetros de sintonización de un controlador PID con el método de Dahlin como se explicará posteriormente[6].

1.4.5 Controlador PID

Un controlador PID es aquel que está compuesto por la suma tres componentes de control, una que trabaja con un parámetro proporcional al error, también una componente integral para bajar el error en estado estacionario [5] y otra que emplea una componente derivativa con la finalidad de mejorar la respuesta durante el estado transitorio[6]. Los controladores que emplean estas tres componentes de control son conocidos como controladores PID [7].

La sintonización de un controlador PID se realiza ya sea empleado métodos de sintonización en lazo abierto (como el método de Dahlin) o métodos de sintonización a lazo cerrado (como el método de Ziegler-Nicols) [4]. Estos métodos están basados en modelos de primer orden con retardo, por lo que utilizan el parámetro t_0 que corresponde al retardo de tiempo, parámetro que se encuentra en la respuesta de la variable controlada. Debido a que este parámetro es parte de la sintonización de un controlador PID, entonces representa un problema, si ante la presencia de perturbaciones el retardo t_0 o más parámetros de sintonización cambian, lo que puede producir la pérdida de control en un controlador PID o que el mismo no pueda alcanzar su referencia.

La ecuación general que define un control PID viene dada por:

$$u(t)=K_c \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1.9)$$

1.4.6 SINTONIZACIÓN DE CONTROLADORES

Uno de los métodos de sintonización de controladores PID consiste en utilizar la curva de reacción en lazo abierto [3].

En la Figura 1.4 se observa un ejemplar de los parámetros que se obtienen a partir de la curva de reacción como: $t_1, t_2, \Delta u, \Delta y$ donde el punto p_1, p_2 están establecidos como se mostró en la Tabla 1.1.

Se puede sintonizar un controlador a lazo abierto con el método de Dahlin, para ello se deben hallar tres parámetros con el análisis de la curva de reacción a lazo abierto, estos parámetros son: la constante de tiempo τ , el retardo t_0 , y la ganancia K . Con el análisis de la curva de reacción en los instantes t_1 y t_2 , que son los tiempos necesarios para llegar a los puntos de análisis, se puede encontrar τ y t_0 con las ecuaciones 1.2 y 1.3 [3]

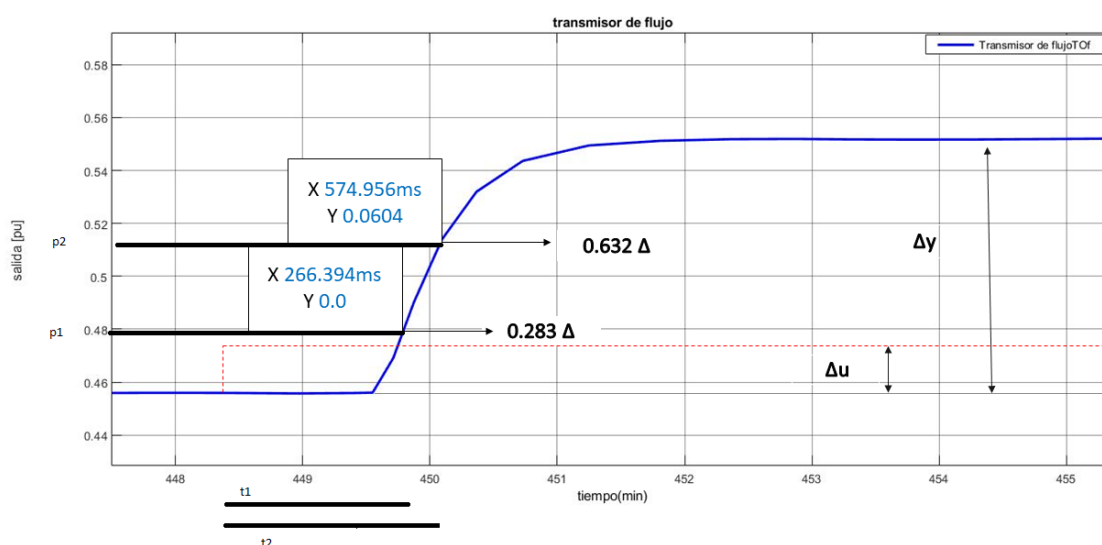


Figura 1.4. Curva de reacción, método de dos puntos [4].

Estos parámetros mostrados en las ecuaciones 1.2 y 1.3 son deducidos de la siguiente forma:

1. Se escoge uno de los métodos de la Tabla 1.1 y se determinan los valores de tiempo

para el punto p_1 y p_2 según el método seleccionado.

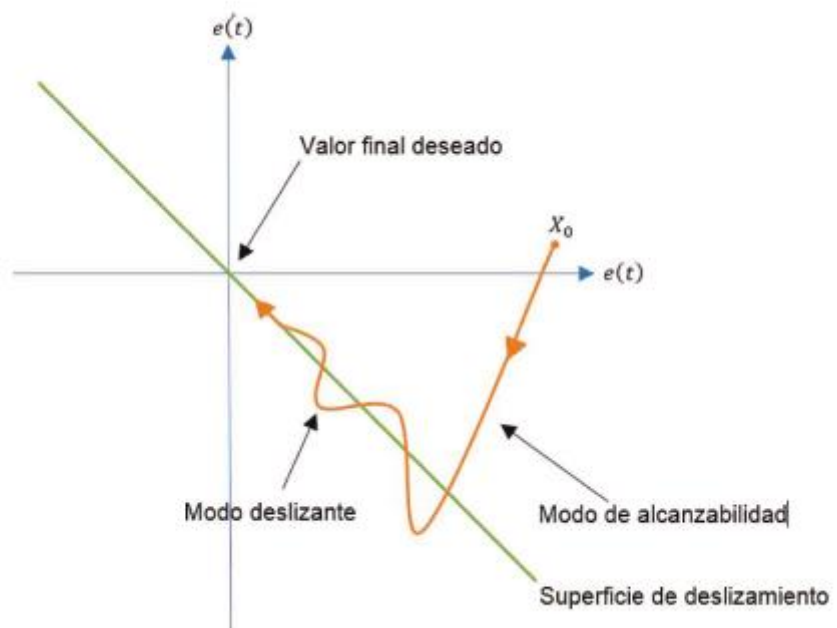
2. Se reemplaza los valores de: a, b, c, d y de las ecuaciones 1.2 y 1.3, al resolver se tiene valor de τ y t_0 .
3. Encontrados los valores de τ , t_0 y la ganancia K, se puede sintonizar el controlador deseado por el método de Dahlin con las expresiones de la Tabla 1.2.

Tabla 1.2. de Sintonización a Lazo Abierto por el Método de Dahlin [4].

Controlador	Parámetro de ajuste	Expresión
PID	K_p	$\frac{1}{2K} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-1}$
	τ_i	τ
	τ_d	$t_0/2$

1.4.7 Control SMC

El control por modos deslizantes (SMC- Sliding Mode Control) es una técnica de control útil para procesos no lineales [4].



1.4.1

Figura 1.5. Interpretación gráfica de un controlador SMC [4].

En la Figura 1.5 se observa la interpretación gráfica del proceso de cómo trabaja un controlador SMC, donde el estado inicial X_0 es llevado hacia la superficie y es a través del recorrido sobre ésta que llega a la referencia final deseada.

Para empezar a definir un controlador por modos deslizantes se debe establecer la superficie $S(t)$. Donde $S(t)$ define el funcionamiento general que se espera tener, como por ejemplo tener un estado permanente, esta viene dada por:[4]

$$S(t) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^n \int_0^t e(t)dt \quad (1.10)$$

1.4.7.1 Ley de control para el controlador SMC

En un control por modos deslizantes, la ley de control se define con $U_{eq}(t)$ y está conformada con la suma de dos componentes: la componente continua $U_C(t)$ y la componente discontinua $U_D(t)$ [3], es decir:

$$U_{eq}(t) = U_c(t) + U_D(t) \quad (1.11)$$

La componente discontinua $U_D(t)$ es aquella que tiene la tarea de mover la variable desde su condición inicial a la superficie.

$$U_{D1}(t) = K_D(\text{sgn}(S(t))) \quad (1.12)$$

El error de la trayectoria, el mismo que es la resta del valor la referencia $R(t)$ y el valor de la variable controlada $X(t)$ se define como:

$$e(t) = R(t) - X(t) \quad (1.13)$$

La componente continua se obtiene a partir del análisis del modelo, es decir partiendo de la ecuación 1.14

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K}{(\tau s + 1)(t_0 s + 1)} \quad (1.14)$$

Luego, el modelo en forma diferencial se traduce como:

$$t_0 \tau \frac{d^2 X(t)}{dt^2} + (t_0 + \tau) \frac{dX(t)}{dt} + x(t) = KU(t) \quad (1.15)$$

De la ecuación 1.15 se puede observar que se está trabajando con un sistema de orden $n=2$, por lo tanto, de la ecuación 1.10 se puede determinar que se tendrá una superficie dada por:

$$S(t) = \frac{de(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t)dt \quad (1.16)$$

La expresión de la superficie también puede ser expresada de la siguiente forma:

$$S(t) = \left[\frac{-dX(t)}{dt} + \lambda_1 e(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t)dt \right] \text{sign}(K) \quad (1.17)$$

Donde se puede observar que la superficie consta de una componente proporcional, una integral y una derivativa [4]. La superficie es multiplicada a la función signo de la ganancia K. También se puede tomar en cuenta que:

$$\lambda_1 = 2\lambda \quad (1.18)$$

$$\lambda_0 = \lambda^2 \quad (1.19)$$

Luego, es necesario encontrar la Ueq que es la Ueq(t) equivalente, cuya condición es que la derivada de la superficie sea igual a cero. Además, si se considera que el error dado por la ecuación 1.13 se puede determinar la superficie como se indica a continuación.

Primero se introduce la ecuación 1.13 en la ecuación 1.16 y se define a la superficie S(t):

$$S(t) = \frac{dr}{dt} - \frac{dX(t)}{dt} + \lambda_1 r(t) - \lambda_1 x(t) + \lambda_0 \int_0^t e(t) dt \quad (1.20)$$

Por lo tanto, para encontrar la Ueq se tiene que:

$$\frac{dS(t)}{dt} = 0 \quad (1.21)$$

Realizando la derivada a la superficie como se indica en la ecuación 1.21 se tiene la siguiente expresión:

$$= \frac{d^2R}{dt} - \frac{d^2X(t)}{dt} + \lambda_1 \left(\frac{dR(t)}{dt} - \frac{dX(t)}{dt} \right) + \lambda_0 e(t) = 0 \quad (1.22)$$

Si a la ecuación 1.15 se la divide para (τt_0) se tiene la siguiente ecuación:

$$\frac{d^2X(t)}{dt} + \frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} \frac{dX(t)}{dt} + \frac{x}{t_0 \tau} = \frac{KU(t)}{t_0 \tau} \quad (1.23)$$

Sumando la ecuación 1.22 con la ecuación 1.23 y extrayendo un factor común a la primera derivada de x se tiene:

$$\frac{d^2r}{dt} + \lambda_1 \frac{dR}{dt} + \left(\frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} - \lambda_1 \right) \frac{dx}{dt} + \frac{x}{\tau t_0} + \lambda_0 e(t) = \frac{KU(t)}{\tau t_0} \quad (1.24)$$

La U(t) encontrada en la ecuación 1.24 es la Ueq buscada, por lo que al despejarla se tendrá la componente continua U_c :

$$U_c = \left(\frac{\tau t_0}{K} \right) \left[\left(\frac{\tau + t_0}{t_0 \tau} - \lambda_1 \right) \frac{dx}{dt} + \lambda_1 \frac{dR}{dt} + \lambda_0 e(t) + \frac{d^2R(t)}{dt^2} + \frac{x(t)}{\tau t_0} \right] \quad (1.25)$$

Se puede conseguir un controlador SMC menos complejo si se suprimen los términos con derivadas, este proceso que no perjudicará al sistema de control. Obteniendo una

componente continua dada por[4].

$$U_c = \left(\frac{\tau t_0}{K}\right) \left[\lambda_0 e(t) + \frac{x(t)}{\tau t_0} \right] \quad (1.26)$$

Donde:

$e(t)$: Es el error de la trayectoria, es decir la resta de la referencia, $R(t)$ y la salida, $X(t)$, la ecuación de error está dada por la ecuación 1.13.

El número λ es un parámetro de sintonización que es de ayuda para definir la dinámica de $S(t)$, parámetro que calcula el diseñador. Este define como se comporta la superficie deslizante.

Para entender de mejor forma el funcionamiento del control SMC se puede hacer el análisis del modelo siguiendo la teoría mostrada en [4] donde se define a la variable controlada como $x(t)$ y a la variable manipulada como $U(t)$. Además, $K(t)$ = ganancia del proceso, τ = constante de tiempo del sistema y t_0 = representa al retardo del sistema.

Asociados estos términos en la ecuación 1.1 se permite definir la siguiente ecuación.

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K_p e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} \quad (1.27)$$

Donde se tiene a:

- $X(s)$ transformada de Laplace de la variable controlada (valor entregado por el transmisor)
- $U(s)$ la transformada de Laplace de la variable manipulada (valor entregado por el controlador)

1.4.7.2 Sintonización de controladores SMC

Mencionados anteriormente los métodos por los cuales se puede encontrar los términos que conforman un modelo FOPDT (K, τ, t_0). Se puede encontrar los parámetros que permiten definir de un controlador SMC, el cual se encuentra en función de las expresiones de las siguientes constantes: $\lambda_1, \lambda_0, K_D, \delta$, Según las siguientes ecuaciones [1]:

$$\lambda_1 = \frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} \quad (1.29)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{t_0 + \tau}{t_0 \tau} \right)^2 \quad (1.30)$$

$$K_D = \frac{0.51}{|K|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} \quad (1.31)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12|K|(K_D * \lambda_1) \quad (1.32)$$

1.4.8 Controladores en cascada

Un controlador en cascada es aquel que se forma de dos lazos de control, donde el controlador que se encuentra en el lazo externo será el maestro y el controlador que se encuentra en el lazo interno será el esclavo.[5] Se puede visualizar lo descrito en la Figura 1.6.

Este método de control es conocido por incrementar el rendimiento, por lo que es utilizado para deducir perturbaciones en el controlador [5].

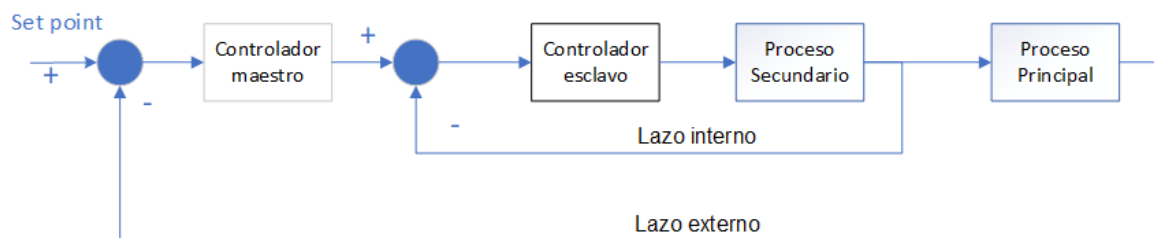


Figura 1.6. Esquema control en cascada.

Para realizar la sintonización de un controlador en cascada es necesario que primero se encuentre sintonizado el controlador del lazo interno, con los lazos del control cascada abiertos, para después proceder a sintonizar el controlador del lazo externo. Una vez sintonizado el controlador en cascada, se procede a cerrar el lazo externo e interno y se hacen las respectivas pruebas.

Una de las características que debe tener un control en cascada es que en el lazo de control externo se debe encontrar el control de la variable más lenta, y en el lazo de control interno debe encontrarse el control de la variable más rápida (criterio que debe analizar el diseñador al momento de escoger la variable a controlarse en el lazo interno y externo). Para esto se recomienda tomar en cuenta que la constante de tiempo del lazo de control interno debe ser menor o igual a 1/3 de la constante de tiempo del lazo externo [5].

1.4.9 Índice de desempeño ISE

El ISE (Integral Square Error) es utilizado como índice de desempeño en controladores, debido a que analiza la respuesta transitoria de la variable controlada, este índice se enfoca en los errores de gran magnitud[6], es decir, tiene más ponderación en los errores del estado transitorio, mientras que concede una menor ponderación en los errores del estado

estacionario . Es decir, el ISE será más pequeño mientras la variable controlada se acerque más a referencia[7].

La expresión que define el ISE viene dada por:[7]

$$ISE = \int_0^t e(t)^2 dt \quad (1.33)$$

2 METODOLOGÍA

2.1 Caso de estudio

El proceso con el que se trabajará en el presente proyecto consiste en mezclar un flujo de agua caliente W_1 y un flujo de agua fría W_2 para mantener la mezcla a una temperatura de 150°F [8]. La entrada del flujo de agua caliente W_1 y la entrada de flujo de agua fría W_2 actúan como perturbaciones, debido a que su flujo másico de ingreso es variable, además el transmisor de temperatura se encuentra a 125ft de distancia. En la Figura 1.1 del capítulo anterior, se observa el diagrama de la planta mencionada que se utiliza como referencia para la propuesta de control del presente trabajo.

Con la finalidad de implementar controladores con el desempeño necesario para estabilizar la temperatura de la mezcla, se plantea un control en cascada que tiene el control de temperatura T_3 para el lazo externo y el control de flujo del flujo de agua fría W_2 para el lazo interno. Esta propuesta puede ser observada en la Figura 2.1.

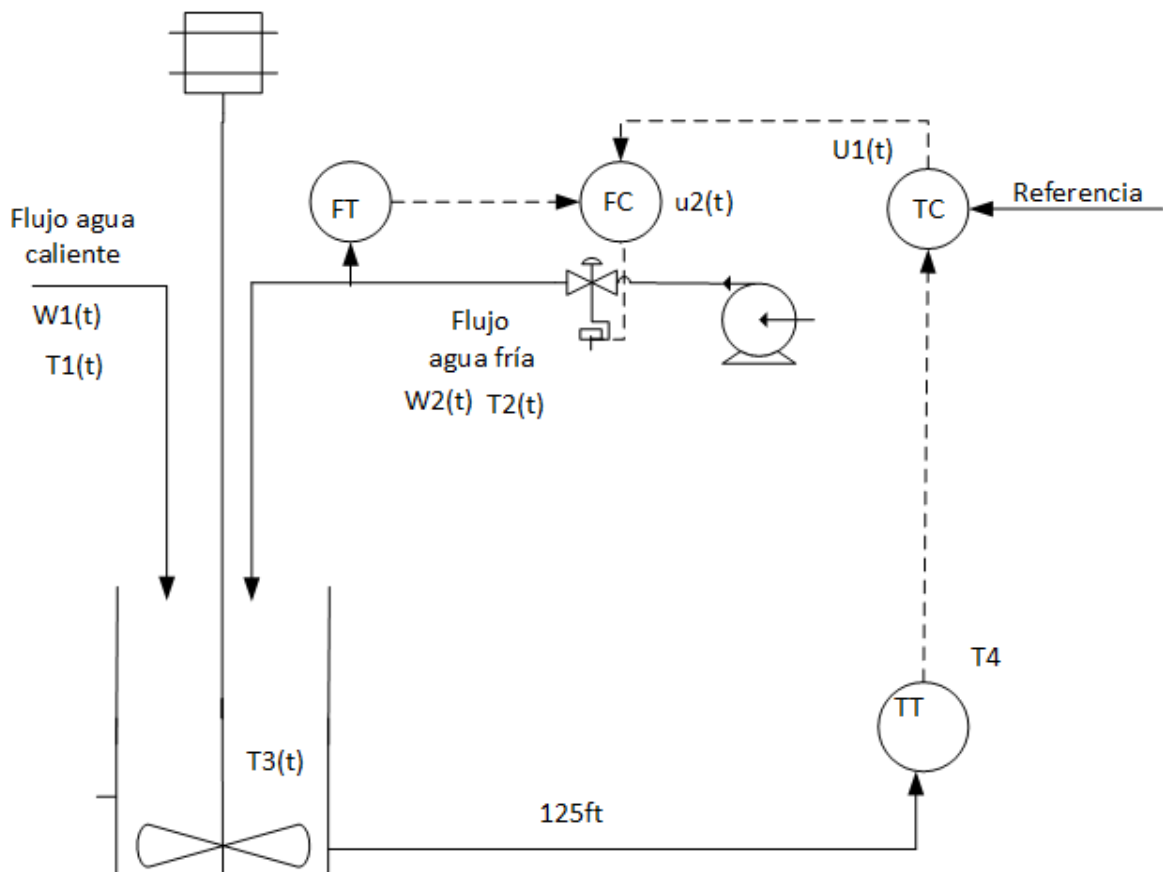


Figura 2.1. Figura P&ID de la planta en cascada [8].

2.1.1 Descripción de la planta.

El retardo de tiempo por transportación de la planta está definido por una fracción donde L , A y ρ son constantes y $W_1(t)$, $W_2(t)$ varían en el tiempo (ecuación 2.2). Por lo tanto, se puede inferir que en este proceso existirán retardos de tiempo variables, los que le pueden causar dificultades al controlador para que se pueda conseguir llegar a la referencia deseada.

A continuación, se presenta las ecuaciones que definen el comportamiento de las variables del proceso. La ecuación que define la temperatura de la mezcla en el tanque de mezclado viene dada por:

$$W_1(t)C_{p1}T_1(t) + W_2(t)C_{p2}T_2(t) - (W_1(t) + W_2(t))C_{p3}T_3(t) = V * \rho * C_{V3} \frac{dT_3(t)}{dt} \quad (2.1)$$

La expresión que define el retardo de tiempo por transportación se define por:

$$t_0 = \frac{L A \rho}{W_1(t) + W_2(t)} \quad (2.2)$$

Donde:

$W_1(t)$ = Flujo másico del agua caliente

$W_2(t)$ = Flujo másico del agua fría

L = Largo de la tubería del proceso en ft

A = Área transversal de la tubería en ft²

ρ = Densidad del contenido del tanque en lb/ft³.

La salida entregada por el transmisor de temperatura viene dada por:

$$\frac{dT_O(t)}{dt} = \frac{1}{\tau t} \left[\frac{T_4(t) - 100}{100} - T_O(t) \right] \quad (2.3)$$

La lectura de temperatura T_3 afectada por el retardo t_0 :

$$T_4(t) = T_3(t)(t - t_0) \quad (2.4)$$

La ecuación de la válvula de control de ingreso de flujo de agua fría está definida por:

$$W_2 = \frac{500}{60} * CVL * V_p(t) \sqrt{G_f \Delta P_v} \quad (2.5)$$

La ecuación que define el posicionador de la válvula viene dada por:

$$\frac{dV_p(t)}{dt} = \frac{1}{\tau V_p} [m(t) - V_p(t)] \quad (2.6)$$

Donde:

$W_1(t)$ = Flujo másico de flujo de agua caliente en lb/min

$W_2(t)$ = flujo másico de flujo de agua fría en lb/min

$V_p(t)$ = posición de la válvula, de 0 a 1 (cerrada o abierta respectivamente)

G_f = gravedad específica adimensional

ΔP_v = pérdida de presión a través de la válvula, en psi

τT = Constante de tiempo del transmisor de temperatura en min.

