

Comparación del desempeño de un Predictor de Smith frente a un PID convencional en la planta de fabricación de kumis del PIAI



Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniera en Automática Industrial

Lucy Elena Gómez Chicue

Director:

Msc. Francisco Franco Obando Díaz

Asesor de la empresa:

Msc. Vladimir Trujillo Arias

Coordinador de laboratorios

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Ingeniería en Automática Industrial

Popayán, 2022

Comparación del desempeño de un Predictor de Smith frente a un PID convencional en la planta de fabricación de kumis del PIAI

Monografía presentada como requisito parcial para optar por el título de
Ingeniera en Automática Industrial

Lucy Elena Gómez Chicue

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones
Ingeniería en Automática Industrial
Popayán, 2022

Contenido

Introducción	1
Capítulo 1: Generalidades	3
1.1 Retardo de tiempo en procesos industriales	3
1.2 El predictor de Smith.....	6
1.3 Propiedades del predictor de Smith	9
1.4 Predictor de Smith filtrado.....	11
1.5 Aplicaciones del predictor de Smith	14
1.6 Técnicas de sintonización de PID	16
Capítulo 2: Planta virtual de fabricación de kumis del PIAI.....	21
2.1 Descripción de la planta virtual de fabricación de kumis.....	21
2.1.1 Componentes Hardware y Software de la planta virtual de fabricación de kumis.....	21
2.1.2 El proceso de fabricación de kumis	23
2.2 Identificación del comportamiento dinámico de los intercambiadores de calor de la planta de fabricación de kumis.....	28
2.2.1 Identificación del modelo para el intercambiador de aumento de temperatura	28
2.2.2 Identificación del modelo para el intercambiador de disminución de temperatura	31
2.3 Sintonización de los PID convencionales en la etapa de pasteurización de la leche	35
2.3.1 Pruebas de sintonización del controlador PID convencional para el intercambiador de aumento de temperatura	35
2.3.2 Pruebas de sintonización del controlador PID convencional para el intercambiador de disminución de temperatura	43
Capítulo 3 : Diseño e implementación del predictor de Smith para los intercambiadores de calor de la planta virtual de fabricación de kumis.....	51
3.1 Predictor de Smith simulado mediante Matlab/Simulink.....	51
3.1.1 Predictor de Smith para el intercambiador de aumento de temperatura simulado en Matlab/Simulink	51

3.1.2	Predictor de Smith para el intercambiador de disminución de temperatura simulado en Matlab/Simulink	55
3.2	Implementación del Predictor de Smith en los intercambiadores de calor de la etapa de pasteurización de la planta de fabricación de kumis	58
3.2.1	Predictor de Smith para la etapa de aumento de temperatura.....	59
3.2.2	Predictor de Smith para la etapa de disminución de temperatura	65
Capítulo 4:	Resultados y conclusiones	73
4.1	Comparación de resultados obtenidos en la etapa de aumento de temperatura	73
4.2	Comparación de resultados obtenidos en la etapa de disminución de temperatura	79
Conclusiones	84
Bibliografía	86

Lista de tablas

Tabla 1	18
Tabla 2	18
Tabla 3	19
Tabla 4	19
Tabla 5	29
Tabla 6	32
Tabla 7	36
Tabla 8	36
Tabla 9	37
Tabla 10	38
Tabla 11	40
Tabla 12	43
Tabla 13	44
Tabla 14	45
Tabla 15	47
Tabla 16	48
Tabla 17	52
Tabla 18	53
Tabla 19	54
Tabla 20	55
Tabla 21	56
Tabla 22	57
Tabla 23	60
Tabla 24	62
Tabla 25	63
Tabla 26	66
Tabla 27	68
Tabla 28	70
Tabla 29	73
Tabla 30	74
Tabla 31	75
Tabla 32	76
Tabla 33	78

Tabla 3479
Tabla 3580
Tabla 3681
Tabla 3782
Tabla 3884

Lista de figuras

Figura 1 Estructura clásica del predictor de Smith, tomado de [7]	7
Figura 2 Predictor de Smith modificado con filtro para el rechazo a perturbaciones de carga, tomado de [8].....	12
Figura 3 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de kumis, tomado de [29]	25
Figura 4. Diagrama P&ID del proceso de fabricación de kumis, [29]	26
Figura 5 Etapa de pasteurización de la leche en el software Cadsim Plus	27
Figura 6 Porcentaje de apertura de la válvula TCV 201 – 1 en el intercambiador de calor 1.....	29
Figura 7 Temperatura de salida del intercambiador de calor 1 en la prueba escalón.	30
Figura 8 Validación del modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 1	31
Figura 9 Porcentaje de apertura de la válvula TCV 202_1 del intercambiador de calor 2	32
Figura 10 Temperatura de salida del intercambiador de calor 2 obtenida en la prueba escalón.....	33
Figura 11 Validación del modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 2	34
Figura 12 Diagrama de bloques que representa la etapa de aumento de temperatura de la leche en la planta de fabricación de kumis.....	35
Figura 13 Curva de respuesta de la temperatura ante seguimiento de consigna.....	37
Figura 14 Respuesta del esfuerzo de control	37
Figura 15 Respuesta de la variable temperatura ante disturbios 1 y 2	38
Figura 16 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbio 1 y 2	38
Figura 17 Respuesta de la temperatura por el método de López Et Al., ante seguimiento de consigna.....	39
Figura 18 Respuesta del esfuerzo de control por el método de López Et Al.....	39
Figura 19 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al.	40
Figura 20 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al.	40
Figura 21 Respuesta de la temperatura por el método Lambda ante seguimiento de consigna	41
Figura 22 Respuesta del esfuerzo de control por el método Lambda.....	41
Figura 23 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método Lambda	42
Figura 24 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2 por el método de Lambda	42
Figura 25 Diagrama de bloques que representa la etapa de disminución de temperatura de la leche en la planta de fabricación de kumis	43
Figura 26 Respuesta de la temperatura por el método CHR ante seguimiento de consigna.....	45
Figura 27 Respuesta del esfuerzo de control por el método CHR	45
Figura 28 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método CHR	46
Figura 29 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2	46
Figura 30 Respuesta de la temperatura por el método de López Et Al, ante seguimiento de consigna	47

Figura 31 Respuesta del esfuerzo de control por el método de López Et Al.....	47
Figura 32 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al.	48
Figura 33 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2	48
Figura 34 Respuesta de la temperatura por el método de Lambda ante seguimiento de consigna	49
Figura 35 Respuesta del esfuerzo de control por el método Lambda.....	49
Figura 36 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método Lambda	50
Figura 37 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2	50
Figura 38 Diagrama de bloques del predictor de Smith para el intercambiador de aumento de temperatura.	52
Figura 39 Respuestas del predictor de Smith y PID convencional por el método de CHR	53
Figura 40 Respuesta del predictor de Smith y PID convencional por el Método de López Et Al	53
Figura 41 Respuesta del predictor de Smith y PID convencional por el Método de Lambda	54
Figura 42 Diagrama de bloques del Predictor de Smith de la etapa de disminución de temperatura	55
Figura 43 Respuestas del predictor de Smith y PID convencional por el método de CHR.....	56
Figura 44 Respuesta del predictor de Smith y PID convencional por el Método de la integral del error criterio IAE	57
Figura 45 Respuesta del predictor de Smith y PID convencional por el Método de Lambda	57
Figura 46 Diagrama de bloques en tiempo discreto del predictor de Smith.....	59
Figura 47 Respuesta de predictor de Smith por el método CHR ante seguimiento de consigna	60
Figura 48 Respuesta del esfuerzo de control por el método CHR	60
Figura 49 Respuesta de la variable temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método CHR.....	61
Figura 50 Respuesta del esfuerzo de control para disturbos 1 y 2	61
Figura 51 Respuesta de la temperatura por el método de López Et Al, ante seguimiento de consigna	62
Figura 52 Respuesta del esfuerzo de control por el método de López Et Al.....	62
Figura 53 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al	63
Figura 54 Respuesta del esfuerzo de control para disturbios 1 y 2	63
Figura 55 Respuesta de la temperatura por el método Lambda ante seguimiento de consigna.....	64
Figura 56 Respuesta del esfuerzo de control por el método Lambda.....	64
Figura 57 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método Lambda	65
Figura 58 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2 por el método de Lambda	65
Figura 59 Respuesta de predictor de Smith por el método CHR ante seguimiento de consigna	66
Figura 60 Respuesta del esfuerzo de control por el método CHR	67
Figura 61 Respuesta de la variable temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método CHR.....	67
Figura 62 Respuesta del esfuerzo de control para disturbos 1 y 2	68

Figura 63 Respuesta de la temperatura por el método de López Et Al, ante seguimiento de consigna	68
Figura 64 Respuesta del esfuerzo de control por el método de López Et Al.....	69
Figura 65 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al	69
Figura 66 Respuesta del esfuerzo de control para disturbios 1 y 2	70
Figura 67 Respuesta de la temperatura por el método Lambda ante seguimiento de consigna	70
Figura 68 Respuesta del esfuerzo de control por el método Lambda.....	71
Figura 69 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método Lambda	71
Figura 70 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2 por el método de Lambda	72
Figura 71 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con la sintonización CHR	73
Figura 72 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con el método de López	73
Figura 73 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con el método de Lambda	74
Figura 74 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización CHR	74
Figura 75 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización de López Et Al	75
Figura 76 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización de Lambda.....	75
Figura 77 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con la sintonización CHR	79
Figura 78 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con el método de López	79
Figura 79 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con el método de Lambda	80
Figura 80 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización CHR	80
Figura 81 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización de López Et Al	81
Figura 82 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización de Lambda.....	81

Introducción

En el campo de la industria existen muchos procesos que presentan tiempos muertos considerables en su comportamiento dinámico, ejemplo de ello son los procesos químicos, biológicos, sistemas conectados en serie o los procesos controlados en forma remota, estos retardos de tiempo pueden originarse debido a muchos factores, pueden ser debidos al transporte de energía, masa o un retraso en la comunicación y hacen que el diseño del controlador no sea una tarea fácil de llevar a cabo debido a que la acción de corrección no se puede realizar inmediatamente, convirtiéndose el retardo de tiempo en una gran limitante para el sistema de control debido a que puede conducir el sistema a la inestabilidad o a un rendimiento deficiente en el control del proceso [1].

En la práctica una forma de minimizar el impacto que genera la presencia de retardos de tiempo en un proceso industrial es disminuyendo la ganancia del controlador y esperar el resultado de actuación una vez transcurrido el retardo de tiempo, pero esto implica que se produzca una degradación en la respuesta del lazo cerrado, provocando que el sistema presente un comportamiento lento y un bajo rechazo a perturbaciones [2], debido a esto en 1957 el norteamericano Otto Smith ideó una estrategia de control para hacer frente a los procesos con retardos de tiempo, la cual denominó el Predictor de Smith y se basa en el desacoplamiento del retardo de tiempo puro del lazo de control [3], en esta estrategia el modelo del proceso se incorpora al controlador para predecir los efectos de la salida real del proceso [4], el atractivo de este compensador de tiempo muerto radica en el hecho de que elimina el retardo de tiempo de la ecuación característica del lazo cerrado, convirtiendo así el problema de diseño y ajuste de un sistema con retardo de tiempo en un sistema sin retardo de tiempo [5].