$C_{p1}(t)$ = capacidad calorífica del del agua caliente a presión constante, en Btu/lb-°F

$C_{p2}(t)$ = capacidad calorífica del del agua fría a presión constante, en Btu/lb-°F

$C_{v3}(t)$ = capacidad calorífica del del agua del tanque de a volumen constante. en Btu/lb-°F

$T_1(t)$ = temperatura del agua caliente, en °F

$T_2(t)$ = temperatura del agua fría, en °F

$T_3(t)$ = temperatura de la mezcla en el tanque en, °F

$T_4(t)$ = temperatura de la mezcla del tanque afectada por el retardo, en °F

CVL = coeficiente de flujo de la válvula en, gpm/psi^{1/2}

A = Área a través de la tubería en, ft²

V = volumen del líquido en, ft³

t_0 = retardo por transportación en, min

L = largo de la tubería en, ft

$m(t)$ = fracción de la salida del controlador, entre 0 y 1

ρ = densidad de la mezcla en el tanque en, lb/ft³

$TO(t)$ = Salida del transmisor de temperatura entre 0-1

Es importante conocer las variables presentes en la planta a utilizar y los valores en su punto de estado estacionario, dichos valores se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Parámetros de la Planta en su Punto Estacionario [3].

Variable	Valor	Variable	Valor
ρ	62.4lb/ft ³	m	0.478
T_3	150°F	L	125ft
T_2	50°F	A	0,2006 ft ²
T_1	250°F	τV_p	0.4min
C_{p1}	0.8Btu/lb-°F	V_p	0.478
C_{p2}	1Btu/lb-°F	CVL	12gpmpsi ^{1/2}
C_{p3}	0.9Btu/lb-°F	ΔP_v	16psi
referencia	150°F	τT	0.5min
C_{p1}	0.8BTU	V_p	0.478
W_2	191.17lb/min	TO	0.5
W_1	250lb/min	V	15 ft ³

2.2 Validación del modelo

Con los parámetros del transmisor de temperatura del tanque, se hizo la validación del modelo de primer orden con retardo para verificar si la respuesta obtenida analíticamente coincide con la respuesta dada por el tanque de mezclado simulado. Por lo que el modelo de primer orden con retardo se puede definir con la ecuación 2.7.

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{K_p * e^{-t_0 s}}{\tau s + 1} = \frac{-0.8222 * e^{-4.197s}}{2,2022s + 1} \quad (2.7)$$

Para realizar la validación se utilizó a la entrada del tanque de mezclado una referencia que inicia 0.478 (valor de estado estacionario) para en el minuto 35 alterarse en un 20%, pasando a tener una referencia con un valor de 0.574.

El resultado obtenido al comparar la respuesta del transmisor de temperatura TO del tanque de mezclado simulado con el modelo de primer orden con retardo se puede observar en la Figura 2.2.

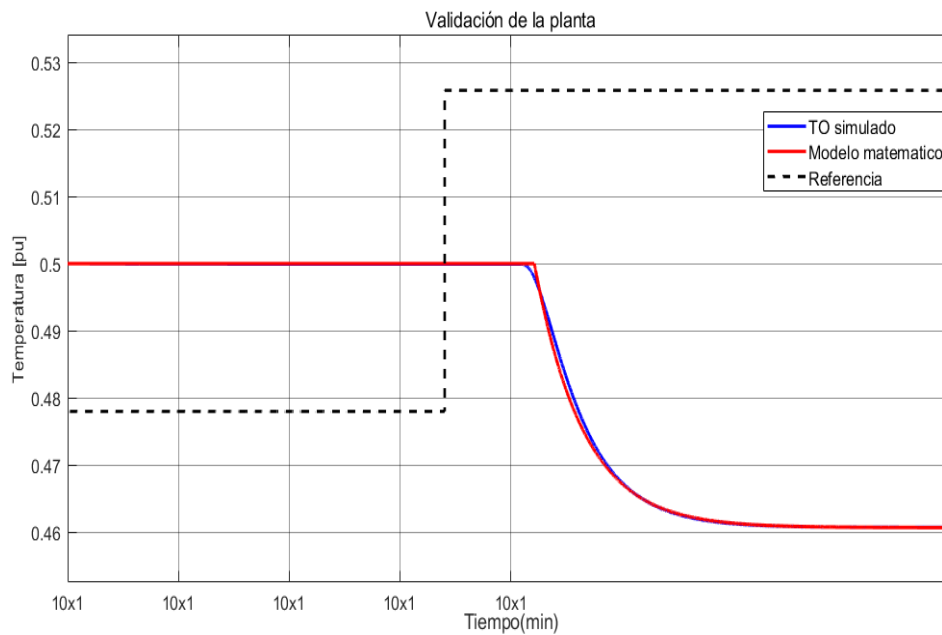


Figura 2.2. Validación TO simulado Vs modelo de primer orden con retardo

En la Figura 2.2 se observa que la respuesta del transmisor de temperatura se superpone a la respuesta del modelo de primer orden con retardo. Después de darse el paso a la entrada y al pasar el efecto del retardo, se observa que la respuesta del tanque simulado entrega la misma respuesta que la del modelo de primer orden con retardo y estas respuestas se vuelven a superponer al pasar el estado transitorio, como se puede apreciar en la figura 2.2

El resultado obtenido a partir de la Figura 2.2 que indica la validez de la simulación del tanque de mezclado para trabajar adecuadamente con ella.

2.3 Diseño de controladores en cascada

Para mejorar la respuesta lograda con el controlador PID que se observó en la Figura 1.2 del capítulo anterior, se plantea diseñar un control en cascada según el diagrama P&ID de la Figura 2.1 donde se tiene el control de flujo de agua fría en el lazo interno y el control de la temperatura de la mezcla en el tanque se encuentra en el lazo externo del controlador cascada [8].

2.3.1 Controlador PID-PID

En la Figura 2.3 se observa el esquema del controlador PID-PID simulado, aquí se puede observar al tanque de mezclado y los controladores de flujo en el lazo interno y controlador PID de temperatura en el lazo externo [9].

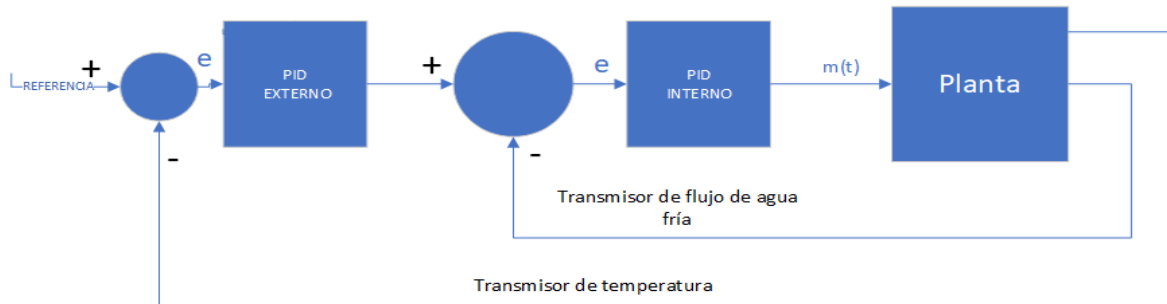


Figura 2.3 . Diagrama de bloques controlador PID-PID

Para empezar con la sintonización del controlador interno de flujo de agua fría es necesario diseñar el transmisor de flujo el cual entregará una salida en valor porcentual de los valores que tenga la variable W_2 (flujo de agua fría en lb/min). Por lo tanto, para una variación de flujo entre 100-300 lb/min, que entregará una salida entre 0 y 1 (criterio de diseño) se tiene.

$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \quad (2.8)$$

$$\frac{y-0}{1-0} = \frac{x-100}{300-100} \quad (2.9)$$

$$\frac{dTof}{dt} = \frac{1}{\tau_f} \left(\frac{F(t)-100}{200} - \frac{Tof}{dt} \right) \quad (2.10)$$

Donde:

Tof = Salida del transmisor de flujo

$F(t)$ = Flujo másico de agua fría en lb/min

τ_f = constante de tiempo del transmisor de flujo=0.15

Si el flujo másico de agua fría en estado estacionario es de 191.17lb/min y utilizando la ecuación 2.9 se tiene que el valor en estado estacionario para el transmisor de flujo másico de agua fría será de:

$$Tof = \frac{191.17-100}{200} = 0.4559 \quad (2.11)$$

2.3.1.1 PID interno

Después de haber diseñado el transmisor de flujo y al conocer su valor en estado estacionario se procede a sintonizar un controlador PID - PID en cascada, por lo que se empieza con el análisis la respuesta entregada por el transmisor de flujo a lazo abierto, para sintonizar un controlador PID y controlar el flujo de agua fría.

Por lo tanto, se analiza la respuesta del transmisor de flujo con el método de Smith con los datos obtenidos de la Figura 2.4, donde se tiene dos gráficas, la que entrega el transmisor de flujo de agua fría y el cambio de referencia que se tiene a la entrada, aquí se muestra la respuesta del transmisor de flujo cuando se tiene una entrada paso que cambia desde 0.478 a 0.5736 en el minuto 20 la respuesta y los datos obtenidos se muestran en la Figura 2.4.

Al utilizar el método de Smith para la parametrización, se debe encontrar los tiempos de la respuesta del transmisor de flujo para alcanzar el 28.3% y el 63.2%, procedimiento que se observará posteriormente.

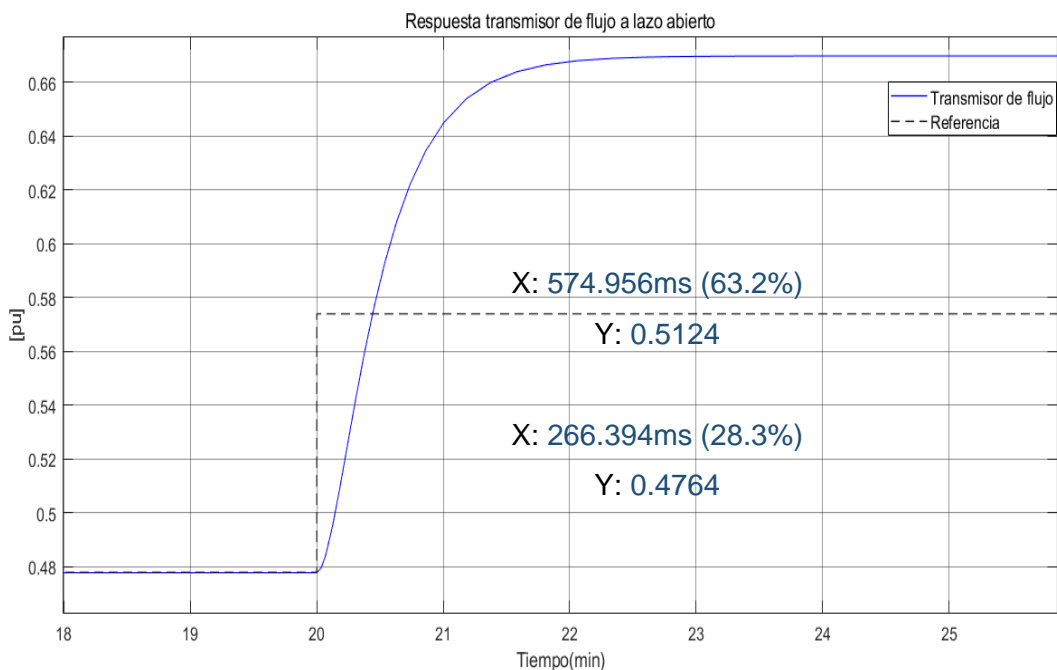


Figura 2.4. Respuesta del Transmisor de Flujo a Lazo Abierto

De la Figura 2.4 se tiene la respuesta obtenida por el transmisor de flujo, después de analizar la respuesta del tanque de mezclado a lazo abierto, al hacer una variación en la entrada $m(t)$ de 0.478 a 0.5736 y se observa que la salida del transmisor de flujo no sigue la referencia debido a que poseen diferentes valores después del estado transitorio.

De la ecuación 1.7 y 1.8 se calcula la constante de tiempo τ y el retardo t_0 con los valores

de t_1 y t_2 en el 28.3% y 63.2% de la respuesta del transmisor de flujo respectivamente, según el método de Smith [9].

$$t_{28.3\%} = 266.394 \text{ ms}$$

$$t_{63.2\%} = 574.956 \text{ ms}$$

Utilizando el método de Smith se obtuvieron los valores de tiempo en el 28.3% y 63.2% de la respuesta del transmisor de flujo a lazo abierto. A continuación, según las ecuaciones 1.7 y 1.8 se calcula la constante de tiempo τ y el retardo t_0 [9]

$$\tau = 1.5(574.956 \text{ ms} - 266.394 \text{ ms}) = 0.4628 \quad (2.12)$$

$$t_0 = 574.956 - 0.4628 = 0.112156 \quad (2.13)$$

De la ecuación 1.4 se obtiene la ganancia

$$K_p = \frac{0.5515 - 0.4559}{0.5258 - 0.478} = 2 \quad (2.14)$$

Con los parámetros encontrados se realiza la sintonización del controlador PID interno por el método de Dahlin según las expresiones de la Tabla 1.2.

$$K_p = \frac{1}{2(2)} \left(\frac{0.112156}{0.4628} \right)^{-1} = 1.031 \quad (2.15)$$

$$KI = \frac{K_p}{\tau} = \frac{1.031}{0.4628} = 2.2277 \quad (2.16)$$

$$I = \frac{KI}{K_p} = \frac{2.2277}{1.031} = 2.16 \quad (2.17)$$

$$D = \frac{t_0}{2} = \frac{0.112156}{2} = 0.056 \quad (2.18)$$

Al implementar el controlador PID en el lazo interno se obtuvo la respuesta del transmisor de flujo tal como se muestra en la Figura 2.5.

En la Figura 2.5 se tiene la respuesta obtenida del transmisor de flujo TOF al implementar el controlador PID interno. Aquí se observa como la salida del transmisor de flujo sigue adecuadamente a la referencia pasando de 0.478 a 0.5470.

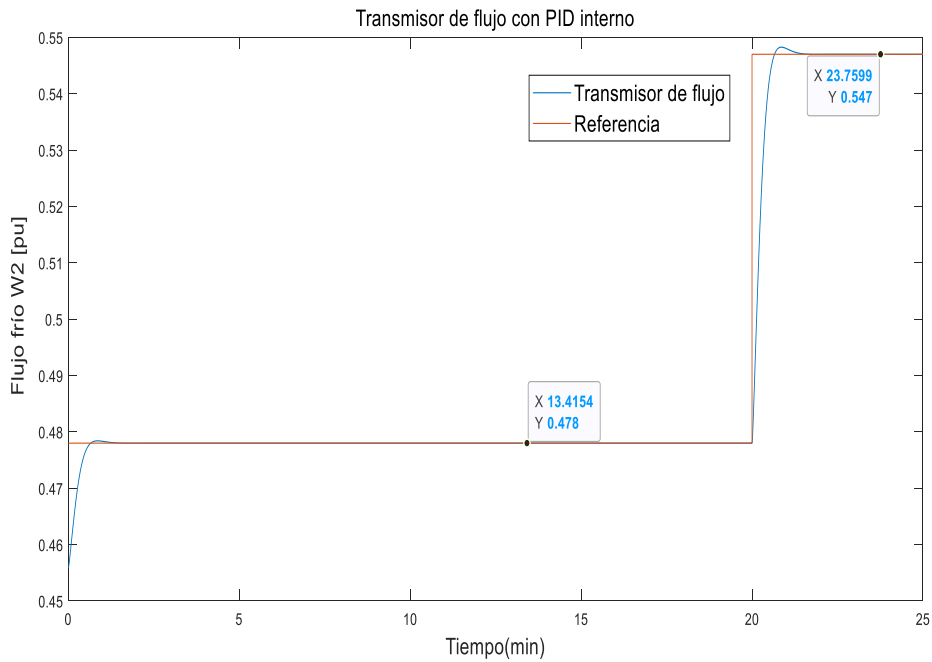


Figura 2.5. Transmisor de flujo con PID interno

2.3.1.2 PID externo

Al saber que con el Controlador PID interno la salida del transmisor de flujo TOf sigue a la referencia dada, se procede a analizar el transmisor de temperatura TO de la Figura 2.6 utilizando el método de Alfaro según los datos de la Tabla 1.1

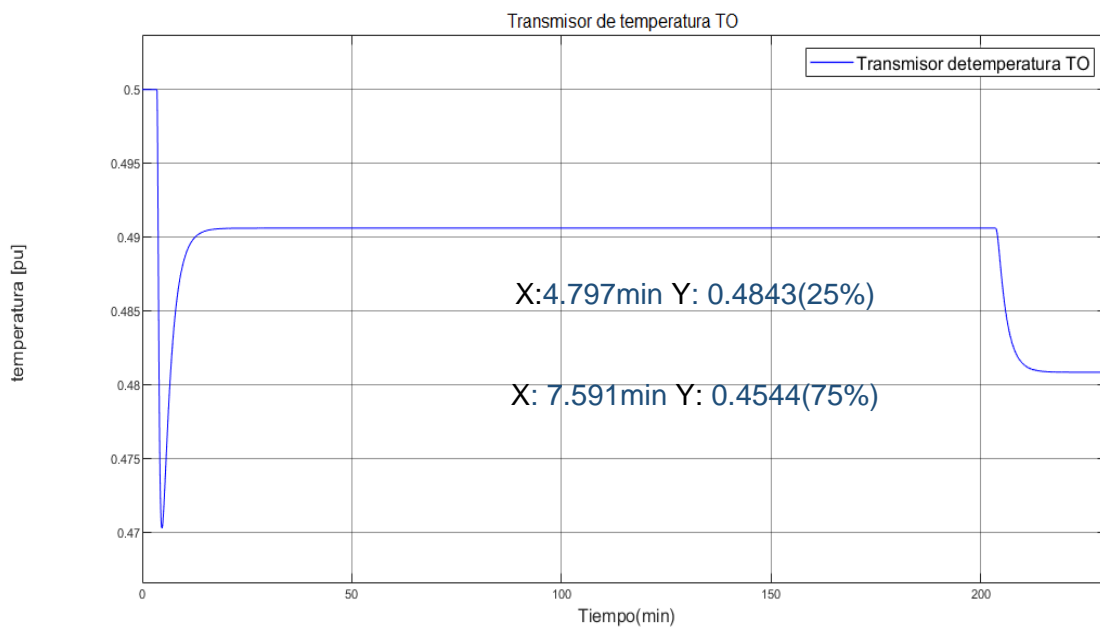


Figura 2.6. Transmisor de Temperatura con Controlador PID Interno

Analizando la Figura 2.6 se obtienen los parámetros K , τ , t_0 para diseñar un controlador

PID de temperatura según el método de Dahlin utilizando la Tabla 1.2 por lo tanto se procede a calcular los parámetros necesarios para la sintonización del controlador PID externo[10].

De la Figura 2.6 se toman los datos necesarios para sintonizar un controlador PID según el método de Dahlin. Por lo tanto, se calcula la ganancia K_p utilizando la ecuación 1.4.

$$K_p = \frac{0.4809-0.5}{0.50149-0.4559} = -0.4189 \quad (2.19)$$

$$t_1 = 4.797min \quad t_2 = 7.591min \quad (2.20)$$

Con los valores de tiempo encontrados en el momento determinado con el método de Alfaro se procede a obtener los valores de la constante de tiempo, τ y retardo t_0 utilizando la ecuación 1.2 y 1.3.

$$\tau = -0.910(4.797) + 0.910(7.591) = 2.542 \quad (2.21)$$

$$t_0 = 1.262(4.797) - 0.262(7.591) = 4.06497 \quad (2.22)$$

Una vez determinados los parámetros K, τ, t_0 al utilizar la curva de reacción a lazo abierto, se realizó la sintonización de un controlador PID de temperatura utilizando el método de Dahlin según las expresiones de la Tabla 1.2. A continuación se puede observar las ecuaciones utilizadas.

$$K_p = \frac{1}{2(-0.4189)} \left(\frac{4.06497}{2.542} \right)^{-1} = -0.746 \quad (2.23)$$

$$KI = \frac{K_p}{\tau} = \frac{-0.746}{2.542} = -0.2934 \quad (2.24)$$

$$I = \frac{KI}{K_p} = \frac{-0.2934}{-0.746} = 0.3933 \quad (2.25)$$

$$D = \frac{t_0}{2} = \frac{4.06497}{2} = 2.0324 \quad (2.26)$$

Encontradas las componentes proporcional, integral y derivativa del controlador PID externo, se puede implementar el controlador PID-PID en cascada cuyos resultados se pueden observar en el capítulo tres.

2.3.2 Controlador SMC-PI

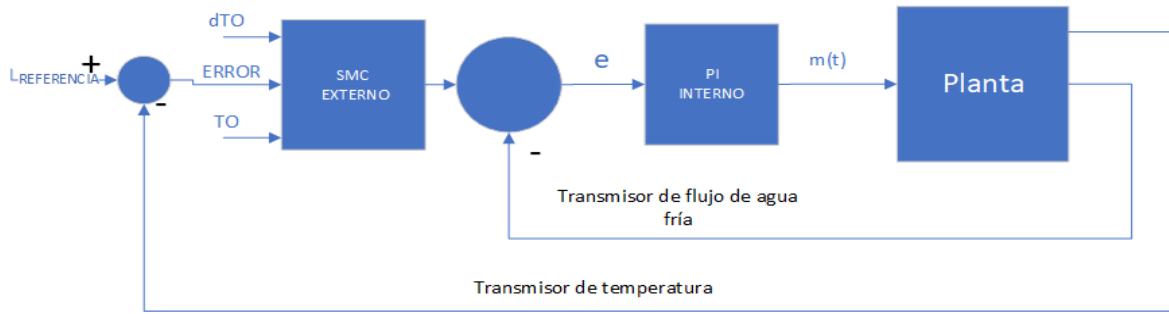


Figura 2.7. Esquema controlador SMC-PI simulado

En la Figura 2.7 se observa un diagrama de bloques de la estructura del controlador SMC-PI diseñado.

2.3.2.1. Controlador PI interno.

Para el diseño del controlador PI interno se puede utilizar los parámetros encontrados en la sintonización del controlador PID de flujo encontrados en la sección 2.3.1.1. Por lo tanto, se tiene los siguientes valores.

$$K = \frac{0.5515 - 0.4559}{0.5258 - 0.478} = 2 = \textit{ganancia} \quad (2.27)$$

$$\tau = 1.5(574.95ms - 266.394ms) = 0.4628 \quad (2.28)$$

$$t_0 = 574.956ms - 0.4628 = 0.112156 \quad (2.29)$$

$$K_p = \frac{1}{2*2} \left(\frac{t_0}{\tau}\right)^{-1} = \frac{1}{2*2} \left(\frac{0.112156}{0.4628}\right)^{-1} = 1.031 \quad (2.30)$$

$$K_I = \frac{K_p}{\tau} = \frac{1.031}{0.4628} = 2.2277 \quad (2.31)$$

$$I = \frac{K_I}{K_p} = \frac{2.2277}{1.031} = 2.16 \quad (2.32)$$

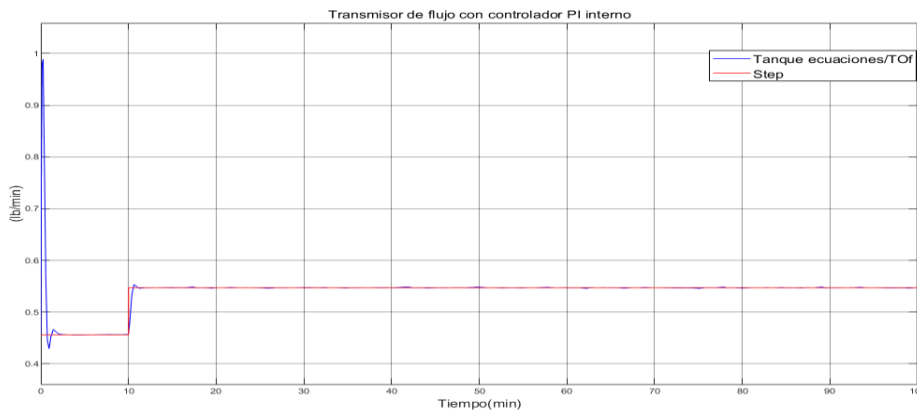


Figura 2.8. Transmisor de flujo con controlador PI interno

Después de implementar el controlador PI interno se analiza la respuesta del transmisor de flujo a de la Figura 2.8.

En la Figura 2.8 se observa la respuesta del transmisor de flujo cuando la referencia realiza un cambio desde 0.4559 a 0.5470 en el minuto 20, aquí se puede observar que con el controlador PI diseñado la salida del transmisor de flujo de agua fría sigue sin presentar mayor dificultad, por lo que al tener el control del lazo interno se procede a diseñar el controlador SMC de temperatura.

2.3.2.2. Diseño controlador SMC externo

A continuación, se debe sintonizar el controlador SMC del lazo externo, para lo que se analizó la respuesta del transmisor de temperatura (TO), al tener conectado el controlador de flujo PI diseñado (lazo-cascada-abierto).

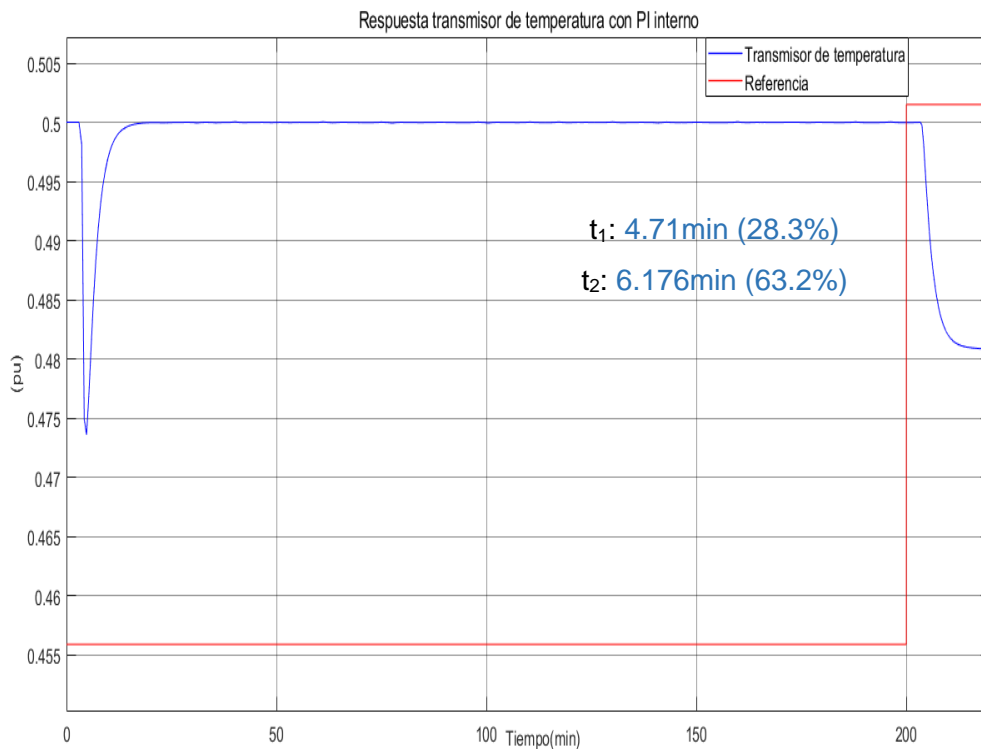


Figura 2.9. Transmisor de Temperatura con Controlador PI Interno SMC-PI

Para la obtención de los parámetros para la sintonización del controlador SMC del lazo externo de temperatura se utilizó el método de Smith, por lo que se tomó los valores en el 25% y 75% de la respuesta del transmisor de temperatura TO. Los valores encontrados se detallan en la Figura 2.9.

Con la respuesta del transmisor de temperatura de la Figura 2.9 se obtiene la ganancia y los valores de tiempo encontrados para el punto t_1 y t_2 empleando el método de Smith con los datos que se muestran en la Figura 2.9 según las ecuaciones: 1.4, 1.7, 1.8 se obtienen la ganancia, la constante de tiempo y el retardo de tiempo, los cálculos realizados para la obtención de estos parámetros se muestran a continuación:

$$K_p = \frac{0.4809-0.5}{0.5015-0.4559} = -0.4188 \quad (2.33)$$

$$t_1 = 4.71 \quad (2.34)$$

$$t_2 = 6.176 \quad (2.35)$$

$$\tau = 1.5(6.176 - 4.71) = 2.199 \quad (2.36)$$

$$t_0 = 6.176 - 2.2 = 3.977 \quad (2.37)$$

Conocido el valor de la constante de tiempo τ del lazo externo del controlador SMC-PI es posible determinar el tiempo de establecimiento t_s , en el lazo externo de control de temperatura, como se muestra a continuación.

$$t_s = 4 * \tau = 4 * 2.199 = 8.796 \text{min} \quad (2.38)$$

Obtenidos los parámetros que definen a un modelo de primer orden con retardo se puede sintonizar el controlador SMC con las ecuaciones (1.29), (1.30), (1.31), (1.32) por lo que los valores encontrados para diseñar el controlador SMC del lazo externo, al tener el controlador PI interno (lazo en cascada abierto) se muestra a continuación:

$$K_D = \frac{0.51}{|K|} \left(\frac{\tau}{t_0}\right)^{0.76} = \frac{0.51}{|-0.4188|} \left(\frac{2.199}{3.977}\right)^{0.76} = 0.77662 \quad (2.39)$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{\tau+t_0}{\tau*\tau_0}\right) = \left(\frac{2.199+3.977}{2.199*3.977}\right) = 0.7061 \quad (2.40)$$

A continuación, se determina:

$$\lambda_0 = \frac{1}{4} \left(\frac{\tau+t_0}{\tau*\tau_0}\right)^2 = \frac{1}{4} \left(\frac{2.199+3.977}{2.199*3.977}\right)^2 = 0.12467 \quad (2.41)$$

Finalmente se debe encontrar el parámetro:

$$\delta = 0.68 + 0.12|K|(K_D\lambda_1) = 0.68 + 0.12|-0.4188|(0.77662 * 0.7061) = 0.7075 \quad (2.42)$$

Calculados los parámetros que permiten definir el controlador SMC de temperatura del controlador SMC-PI. Se puede desarrollar el controlador SMC-PI en cascada.

El resultado obtenido y las pruebas a las que se sometió se puede observar en el siguiente capítulo.

A continuación, en la siguiente sección se podrá observar el procedimiento que se realizó para realizar el diseño controlador SMC-SMC en cascada, primero se observará el procedimiento realizado para sintonizar el controlador SMC que controla el flujo de agua fría, para después proceder a diseñar el controlador SMC que controla la temperatura de la mezcla del tanque.

2.3.3 Controlador SMC-SMC

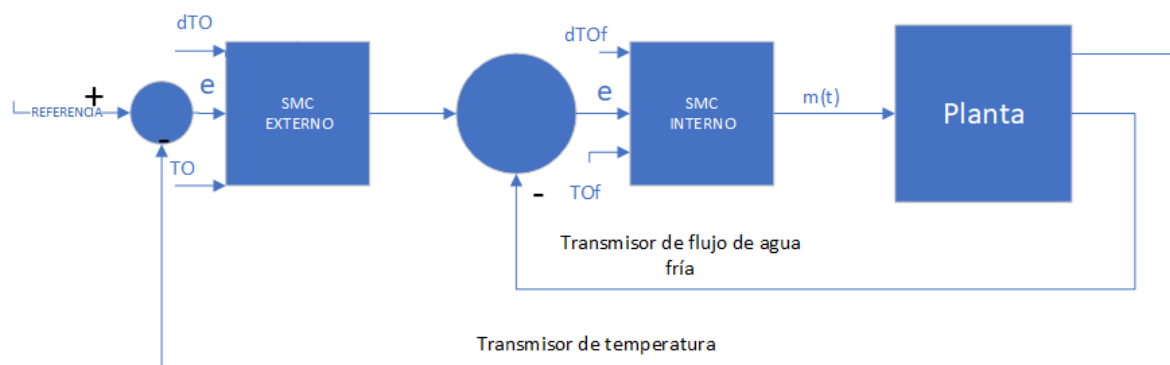


Figura 2.10. Esquema del controlador SMC-SMC simulado

En la Figura 2.11 se observa la representación en bloques del controlador SMC-SMC simulado, en este se observa los elementos que lo conforman y las conexiones realizadas. Para iniciar con el diseño del controlador SMC-SMC se inicia analizando la curva de reacción dada por el transmisor de flujo como se observar a continuación, en la sección 2.3.3.1

2.3.3.1 Diseño Controlador SMC Interno

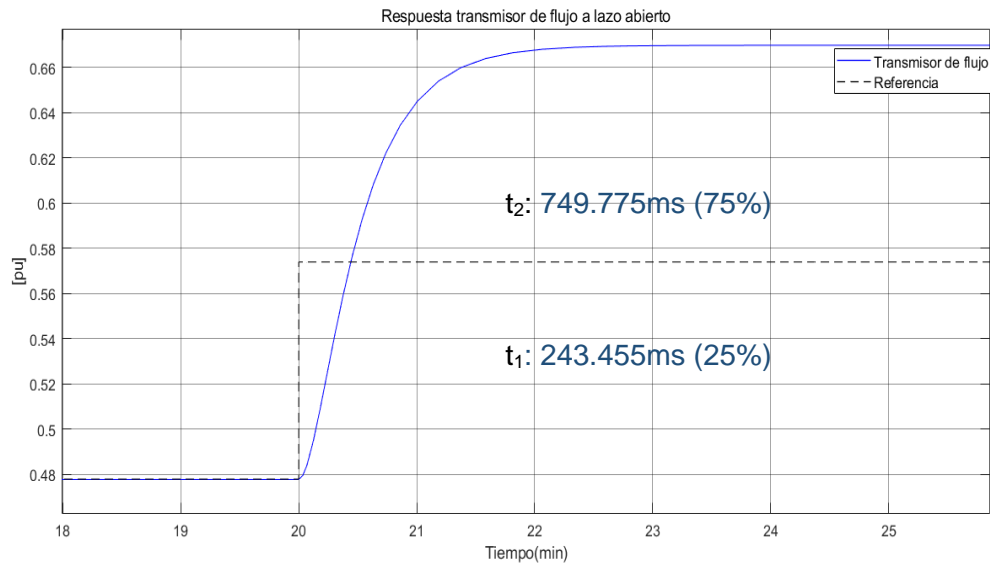


Figura 2.11. Respuesta del transmisor de flujo a lazo abierto

Para empezar con el diseño del controlador SMC-SMC en cascada, se comienza con la obtención de los parámetros analizando la respuesta del transmisor de flujo en el lazo interno, según la respuesta del transmisor de flujo obtenida en la Figura 2.11, donde se observan los valores encontrados con el uso del método de Alfaro.

Como se observa en la Figura 2.11 se encontró los valores de tiempo para el 25% y 75% de la respuesta entregada por el transmisor de flujo. Se calculó los siguientes valores para la ganancia , la constante de tiempo y el retardo utilizando las ecuaciones 1.4, 1.2 y 1.3, respectivamente, como se observa a continuación.

$$K_p = \frac{9.537e^{-2}}{0.5258 - 0.478} = 1.995 \approx 2 \quad (2.43)$$

$$\tau = -0.910(243.455\text{ms}) + 0.910(749.775\text{ms}) = 0.46075 \quad (2.44)$$

$$t_0 = 1.262(243.455\text{ms}) - 0.262(749.775\text{ms}) = 0.1107 \quad (2.45)$$

Encontrados los parámetros que se necesitan para diseñar el controlador SMC se utilizan las ecuaciones: (1.29), (1.30), (2.31), (1,32) por lo tanto los parámetros encontrados para el controlador SMC de flujo son:

$$K_D = \frac{0.51}{|K_p|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} = \frac{0.51}{2} \left(\frac{0.46075}{0.1107} \right)^{0.76} = 0.7537 \quad (2.46)$$

$$\lambda_1 = \left(\frac{\tau+t_0}{\tau t_0} \right) = \left(\frac{0.4607+0.1107}{0.4607*0.1107} \right) = 11.20 \quad (2.47)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12|K|(K_D \lambda_1) = 0.68 + 0.12|2|(0.7537 * 11.20) = 2.7056 \quad (2.48)$$

$$\delta = 2.7056 \quad (2.49)$$

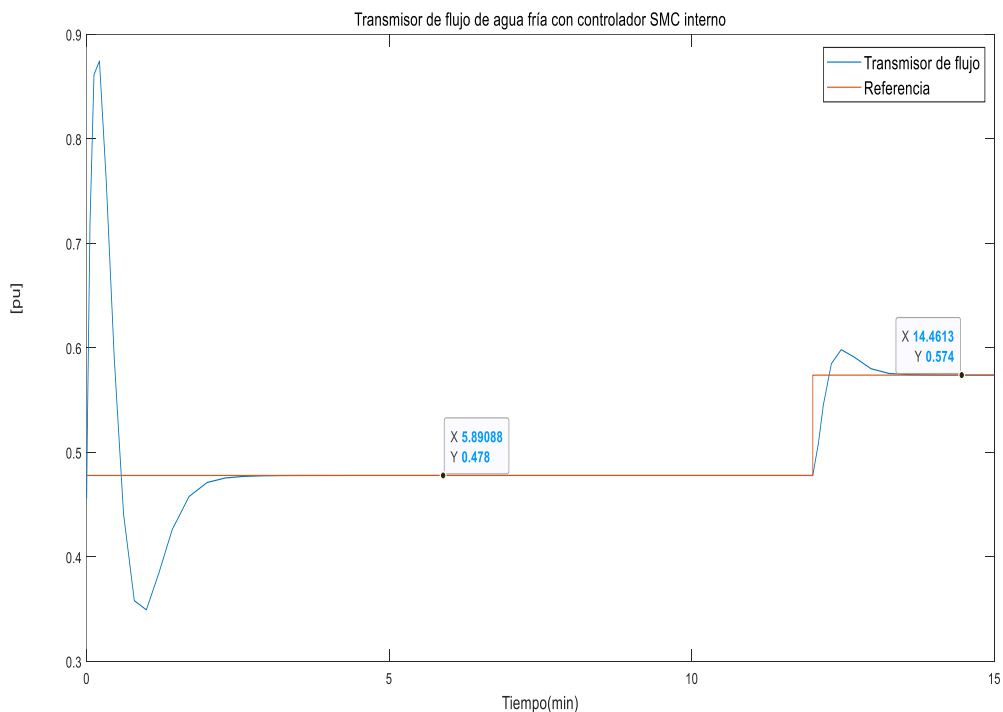


Figura 2.12. Transmisor de flujo con controlador SMC Interno

Encontrados los parámetros necesarios para implementar el controlador SMC de flujo se procede a simular y verificar el resultado obtenido en el transmisor de flujo, el mismo que se puede observar en la Figura 2.12.

Una vez sintonizado los parámetros del controlador SMC de flujo se obtuvo la respuesta de la Figura 2.12, que es la respuesta del transmisor de flujo ante una variación del 20 % del estado estacionario de la entrada del lazo interno pasando de 0.4559 a 0.5470 como se aprecia en la Figura.

En la Figura 2.12 se observa que después de simular la planta con el controlador SMC interno. El transmisor de flujo sigue de manera correcta a la referencia, debido a que cambia de 0.4559 a 0.5470 como los valores en (pu) que tiene la referencia a la entrada. Motivo por el que se procede a realizar la sintonización del SMC de temperatura según las ecuaciones (1.29), (1.30), (1.31), (1.32), por lo tanto. Utilizando el método de Alfaro se obtuvieron los siguientes valores de un $t_1 = 4,322$, y un $t_2 = 6,705$ como se observa en la Figura 2.13.

Utilizando el método de Alfaro según la Tabla 1.1 y con las ecuaciones (1.2) y (1.3) se analiza la respuesta del transmisor de temperatura con el controlador SMC interno conectado(lazo en cascada abierto), de donde se obtiene los datos para el 25 % y 75% de la respuesta del transmisor de temperatura que se observa en la Figura 2.13.

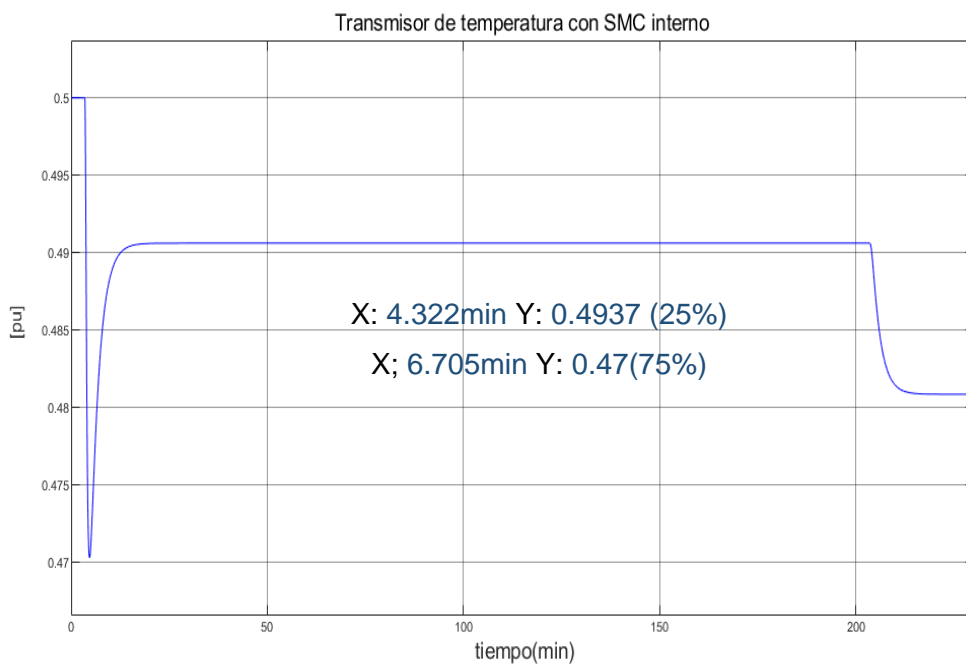


Figura 2.13. Transmisor de Temperatura TO con Control SMC Interno

En la Figura 2.13 se aprecia a la respuesta obtenida del transmisor de temperatura TO del tanque cuando se tiene el controlador SMC interno conectado (lazo en cascada abierto).

De esta respuesta se obtiene el tiempo en el 25% 75% de la respuesta del transmisor de temperatura del cual se obtuvo un tiempo $t_{25\%}$ de 4.322 min y un

tiempo $t_{75\%}$ de 6.705min. con estos dos valores de tiempo se puede obtener los demás parámetros necesarios para la sintonización del controlador SMC de temperatura como se explicará en la siguiente sección.

2.3.3.2 Controlador SMC Externo

A partir del análisis de la respuesta del transmisor de temperatura teniendo, con el controlador SMC interno conectado (lazo en cascada abierto) se obtienen los parámetros utilizando el método de Alfaro según los datos de la Tabla 1.1. La ganancia se obtiene con el uso de la ecuación 1.4 como se observa a continuación.

$$K_p = \frac{1.912 \times 10^{-2}}{0.50149 - 0.4559} = -0.4193 \quad (2.50)$$

En la Figura 2.13 se observó en la respuesta del transmisor de temperatura obtenida al tener el controlador SMC de flujo conectado (lazo en cascada abierto), se encontraron los valores de tiempo en el 25% y 75% del resultado dado por el transmisor de temperatura como se tiene en la Figura 2.13. Para determinar la constante de tiempo τ y el retardo t_0 según el método de Alfaro se usó las ecuaciones 1.2 y 1.3, como se puede observar a continuación.

$$\tau = -0.910(4.322) + 0.910(6.705) = 2.168 \quad (2.51)$$

$$t_0 = 1.262(4.322) - 0.262(6.705) = 3.697 \quad (2.52)$$

Al conocer la constante de tiempo τ del lazo externo de temperatura, se puede determinar el tiempo de establecimiento t_s , del controlador SMC-SMC, por lo tanto, se realiza el cálculo mostrado a continuación:

$$t_s = 4 * \tau = 4 * 2.168 = 8.672min \quad (2.53)$$

Del tiempo de establecimiento t_s encontrado con el controlador SMC-SMC, se puede apreciar que este es inferior al 8.79 min del tiempo de establecimiento t_s encontrado con el controlador SMC-PI, resultado que indica que existe una ligera ventaja de rapidez del controlador SMC-SMC por sobre el controlador SMC-PI.

Esto permitirá que el controlador SMC-SMC alcance la referencia antes que el controlador SMC-PI.

Para sintonizar el controlador SMC-SMC en cascada se debe determinar los parámetros: $\lambda_1, \lambda_0, K_D, \delta$ que definen a un controlador por modo deslizantes SMC, según las ecuaciones (1.29), (1.30), (1.31), (1.32).