En el laboratorio de control de procesos del PIAI de la universidad del Cauca se encuentra la planta virtual de fabricación de kumis, la cual es una planta mixta que fue desarrollada bajo una plataforma de arquitectura Hardware in the Loop Simulation, y está dividida en cinco etapas que son: etapa de recepción y almacenamiento de leche, etapa de filtrado y homogenización, etapa de pasteurización, etapa de inoculación y finalmente etapa de fermentación. Entre las características principales de esta planta se encuentra que posee al menos 50 variables entre continuas y discretas y posee constantes de tiempo del orden de minutos e incluso horas, ejemplo de ello es la

etapa de pasteurización de la leche, que está dividida en tres operaciones que son (1) aumento de temperatura de la leche hasta un valor de 60 °C, (2) almacenamiento intermedio y (3) disminución de temperatura de la leche, hasta 40 °C. Esta etapa del proceso cuenta con dos intercambiadores de calor, los cuales presentan dinámicas con tiempos muertos significativamente grandes frente a la constante de tiempo dominante, en consecuencia de ello, los lazos de control Feedback de esta etapa del proceso no operan de forma óptima, limitando la máxima ganancia que se puede utilizar y presentando un comportamiento lento, lo cual lleva el sistema a volverse oscilatorio e inestable. El control de temperatura de la leche en la etapa de pasteurización se realiza mediante un PID convencional, el cual posibilita regular la variable temperatura, pero debido a la presencia de estos retardos de tiempo se dificulta la sintonización clásica de los PID que se encuentran en el PLC físico, dando como resultado que no se cumpla de forma óptima los requerimientos temporales deseados.

El presente trabajo se enfoca en la implementación de un predictor Smith en la planta virtual de fabricación de kumis del laboratorio de control de procesos del PIAI, la cual presenta una degradación en la respuesta del proceso, debido a atrasos considerables presentados en los intercambiadores de calor de la etapa de pasteurización de la leche, y realizar la comparación de su desempeño frente a un PID convencional. De este modo, el presente documento se estructura de la siguiente forma: el capítulo 1 hace referencia a generalidades, donde se abordan conceptos como el retardo de tiempo y cuáles son sus efectos en el control de un proceso industrial, los métodos de sintonización comúnmente utilizados en la industria, el predictor de Smith y sus propiedades como también se presentan algunas de sus aplicaciones. El capítulo 2 permite un acercamiento a la planta virtual de fabricación de kumis, exponiendo como se encuentra conformada, que etapas que la componen, como también la identificación del proceso de los intercambiadores de calor, y las técnicas de sintonización aplicadas para el control del proceso mediante un PID convencional. En el tercer capítulo se desarrolló la implementación del predictor de Smith en la planta virtual de fabricación de kumis y se probaron diferentes técnicas de sintonización de controladores aplicadas en el capítulo 2. Finalmente, en el capítulo 4 se discuten los resultados obtenidos tanto para el PID convencional como para el predictor de Smith.

Capítulo 1: Generalidades

1.1 Retardo de tiempo en procesos industriales

El retardo de tiempo es un fenómeno muy frecuente en el comportamiento dinámico de diversos procesos industriales, sistemas ecológicos, agrícolas, biotecnológicos, unidades de procesos, etc., donde en algunas ocasiones puede ser despreciable y por lo tanto no afecta a la dinámica del proceso, pero existen ciertas situaciones donde el retardo de tiempo es significativamente grande y dificulta el adecuado control del sistema [1].

El retardo de tiempo está definido como el retraso que ocurre desde el instante en que se emite una señal de salida del controlador hasta que la variable de proceso medida comienza a responder, de ahí que durante este intervalo de tiempo la planta no responde en absoluto a las señales de entrada [6]. Existen diferentes motivos por los cuales un sistema físico puede presentar estos retardos de tiempo, pueden deberse bien sea por las características intrínsecas del sistema o por factores externos que intervienen en él [7]. Por características propias del sistema puede originarse, por ejemplo, por el tiempo necesario para transportar masa, energía o información o por la acumulación de desfases en un gran número de sistemas de bajo orden conectados en serie, lo cual es una gran limitante para lograr un control adecuado del proceso, también puede originarse a causa del tiempo que requieren los sensores para entregar los resultados de las mediciones o por el tiempo requerido para el cálculo de los algoritmos de control en los controladores, es por esto que durante el diseño del controlador este debe ser tenido en cuenta, dado que es una fuente de inestabilidad para los lazos de control [8].

El efecto del retardo de tiempo sobre el proceso está relacionado directamente con la relación entre la constante de tiempo del sistema y el tamaño del retardo, en ese sentido, si el retardo es pequeño en comparación con la constante de tiempo del sistema, el controlador se puede diseñar haciendo una aproximación del retardo. Sin embargo, cuando el retardo de tiempo es significativamente grande en comparación con la constante de tiempo del sistema, el problema se puede tratar mediante el uso de un esquema de compensación de retardo de tiempo [9]. La mayoría de procesos industriales presentan tiempos muertos que pueden ser originados por diferentes causas, entre estas se encuentran:

- La distancia física entre el controlador y el instrumento de medición.

- El tiempo requerido por los actuadores para producir un cambio, por ejemplo, las válvulas o compuertas muy pesadas.
- El comportamiento dinámico intrínseco de algunas plantas, por ejemplo, el tiempo requerido por las reacciones químicas para obtener el producto deseado en los reactores químicos.
- El tiempo de procesamiento requerido por los controladores para obtener la señal de control.
- El tiempo necesario para la transmisión de información en las redes de comunicación.
- El tiempo que tarda un fluido en circular de un punto a otro a través de tuberías, también conocido como retardo distancia-velocidad [10], que como consecuencia puede introducir un tiempo muerto al lazo de control, por ejemplo, si en un proceso se cambia el valor de una concentración o de temperatura en un extremo de la tubería y el sensor está ubicado en el otro extremo, este cambio de valor de la variable no se detectará hasta que el material haya recorrido a lo largo de la tubería, en este caso el tiempo que tarda el material en recorrer la tubería es el tiempo muerto.
- El tiempo muerto también se puede originar cuando la velocidad del flujo que circula por las tuberías es lo suficientemente baja ocasionando un retraso de tiempo significativo [7].

De igual manera puede ser debido a que en los lazos de control existen instrumentos de medición que pueden tomar un determinado tiempo para arrojar los resultados de la medición, esto rara vez es un problema para la sintonización, pero indica que cada lazo de control tiene al menos un tiempo muerto [7].

En ciertas situaciones el problema del tiempo muerto del proceso se puede solucionar mediante un cambio de diseño, es decir, ubicar el sensor más cerca de la acción o cambiar por un dispositivo de respuesta más rápida, pero existen ocasiones donde el tiempo muerto es una característica permanente del lazo de control y únicamente se puede abordar el problema mediante el desajuste del controlador o con la implementación de un compensador de tiempo muerto [7].

El retardo de tiempo en un sistema de control puede clasificarse de dos formas: Siendo un retardo de tiempo dominante cuando la relación $\frac{L}{\tau} > 1$.

Donde L es el retardo de tiempo y τ es la mayor constante de tiempo de la planta.

En caso contrario, es decir, donde $\frac{L}{\tau} < 1$, el retardo de tiempo es clasificado como no dominante [11].

Cuando el retardo de tiempo es conocido y no es dominante es posible utilizar controladores convencionales tipo PID, dando como resultado un funcionamiento aceptable del sistema de control. Pero, en caso contrario, cuando el proceso presenta un retardo de tiempo dominante el control mediante el uso de un controlador PID convencional no es efectivo, debido a que el tiempo muerto del proceso introduce una fase negativa, la cual reduce la frecuencia crítica y el margen de fase, limitando la máxima ganancia que se puede utilizar, y la velocidad de respuesta del sistema de control, que como consecuencia puede ocasionar inestabilidad del sistema o un aumento significativo del tiempo de establecimiento de la respuesta temporal [11]. Las anteriores circunstancias hacen necesario recurrir al desajuste del controlador tipo PID, en otras palabras, tener una ganancia proporcional baja y un tiempo integral grande para poder asegurar la estabilidad del sistema en lazo cerrado, pero este desajuste del controlador ocasiona que el sistema en lazo cerrado presente un comportamiento lento y un bajo rechazo a perturbaciones [10].

En este tipo de procesos que presentan un retardo de tiempo significativamente grande se incrementa la complejidad del diseño de control, puesto que las perturbaciones no son detectadas a tiempo y la acción de control que depende de la oportuna medición no ocurre en el momento preciso, lo que ocasiona una respuesta retardada de la planta a la señal de control, causando una reacción del controlador que no corresponde con la requerida, originando en consecuencia la pérdida de estabilidad del sistema de control [6]. Algunos ejemplos de procesos con retardo de tiempo pueden ser las columnas de destilación o las plantas térmicas, entre las que se destacan los intercambiadores de calor [12], también se pueden originar retardos de tiempo en las plantas conectadas en serie, en la distribución de agua en canales de riego, en los hornos de calentamiento de combustible o en las calderas y en las plantas con fases de incubación como el caso de los fermentadores [6], entre otros.

Para concluir, se puede decir que el retardo de tiempo es un fenómeno típico que hace parte de los procesos reales, siendo más del 60% de los problemas observados en la industria debidos al efecto de los retardos de tiempo, así como las perturbaciones sobre los sistemas de control, lo cual trae como consecuencia la reducción del margen de fase del sistema, que limita la máxima

ganancia que se puede utilizar, así como la velocidad de respuesta del sistema de control, de tal manera que si la fase está por debajo de -180° el sistema comenzará a volverse oscilatorio o inestable [6].

Una vez vistos los aspectos principales acerca del retardo de tiempo, como son sus causas y sus efectos en un proceso industrial, a continuación, se describe el compensador de tiempo muerto conocido como el predictor de Smith, su estructura y algunas aplicaciones de este en la industria.

1.2 El predictor de Smith

Como ya se vio en el apartado anterior, los retardos de tiempo son fenómenos típicos de los procesos reales, y pueden estar provocados por el transporte de masa, de energía o de información, cuando estos retardos de tiempo son muy grandes la acción de control que depende de una oportuna medición no ocurre en el momento indicado y demora en hacer efecto sobre el comportamiento dinámico del proceso, trayendo como consecuencia que la reacción del controlador no corresponda con la requerida y se genere inestabilidad en el sistema de control o un aumento significativo del tiempo de establecimiento de la respuesta temporal [6].

Una solución para tratar los problemas generados por el retardo de tiempo, es mediante el uso del compensador de tiempo muerto más conocido como el predictor de Smith, que fue desarrollado por el norteamericano Otto J.M. Smith en 1957, como una primera estructura compensadora de tiempo muerto para sistemas de una sola entrada y una sola salida con el fin de mejorar el rendimiento de los controladores PI o PID en procesos que presenten tiempos muertos grandes [13], su principal objetivo es compensar los efectos negativos causados por los tiempos muertos presentados en los sistemas y lograr un adecuado control de las variables del proceso [7].