Para ello se utiliza los parámetros que definen a un modelo de primer orden con retardo que fueron obtenidos partir de la respuesta del transmisor de temperatura TO cuando se tenía el controlador SMC interno conectado. Los cálculos realizados se pueden observar a continuación.

$$\lambda_1 = \left(\frac{t_0 + \tau}{t_0 * \tau} \right) = \frac{3.697 + 2.168}{2.168 * 3.697} = 0.7317 \quad (2.54)$$

$$\lambda_0 = \frac{1}{4} * \left(\frac{t_0 + \tau}{t_0 * \tau} \right)^2 = \frac{1}{4} * \left(\frac{2.168 + 3.697}{3.697 * 2.168} \right)^2 = 0.1338 \quad (2.55)$$

$$K_D = \frac{0.51}{|K|} \left(\frac{\tau}{t_0} \right)^{0.76} = \frac{0.51}{|-0.4193|} \left(\frac{2.168}{3.697} \right)^{0.76} = 0.8107 \quad (2.56)$$

$$\delta = 0.68 + 0.12|K|(K_D \lambda_1) = 0.68 + 0.12|-0.4193|(0.8107 * 0.7317) = 0.7098 \quad (2.57)$$

Encontrados los parámetros que permiten definir el controlador (SMC) maestro para controlar la temperatura en el tanque de mezclado; se procede a ingresar los valores encontrados al controlador SMC del lazo externo simulado y se procede acerrar los lazos del controlador en SMC-SMC en cascada para verificar los resultados que entrega este controlador, realizar las pruebas respectivas y obtener los índices de desempeño ISE para las pruebas propuestas.

Los resultados obtenidos con el controlador SMC-SMC en cascada al tener las perturbaciones de agua caliente y agua de agua fría (simultánea e individualmente), se pueden observar más a detalle en el capítulo de resultados conclusiones y recomendaciones.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

En esta sección se pueden observar los resultados obtenidos por los controladores en cascada diseñados: PID-PID, SMC-PI, SMC-SMC, como también las respuestas obtenidas por la salida de control $m(t)$.

Los controladores son sometidos a pruebas de seguimiento y perturbaciones. Respecto a las pruebas de perturbaciones, estas son realizadas con la variación de flujos máxicos de agua fría y caliente en diferentes instantes de tiempo.

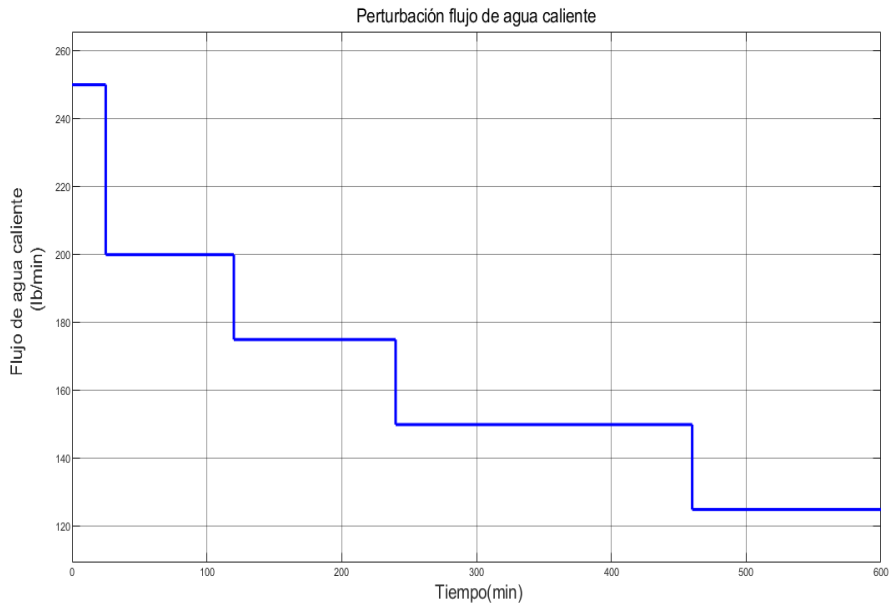


Figura 3.1. Perturbación de agua caliente

En la Figura 3.1 se aprecia a la perturbación de agua caliente, que es la variación del flujo de ingreso de agua caliente en el tanque de mezclado. Este flujo inicia en 250lb/min, posteriormente cambia a 200, 175, 150 y 125 lb/min.

En la Figura 3.2 se aprecia a la perturbación de agua fría implementada, que es la variación el flujo de agua fría que ingresa en el tanque de mezclado, variación que ha sido sumada a la salida W_2 . esta variación inicia en un valor de 0lb/min, en el minuto mil se suma un valor de 10lb/min, en el minuto mil doscientos (1200), este valor incrementa a 20lb/min, posteriormente en el minuto mil doscientos ochenta (1280) se suma un valor de 30lb/min, en el minuto mil trescientos (1300) el valor sumado asciende a 40lb/min, para finalmente sumar 30lb/min en el minuto 1350.

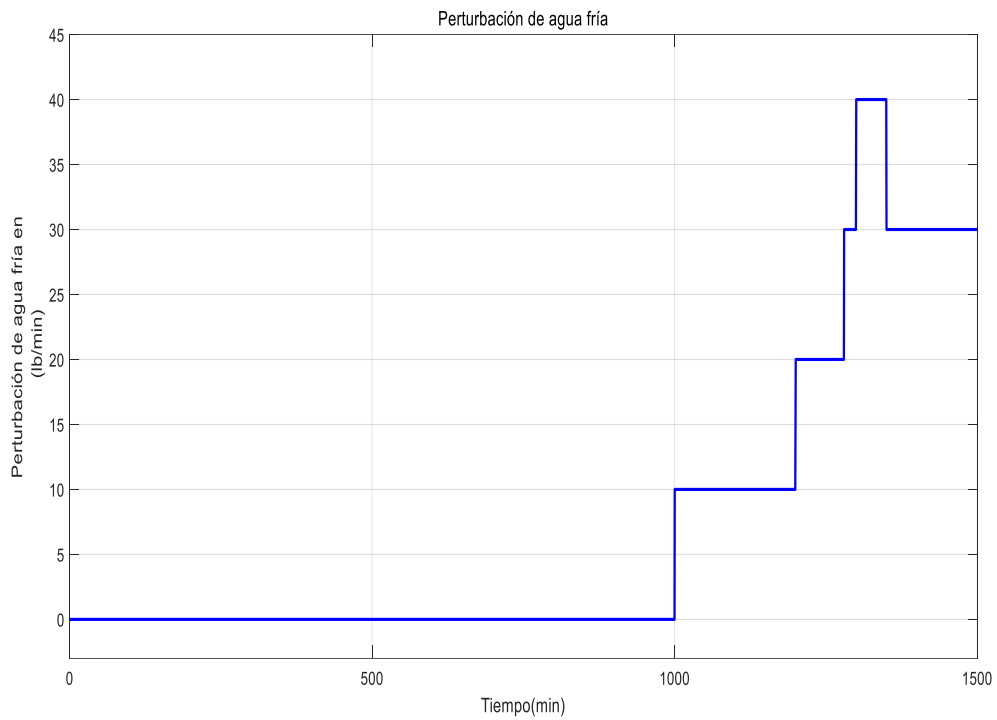


Figura 3.2. Perturbación de agua fría

3.1.1 Controlador PID-PID

En la Figura 3.3 se observa un esquema del controlador PID-PID simulado, aquí se puede apreciar al controlador PID maestro en el lazo externo de control, el mismo que se encarga de controlar la temperatura en el tanque de mezclado. Como también se observa al controlador PID esclavo del lazo de control interno, el mismo que controla el flujo de agua fría en el tanque de mezclado.

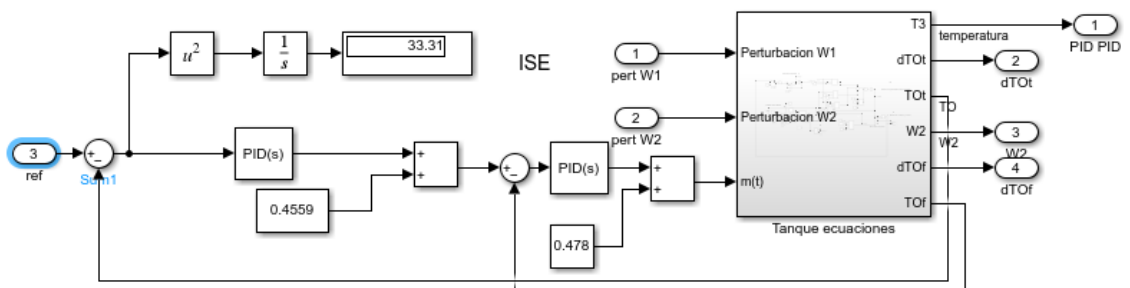


Figura 3.3. Controlador PID-PID simulado

Encontradas las constantes proporcional, integral y derivativa del controlador PID del lazo externo del controlador PID-PID cascada, se lo conecta al PID del lazo interno y se realizaron las pruebas mostradas a continuación.

3.1.1.1 Prueba de seguimiento

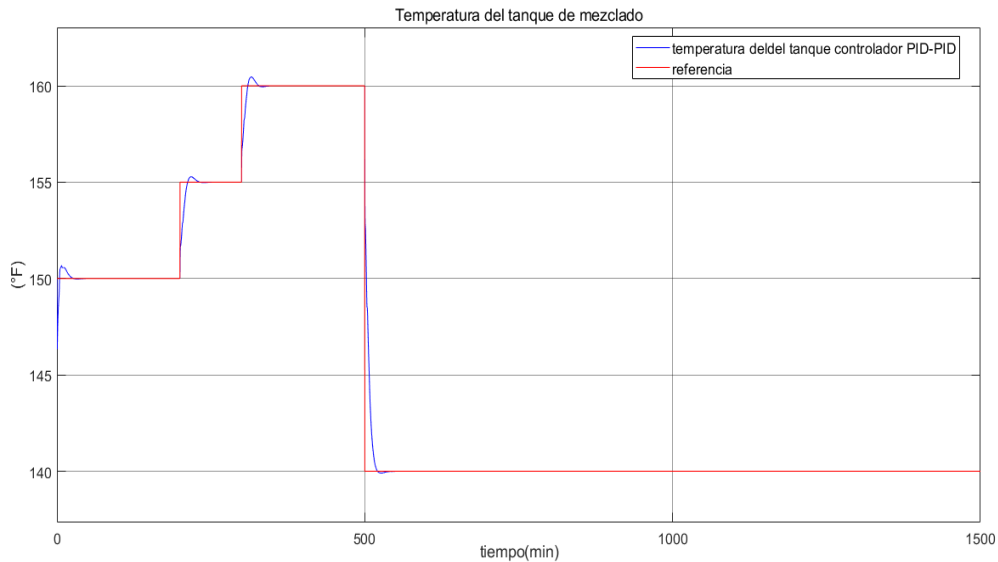


Figura 3.4. Temperatura del tanque con cambios de referencia

En la Figura 3.4 se observa la prueba de seguimiento realizada al controlador PID-PID, la misma que se realizó con los valores de estado estacionario para el flujo de agua caliente y de agua fría, 250lb/min y 191.17lb/min respectivamente.

Esta prueba empieza con una referencia de 150°F, para posteriormente cambiar a 155°F, 160°F y 140°F.

Aquí inicialmente se observa que la presencia de retardo en el proceso produce un pequeño sobreimpulso en la temperatura del tanque, después se establece en 150°F gracias a la acción de control.

Al incrementar la referencia a los valores mencionados se aprecia que la temperatura sigue a la referencia y se establece después del sobreimpulso que se produce debido al cambio de la temperatura de referencia.

Lo que determina que el controlador PID-PID es capaz de seguir a la referencia en las condiciones de trabajo mencionadas.

3.1.1.2 Prueba con perturbaciones de agua caliente

En la Figura 3.5(a) se aprecia la perturbación de agua caliente mientras que en la Figura 3.5(b) se observa a la perturbación de agua fría en su valor de estado estacionario de 191.17lb/min; en la Figura 3.5(c) se muestra el resultado de la temperatura del tanque obtenida con el controlador PID-PID con su valor de referencia (150°F). En la Figura 3.5(c) se aprecia que con el controlador PID-PID la temperatura del tanque se mantiene sobre los 150°F, alterándose en con cada perturbación de agua caliente, pero la acción de control permite que la temperatura se restablezca en los 150°F, este comportamiento es repetitivo hasta la cuarta perturbación caliente, aquí la temperatura del tanque pasa a ser críticamente estable momentáneamente hasta el minuto mil, donde se observa que se pierde el control.

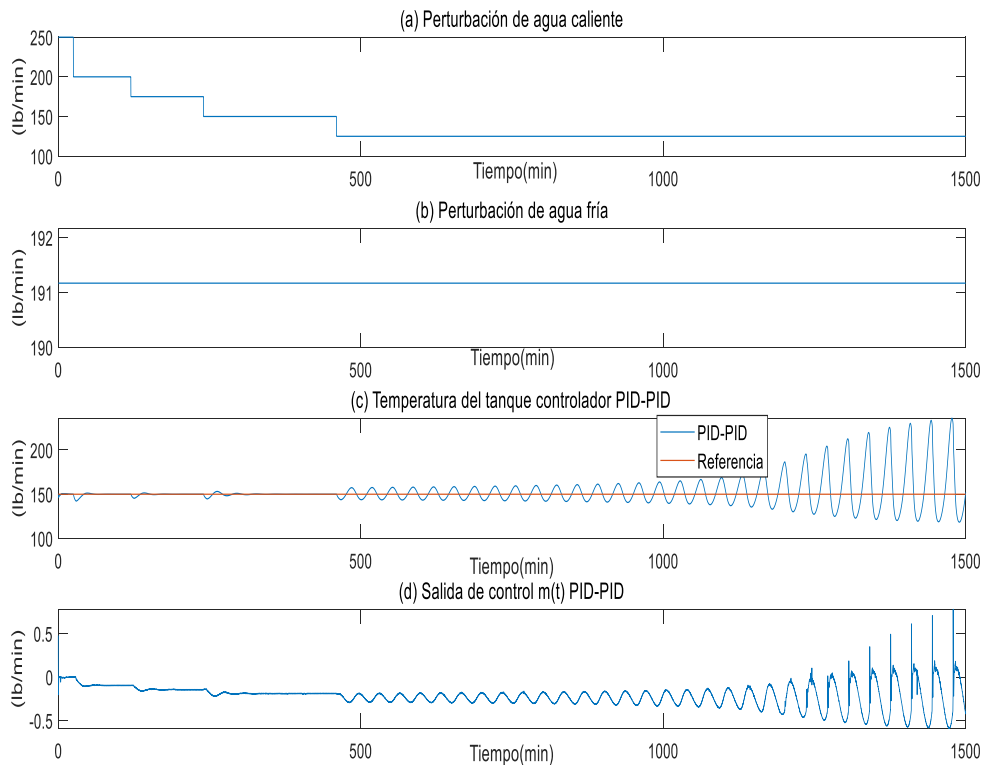


Figura 3.5. Temperatura del tanque, prueba con perturbación de agua caliente

En la Figura 3.5(d) se aprecia la salida de control $m(t)$ conseguida del controlador PID-PID, se puede observar que esta figura tiene un comportamiento muy similar al de la figura 3.5c. Se puede apreciar que la salida $m(t)$ decae a valores cercanos a cero, para establecerse en los valores de $m(t)$ que le permitan alcanzar la temperatura de 150°F. Se

puede notar en esta gráfica que conforme el flujo másico de agua caliente disminuye, la salida $m(t)$ tiende a hacerse más negativa. Es a partir de la cuarta perturbación de agua caliente donde la salida de control $m(t)$ es críticamente estable momentáneamente hasta el minuto mil, donde se aprecia que el controlador PID-PID pierde el control.

3.1.1.3 Prueba con perturbaciones de agua fría.

En esta sección se analizará la respuesta de temperatura del tanque conseguida con el controlador PID-PID, cuando tiene las perturbaciones de agua fría W_2 con la entrada del flujo de agua caliente W_1 en su valor de estado estacionario, es decir un flujo másico de 250lb/min. La referencia de temperatura utilizada para esta prueba fue de 150°F.

La finalidad de esta prueba es conocer el grado de impacto de las perturbaciones de agua fría sobre la temperatura del tanque de mezclado cuando se utiliza el controlador PID-PID en cascada, para poder comparar con los resultados de los demás controladores.

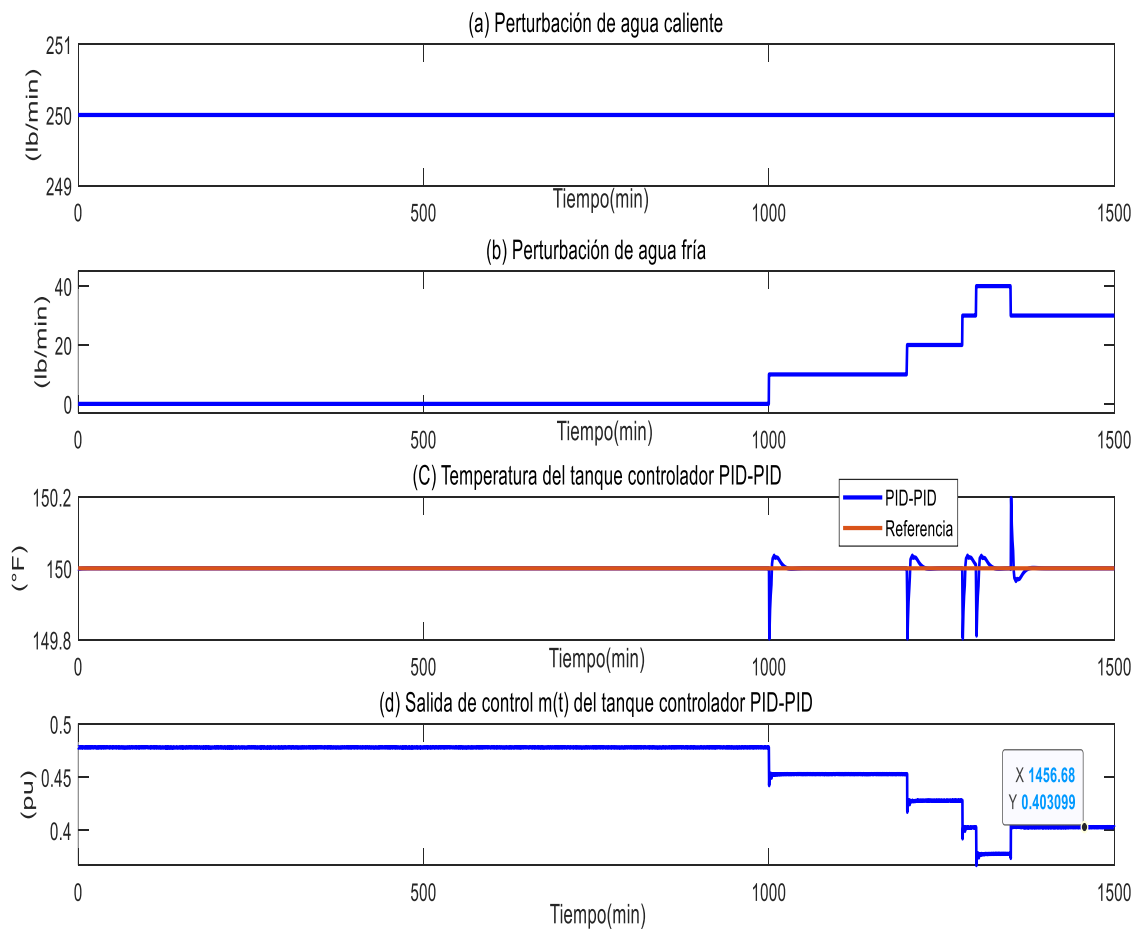


Figura 3.6. Temperatura del tanque con perturbaciones de agua fría

Los resultados encontrados de esta prueba se pueden observar a continuación en la Figura 3.6. En la Figura 3.6(a) se observa a la perturbación de agua caliente en su valor de estado estacionario de 250lb/min; en la Figura 3.6(b) se aprecia a las perturbaciones de agua fría; en la Figura 3.6(c) se encuentra la temperatura del tanque conseguida con el controlador PID-PID al tener solamente las perturbaciones de agua fría, se observa que el controlador PID-PID permite mantener la temperatura de estado estacionario de 150°F hasta el minuto mil.

Con la llegada de las perturbaciones de agua fría se producen cuatro sobre picos de -0.2°F y un sobre pico de 0.2°F. Perturbaciones que no impiden que la temperatura se pueda restablecer sobre los 150°F, una vez que ha pasado su efecto sobre el tanque.

En la Figura 3.6(d) se observa la salida de control $m(t)$ del controlador PID-PID, cuando se tiene únicamente las perturbaciones de agua fría; aquí se observa que la salida de control se mantiene en su valor de estado estacionario de 0.478 hasta el minuto mil donde aparecen las perturbaciones de agua fría, estas producen que la salida de control $m(t)$ disminuya hacia otro valor que le permita tener bajo control a la temperatura del tanque, hasta terminar finalmente estableciéndose en un valor de 0.4030.

3.1.1.4 Prueba con perturbaciones de agua fría y caliente.

En la Figura 3.2(a) se observan las perturbaciones de agua caliente; en la Figura 3.1(b) se tiene las perturbaciones de agua fría; en la Figura 3.1(c) se aprecia la respuesta de temperatura del tanque que se obtuvo con el controlador PID-PID; en la Figura 3.2(d) se obtiene a la salida de control $m(t)$ entregada por el controlador PID-PID. De la Figura 3.2(c) se observa que con el controlador PID-PID la temperatura del tanque puede establecerse sobre los 150°F, a pesar de ser alterada con cada perturbación de agua caliente, comportamiento repetitivo hasta la cuarta perturbación de agua caliente donde la temperatura pasa a ser críticamente estable hasta el minuto mil. En este punto, se aprecia que se pierde el control de la temperatura del tanque de mezclado. En la Figura 3.2(d) se observa a la salida de control $m(t)$ la cual presenta un comportamiento similar al entregado por la temperatura del tanque de mezclado, donde $m(t)$ se establece sobre valores cercanos a 0.478 que le permiten alcanzar los 150°F, comportamiento que se repite hasta la cuarta perturbación de agua caliente, aquí la salida se hace críticamente estable, pero a partir el minuto mil se pierde el control, como se puede observar.

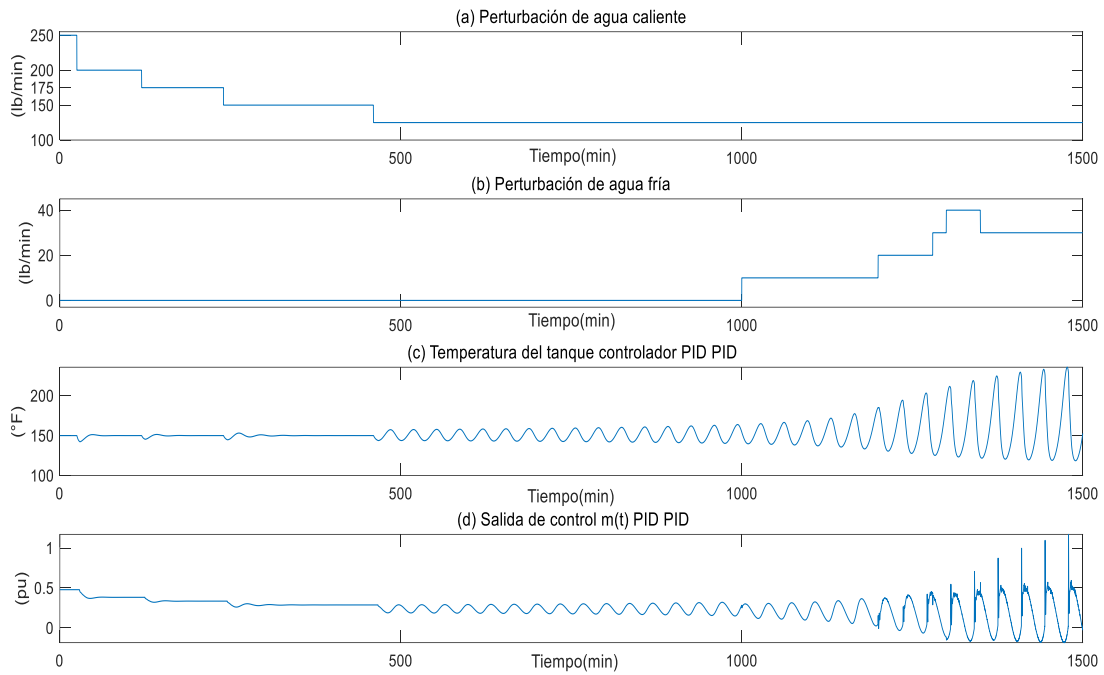


Figura 3.7. Temperatura del tanque con perturbación de agua fría y calientes

3.1.2 Controlador SMC-PI

En la figura 3.8 se puede apreciar el esquema del controlador SMC-PI simulado, aquí se aprecia a la planta del tanque de mezclado con el controlador SMC maestro y el controlador PI esclavo con los lazos de control, como también se puede apreciar la conexión en el error del controlador maestro para obtener el índice ISE.

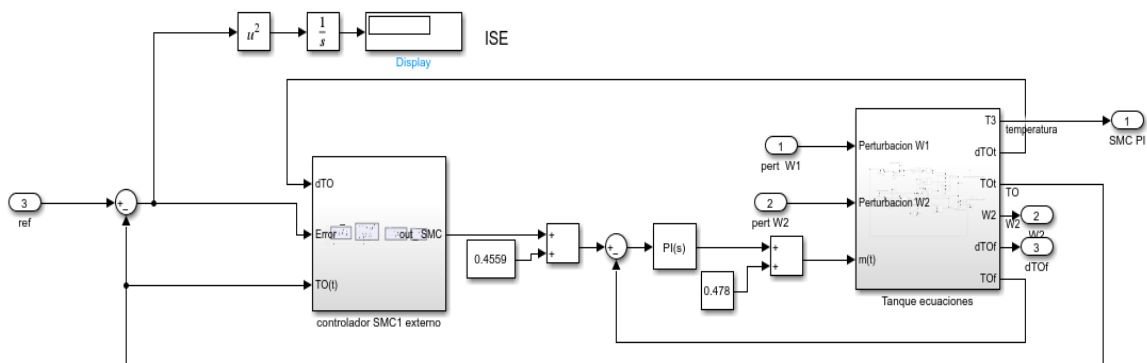


Figura 3.8. Controlador SMC-PI en cascada implementado

Con la finalidad de disminuir los efectos que produce el retardo de tiempo en la acción de control, se observa que a la salida de cada controlador se sumó el valor de estado estacionario a la salida de cada controlador. Así se mitiga el descenso que producen a la salida de control, las perturbaciones de agua caliente y de agua fría.

A continuación, se presenta la prueba de seguimiento realizada al controlador SMC-PI, con la finalidad de observar el comportamiento que este presenta ante el aumento y disminución de la referencia de temperatura, como también visualizar los efectos que produce el retardo de tiempo sobre este controlador.

3.1.2.1 Prueba de seguimiento.

En la prueba de seguimiento se analizará la respuesta del controlador SMC-PI para alcanzar la referencia, partiendo desde 150°F hacia 155°F, 160°F, y 140°F.

Prueba realizada con los valores de estado estacionario para la entrada de agua caliente W_1 (250lb/min) y la entrada de flujo de agua fría W_2 se coloca a las perturbaciones de agua fría.

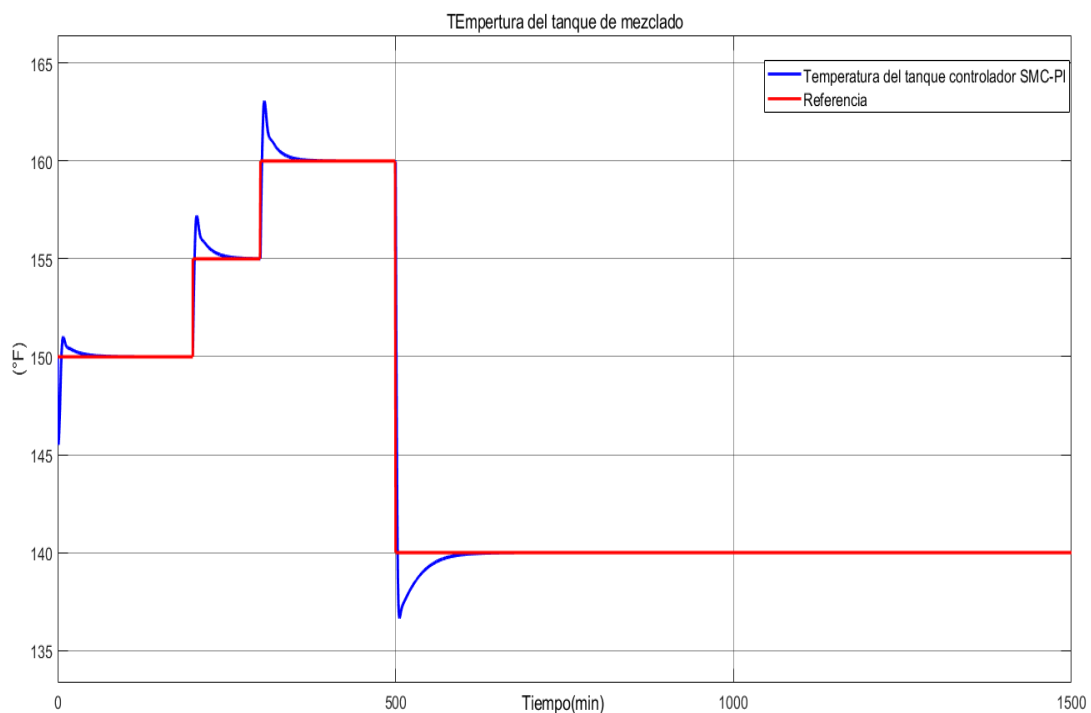


Figura 3.9. Temperatura del tanque con cambios de referencia

En la Figura 3.9 se muestra la respuesta del controlador SMC-PI en la prueba de seguimiento en donde claramente se puede observar que por el efecto del retardo del tiempo inicialmente la temperatura disminuye, pero la acción de control permite que esta se establezca sobre los 150°F después del sobre impulso que se genera por la acción de control provocada por el SMC-PI. De la misma manera ocurre al momento de cambiar la referencia a 155, 160 y 140°F.

El controlador SMC-PI sigue a la referencia sin dificultad, con la desventaja que presenta un tiempo de establecimiento considerable y un sobre impulso de casi 3°F.

El tener un gran tiempo de establecimiento es una característica que podría ser una desventaja si un proceso requiere más velocidad por parte de la respuesta de control.

También se puede observar que cuando se cambia la referencia a 140°F, la respuesta de temperatura alcanzada con el controlador SMC-PI presenta un sobre impulso de ganancia negativa. Característica que sumada al tiempo de establecimiento considerable que este controlador posee, hacen que sea aproximadamente 0.2min más lento que el controlador SMC-SMC según el tiempo de establecimiento calculado para estos controladores.

3.1.2.2 Prueba con perturbación de agua caliente.

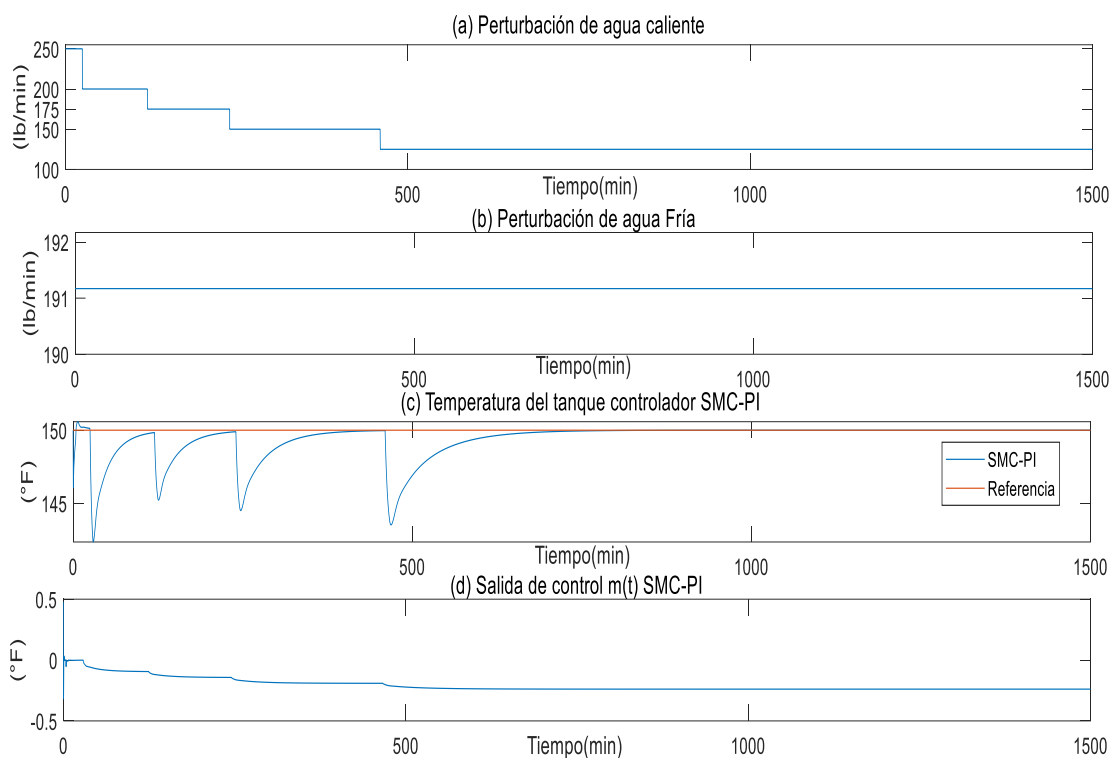


Figura 3.10. Temperatura del tanque perturbación de agua caliente

En la Figura 3.10(a) se tiene la perturbación de agua caliente; en la Figura 3.10(b) se observa la perturbación de agua fría; y en la Figura 3.10(c) se presenta la temperatura del tanque conseguida con el controlador SMC-PI, al tener solo las perturbaciones de agua caliente; en la Figura 3.10(d) se observa la salida de control $m(t)$ obtenida por el controlador SMC-PI.

En la Figura 3.10(c) también se aprecia que las perturbaciones de agua caliente disminuyen la temperatura del tanque en aproximadamente 6°F, pero la acción de control permite que el controlador SMC-PI alcance los 149.8°F, antes que la temperatura disminuya a causa de la segunda perturbación de agua caliente, después vuelve a obtener una temperatura de 149.8°F antes de que la tercera perturbación de agua caliente produzca un descenso de temperatura.

Es después de esta perturbación, que el controlador SMC-PI tiene el tiempo de establecimiento necesario para llegar a los 150°F. Después de darse la cuarta perturbación de agua caliente, se observa que el controlador SMC-PI no pierde el control de la temperatura como la respuesta entregada por el controlador PID en feedback, mostrada en el capítulo uno, ni tampoco se observa una respuesta críticamente estable como la respuesta que entregó el controlador PID-PID.

En la figura 3.10(d) se observa la salida de control $m(t)$ del controlador SMC-PI obtenida cuando se tienen las perturbaciones de agua caliente y en el flujo de entrada de agua fría se tiene su valor de estado estacionario (191.17lb/min).

Se puede observar que la salida de control inicialmente decae por efecto del retardo del proceso hacia valores cercanos a cero. Se puede apreciar que con cada perturbación de agua caliente la salida de control $m(t)$ del controlador SMC-PI tiende a decrecer, para establecerse en un valor de $m(t)$ que le permita llegar a referencia de 150°F.

3.1.2.3 Prueba con perturbación de agua fría

A continuación, se realiza la prueba con perturbaciones de agua fría. Para realizar esta prueba se definió el flujo de agua caliente en su valor de estado estacionario de 250lb/min como un valor constante y se incluyeron las perturbaciones de agua fría.

La finalidad de esta prueba es observar el impacto sobre la temperatura del tanque de mezclado cuando este posee solo las perturbaciones de agua fría.

Como también comprobar que configuración de los controladores diseñados disminuye en mayor magnitud dichas perturbaciones

Los resultados encontrados en la prueba con perturbaciones de agua fría se pueden observar en la figura 3.11.

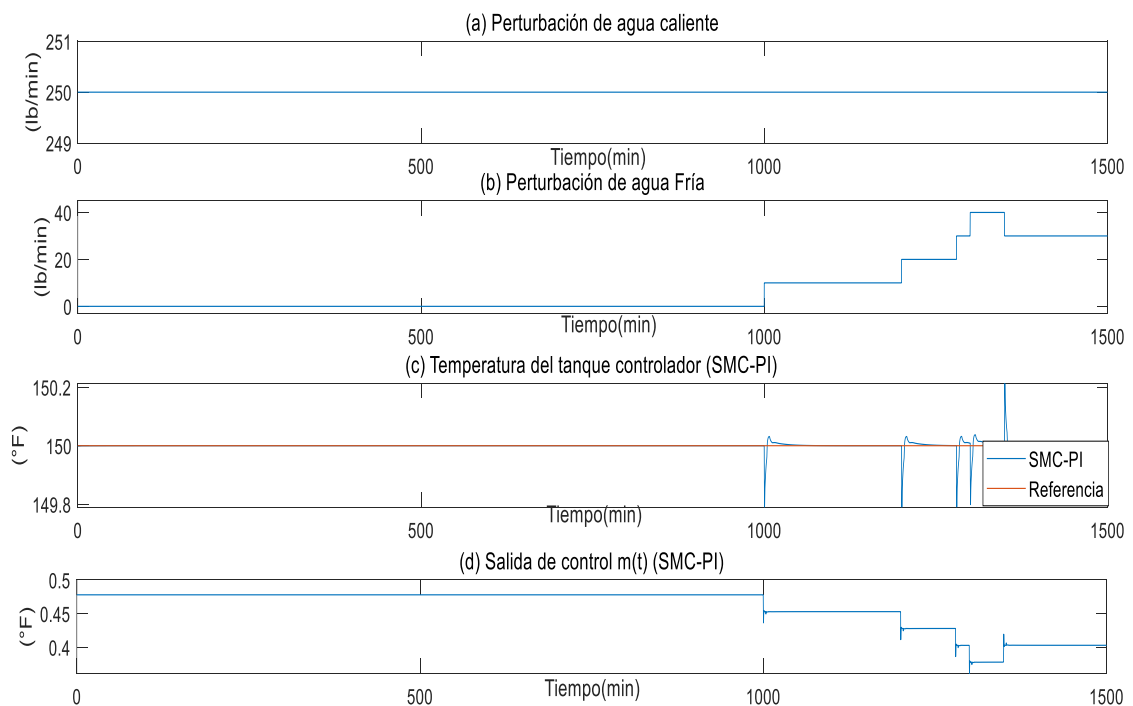


Figura 3.11. Prueba con perturbación de agua fría

En la Figura 3.11(a) se observa la perturbación de agua caliente en su valor de estado estacionario de 250lb/min; en la Figura 3.11(b) se aprecia a las perturbaciones de agua fría; en la Figura 3.11(c) se muestra la respuesta de temperatura del tanque obtenida con el controlador SMC-PI con su referencia de temperatura de 150°F, respuesta conseguida al tener solo las perturbaciones de agua fría.

Aquí se puede observar que con el controlador SMC-PI la temperatura del tanque se establece en su valor de estado estacionario de 150°F hasta el minuto mil, donde las perturbaciones de agua fría producen cuatro sobre picos instantáneos de -0.2°F y un sobre pico instantáneo de 0.2°F, para después del efecto de las perturbaciones establecerse en la temperatura de estado estacionario de 150°F sin perder el control.

En la Figura 3.11(d) se encuentra la salida de control $m(t)$ conseguida con el controlador SMC-PI al tener solo las perturbaciones de agua fría.

Esta mantiene inicialmente su estado estacionario de 0.478 y desciende con cada perturbación de agua fría, hasta alcanzar un nuevo valor de $m(t)$ que le permita alcanzar la temperatura de referencia de 150 °F.

3.1.2.4 Prueba con perturbación de agua fría y agua caliente.

En la siguiente prueba realizada se analiza la respuesta de temperatura del tanque con el controlador SMC-PI cuando se tiene las perturbaciones de agua caliente en la entrada W_1 y las perturbaciones de agua fría en la entrada W_2 .

El resultado encontrado para esta prueba se puede observar en la Figura 3.12.

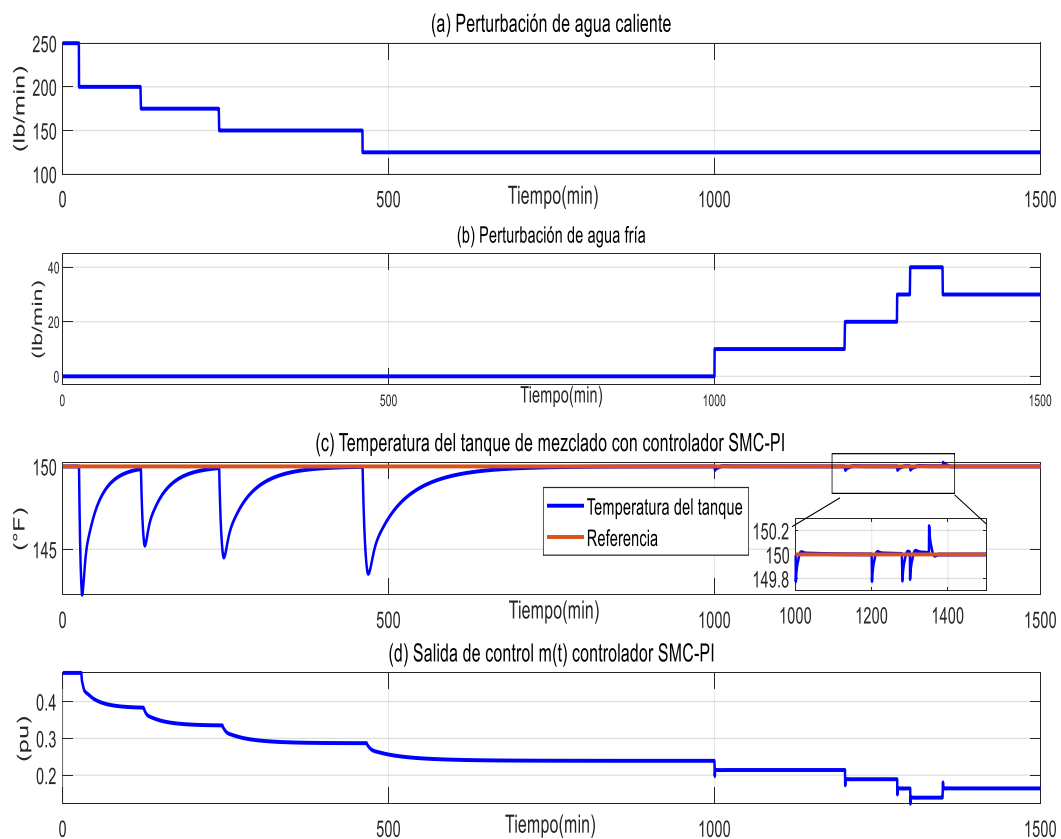


Figura 3.12. Temperatura del tanque con perturbaciones de agua fría y caliente

En la Figura 3.12(a) se puede observar la perturbación de agua caliente; en la Figura 3.12(b) se tiene la perturbación de agua fría; en la Figura 3.12(c) se aprecia la salida de temperatura del tanque conseguida con el controlador SMC-PI con su referencia en 150°F, donde se observa que las perturbaciones de agua caliente producen un descenso en la temperatura del tanque de aproximadamente 6°F, posteriormente la acción de control le permite alcanzar los 149.8°F, también se puede apreciar que tras el descenso de temperatura producido por la tercera perturbación de agua caliente, esta es capaz de alcanzar los 150°F. Después de la cuarta perturbación de agua caliente se debe notar que con el controlador SMC-PI la temperatura del tanque no es inestable como la respuesta entregada por el controlador PID en feedback (mostrada en el capítulo uno) ni críticamente

estable como la respuesta conseguida por el controlador PID-PID. En la Figura 3.12(d) se tiene la salida de control $m(t)$ conseguida con el controlador SMC-PI, aquí se aprecia que la salida de control $m(t)$ inicia en su valor de estado estacionario de 0.478 y decae después de la primera perturbación hasta terminar finalmente en un valor de 0.164.

El efecto producido por las perturbaciones de agua fría es producir cuatro sobre picos de -0.2°F y un sobre pico de 0.2°F , después de efecto de estas perturbaciones la temperatura del tanque se restablece sobre los 150°F .

3.1.3 Controlador SMC-SMC

En la figura 3.13 se aprecia un esquema del controlador SMC-SMC simulado, el mismo que consta de del controlador SMC maestro, el controlador SMC esclavo, la planta del tanque de mezclado y los lazos de control interno y externo del mismo del mismo. También se puede observar la conexión realizada para obtener el ISE por medio del error en el controlador maestro.