El predictor de Smith plantea como objetivo de diseño lograr que la respuesta del sistema con retardo tenga las mismas características dinámicas del sistema sin retardo, por ejemplo, que tenga la misma respuesta a una entrada escalón, pero desplazada en el tiempo el valor del retardo, en ese caso es posible afirmar que se cumple con el principio de Smith. En ese sentido, esta estructura de control hace uso de un modelo del proceso sin el retraso de tiempo para predecir la salida del proceso y este nuevo proceso es controlado por un controlador convencional [14], por ello consta de dos lazos de control, el lazo externo, que sirve para realimentar los errores de

modelado y el lazo interno, cuya función es estimar la respuesta del proceso sin retardo de tiempo [1].

El predictor de Smith es una estructura compensadora de tiempo muerto que presenta tanto ventajas como desventajas, su ventaja principal radica en que el tiempo muerto se toma efectivamente fuera del lazo de control en la función de transferencia que relaciona la salida del proceso con la referencia, pero así mismo tiene ciertas desventajas como por ejemplo que presenta una falta de robustez a las variaciones en los parámetros del proceso [13]. En la figura 1 se presenta la arquitectura del predictor de Smith convencional, que está compuesta por dos partes fundamentales, por un controlador primario $C(s)$ y la parte del predictor, quien a su vez está conformado por un modelo del proceso sin retardo de tiempo $G_n(s)$ también llamado modelo rápido, el cual hace posible predecir la salida de la planta y está conectado en paralelo a la misma, y compuesto también por un modelo de retardo de tiempo $e^{-L_n s}$, cabe aclarar que, si el modelo es exacto entonces la señal \hat{y} es una predicción de lo que sería la salida sin el retardo, esto significa que al emplear el modelo se está realizando una predicción de la salida [7].

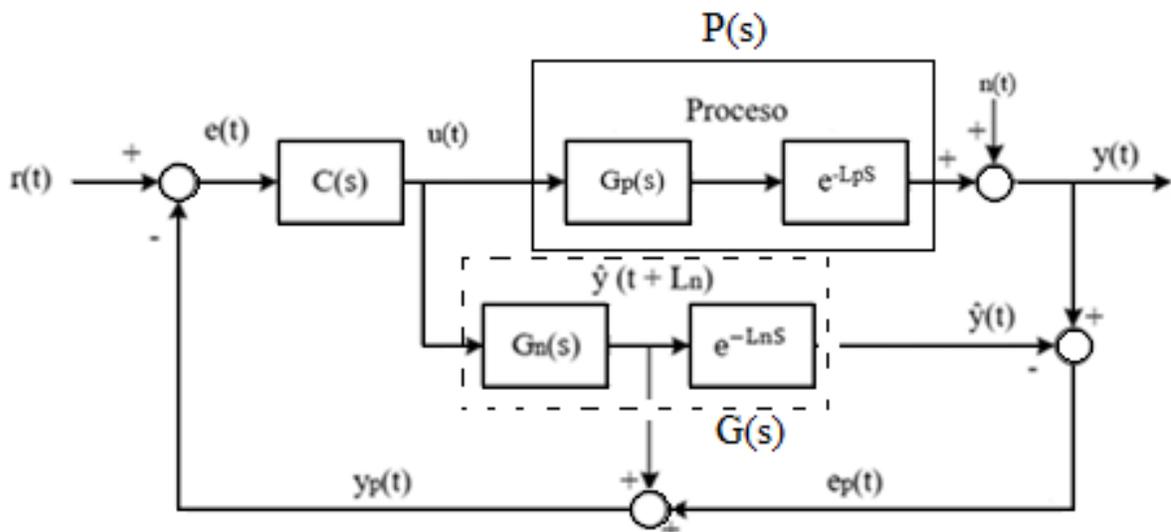


Figura 1 Estructura clásica del predictor de Smith, tomado de [7]

En la figura 1 se observa la estructura del predictor de Smith convencional, la cual posee las siguientes características:

- $r(t)$: Representa la señal de referencia
- $C(s)$: Representa el controlador

- $P(s)$: Representa el proceso real
- $u(t)$: Representa la señal de control
- $n(t)$: Representa una perturbación
- $y(t)$: Representa la señal de salida
- $y_p(t)$: Representa la predicción de la salida L_n instantes de tiempo por delante

Y en paralelo al proceso al proceso existe un modelo de dicho proceso, $G(s)$ que consiste en una función de transferencia estable racional $G_n(s)$ y de un tiempo muerto L_n , y puede expresarse según la ecuación 1 :

$$G(s) = G_n(s) e^{-L_n s} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Aquí, $G_n(s)$: representa el modelo sin retardo y es utilizado para calcular la predicción en lazo abierto y $e^{-L_n s}$: representa el retardo de tiempo del proceso.

En esta estructura se realimenta la predicción de salida del proceso calculada usando el modelo de la planta sin retardo $G_n(s)$ para aumentar el desempeño del sistema. El error ($e_p(t) = y(t) - \hat{y}(t)$) viene dado por la diferencia entre la salida del proceso $y(t)$ y el modelo que incluye el retardo de tiempo $\hat{y}(t)$, quien se realimenta para corregir errores de modelado y perturbaciones de carga [15].

De acuerdo con la figura 1, la función de transferencia de lazo cerrado está representada por la ecuación 2,

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s) G_p(s) e^{-L_p s}}{1 + C(s) G_n(s) + C(s) [G_p(s) e^{-L_p s} - G_n(s) e^{-L_n s}]} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Cabe destacar que si el modelo del sistema identificado es igual al proceso real implica que:

$$P(s) = G(s) = G_p(s) e^{-L_p s} = G_n(s) e^{-L_n s} \quad (\text{Ecuación 3})$$

En consecuencia, la ecuación 2 queda reducida a la ecuación 4:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s) G_p(s)}{1 + C(s) G_n(s)} e^{-L_p s} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Esto también implica que $e_p(t) = y(t) - \hat{y}(t) = 0$, por lo tanto, la realimentación consiste sólo de la salida del modelo sin retardo. Es así como la ecuación característica, que es el denominador en lazo cerrado $1 + C(s) G_n(s) = 0$ queda libre de atraso, de esta manera el tiempo

muerto se aísla y se compensa y puede ser ignorado para los propósitos del diseño del controlador, puesto que el mismo no aparece en la ecuación característica del sistema, sin embargo, el predictor de Smith es poco robusto y puede presentar inestabilidad debido a errores de modelado [15].

Es necesario subrayar que $C(s)$ es un controlador PI o PID convencional que se puede ajustar mucho más debido a la eliminación del tiempo muerto del lazo, si no hay errores o perturbaciones de modelado el error entre la salida del proceso actual y la salida del modelo será nulo, lo cual quiere decir que la señal de salida del predictor será la salida sin retardo de tiempo del proceso, en estas condiciones el controlador $C(s)$ se puede sintonizar al menos en el caso nominal (sin errores de modelado), si el proceso no tuvo retardos de tiempo [1].

En base a lo anteriormente mencionado, es posible resumir que la estructura del predictor de Smith para el caso nominal (es decir, sin errores de modelado) tiene tres ventajas fundamentales que son: compensación de retardo de tiempo, predicción y compensación dinámica, de ese modo, el predictor de Smith constituye sin lugar a dudas un compensador de tiempo muerto muy utilizado en el control de plantas con retardo de tiempo debido a su elevada efectividad y simple implementación, cabe resaltar que la idea de esta estructura surgió por la necesidad de mejorar el desempeño de los controladores clásicos (PI o PID) en el control de plantas con retardos de tiempo dominantes [16].

1.3 Propiedades del predictor de Smith

La arquitectura del predictor de Smith proporciona varios beneficios en su aplicación ya que brinda una mejor estructura al controlador para la compensación del tiempo muerto, también tiene una buena respuesta de punto de ajuste porque elimina los retardos internos de la función de transferencia de lazo cerrado, por lo cual recibió una atención considerable durante los últimos años [14]. A continuación, se describen las propiedades que presenta esta estructura:

- Elimina el retardo de tiempo de la ecuación característica del sistema de control en lazo cerrado ($1 + C(s)G_n(s) = 0$) cuando su modelo interno describe de forma perfecta el comportamiento dinámico de la planta, es decir, que saca el retardo de tiempo del lazo de control, de este modo el problema de diseño y análisis de sistemas de control de procesos con

retardo de tiempo se realiza como si no existiera dicho retardo, lo cual es muy importante para el diseño y ajuste del controlador [16].

- Anticipa la señal de salida del modelo rápido ($\hat{y}(t)$) a la señal de salida de la planta real ($y(t)$) en un periodo de tiempo L_n , es decir, $\hat{y}(t) = y(t + L_n)$ [11].
- Controla de forma efectiva procesos estables con retardo de tiempo dominante cuando se tiene el conocimiento preciso del modelo de la planta [11].
- Presenta una elevada efectividad y simple implementación, por esto es el compensador de tiempo muerto más utilizado en el control de plantas con retardo de tiempo [16].

A pesar del gran beneficio que proporciona a los procesos con un retardo de tiempo dominante el predictor de Smith encontró aplicaciones limitadas en todas las industrias de procesos y es difícil obtener un rendimiento satisfactorio para el predictor de Smith convencional debido a que presenta limitaciones tales como:

- El predictor de Smith convencional mejora la respuesta del punto de ajuste, pero tiene un bajo rendimiento ante perturbaciones de entrada (carga) para procesos con dinámica lenta porque los polos del proceso de lazo abierto originales permanecen sin cambios, sin embargo esto puede rectificarse mediante diseños alternativos [14].
- Permite mayores ganancias del controlador sin que el sistema se vuelva inestable, pero el sistema de circuito cerrado ahora es más sensible a los errores de modelado [7].
- El predictor de Smith convencional presenta una deficiencia importante en comparación con el controlador PI y es la falta de robustez a las variaciones en los parámetros del proceso [13].
- La técnica de control del predictor de Smith tiene algunas limitaciones, tales como, que la respuesta de circuito en lazo abierto es más rápida que la respuesta de circuito cerrado y si el proceso tiene al menos un polo inestable, el sistema no se vuelve estable internamente [17].
- Otra desventaja del predictor de Smith es que su correcto funcionamiento depende del conocimiento exacto del modelo de la planta, lo que no siempre es una tarea sencilla debido a que en general no se conoce la estructura del proceso (cuantas constantes de tiempo, etc), sólo se dispone de las respuestas de tiempo entrada – salida, y los modelos habituales pueden no ser siempre adecuados para el proceso, esto significa que cualquier imprecisión o

incertidumbres en el modelo conlleva a una degradación de la respuesta temporal del sistema de control [3].

- La efectividad del Predictor de Smith se degrada cuando los procesos se encuentran sometidos al efecto de perturbaciones externas no medibles [11].

Con el tiempo, se han superado algunas limitaciones, debido a mejoras realizadas al predictor, tales como, la inserción de un filtro cuya finalidad es mejorar la robustez del sistema, el rechazo del ruido y asegurar la estabilidad interna del sistema para plantas inestables, así, el predictor de Smith se ha convertido en una poderosa herramienta de control en diferentes plantas [17].