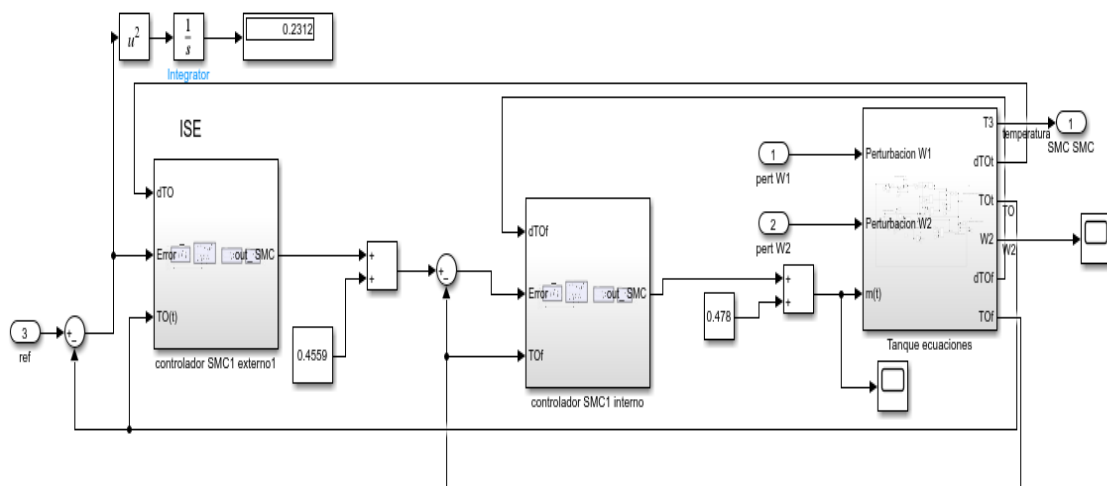


Figura 3.13. Esquema controlador SMC-SMC simulado

En esta sección se presenta los resultados de temperatura del tanque obtenidos al implementar el controlador SMC-SMC al tanque de mezclado en cuanto a seguimiento de su referencia, también cuando se tienen las perturbaciones de agua fría, las perturbaciones de agua caliente y las perturbaciones de agua fría y agua caliente.

3.1.3.1 Prueba de seguimiento

En esta sección se observa la prueba de seguimiento del controlador SMC-SMC.

En la Figura 3.14 se muestra la prueba de seguimiento del controlador SMC-SMC, para realizar esta prueba se utiliza el flujo de agua caliente y de agua fría en sus valores de estado estacionario, 250 y 191.17lb/min respectivamente. La referencia inicia con una temperatura de 150°F, posteriormente se realizan cambios a 155, 160 y 140°F. Se observa que existe un descenso de temperatura instantáneo causado por el retardo presente en la planta, pero la acción de control permite que la temperatura del tanque se establezca sobre los 150°F.

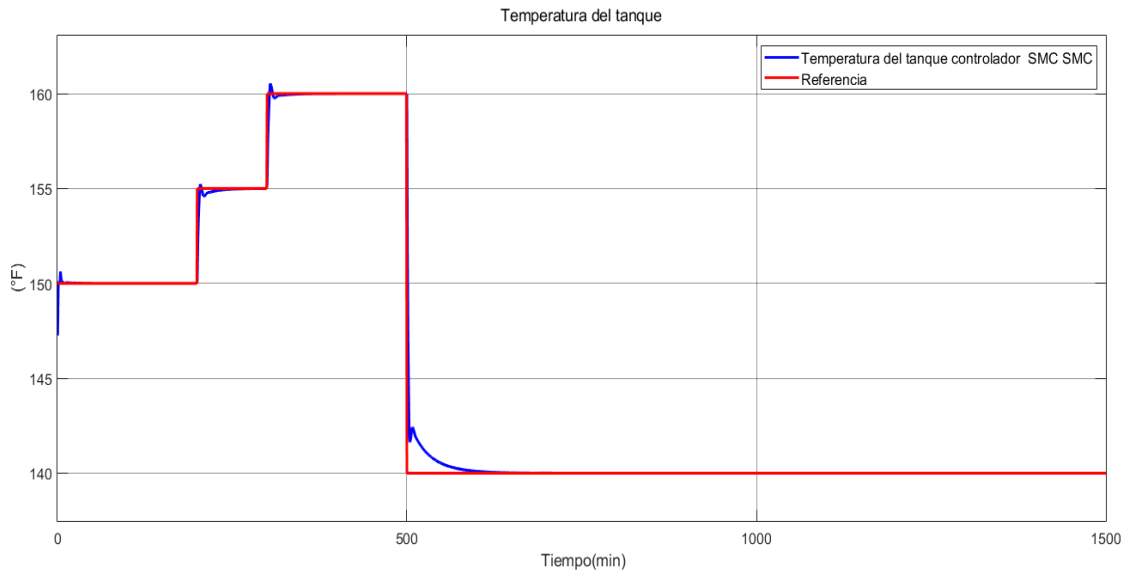


Figura 3.14. Temperatura del tanque

Al realizar el incremento de temperatura el controlador SMC-SMC muestra una buena respuesta, debido a que solo muestra un sobre pico inicial de 0.6°F, para después producir un sobre pico de ganancia negativa de -0.03°F antes de establecerse sobre los 150°F. Después cuando la referencia se incrementa a 160°F, el controlador SMC-SMC produce un sobre pico de 0.5°F y un sobre pico de ganancia negativa de -0.2°F para después establecerse sobre los 160°F, presentando la ventaja de tener un tiempo de establecimiento de 8.6min, mientras el controlador SMC-PI tiene un tiempo de establecimiento de 8.8min aproximadamente, haciendo que el controlador SMC-SMC alcance la referencia antes que el controlador SMC-PI.

3.1.3.2 Prueba con perturbaciones de agua caliente

Con la prueba con perturbaciones de agua caliente se pone en la entrada de flujo de agua

caliente W_1 a las perturbaciones de agua caliente y en la entrada de flujo de agua fría W_2 se coloca el valor de estado estacionario de W_2 (191.17lb/min).

El objetivo de realizar esta prueba es poder visualizar que diferencias existen en la temperatura del tanque de mezclado cuando se trabaja con el controlador SMC-SMC al tener solo las perturbaciones de agua caliente en la entrada de flujo másico de agua caliente W_1 y en la entrada de flujo másico de agua fría su valor de estado estacionario de 191.17lb/min.

El resultado obtenido de la prueba con la perturbación de agua caliente, al trabajar con el controlador SMC-SMC prueba que se puede apreciar en la Figura 3.15.

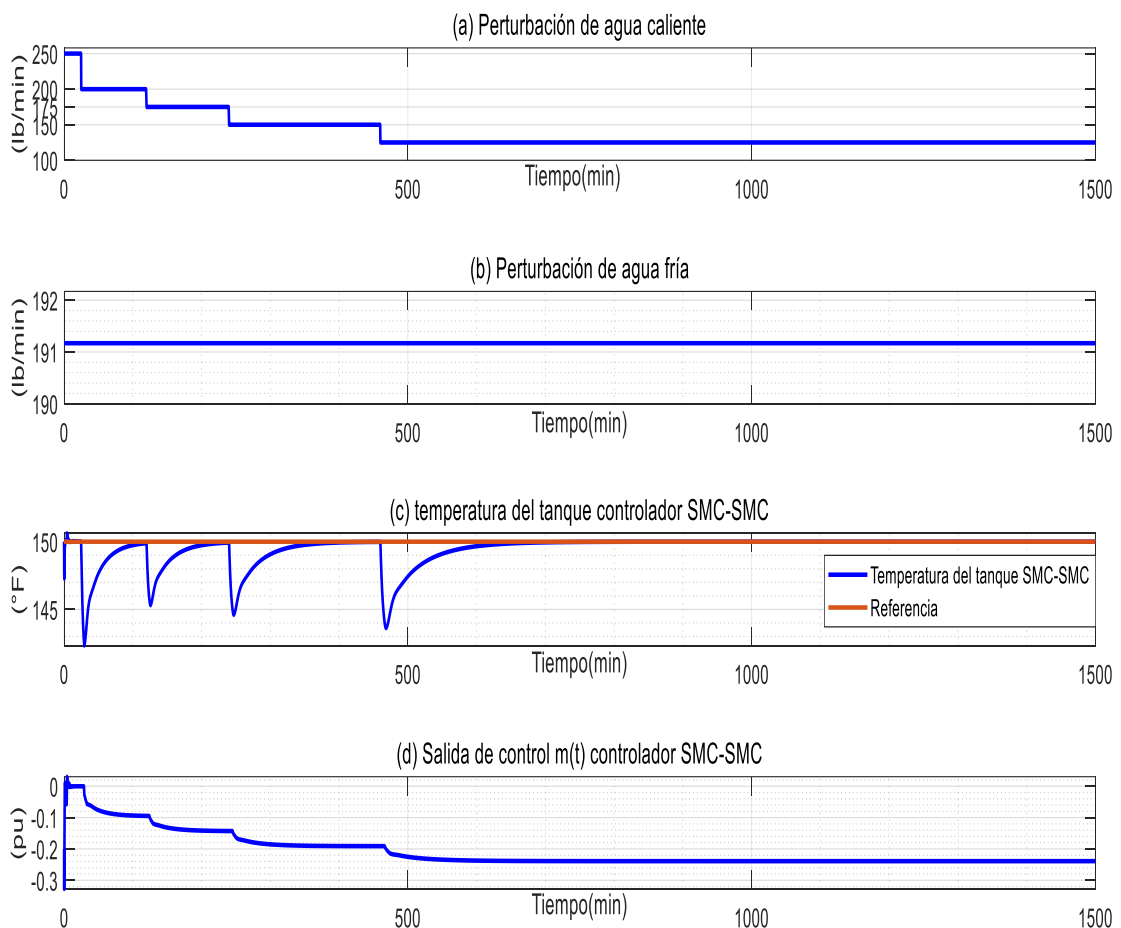


Figura 3.15. Temperatura del tanque con perturbación de agua caliente

En la Figura 3.15(a) se observa a las perturbaciones de agua caliente; en la Figura 3.15(b) se presenta a la perturbación de agua fría en su valor de estado estacionario de 191.17lb/min; en la Figura 3.15(c) se observa a la respuesta de temperatura del tanque

conseguida con el controlador SMC-SMC con su valor de estado estacionario en 150°F, cuando se tiene solo las perturbaciones de agua caliente; en la Figura 3.15(d) se observa a la salida de control $m(t)$ que se obtuvo con el controlador SMC-SMC.

En la Figura 3.15(c) se puede observar también que cada perturbación de agua caliente produce un descenso de temperatura de aproximadamente 6°F, pero la acción de control permite que la temperatura alcance 149.9°F antes que la segunda perturbación de agua caliente disminuya la temperatura nuevamente.

Posteriormente con el controlador SMC-SMC se logra llegar a los 149.9°F antes que la tercera perturbación de agua caliente disminuya la temperatura, es aquí donde el controlador SMC-SMC posee el tiempo de establecimiento necesario para alcanzar los 150°F antes de dar la cuarta perturbación de agua caliente; después de esta perturbación la temperatura del tanque logra alcanzar los 150°F después del tiempo de establecimiento necesario para alcanzar la referencia.

La ventaja que resalta entre el controlador el controlador SMC-PI y el SMC-SMC, es que este último posee un menor tiempo de establecimiento que el calculado para el controlador SMC-PI, haciendo que sea más más rápido para alcanzar la referencia.

En la Figura 3.15(d) se observa a la salida de control $m(t)$ del controlador SMC-SMC cuando se tienen solo las perturbaciones de agua caliente, donde se puede apreciar que con cada perturbación de agua caliente la salida $m(t)$ disminuye hasta alcanzar valores inferiores a cero, valores que le permiten mantener el control y llegar a la referencia requerida.

3.1.3.3 Prueba con perturbaciones de agua fría

En la siguiente prueba realizada se observarán los efectos producidos sobre la temperatura del tanque cuando se tiene solamente las perturbaciones de agua fría con el controlador SMC-SMC.

Para realizar esta prueba se utilizó el flujo de agua caliente en su valor de estado estacionario de 250lb/min y en el flujo de agua fría W_2 ha sido sumado a las perturbaciones de agua fría. Con esta prueba se podrá determinar que configuración de los controladores diseñados sufre menos alteraciones en la temperatura del tanque cuando se tiene solo las perturbaciones de agua fría. El resultado obtenido en esta prueba se observa en la Figura 3.16

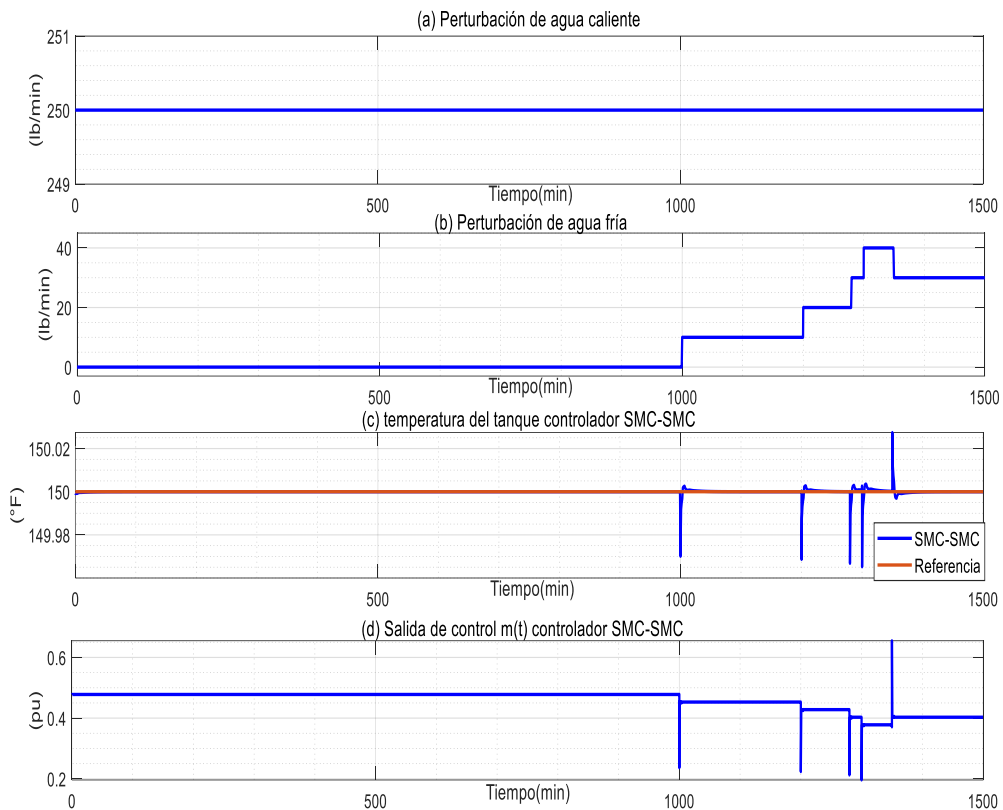


Figura 3.16. Temperatura del tanque prueba con perturbación de agua fría

En la Figura 3.16(a) se observa la perturbación de agua caliente en su valor de estado estacionario de 250lb/min; en a Figura 3.16(b) se aprecia la perturbación de agua fría; en la Figura 3.16(c) se tiene a la respuesta de temperatura del tanque con la referencia de temperatura cuando se encuentra con las perturbaciones de agua fría; en la Figura 3.16(d) se observa a la salida de control $m(t)$ conseguida con el controlador SMC-SMC.

En la Figura 3.16(c) se puede observar que el controlador SMC-SMC permite mantener la temperatura de estado estacionario de 150°F. Se observa que las perturbaciones de agua fría producen cuatro sobre picos de -0.02°F y un sobre pico de 0.02°F, sin embargo, al pasar las perturbaciones de agua fría la temperatura del tanque se establece sobre los 150°F sin perder el control.

3.1.3.4 Prueba con perturbaciones de agua fría y caliente

En la prueba con perturbaciones de agua fría y agua caliente se pone en W_1 las perturbaciones de agua caliente, mientras a la salida de flujo de agua fría W_2 se suman las perturbaciones de agua fría.

El objetivo de realizar esta prueba es visualizar el efecto sobre la temperatura del tanque

de mezclado cuando se trabaja con el controlador SMC-SMC, al tener las perturbaciones de agua caliente y agua de agua fría. El resultado encontrado con esta prueba se observa en la Figura 3.17.

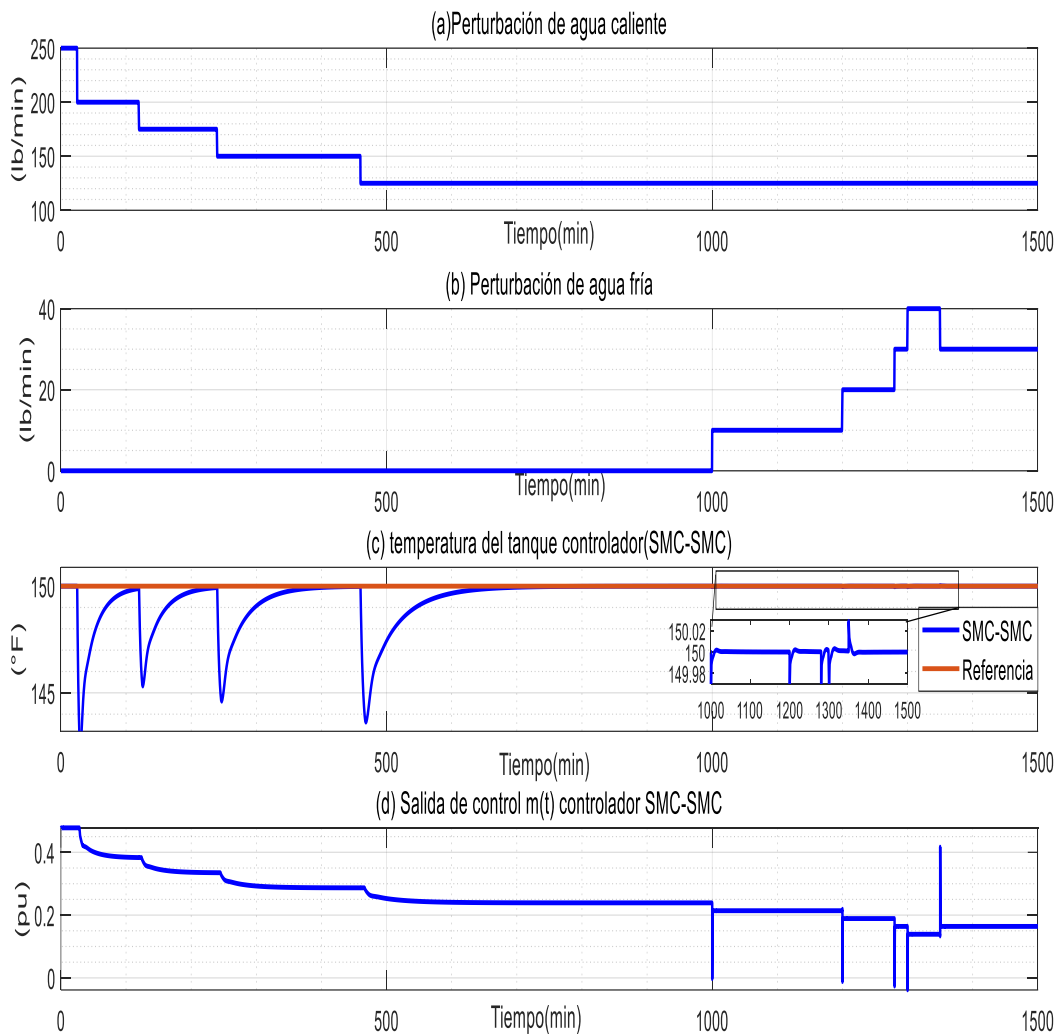


Figura 3.17. Temperatura del tanque con perturbaciones de agua fría y caliente

En la Figura 3.17(a) se observa las perturbaciones de agua caliente; en la Figura 3.17(b) se grafica la perturbación de agua fría; en la Figura 3.17(c) se aprecia la respuesta de temperatura del tanque de mezclado dada con el controlador SMC-SMC con su valor de referencia en 150°F; mientras que en la Figura 3.17(d) se observa la salida de control $m(t)$ obtenida con el controlador SMC-SMC.

Con este controlador la salida de control $m(t)$ tiene picos con magnitud 0.2.

Se puede apreciar en la Figura 3.17(c) que la primera perturbación caliente produce una

disminución de 6°F aproximadamente en la temperatura del tanque.

Posterior, la temperatura sube a un valor de 149.9°F antes de la segunda perturbación de agua caliente.

Después vuelve a alcanzar un valor de 149.9°F antes de producirse la tercera perturbación de agua caliente.

Luego la temperatura logra alcanzar los 150°F antes que se dé la cuarta perturbación de agua caliente. Después de la cuarta perturbación de agua caliente se observa que la temperatura no es ni críticamente estable, ni inestable.

La principal diferencia encontrada entre el controlador SMC-PI y SMC-SMC, es que éste último es capaz de alcanzar el valor de referencia en menor tiempo comparado con el controlador SMC-PI, debido a que tiene un menor tiempo de establecimiento t_s que el obtenido por el controlador SMC-PI.

También se observa que el controlador SMC-SMC suprime los efectos producidos por las perturbaciones de agua fría como se observa en el acercamiento realizado a la Figura 3.17(c), al tener sobre picos de 0.02°F.

En la Figura 3.17d() se puede observar la respuesta de $m(t)$ del controlador SMC-SMC.

Se puede apreciar que cada perturbación de agua caliente provoca un descenso del valor estacionario de $m(t)$ pasando desde 0.478 hasta que la salida $m(t)$ llega a un valor final de 0.1640, al tener las dos perturbaciones

3.1.4 Comparación de desempeño de controladores

3.1.4.1 Prueba de seguimiento

En esta sección se muestra una comparación de la respuesta al seguimiento conocida también como prueba de cambio de referencia. En esta prueba se hace variaciones la referencia de temperatura con los tres controladores diseñados.

Donde se mantiene las perturbaciones de agua fría y agua caliente constantes en su valor de estado estacionario.

Para realizar de esta prueba de cambio de referencia, se puso un valor constante para la densidad de flujo de agua caliente W_1 de 250lb/min y de 191.17lb /min para el flujo de agua fría.

Después se realizó cambios de referencia desde 150°F, en el minuto 480 se pasa a 155°F.

Posteriormente en el minuto 780 se cambia a 160°F, para finalmente bajar a 140°F. en el minuto 1200. Aquí se aprecia que, sin las perturbaciones de agua caliente y agua fría, los controladores pueden seguir la referencia sin mayor dificultad. Donde es el controlador SMC-PI el controlador que presenta mayor sobre pico ante cambios de referencia como se puede observar en la Figura 3.18.