1.4 Predictor de Smith filtrado

Dado que no es posible aplicar el predictor de Smith convencional en sistemas inestables o integradores y que también presenta una reducida robustez frente a incertidumbres en el modelo de la planta, a finales de la década de los noventa se realizaron modificaciones en la estructura del predictor de Smith con el propósito de garantizar la estabilidad del sistema, mejorando de manera significativa las desventajas presentadas en la estructura convencional [9]. Es así como se adicionó el uso de un filtro pasa bajo en la salida de predicción de la estructura, cuyo objetivo era reducir las oscilaciones que se presentaran entre el proceso real y el modelo de la planta, dado que al reducir estas oscilaciones permitía mejorar la dinámica de rechazo a perturbaciones y aumentar la robustez, en otras palabras, proporcionar un control adecuado ante presencia de disturbios, como también en el caso de que el modelo identificado del proceso no fuera exactamente el mismo que el proceso real y además permitía cancelar los polos integradores o inestables que pudieran presentar en el proceso para garantizar la estabilidad interna de la estructura de control [18].

El predictor de Smith filtrado es una estructura de compensación de tiempo muerto que brinda una solución a los inconvenientes típicos presentados en el predictor de Smith convencional, gracias a las características presentadas en este es posible calcular un controlador teniendo en cuenta robustez, mejorando las propiedades del rechazo a perturbaciones, y desacoplando el punto de ajuste y las respuestas de perturbación, por lo tanto, todos los inconvenientes de la estructura clásica se consideran en el diseño de este, utilizando una sola estructura que puede

aplicarse en plantas estables, inestables o integradoras [18]. A continuación, se presenta la estructura del predictor de Smith filtrado.

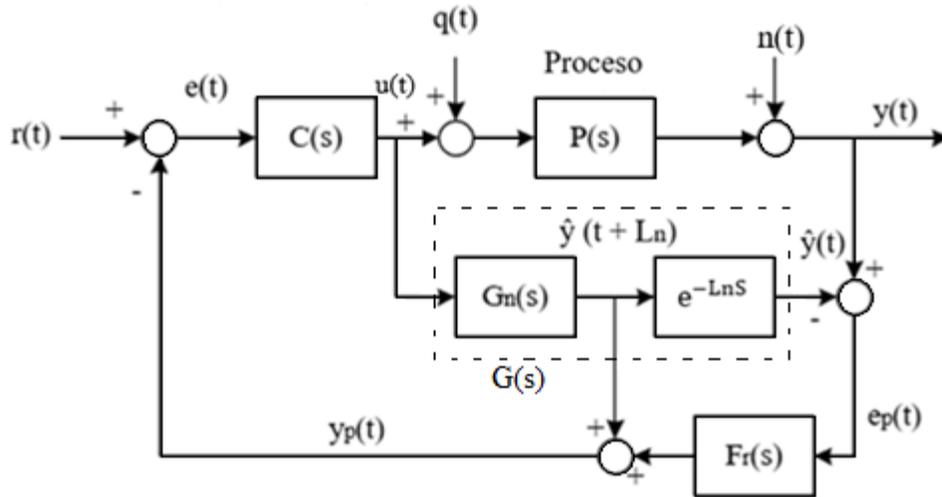


Figura 2 Predictor de Smith modificado con filtro para el rechazo a perturbaciones de carga, tomado de [8]

En la figura 2 se presenta la estructura del predictor de Smith filtrado, en la cual se pueden observar las siguientes características:

- $e(t)$ es la señal de error
- $q(t)$ es una perturbación de carga
- $P(s)$ representa la planta, que puede ser una planta estable, integradora o inestable
- $F_r(s)$ es el filtro utilizado para mejorar las propiedades del predictor de Smith
- $e_p(t)$ es el error de predicción
- $\hat{y}(t)$ es la señal de salida del modelo

En esta estructura se debe tener en cuenta que $G(s) = G_n(s) e^{-L_n s}$ corresponde al modelo del proceso, en el cual $G_n(s)$ es el modelo libre de tiempo muerto y L_n es el retardo de tiempo. Seguidamente en las ecuaciones 5, 6 y 7 se presentan las funciones nominales de transferencia en lazo cerrado para las respuestas a la referencia, a perturbaciones de carga y a perturbaciones de salida respectivamente.

$$H_{yr}(s) = \frac{y(t)}{r(t)} = \frac{C(s)G(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$H_{yq}(s) = \frac{y(t)}{q(t)} = G(s) \left[1 - \frac{C(s)G(s)F_r(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \right] \quad (\text{Ecuación 6})$$

$$H_{yn}(s) = \frac{y(t)}{n(t)} = 1 - \frac{C(s)G(s)F_r(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde

- $H_{yr}(s)$ (Ecuación 5) representa el lazo cerrado de la salida $y(t)$ con respecto a la referencia $r(t)$, la cual es una ecuación característica que queda libre de atraso.
- $H_{yq}(s)$ (ecuación 6) es la función de transferencia de lazo cerrado para la salida $y(t)$ con respecto a $q(t)$ que es una perturbación de carga.
- H_{yn} (ecuación 7) es la función de transferencia de lazo cerrado para la respuesta $y(t)$ con respecto a una perturbación n en la salida.

Cabe resaltar que, en los últimos 25 años se han propuesto numerosas extensiones y modificaciones al predictor de Smith con el fin de obtener las siguientes características:

- Mejorar las capacidades reguladoras del predictor para perturbaciones mensurables o inconmensurables [8].
- Permitir su uso en plantas inestables [8].
- Mejorar la robustez [8].

Con respecto al diseño del filtro se deben cumplir dos condiciones:

- El filtro debe ser diseñado para que cancele las dinámicas lentas del lazo abierto y polos no deseados.
- El filtro debe tener ganancia unitaria.

Cabe destacar que, el predictor de Smith filtrado presenta dos propiedades fundamentales:

- El equilibrio entre la robustez y el rendimiento de rechazo de perturbaciones puede definirse mediante el filtro de robustez $F_r(s)$ sin efecto sobre la respuesta de seguimiento del punto de ajuste nominal [19].
- El predictor de Smith filtrado puede ser aplicado para asegurar la estabilidad interna de procesos integradores e inestables de tiempo muerto [19].

Anteriormente se presentó el predictor de Smith convencional y se describieron sus propiedades, como también su estructura modificada, ahora se pasará a mencionar algunas de las aplicaciones que ha tenido este compensador de tiempo muerto en la industria.

1.5 Aplicaciones del predictor de Smith

Una de las aplicaciones del predictor de Smith más frecuente es en el control de la temperatura de un proceso, como por ejemplo en la industria farmacéutica [11], donde se utilizan reactores químicos para la preparación de medicamentos inyectables, aquí se cuenta con una fase de calentamiento de los ingredientes para facilitar la solubilidad de la mezcla, y debido a que deben ser productos de elevada calidad, se requiere de un control preciso y fiable de la temperatura, pero los reactores químicos son plantas que presentan un comportamiento dinámico complejo donde se observan retardos de tiempo dominantes y diferentes tipos de perturbaciones, por lo cual el uso de estrategias basadas en PI y PID convencionales no son efectivas, debido a esto se implementó un predictor de Smith modificado, con el cual se obtuvo un mejor desempeño del sistema y un comportamiento robusto frente al efecto de perturbaciones. Otra aplicación de este compensador de tiempo muerto es en [17] donde se expone la aplicación de un predictor de Smith modificado para tratar el problema presentado en un convertidor de potencia CC-CC cuya función es elevar el nivel de voltaje de CC de entrada a un nivel de voltaje de salida más alto, y es muy utilizado en aplicaciones como fuentes de alimentación, aplicaciones de LED, sistemas de alimentación ininterrumpida, convertidores para energías renovables, entre otras; sin embargo el modelo de señal pequeña de este convertidor es un sistema de fase no mínima, que presenta una respuesta de subimpulso, un error de estado estable y una respuesta transitoria lenta debido al cero en el semiplano derecho, por tanto, se vio la necesidad de implementar la estructura del predictor de Smith filtrado, con el fin de corregir los anteriores inconvenientes, la cual proporcionó un factor de amortiguación más alto para los polos de lazo cerrado con una respuesta de tiempo rápida.

Otra aplicación de esta estructura es en [1] donde se utilizó un predictor de Smith con un controlador Fuzzy para el proceso de blanqueo de glicerina, el objetivo era eliminar el color del pigmento de la materia prima, en este caso también se realizó un control de temperatura de la glicerina para obtener un producto de buena calidad y con ayuda de esta técnica de control se

obtuvo un óptimo funcionamiento del sistema. También se encontraron trabajos como en [20], donde se estudió la eficiencia de un sistema de control con un predictor de Smith utilizando un simulador basado en un controlador Owen, y en [7] el proceso a tratar fue un intercambiador de calor tubular en el que el agua fría se calienta con agua caliente y es un sistema no lineal que presenta un retardo de tiempo dominante, en este trabajo inicialmente se implementó un controlador PID convencional, pero no se logró una respuesta eficaz ante un sistema con retardos prolongados, debido a esto se empleó un predictor de Smith para controlar la temperatura de salida del fluido frío variando el caudal de entrada de fluido caliente, de esta manera se logró una respuesta adecuada y un control eficiente del sistema. Existen también aplicaciones de este compensador de tiempo muerto en campos como el de las redes inalámbricas que presentan retardos, como es el caso de [21] donde trata acerca de los sistemas de control en red inalámbricos, los cuales han sido utilizados ampliamente en aplicaciones como en operaciones de rescate, automatización industrial inalámbrica o en sistemas de información inalámbricos para mejorar la eficiencia de combustible en los vehículos, etc., donde presentan problemas como la gestión de la pérdida de datos y retrasos, que generan una degradación del rendimiento del sistema de control, por estas razones se propuso un predictor de Smith dinámico, que arrojó buenos resultados en cuanto a un mejor desempeño dinámico y robustez del sistema. En [22] se realizó el control de temperatura en un sistema complejo de calefacción, ventilación y aire acondicionado, que es un sistema utilizado para controlar la temperatura y humedad del aire en los edificios, aquí se implementó un predictor de Smith en combinación con un controlador PI de autoajuste donde se lograron resultados satisfactorios en el control de temperatura. En [23] el sistema de control a tratar fue una trituradora de cono, el cual es un gran sistema inercial que presenta no linealidades y un retardo de tiempo puro, debido a esto se implementó un PID difuso con un predictor de Smith mejorado, este diseño combinó un PID Fuzzy con un buen rendimiento dinámico y buena robustez, y utilizó un predictor de Smith mejorado que logró superar los efectos de los cambios en los parámetros del objeto controlado.

Como se vio anteriormente el predictor de Smith es un algoritmo muy conocido y utilizado para la compensación de tiempo muerto en procesos industriales, el cual se diseñó inicialmente para mejorar el rendimiento de los controladores PID, basando su éxito en su simplicidad, sin embargo, la estructura original presentó algunas limitaciones tales como, que no se puede usar en procesos integradores e inestables, debido a esto se propusieron numerosas extensiones y

modificaciones del predictor de Smith para hacer frente a las dificultades presentadas y logrando mejores resultados [24].

Después de visto el predictor de Smith, su estructura modificada y las ventajas y desventajas que presenta cada uno de estos, como también diferentes aplicaciones que ha tenido este compensador de tiempo muerto, a continuación, se expone un resumen de las principales técnicas de sintonización de controladores utilizadas en la industria.

1.6 Técnicas de sintonización de PID

El controlador PID (Proporcional - Integral - Derivativo) desde su introducción al mercado en 1940, hasta la actualidad ha sido ampliamente aceptado en la industria para controlar diferentes tipos de procesos, esto se debe en gran parte a su simplicidad estructural, su rendimiento, robustez y su amplia gama de aplicabilidad. El objetivo principal de su funcionamiento es obtener un bajo sobreimpulso y un tiempo de asentamiento mínimo, y para lograrlo dispone de tres parámetros K_p , T_i , y T_d que deben ser calculados y ajustados de manera precisa para obtener un buen resultado de control, tal que cumpla con las especificaciones de rendimiento del sistema [25]. Esta tarea de encontrar los parámetros de sintonización del controlador tal que este alcance de forma óptima su objetivo de control, se hace más fácilmente utilizando las reglas de ajuste de PID que diferentes autores han desarrollado a lo largo de estos años, las cuales en su mayoría hacen uso de un modelo de primer orden más retardo de tiempo, como base para determinar sus parámetros de ajuste, esto se debe al hecho de que este modelo es fácil de obtener a partir de los datos del proceso y también tiene la capacidad de capturar las características dinámicas esenciales del mismo [26].

Debido a que en los procesos industriales reales se presentan diferentes tipos de no linealidades y demoras de tiempo, que causan dificultad a la hora de realizar el ajuste del controlador, se han desarrollado diferentes técnicas de sintonización de controladores, cuyo objetivo principal consiste en la determinación del ajuste de los parámetros del controlador de acuerdo con algún criterio de desempeño establecido para obtener un control aceptable y robusto, de modo que el tiempo de estabilización y sobreimpulso del sistema sea lo más bajo posible y el sistema presente un funcionamiento estable tanto en estado estable como en estado transitorio, pero para realizar este proceso de ajuste del controlador, en primer lugar, se debe identificar la

dinámica del proceso y a partir de esta se determinan los parámetros K_p , T_i y T_d , cabe resaltar que, para modelos de orden superior el ajuste del controlador PID es difícil de obtener, por lo tanto, este tipo de modelos debe reducirse a una estructura de modelo inferior adecuada (modelo de primer orden más tiempo muerto FOPDT) y luego los métodos de ajuste del controlador se pueden realizar de una manera más eficiente [25].

La mayoría de los métodos de sintonización del controlador están diseñados para funcionar con el modelo FOPDT, el cual es una aproximación de sistemas no lineales, que se genera a partir de la curva de reacción del proceso obtenida mediante una prueba en lazo abierto, con el controlador en modo manual y con el sistema situado en un punto de operación deseado, y se representa de la siguiente manera,

$$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (\text{Ecuación 8})$$

Donde K es la ganancia de estado estable del sistema, τ es la constante de tiempo y L es el tiempo de retardo del sistema, estos parámetros del proceso permiten calcular los parámetros del controlador K_p , T_i y T_d [25]. A continuación, se presentan las funciones de transferencia del controlador PID ideal y PID paralelo.

Función de transferencia del PID ideal

El controlador PID “ideal” es el normalmente utilizado para explicar el funcionamiento de un PID, en esta ecuación la ganancia K_p está afectando a las tres acciones de control, es también llamada ecuación ISA, y se representa de la siguiente manera,

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde K_p , T_i , y T_d son la ganancia proporcional, el tiempo integral, y el tiempo derivativo, respectivamente [27].

Función de transferencia del PID paralelo

En la ecuación paralela cada acción (K_p , T_i , T_d) es independiente una de la otra, es decir, que si se ajusta un parámetro, este sólo afecta una acción de control [27].

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde: $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ (Ecuación 11) y $K_d = K_p T_d$ (Ecuación 12)

Una vez vistas las funciones de transferencia del controlador PID ideal y PID paralelo se presenta un resumen de diferentes métodos de sintonización de controladores utilizados a lo largo de la historia.

En la tabla 1 se muestra un resumen de los métodos clásicos de sintonización PID, tales como el método propuesto por Ziegler y Nichols, el método de Cohen – Coon y el método propuesto por Chien, Hrones y Reswick.

Tabla 1

Resumen de diferentes métodos de sintonización del controlador PID

Métodos de sintonización	Control	K_p	T_i	T_d	Descripción
Ziegler y Nichols	P	$\frac{\tau}{KL}$			0.1 $\leq \frac{L}{\tau} \leq$ 0.3 o hasta 1.4 pero no garantiza la robustez del sistema.
(Método 1)	PI	$0.9 \frac{\tau}{KL}$	3L		
	PID	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	2L	0.5L	
Cohen y Coon	P	$\frac{\tau}{KL} \left(1 + \frac{L}{3\tau}\right)$			Sintonía para retardos elevados
	PI	$\frac{\tau}{KL} \left(0.9 + \frac{L}{12\tau}\right)$	$\frac{L(30\tau + 3L)}{9\tau + 20L}$		$\frac{L}{\tau} > 0.3$
	PID	$\frac{\tau}{KL} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau}\right)$	$\frac{L(32\tau + 6L)}{13\tau + 8L}$	$\frac{4L\tau}{11\tau + 2L}$	$0.6 < \frac{L}{\tau} < 4.5$
Chien, Hrones y Reswick (CHR)	P	$\frac{0.3\tau}{KL}$			Criterio de desempeño, la respuesta más rápida posible sin sobreimpulso
	PI	$\frac{0.6\tau}{KL}$	4L		
	PID	$\frac{0.95\tau}{KL}$	2.375L	0.421L	
CHR (Chien Hrones y Reswick) 20% sobreimpulso	P	$\frac{0.7\tau}{KL}$			Criterio de desempeño, la respuesta más rápida posible con 20% de sobreimpulso.
	PI	$\frac{0.6\tau}{KL}$	τ		
	PID	$\frac{0.95\tau}{KL}$	1.357 τ	0.473L	

En la tabla 2 se presenta otro método de sintonización de controladores disponible, denominado sintonía Lambda, la cual entrega una respuesta sin sobreimpulso, ver tabla 2 [28].

Tabla 2

Método de Sintonización Lambda (Smith y Corripio 2005)

Sintonización Lambda	Control	λ	λ'
$K_p = \frac{\tau}{K(\lambda + L)}$	P	0	L
$T_i = \tau$	PI	L	2L
$T_d = \frac{L}{2}$	PID	0.2L	1.2L

Existen de igual manera métodos óptimos de diseño del controlador que consideran el error al ajustar los parámetros del controlador PID, estos parámetros óptimos se definen en términos del error [25], estos se presentan en la tabla 3.

Tabla 3

Criterios de error de integración mínimo

Criterios de error de integración mínimo	
Integral del valor absoluto del error (IAE)	$IAE = \int_0^{\infty} e(t) dt$
Integral del valor absoluto del error ponderado en tiempo (ITAE)	$ITAE = \int_0^{\infty} t e(t) dt$

El método propone emplear los criterios de desempeño de la integral del error por un periodo de tiempo que sea suficiente para eliminar el error en régimen permanente [25]. En la tabla 4 se presentan las reglas de ajuste óptimas para el rechazo a perturbaciones de carga, estas reglas se utilizan para encontrar el valor de ajuste óptimo de los parámetros del controlador PID.

Tabla 4

Resumen de los métodos de ajuste óptimos (rechazo de perturbaciones)

Métodos de ajuste óptimos (Rechazo de perturbaciones)							
$K_p = \frac{1}{K} \left(A \left(\frac{L}{\tau} \right)^B \right)$		$T_i = \frac{\tau}{C \left(\frac{L}{\tau} \right)^D}$		$T_d = \tau \left(E \left(\frac{L}{\tau} \right)^F \right)$			
Constantes para criterio de López							
Controlador	Criterio	A	B	C	D	E	F

PI	IAE	0.984	-0.986	0.608	-0.707		
PI	ITAE	0.859	-0.977	0.674	-0.68		
PID	IAE	1.435	-0.921	0.878	-0.749	0.482	1.137
PID	ITAE	1.357	-0.947	0.842	-0.738	0.381	0.995
Constantes para Kaya y Sheib - Control Clásico							
PID	IAE	0.98089	-0.76167	0.91032	-1.05211	0.59974	0.89819
PID	ITAE	0.77902	-1.06401	1.14311	-0.70949	0.57137	1.03826
Constantes Kaya y Sheib – Control no interactuante							
PID	IAE	1.31509	-0.8826	1.2587	-1.3756	0.5655	0.4576
PID	ITAE	1.31760	-0.7937	1.12499	-1.42603	0.49547	0.41932

En la sección anterior se presentó un resumen de los métodos de sintonización de controladores PID para lazos de control que operan como reguladores, estos métodos hacen uso de los parámetros del modelo de primer orden más tiempo muerto obtenido mediante la identificación del proceso. A continuación, se presenta la información concerniente a la planta virtual de fabricación de kumis.

Capítulo 2: Planta virtual de fabricación de kumis del PIAI

En el capítulo 2 se abarca la información concerniente a la planta virtual de fabricación de kumis, que se encuentra ubicada en el laboratorio de control de procesos del programa de Ingeniería en Automática Industrial (PIAI) de la universidad del Cauca. En la primera parte de este capítulo se presenta la descripción de la planta de fabricación de kumis, sus componentes Hardware y software y las diferentes etapas que componen el proceso de fabricación de kumis, centrándose en la etapa de pasteurización de la leche, donde se presentará tanto su diagrama de flujo como su diagrama P&ID. La segunda parte del documento corresponde a la identificación del modelo del proceso de los intercambiadores de calor de la etapa de pasteurización de la leche, y posteriormente se muestran los resultados de las pruebas de sintonización realizadas en el PID convencional de las etapas de aumento y disminución de temperatura de la leche y su respuesta ante la presencia de disturbios.

2.1 Descripción de la planta virtual de fabricación de kumis

2.1.1 Componentes Hardware y Software de la planta virtual de fabricación de kumis

La planta virtual de fabricación de kumis se encuentra ubicada en el laboratorio de control de procesos del PIAI de la Universidad del Cauca, es una planta mixta que está diseñada para producir un Batch de 12000 litros de kumis, se encuentra dividida en cinco etapas que son: etapa de recepción y almacenamiento de la leche; etapa de filtrado y homogenización, etapa de pasteurización, etapa de inoculación y etapa de fermentación, fue elaborada mediante el software de simulación Cadsim Plus de Aurel System, y su control es realizado desde un PLC ControlLogix 1756-L61 de Allen Bradley. Entre sus características principales están que cuenta con al menos 50 variables entre continuas y discretas y permite realizar tanto control secuencial, como control continuo, fue desarrollada bajo una plataforma de arquitectura Hardware in the Loop Simulation, la cual es una técnica de prueba que simula el comportamiento de las entradas y salidas de un sistema físico que se conecta a una unidad de control normalmente embebida, y se divide en dos componentes principales que son: la simulación del proceso, en este caso el proceso de fabricación de kumis y segundo, el sistema de control [29].

La arquitectura de la plataforma HILS de la planta virtual de fabricación de kumis del PIAI presenta entre sus características técnicas que está conformada por:

- Componente controlador
- Componente computador
- Componente de comunicaciones
- Componente software

El componente controlador es el “cerebro” del sistema de control, es el instrumento que recibe la señal de valor medido y la compara con el valor deseado y en base a esta comparación se calcula el error y actúa a fin de corregir este error. El controlador es el instrumento que decide que hacer para mantener la variable controlada en el valor deseado y de acuerdo a esta decisión el controlador envía una señal al elemento final de control el cual opera sobre la variable manipulada [30], en el caso de la planta virtual de fabricación de kumis el control es realizado desde un PLC ControlLogix 1756-L61 de Allen Bradley que reposa en el laboratorio de control de procesos.