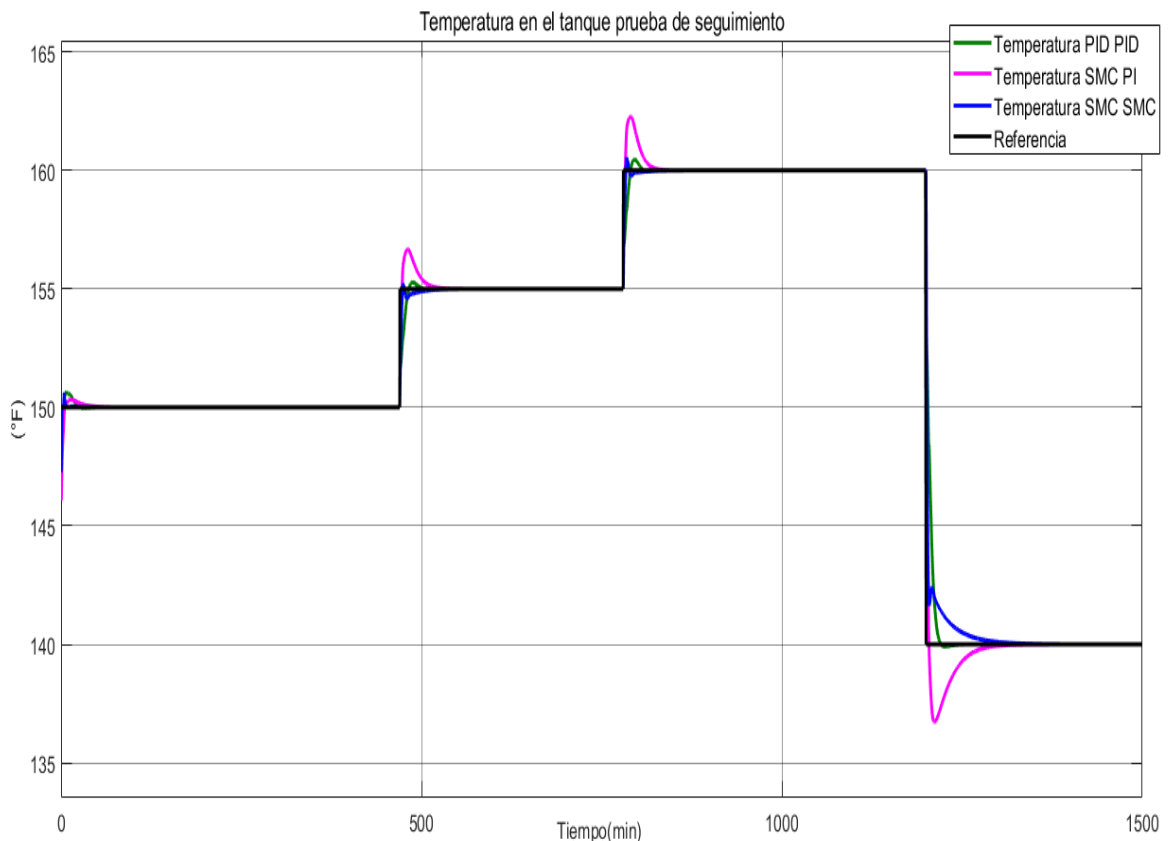


Figura 3.18. Temperatura del tanque ante cambios de referencia

En la Figura 3.18 se puede apreciar a la referencia de temperatura en °F y la respuesta de temperatura conseguida con los tres controladores en cascada. Se puede apreciar como inicialmente el retardo presente en la planta produce un ligero pico de temperatura en el tanque con los tres controladores diseñados, tras pasar dicho efecto, estos se establecen sobre los 150°F. Cuando la referencia de temperatura cambia a 155°F, se observa que el controlador que se adapta más rápido a este cambio es el controlador SMC-SMC, motivo por el que no presenta sobre pico antes de establecerse sobre los 155°F. El controlador PID-PID presenta una buena respuesta de seguimiento tras producir un pequeño sobre impulso antes de establecerse sobre los 155°F, dejando finalmente al controlador SMC-PI como el controlador con mayor sobre impulso ante los cambios de referencia producidos

para esta prueba.

3.1.4.2 Prueba de seguimiento con perturbaciones de agua caliente y agua fría

En esta prueba se observa el resultado obtenido al realizar un cambio de referencia de 150 a 160°F en el minuto 580; al tener las perturbaciones de agua fría y de agua caliente como se puede observar en la Figura 3.19.

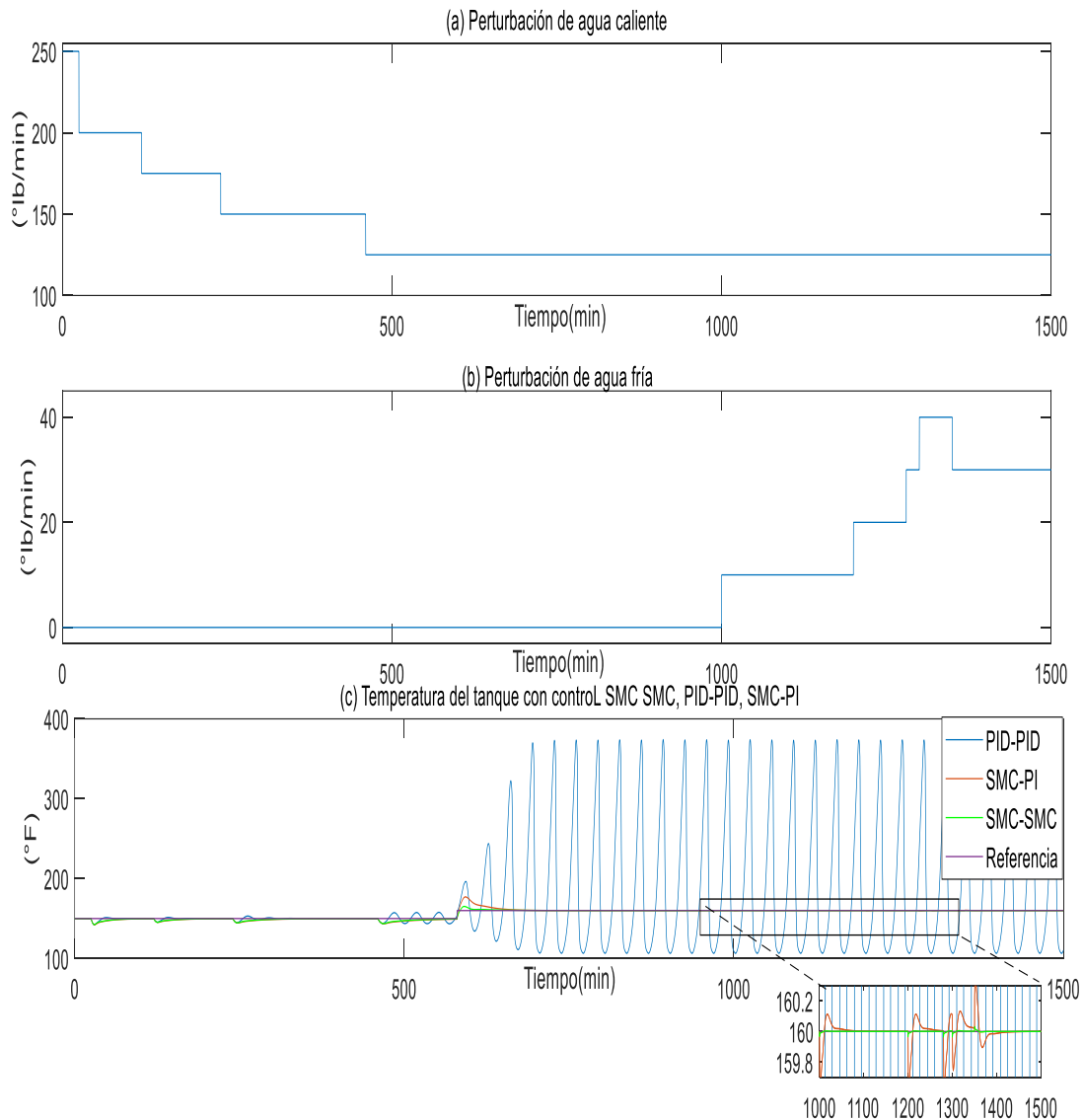


Figura 3.19. Prueba temperatura del tanque ante perturbaciones más cambio de referencia

En la Figura 3.19(a) se presenta la perturbación de agua caliente; en la Figura3.19(b) se tiene a la perturbación de agua fría; en la Figura3.19(c) se observa la respuesta de

temperatura del tanque, conseguida con los tres controladores. Aquí al cambiar la temperatura de referencia de 150°F a 160°F en el minuto 580.

Por parte del controlador PID-PID, se observa el mismo comportamiento del controlador demostrado con la referencia de 150°F, donde de la misma manera este presenta comportamiento oscilatorio. Hasta que termina perdiendo el control comportamiento similar al demostrado con la referencia de 150°F.

Aquí este pierde el control cuando la referencia cambia a 160°F.

En los resultados obtenidos en la Figura 3.19(c), se puede apreciar también un acercamiento que permite divisar las alteraciones producidas por las perturbaciones de agua fría.

Esto permite identificar los efectos y diferencias que producen las perturbaciones de agua fría y de agua caliente al subir la temperatura de referencia.

En el caso de los controladores SMC-PI y el SMC-SMC, estos logran seguir la nueva referencia de 160°F sin perder el control como se pudo apreciar en la Figura 3.19(c)

Durante este cambio de referencia se puede apreciar claramente la desventaja de los grandes sobre impulsos que se produce con el controlador SMC-PI.

debido a que le toma más tiempo establecerse sobre la referencia que es de 160°F.

Los efectos producidos por las perturbaciones de agua fría son cuatro sobre picos de - 0.2°F y un sobre pico de 0.2°F.

La característica del tiempo de establecimiento mencionada será una desventaja si el proceso en estudio requiere velocidad de parte de la acción de control, criterio que tendrá que ser analizado en función de los resultados esperados en un proceso de control.

Según los cálculos realizados el tiempo de establecimiento del controlador SMC-PI es de 8.8min lo que hace que le tomemás tiempo alcanzar la referencia que al controlador SMC-SMC con un tiempo de establecimiento de 8.6min

Después de analizarse la respuesta de temperatura conseguida cuando la referencia de temperatura es superior a la de su punto estacionario, también se analiza el resultado cuando la referencia de temperatura es inferior a los 150°F.

En la siguiente prueba realizada se puede observar los resultados de la temperatura del

tanque que se obtuvo con el controlador SMC-SMC diseñado cuando se realizó un cambio de referencia de 150°F a 140°F como se muestra en la Figura 3.20.

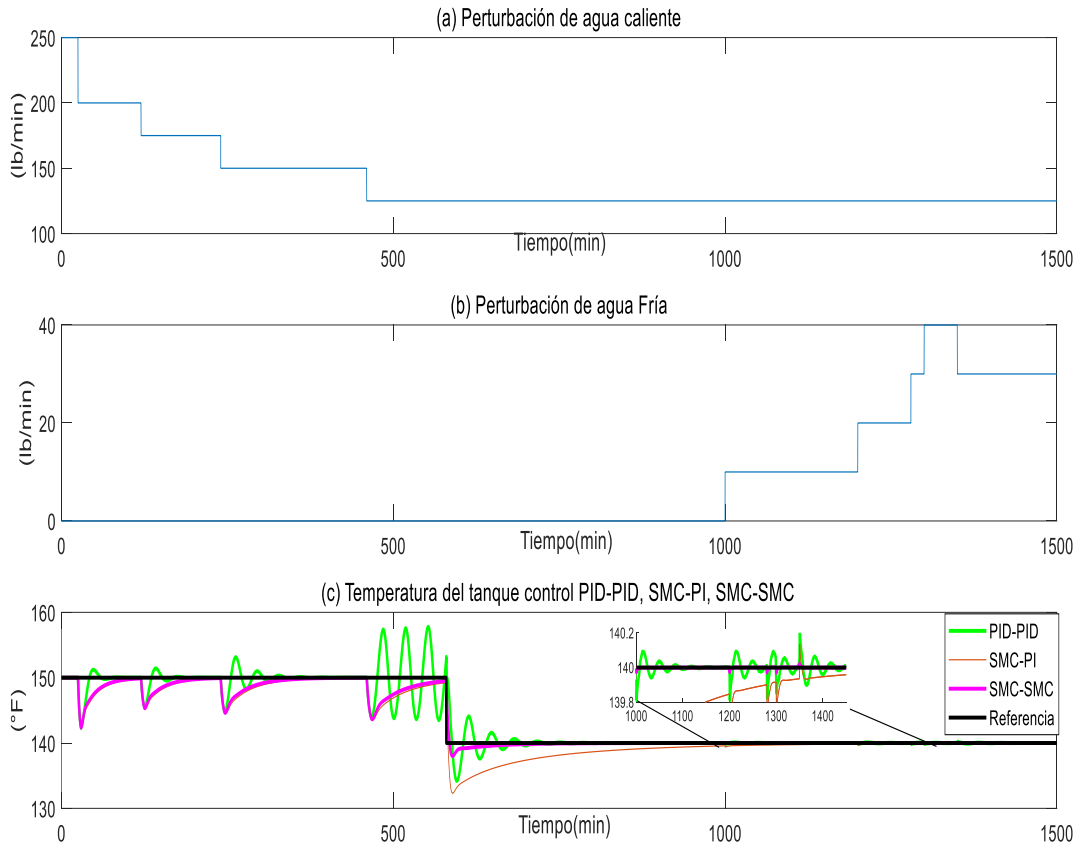


Figura 3.20. Temperatura del tanque Cambio de Referencia a 140°F

En la Figura 3.20(a) se observa a las perturbaciones de agua caliente; en la Figura 3.20(b) se aprecia a las perturbaciones de agua fría; en la Figura 3.20(c) se observa la temperatura del tanque de mezclado con los controladores PID-PID, SMC-PI, SMC-SMC con la referencia de temperatura. Con el controlador PID-PID se tiene un comportamiento oscilatorio después de la cuarta perturbación de agua caliente, efecto producido por la dinámica de la planta. En este caso, se reduce la referencia a 140°F en el minuto 580, apreciándose una enorme diferencia con los resultados obtenidos anteriormente. En este caso con esta nueva referencia de 140°F, los controladores PID-PID, SMC-PI y SMC-SMC son capaces de establecerse satisfactoriamente.

En esta Figura (3.20c) la temperatura del tanque disminuye con cada perturbación de agua caliente, para después proceder a establecerse en 150°F. Además, se observa que los controladores SMC-PI y SMC-SMC no tienen comportamiento oscilatorio como se presenta

con el controlador PID-PID.

3.1.5 Índices ISE obtenidos

En la Tabla 3.1 se observa los índices de desempeño obtenidos para los controladores diseñados en los escenarios de: referencia de 160°F, 140°F, solo perturbación de agua caliente, solo perturbación de agua fría y las dos perturbaciones (perturbación de agua fría y agua caliente).

Tabla 3.1. Índices ISE Obtenidos

No	Controlador	Condición	Índice ISE
1	PID-PID	Perturbación de agua caliente	33.9
2	SMC-PI	Perturbación de agua caliente	0.2835
3	SMC-SMC	Perturbación de agua caliente	0.2312
4	PID-PID	Perturbación de agua fría	2.938×10^{-5}
5	SMC-PI	Perturbación de agua fría	2.247×10^{-5}
6	SMC-SMC	Perturbación de agua fría	1.62×10^{-7}
7	PID-PID	Dos perturbaciones	33.31
8	SMC-PI	Dos perturbaciones	0.4106
9	SMC-SMC	Dos perturbaciones	0.2312
10	PID-PID	Referencia a 160 °F	96.62
11	SMC-PI	Referencia a 160 °F	0.3062
12	SMC-SMC	Referencia a 160 °F	0.2448
13	PID-PID	Referencia a 140 °F	0.2089
14	SMC-PI	Referencia a 140 °F	0.7873
15	SMC-SMC	Referencia a 140 °F	0.295

De la Tabla 3.1 se puede recabar que los índices de error ISE más altos fueron obtenidos en las pruebas que incluyen perturbaciones de agua caliente, siendo estas las que producen mayor alteración en la temperatura del tanque de mezclado. De la misma manera, los índices de error ISE más pequeños fueron obtenidos en las pruebas con perturbaciones de agua fría, debido a que no producen cambio en la temperatura del tanque

Para analizar de manera gráfica los índices de desempeño ISE obtenidos en las diferentes

pruebas, se presenta la figura de barras realizada en base a los datos de la tabla 3.1 en la Figura 3.21.

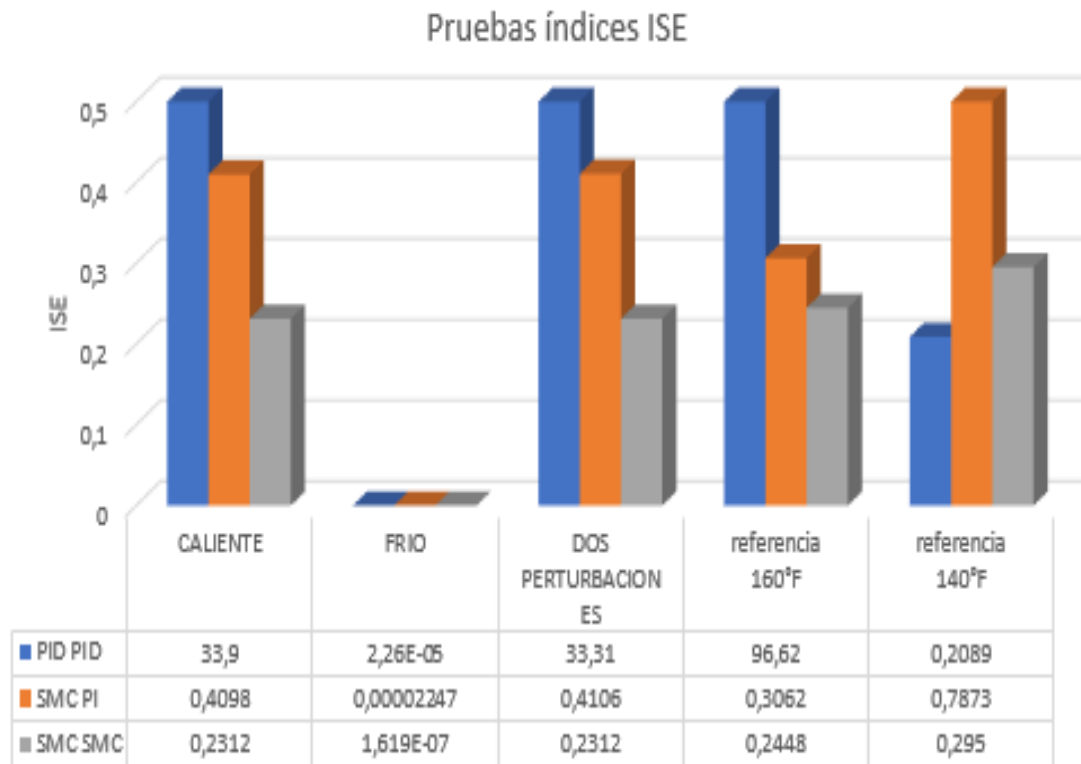


Figura 3.21. Gráfica Comparativa índices ISE

De la gráfica de barras obtenida a partir de los índices ISE de los controladores diseñados en las diferentes pruebas realizadas, se puede determinar que el controlador con el índice ISE más pequeño en las pruebas con perturbaciones de agua fría y de agua caliente (individual o conjuntamente), es el controlador SMC-SMC. Logrando tener un ISE de 0.2312 cuando es sometido a las perturbaciones de agua fría y de agua caliente conjuntamente, mientras el controlador PID-PID logró un ISE de 33.31 en la misma prueba, valor elevado debido a que el controlador PID-PID perdió el control y el controlador SMC-PI alcanza un ISE de 0.4106

En la prueba de cambio de referencia a 160°F el ISE más pequeño lo obtuvo el controlador SMC-SMC con un ISE de 0.2448 y el ISE más alto lo obtuvo el controlador PID-PID con un ISE de 96.62 debido a que este pierde el control, mientras el controlador SMC-PI obtuvo un ISE de 0.3062. El índice ISE del controlador SMC-PI obtenido en esta prueba se debe a que la respuesta de control del controlador SMC-PI es más lenta que la del controlador

SMC-SMC.

En la prueba de cambio de referencia a 140°F el ISE más pequeño lo obtuvo el controlador PID-PID con un valor de 0.2089, debido a que presenta una respuesta de control más rápida comparada con los controladores SMC-PI y SMC-SMC. Mientras el ISE más alto lo tiene el controlador SMC-PI con un ISE de 0.7873, y el índice ISE obtenido por el controlador SMC-SMC en esta prueba fue de 0.295.

Con la finalidad de entender la razón del porqué el valor de ISE obtenido con el controlador PID-PID es inferior comparado con los controladores SMC-PI y SMC-SMC cuando la referencia cambia de 150°F a 140°F, se analiza la salida de control $m(t)$ de los tres controladores para esa prueba como se puede observar en la Figura 3.22.

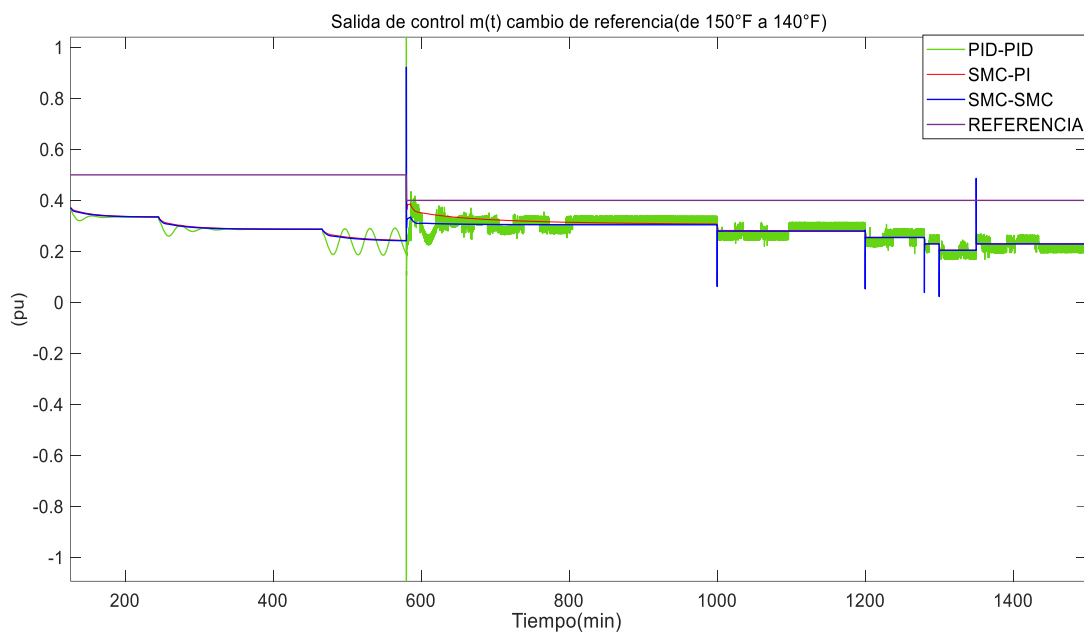


Figura 3.22. Respuesta de control controladores prueba seguimiento de 150°F a 140°F

En la Figura 3.22 se tiene la respuesta de control $m(t)$ dada por los controladores diseñados, al tener las perturbaciones de agua fría y agua caliente, cuando se hace el cambio de referencia de 0.5 (150°F) a 0.4 (140°F).

Aquí se aprecia que el controlador PID-PID ante cada perturbación de agua caliente, desciende de manera más pronunciada que el controlador SMC-PI y SMC-SMC hacia un nuevo valor de $m(t)$, que le permita alcanzar los 150°F, mientras que a los controladores SMC-SMC y SMC-PI les toman más tiempo en alcanzar estos valores.

Se verificó que en el cambio de referencia de 0.5 a 0.4 se producen sobre picos instantáneos en $m(t)$ que alcanzan un valor de 110 con el controlador PID-PID. Mientras que con el controlador SMC-SMC el sobre pico de $m(t)$ alcanza un valor de 0.9, lo que indica que el controlador PID-PID es mucho más agresivo con el elemento final de control, que los controladores SMC-SMC y SMC-PI, cuyas salidas de control $m(t)$ son inferiores a 1, cómo se observó en la Figura 3.22

Se debe tomar en cuenta que en esta prueba de seguimiento (de 150°F a 140°F) el cambio de la referencia a 140° F se efectuó después de la cuarta perturbación de agua caliente, antes que el controlador PID-PID pierda el control motivo por el que éste presenta un comportamiento oscilatorio antes de proceder a establecerse sin problema en 140°F.

Tabla 3.2. Salida de Control $m(t)$

Controlador	$m(t)$
PID-PID	1.7044
SMC-PI	0.164
SMC-SMC	0.164

En la Tabla 3.2 se observan los valores finales alcanzados por la salida $m(t)$ de los controladores diseñados al funcionar con la perturbación de agua fría y la perturbación de agua caliente. Se aprecia que la salida $m(t)$ más alta cuando se tiene las perturbaciones de agua fría y las perturbaciones de agua caliente la obtuvo el controlador PID-PID, debido a que perdió el control, motivo por el que alcanza un valor de 1.7044, superando el valor de $m(t)$ permitido en el modelo entre 0-1. Los valores de la salida $m(t)$ para el controlador SMC-PI y SMC-SMC están dentro del valor diseñado para la salida de control $m(t)$ de 0 a 1.

3.2 Conclusiones

- Se realizó el estudio de las técnicas de identificación de parámetros por el método de Smith y Alfaro y se determinó que el método de Smith puede producir un error considerable del 50%, mientras el método de Alfaro produce una buena exactitud de predicción debido a que toma un punto al inicio (25%) y un punto al final de la respuesta (75%), motivo por el cual la identificación realizada con el método de Alfaro es más exacta que la realizada por el método de Smith.
- Se implementó y validó el modelo del tanque de mezclado en el software Matlab-Simulink y se observó que después de darse la entrada paso y transcurrir el retardo de

tiempo, ambas respuestas muestran el mismo comportamiento durante el estado transitorio y terminan superponiéndose al llegar al estado estacionario, lo que confirma la validez de la planta simulada al presentar la misma respuesta que la del modelo de primer orden con retardo.

- Se diseñaron y simularon los controladores de temperatura en cascada: PID-PID, SMC-PI y SMC-SMC, utilizando métodos de identificación que usan dos puntos de la curva de reacción, de los cuales se observó que las tres configuraciones diseñadas tienen una respuesta satisfactoria para controlar de la temperatura del tanque de mezclado.
- Se realizaron las pruebas de funcionamiento a los controladores diseñados, donde los controladores SMC-PI y SMC-SMC siguen a la referencia de temperatura al tener las perturbaciones de agua fría y agua caliente, mientras el controlador PID-PID perdió el control. Con las perturbaciones de agua fría el controlador SMC-SMC tiene pulsos de 0.02°F y el controlador SMC-PI obtuvo pulsos de 0.2°F. Además, se observó que los tres controladores presentaron buena respuesta ante cambio de referencia, estableciéndose en cada cambio sin perder el control.
- Se determinó con la prueba de perturbación de agua caliente (sin perturbaciones de agua fría), que el controlador PID-PID pierde el control de la temperatura porque no le es posible alcanzar la referencia con las condiciones dadas cuando el flujo másico de agua caliente es de 125lb/min. Con lo que se determinó que el controlador PID-PID no posee el desempeño necesario para controlar la temperatura del tanque
- Se evaluó la respuesta de temperatura en el tanque de mezclado conseguida con los controladores diseñados. Se determinó que el controlador que con mejor desempeño para seguir referencia ante la presencia de perturbaciones de agua fría y agua caliente es el controlador SMC-SMC con un ISE de 0.2312, siendo el ISE más pequeño obtenido.

3.3 Recomendaciones

- Para el caso del controlador SMC-PI se recomienda intercambiar el controlador PI esclavo, por un controlador PID con el objetivo de incrementar la velocidad de la respuesta del control para alcanzar la referencia. Esto debido a que el controlador SMC-PI demostró ser estable pero más lento que el controlador SMC-SMC.
- Si se desea agregar la condición de calentamiento del tanque se recomienda incrementar un serpentín al tanque de mezclado con el objetivo que crear la condición de calentamiento para compensar la pérdida de temperatura causada por las

perturbaciones de agua caliente y la larga distancia entre el tanque de mezclado con el transmisor de temperatura. Esto con el fin de comprobar si el controlador PID-PID, logra alcanzar la referencia sin perder el control y además buscar que la pérdida de temperatura producida por las perturbaciones de agua caliente sea menos significativa.

- Se recomienda incluir en el modelo el impacto sobre la presión a través de la válvula de control de flujo de agua fría, debido a que el flujo variable de agua fría a través de la válvula afecta a la constante de presión utilizada, por el motivo de operar a diferentes temperaturas producidas por distintos flujos máxicos de agua fría.
- Si se desea encontrar una mejor respuesta del controlador PID-PID se recomienda utilizar dos bloques de saturación a las salidas de los controladores maestro y esclavo para limitar las salidas de control entre cero y los valores de estado estacionario de cada controlador.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] O Camacho, C. A. Smith "Sliding mode control: an approach to regulate nonlinear chemical processes", *vol 39,pag 14, Isa transactions*, 2000
- [2] William D. Hammond Empleo de Nitrógeno en pozos petroleros" Congreso geológico internacional, vol. 2, México D.F, 1956.
- [3] V. M Alfaro O Camacho "identificación de procesos sobreamortiguados utilizando técnicas de lazo cerrado",*Researchgate,vol11,18,enero-diciembre2001* Costa Rica ,2001.
- [4] O. Camacho, A. Rosales, F. Rivas, "*Control De Procesos*", Primera Edición, Quito, EPN Editorial, 2020
- [5] Cordero G, Santillanes V," Sintonización de un controlador PID-PID en cascada aplicado a un giroscopio de 2 g.d.l", Instituto tecnológico de la laguna, México, 2014.
- [6] Ismael D. Bonilla, "Diseño, simulación y comparación entre un controlador PID fraccional respecto a unPID clásico". Escuela Politécnica Nacional, May 2019
- [7] Orozco V, "Desarrollo de una herramienta computacional para la sintonización de parámetros de controladores PID y SMC para el seguimiento de trayectoria de un cuadricóptero basado en algoritmos genéticos", Escuela politécnica Nacional, junio, 2018
- [8] M coronel, Luis A. Mora, R Rojas A. "Sliding Mode Control Strategy for Cascade Systems", IEE Latin America Transactions, 2019.
- [9] Chicaiza R, "Diseño e implementación de una librería y aplicación en simulink para el aprendizaje y estudio de controladores en modo deslizante aplicado a un tanque de mezclado con tiempo muerto", Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2021
- [10] D. Bonilla Jiménez diseño, "simulación y comparación entre un controlador PID fraccional con respecto a un PID clásico, en procesos con grandes retardos", Escuela Politécnica Nacional, mayo, 2019.
- [11] J. Buenaño, K. Rocha "diseño y simulación de un control regulatorio descentralizado y estimadores de concentración usando un observador de estados y redes neuronales aplicados a un sistema reactorseparador reciclador"., Escuela politécnica Nacional, 2019

5 ANEXOS

ANEXO I

TANQUE DE MEZCLADO

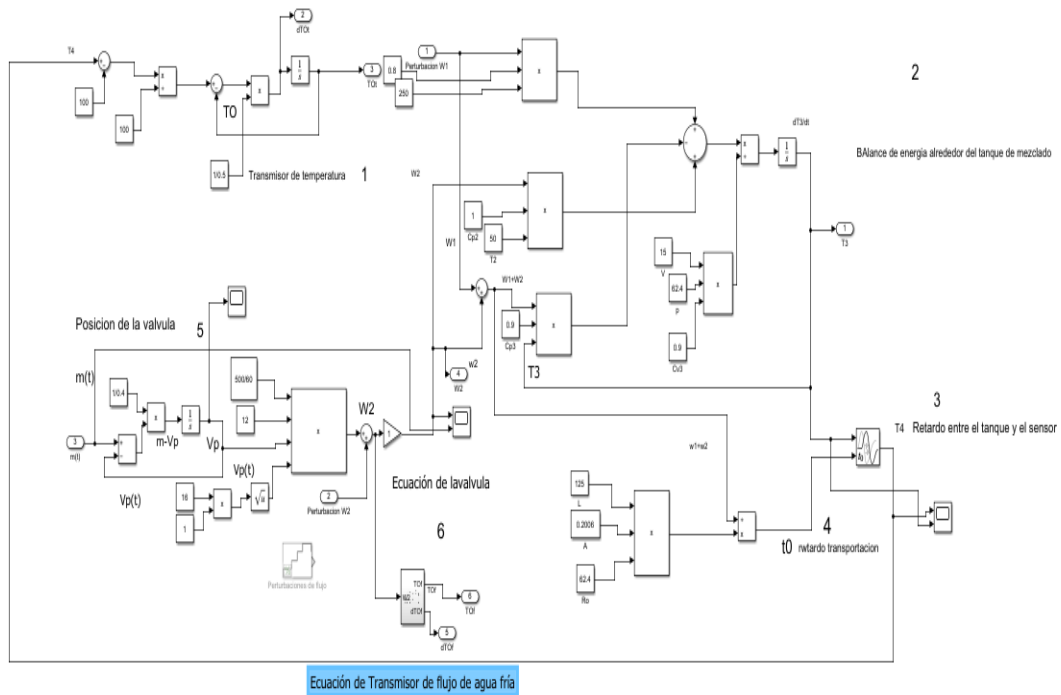


Figura 5.1. Vista interna tanque de mezclado

En la Figura 5.1 se observa el contenido del subsistema del tanque de mezclado utilizado en la simulación, en el cual se encuentran las ecuaciones del: transmisor de temperatura, temperatura del tanque de mezclado, retardo por transportación, ecuación de la válvula de control, posición de la válvula y la ecuación del transmisor de flujo de agua fría se encuentra en un pequeño subsistema dentro del tanque de mezclado.

TRANSMISOR DE FLUJO DE AGUA FRÍA.

En la siguiente figura se muestra el desarrollo del subsistema del transmisor de flujo de agua fría, el mismo que se obtuvo a partir de la ecuación 2.10.

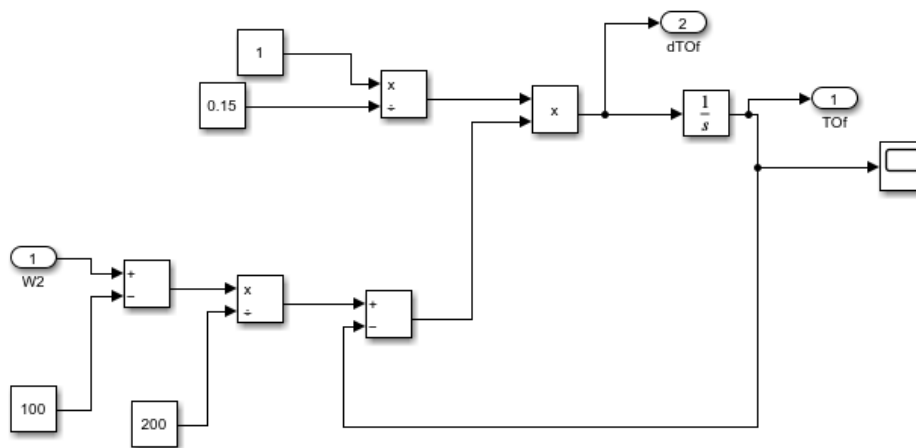


Figura 5.2. Transmisor de flujo de agua fría

En la Figura 5.2 se observa el cómo se implementó el transmisor de flujo de agua fría, el mismo que se obtuvo a partir de la ecuación 2.10 para ello se utilizó bloques: constant, product, subtract, divide, integrator.

ANEXO II

CONTROLADOR PID-PID

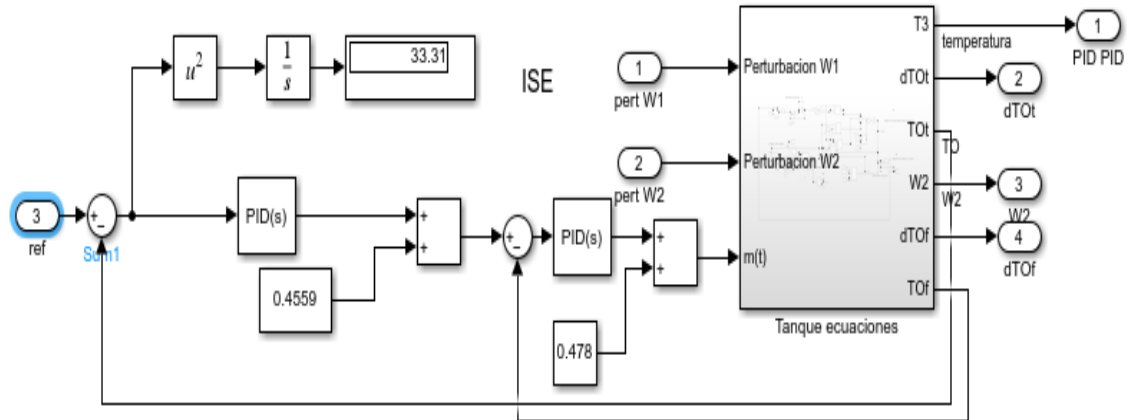


Figura 5.3.Controlador PID-PID diseñado

En la Figura 5.3 se observa el diseño en cascada realizado del controlador PID-PID en cascada, aquí se aprecia al tanque de mezclado simulado con sus salidas y los controladores PID del lazo interno y externo. También se puede observar cómo se realizó la conexión para obtener el índice de desempeño ISE a partir del error del controlador PID maestro.

ANEXO III

CONTROLADOR SMC-PI

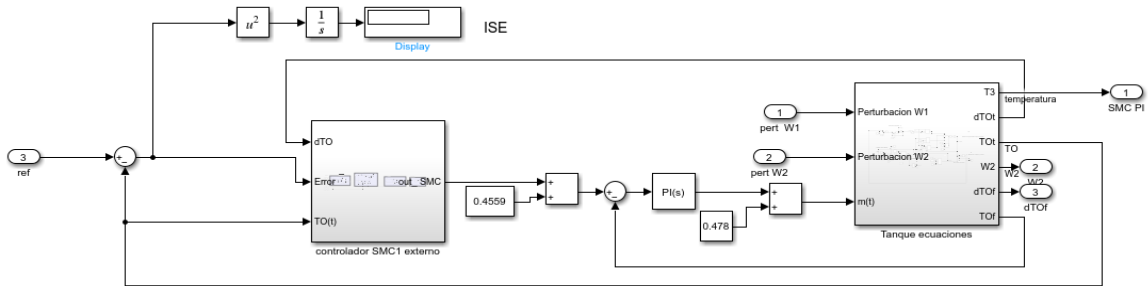


Figura 5.4. Controlador SMC-PI diseñado

En la Figura 5.4 se observa el diseño en cascada realizado del controlador SMC-PI en cascada, aquí se presenta al tanque de mezclado simulado con sus salidas y los controladores PID del lazo interno y externo. También se puede apreciar cómo se realizó la conexión para obtener el índice de desempeño ISE a partir del error del controlador SMC maestro.

ANEXO IV

CONTROLADOR SMC-SMC

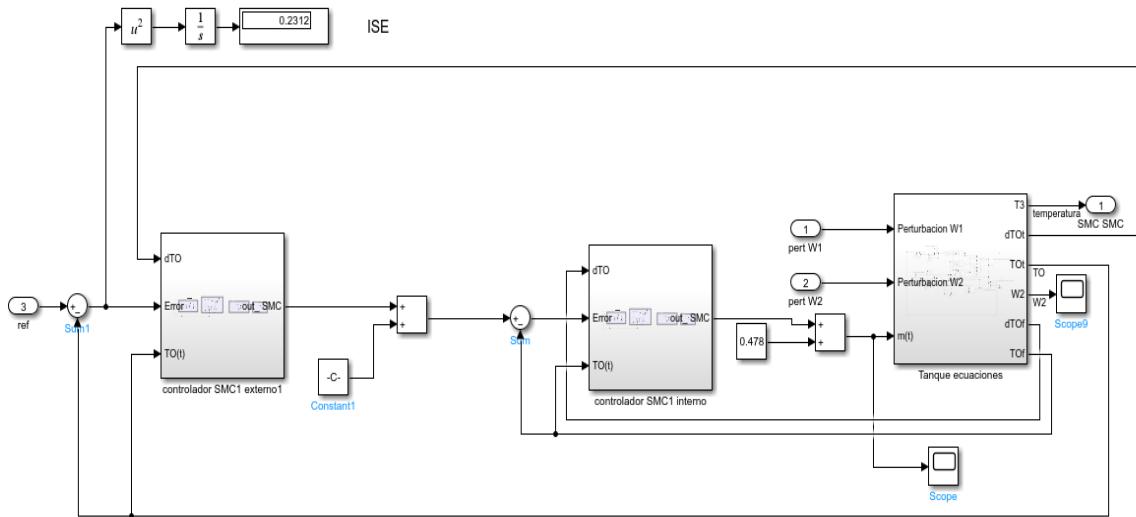


Figura 5.5. Controlador SMC-SMC diseñado

En la Figura 5.5 se observa el diseño en cascada realizado del controlador SMC-SMC en cascada, aquí se presenta al tanque de mezclado simulado con sus salidas y los controladores SMC del lazo interno y externo. También se puede observar cómo se realizó la conexión para obtener el índice de desempeño ISE a partir del error del controlador SMC maestro.

SUBSISTEMA CONTROLADOR SMC

En la siguiente figura se puede observar cómo se realizó el subsistema del controlador SMC.

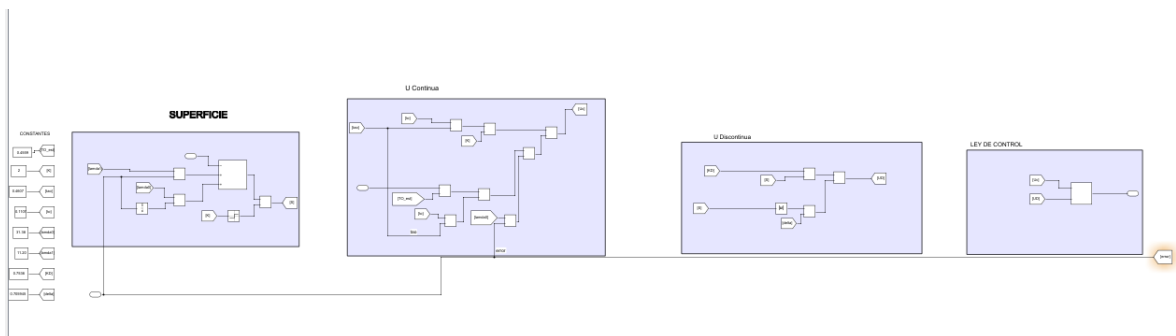


Figura 5.6. Vista interna subsistema del controlador SMC

En la Figura 5.6 se puede apreciar cómo se realizó el subsistema del controlador SMC.

En la parte izquierda de la Figura 5.4 se colocó todas las contantes a utilizar como: K , τ t_{0-} . Como también las constantes que definen a un controlador SMC, estas son: λ_0 , λ_1 , K_D , δ . Para implementar la ecuación de la superficie, la de la componente continua y la de la componente discontinua. Finalmente, para definir la ley de control se sumó la componente continua y la componente discontinua.

Una vez que se ha mostrado los subsistemas principales de la simulación realizada, se muestra la vista general de programa realizado.

VISTA GENERAL SIMULACIÓN REALIZADA

En la siguiente grafica se puede observar una vista completa de la simulación realizada, donde se encuentran los controladores diseñados , las perturbaciones de agua caliente, de agua fría y la referencia de temperatura.

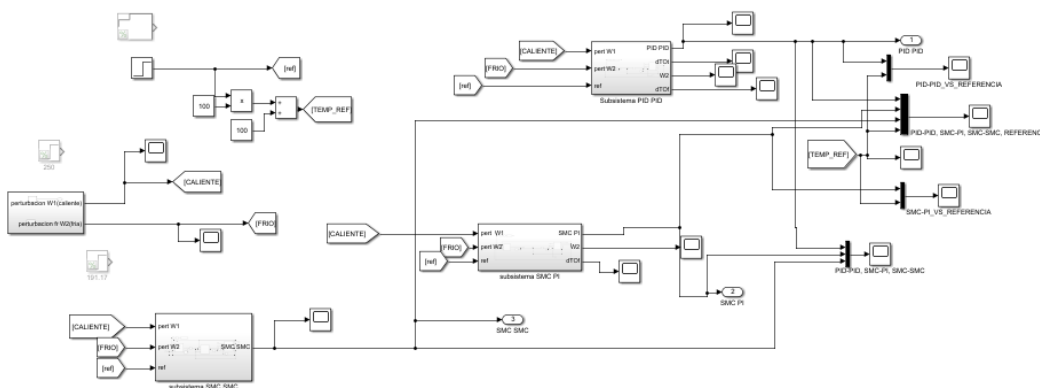


Figura 5.7. Vista general simulación realizada

En la Figura 5.7 se tiene una vista general de la simulación realizada, En esta se aprecia que se tiene a los subsistemas de los controladores simulados, los mismos que contienen a los controladores diseñados, para este trabajo de integración curricular.

Esta simulación consta de cuatro subsistemas, que son los tres subsistemas de los controladores diseñados y también se tiene un subsistema que contiene a las perturbaciones de agua fría y de agua caliente.

Además, se observa una entrada paso que da la referencia de temperatura en (pu), y la

referencia de temperatura en °F (REF_TEMP), obtenida a partir de la referencia en (pu).

Se puede observar que en la simulación existen elementos que están comentados, los mismos que se utilizaron al momento de realizar las pruebas.

Por este motivo lo que cuando no son utilizados se prefiere comentarlos para evitar advertencias al momento de correr la simulación.