En segundo lugar, se encuentra el componente computador que es el equipo donde se encuentran almacenados los programas que utiliza la planta virtual.

Otro de los componentes de la planta virtual de fabricación de kumis es el componente de comunicaciones que hace referencia a la infraestructura encargada del transporte de la información, está compuesto por el conjunto de nodos donde se procesa la información y el conjunto de enlaces o canales que conectan los nodos entre sí. Cabe resaltar que el PLC ControlLogix 1756-L61 cuenta con un módulo Ethernet/IP para poder acceder de forma directa a él y se utiliza este puerto ya que el servidor OPC de la estación de ingeniería únicamente cuenta con este canal para realizar el envío bidireccional de datos entre la planta virtual y el controlador a través de la red física [29].

Y finalmente, está conformada por el componente software que es el encargado de ejecutar las funcionalidades de desarrollo, las conexiones entre programas, el intercambio de datos, la programación de la lógica de control, la simulación del proceso industrial, el sistema de monitoreo y control, y el cliente de la aplicación, para el caso de la planta caso de estudio se tienen los siguientes sistemas interconectados: el simulador de procesos industriales, en este caso el software Cadsim Plus; el servidor OPC, aquí se utiliza el software KEPServerEX; y el servidor

de supervisión y control conformado por los programas: Factory Talk View, RSLinx Classic y RSLogix 5000 [29].

Anteriormente se describieron los componentes software y Hardware que conforman la planta virtual del proceso de fabricación de kumis, a continuación, se describen las etapas que conforman este proceso para obtener el producto final que es el kumis.

2.1.2 El proceso de fabricación de kumis

La planta virtual de fabricación de kumis, es un proceso simulado que está diseñado para producir un Batch de 12.000 litros de kumis, los cuales finalizan en 4 tanques de fermentación, esta planta cuenta con al menos 50 variables entre continuas y discretas y su proceso se encuentra dividido en cinco etapas que son:

1. Recepción y almacenamiento de leche
2. Filtrado y homogenización
3. Pasteurización
4. Inoculación
5. Fermentación

(1) Recepción y almacenamiento de la leche: La etapa de Recepción y almacenamiento de la leche inicia con la llegada de camiones cisterna que contienen la materia prima a la cual manualmente se le realizan determinadas pruebas de plataforma para verificar la calidad de la leche, estas pruebas examinan el porcentaje de grasa, agua, sus proteínas, sólidos totales y nivel de acidez.

Cuando se ha verificado que la leche cumple con la calidad requerida inicia el proceso de fabricación de kumis con el ingreso de la materia prima a un tanque de almacenamiento TK1, que tiene una capacidad para almacenar 12.000 litros de leche, en este ingresa la materia prima a una temperatura de 4 °C, y se dispone de un control de nivel, tal que cuando se llene el tanque de almacenamiento de leche TK1, se cierra la válvula que permitía el ingreso de leche y se da paso a la siguiente etapa del proceso correspondiente a la homogenización de la leche, de aquí en adelante la leche será procesada por lotes de 3.000 litros cada uno.

(2) Homogenización de la leche: La siguiente etapa es la homogenización de la leche, aquí en primer lugar, la leche que viene del tanque de almacenamiento TK1 circula a través de unos filtros para retirar las impurezas que pueda contener y posteriormente se dirige hacia el tanque de homogenización TK2, el cual cuenta con una capacidad de almacenamiento de 3.000 litros. Cuando el tanque de homogenización se ha llenado se efectúa la adición de 9% de azúcar, una vez llevado a cabo este paso y para que se produzca una distribución uniforme del contenido graso se procede a realizar el mezclado del producto durante un tiempo de 10 minutos, una vez transcurrido este tiempo se detiene el mezclado del producto y se inicia la siguiente fase del proceso. En esta etapa se dispone de un control de nivel tal que, una vez se ha llenado el tanque de homogenización se activa un sensor de nivel para que se suspenda el ingreso de leche al tanque de homogenización TK2 y se encienda el motor para que se produzca el mezclado durante determinado tiempo.

(3) Pasteurización de la leche: Después el producto intermedio pasa a la siguiente etapa que corresponde a la pasteurización de la leche, esta etapa del proceso se encuentra dividida en las siguientes operaciones que se detallan a continuación:

1. Elevar la temperatura de la leche
2. Trasladar el producto intermedio
3. Disminuir la temperatura

La primera operación de esta etapa corresponde al elevado de la temperatura de la leche, en esta parte del proceso el producto pasa a través de un intercambiador de calor de placas, donde es elevada su temperatura desde 18 °C hasta 60 °C, posteriormente la leche circula hacia un tanque de almacenamiento intermedio TK3, donde una vez el tanque se encuentra lleno, la leche circula hacia el segundo intercambiador de calor de placas, aquí se realiza el choque térmico y la leche pasa de estar en una temperatura de 60 °C a un valor de 40 °C, una vez culminadas con éxito las tres operaciones anteriores, se da por finalizada la etapa de pasteurización y se prosigue con la etapa de inoculación.

(4) Etapa de inoculación: En la etapa de inoculación se realiza un control de nivel donde la leche ingresa a un tanque de mezclado y una vez se encuentra lleno se adiciona 2% de cultivo madre, una vez realizado esto, se procede a realizar el mezclado del producto durante un tiempo de 3 minutos y luego se pasa a la última etapa correspondiente a la fermentación del producto.

(5) Etapa de fermentación: En la etapa de fermentación, el producto intermedio es trasladado desde el tanque de inoculación hasta el tanque de fermentación, aquí ingresa el producto y se deja reposar hasta que alcance un pH de 4.7, esto se obtiene en aproximadamente 20 horas, y de esta manera se da por finalizado el lote de producción de kumis, para dar paso a un nuevo lote.

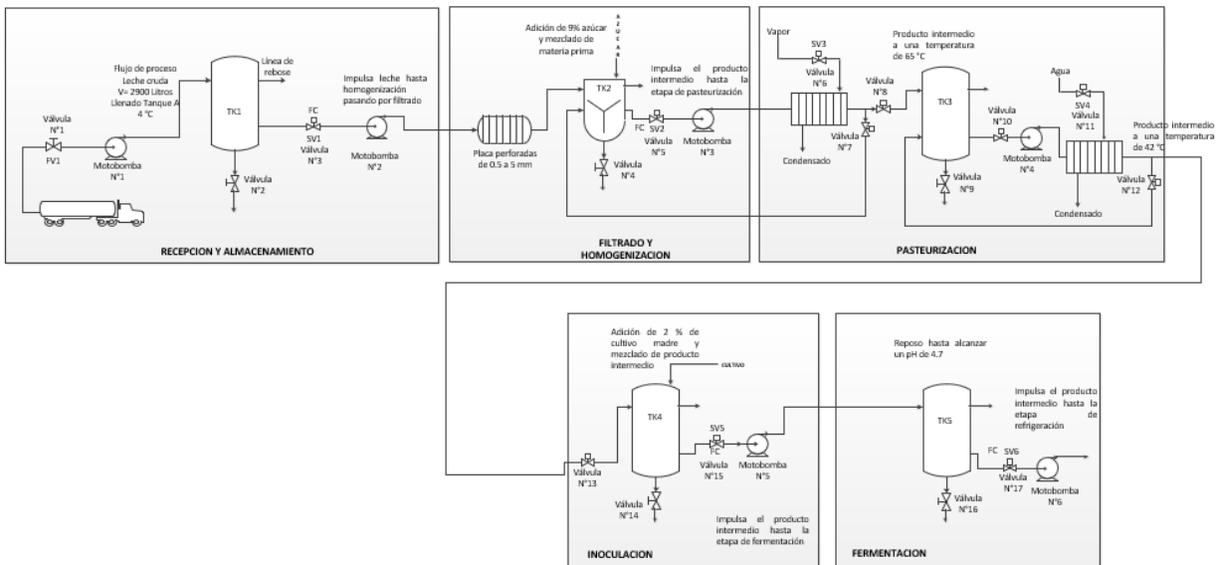


Figura 3 Diagrama de flujo del proceso de fabricación de kumis, tomado de [29]

En la figura 3 se presenta el diagrama de flujo del proceso de fabricación de kumis, donde se puede observar la relación secuencial existente entre las actividades de cada una de las etapas que conforman el proceso, lo que permite facilitar la comprensión de cada actividad y su relación con las demás.

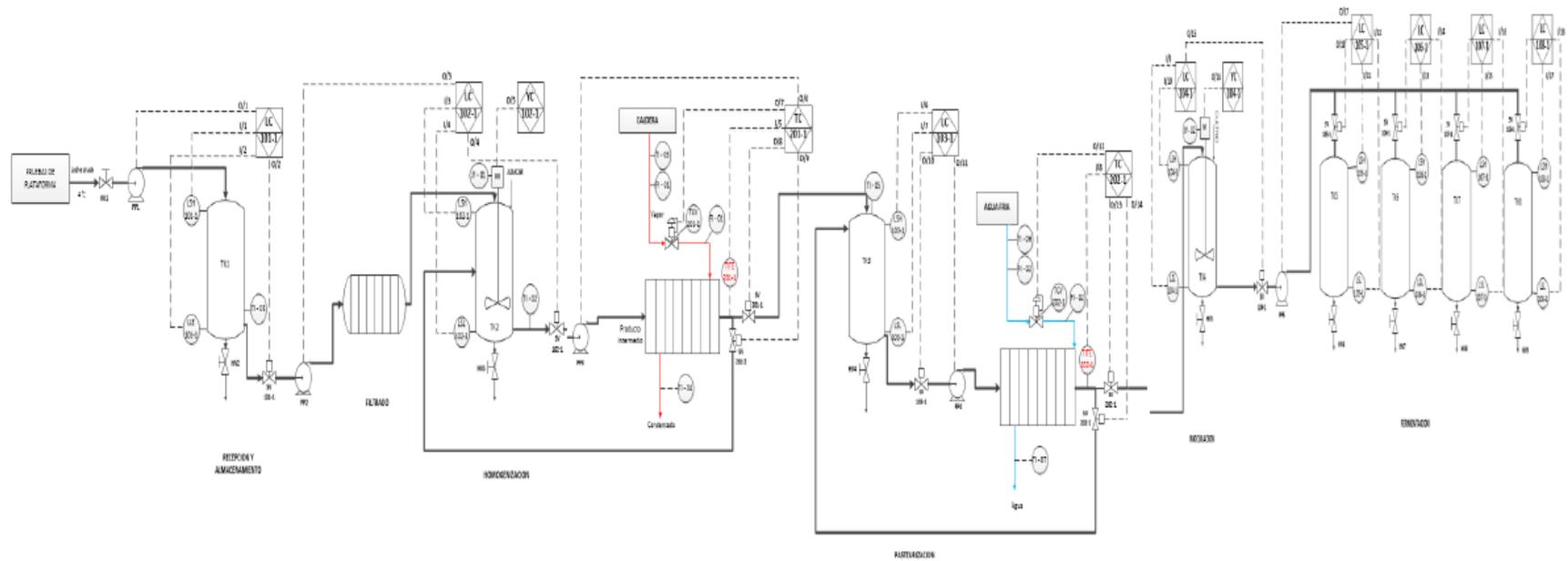


Figura 4. Diagrama P&ID del proceso de fabricación de kumis, [29]

En la figura 4 se presenta el diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID) del proceso de fabricación de kumis, que permite mostrar el flujo de proceso en las tuberías, como también los equipos e instrumentos implementados en la planta de fabricación de kumis.

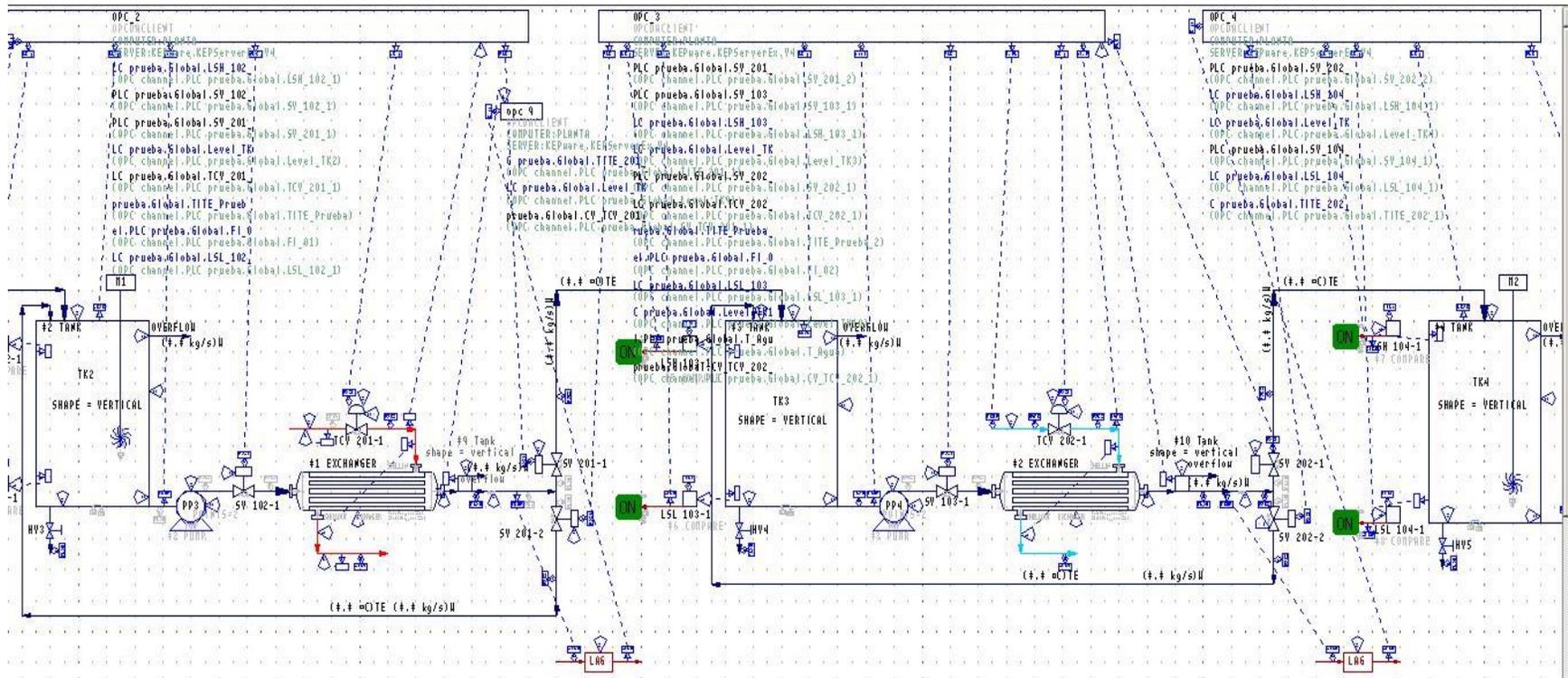


Figura 5 Etapa de pasteurización de la leche en el software Cadsim Plus

En la figura 5 se observa el diagrama de la etapa de pasteurización de la leche implementado en el software Cadsim Plus, en este se pueden observar los intercambiadores de calor y como están conectados. La leche llega desde el tanque de mezclado con una temperatura de 18 °C y pasa a través del intercambiador de calor el cual la lleva a una temperatura de 60 °C, si la temperatura está en un valor menor a 60 °C la leche recirculará hacia el tanque de mezclado hasta alcanzar el valor de Setpoint. Una vez alcanzado el valor de referencia la leche circula hacia el intercambiador de enfriado, el cual lleva la leche de 60 °C a una temperatura de 40°C, mientras esto no se alcance la leche será devuelta a un tanque intermedio para volver a circular por el intercambiador de enfriado, una vez alcance el Setpoint continuará con la siguiente etapa que es la inoculación.

Después de presentadas las características principales del proceso de fabricación de kumis, sus etapas y componentes, como también el diagrama de flujo, el diagrama P&ID y la representación de la etapa de pasteurización en el software Cadsim Plus, a continuación, se presenta la identificación del comportamiento dinámico de los intercambiadores de calor de aumento y disminución de temperatura de la planta de kumis.

2.2 Identificación del comportamiento dinámico de los intercambiadores de calor de la planta de fabricación de kumis

Para realizar la sintonización del controlador, en primer lugar, se realizó la identificación del proceso, que busca obtener un modelo matemático que describa el comportamiento dinámico de la planta que se va a controlar, para luego obtener los parámetros del controlador, empleando el método de sintonización seleccionado. El método de identificación utilizado fue la identificación experimental donde aplicando una señal escalón se obtuvieron los datos entrada – salida con los que posteriormente se encontró un modelo de primer orden más tiempo muerto.

Es así como el proceso de sintonización está conformado por dos etapas que son la identificación y la sintonización. En términos generales el proceso de identificación está comprendido por los siguientes pasos: obtención de los datos entrada – salida, tratamiento previo de los datos, elección de la estructura del modelo, obtención de los parámetros del modelo y finalmente validación del modelo.

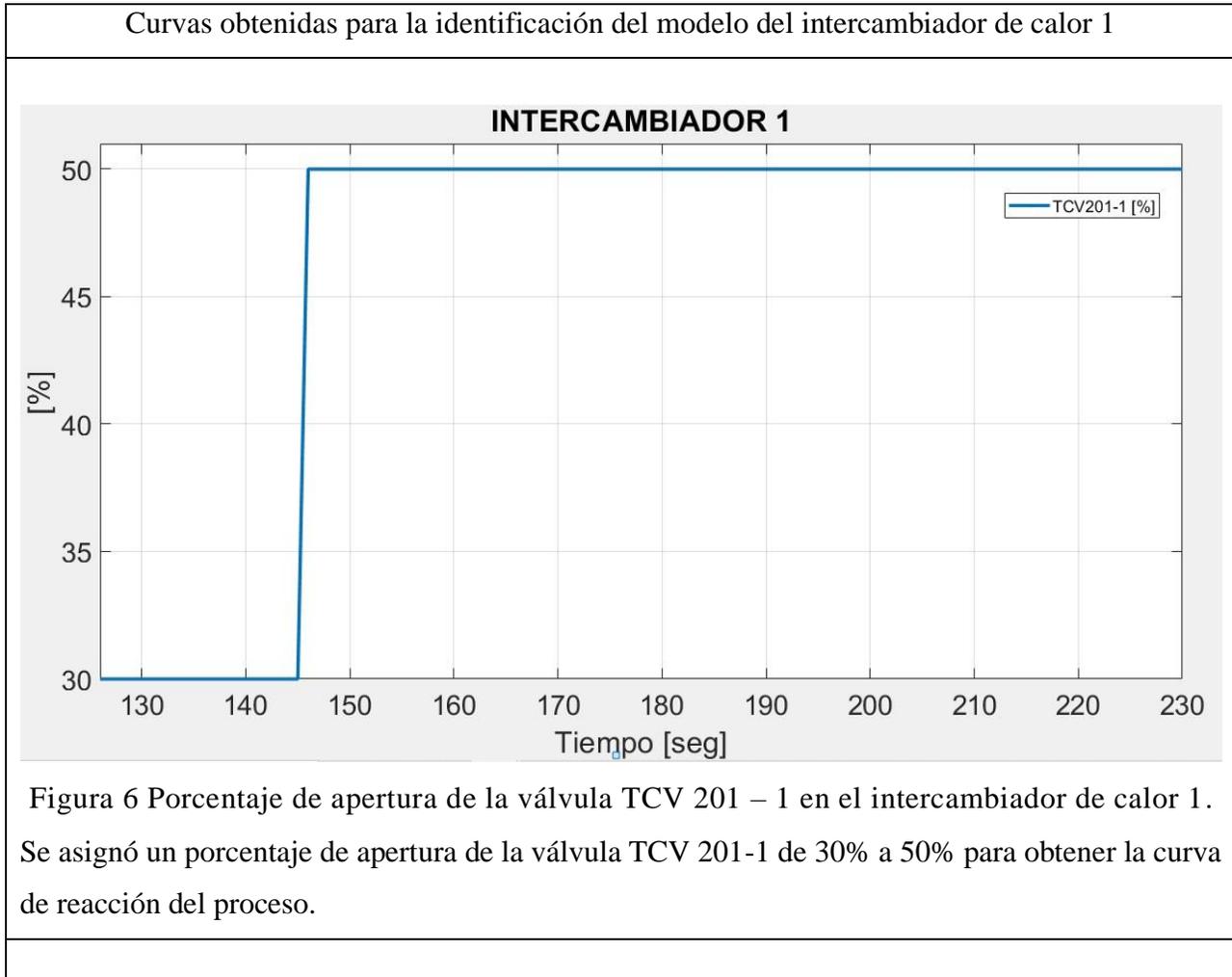
2.2.1 Identificación del modelo para el intercambiador de aumento de temperatura

Para obtener el modelo del proceso del intercambiador de calor 1 de la etapa de aumento de temperatura, se realizó una prueba en lazo abierto, donde en primer lugar se asignaron las condiciones iniciales para que la planta se ubicara en un punto de equilibrio y se asignó un porcentaje de apertura de la válvula de vapor TCV 201-1 en 30% de apertura, con esto la temperatura de salida del intercambiador 1 se estabilizó en un valor de 25.06 °C y posteriormente se generó un escalón a la entrada, cambiando el porcentaje de apertura de la válvula TCV 201-1 a un valor de 50%, se esperó hasta que el sistema se estabilizara y se observó que la temperatura de

salida del intercambiador de aumento de temperatura alcanzó un valor estable de 40.3 °C, en las figuras 6 y 7 se observan las curvas de respuesta obtenidas en el proceso de identificación.

Tabla 5

Identificación del modelo para el intercambiador de calor de aumento de temperatura



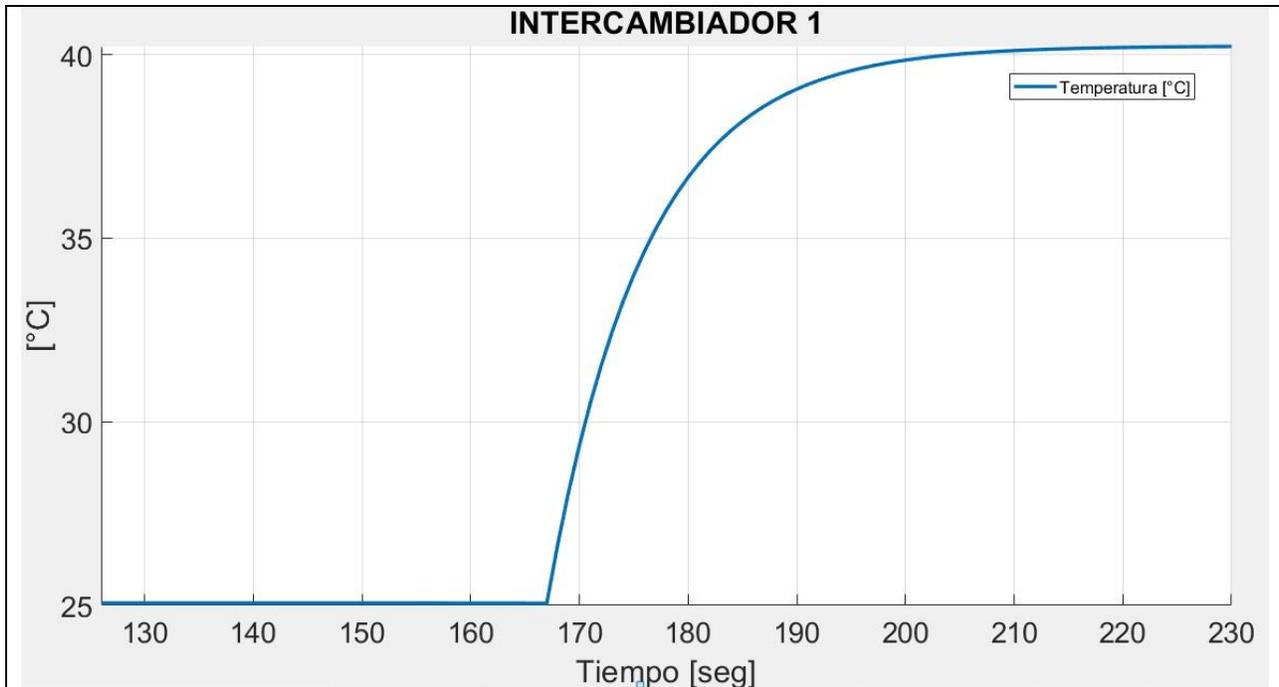


Figura 7 Temperatura de salida del intercambiador de calor 1 en la prueba escalón. Los datos obtenidos en la prueba escalón realizada para el intercambiador de calor 1, se graficaron en Matlab y se observó que la temperatura se estabilizó en un valor de 40.3 °C

Con los datos obtenidos se procedió a encontrar un modelo de primer orden más tiempo muerto mediante el método de dos puntos de Smith, el cual fue posteriormente validado mediante el software Matlab, para ver el procedimiento de identificación del modelo del intercambiador de calor 1, remitirse al anexo B. El modelo del proceso obtenido para el intercambiador de calor 1 se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$G_P(s) = \frac{K e^{-LS}}{\tau s + 1} = \frac{0,8 e^{-22S}}{9s + 1} \quad (\text{Ecuación 13})$$

La ecuación obtenida anteriormente es una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto, en la que el retardo de tiempo tiene un valor de 22 segundos y la constante de tiempo del proceso tiene un valor de 9 segundos, como se pudo observar en la ecuación 13, se presenta un retardo de tiempo dominante, mayor en más de dos veces que la constante de tiempo de la planta.

El modelo de primer orden más tiempo muerto obtenido para el intercambiador de calor 1 se comparó con la curva de respuesta que se obtuvo de los datos tomados en la prueba escalón, dando el siguiente resultado, ver figura 8.

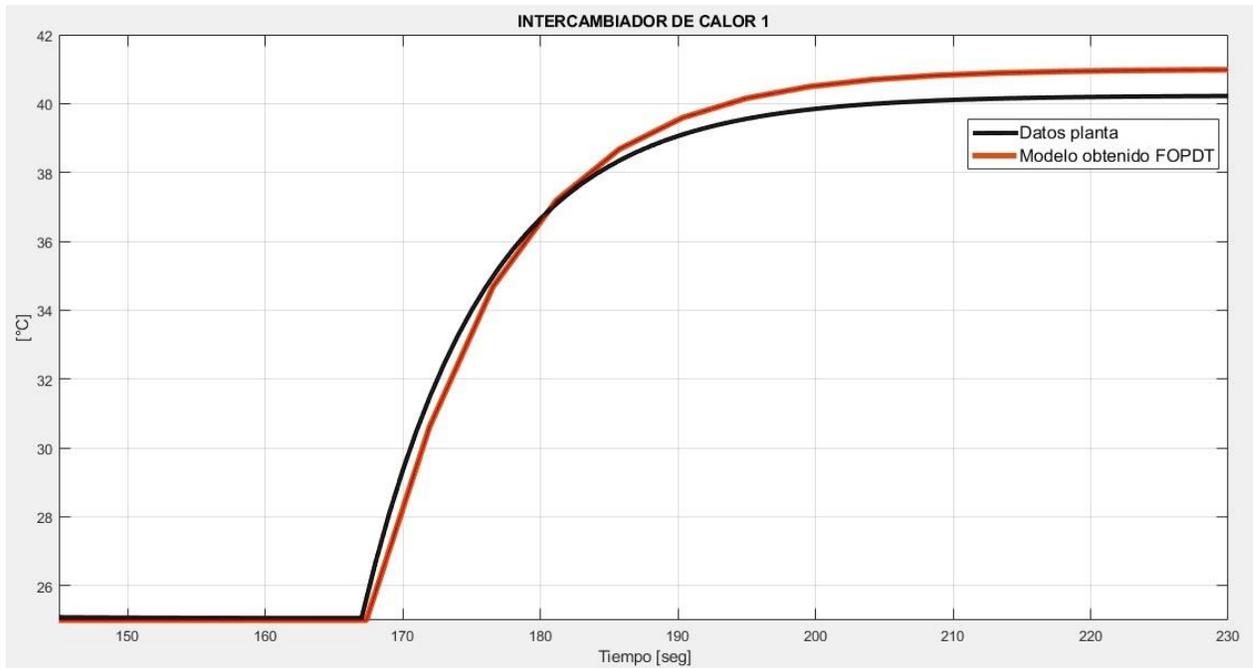


Figura 8 Validación del modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 1

En la figura 8 se presenta la validación del modelo de primer orden más tiempo muerto obtenido mediante el proceso de identificación, se comparó la curva de respuesta del modelo de primer orden más tiempo muerto identificado, con la curva de respuesta de los datos reales obtenidos, se observa que las dos curvas son semejantes, aunque difieren un poco al alcanzar el estado estable, la curva de respuesta de datos reales se estabilizó en 40.3 °C, mientras que con el modelo FOPDT se alcanzó un valor de 41 °C.

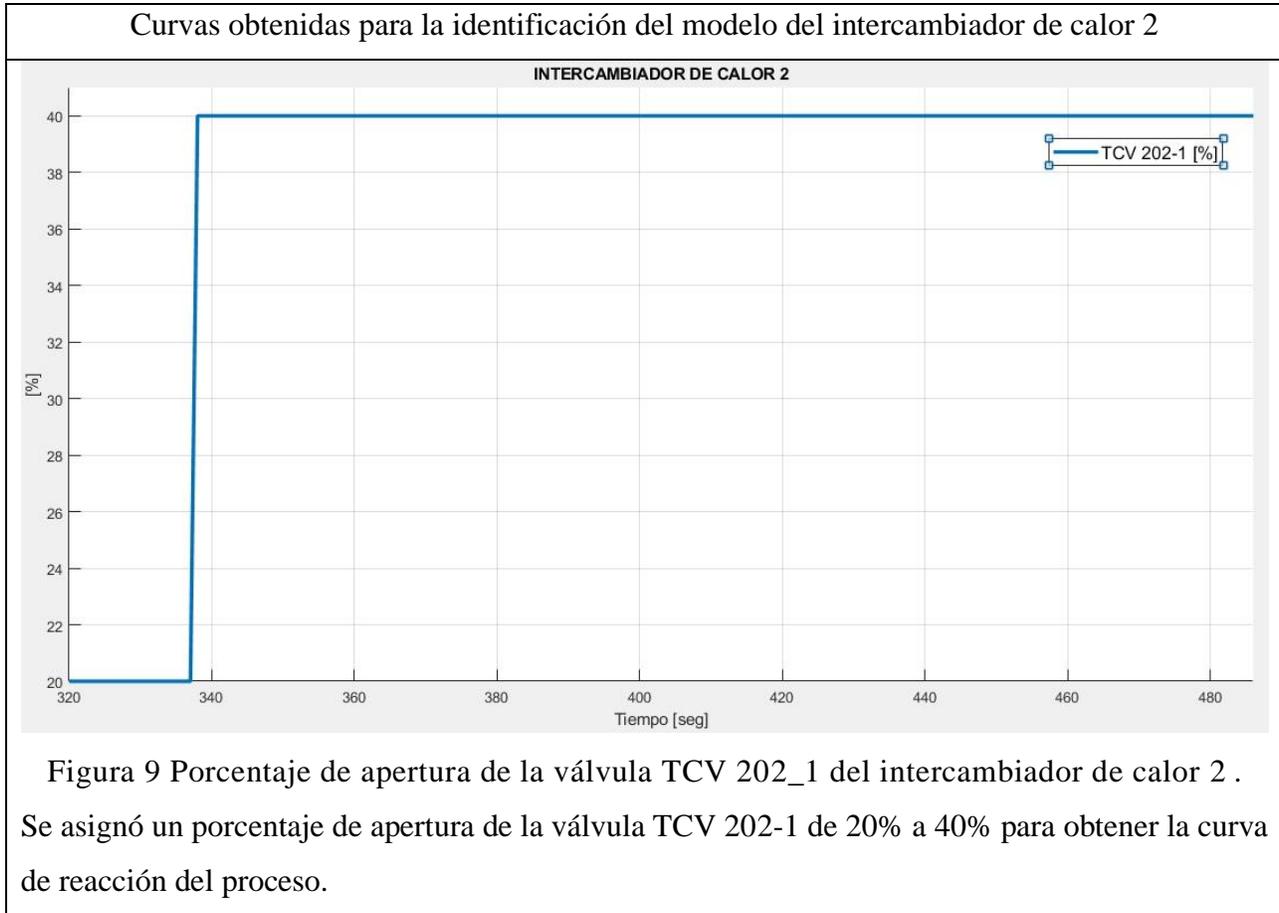
2.2.2 Identificación del modelo para el intercambiador de disminución de temperatura

Para obtener el modelo del proceso del intercambiador de disminución de temperatura se realizó una prueba en lazo abierto, donde se asignaron las condiciones iniciales para que la planta se ubicara en un punto de equilibrio y se asignó un porcentaje de apertura de la válvula de vapor TCV 202-1 de 20% de apertura, con esto la temperatura de salida del intercambiador 2 se estabilizó en un valor de 67.2 °C y posteriormente se generó un escalón a la entrada, cambiando

el porcentaje de apertura de la válvula TCV 202-1 a un valor de 40%, se esperó hasta que el sistema se estabilizara y se observó que la temperatura de salida del intercambiador 2 alcanzó un valor estable de 51.89 °C, las curvas obtenidas se observan en la tabla 6.

Tabla 6

Identificación del modelo para el intercambiador de calor de disminución de temperatura



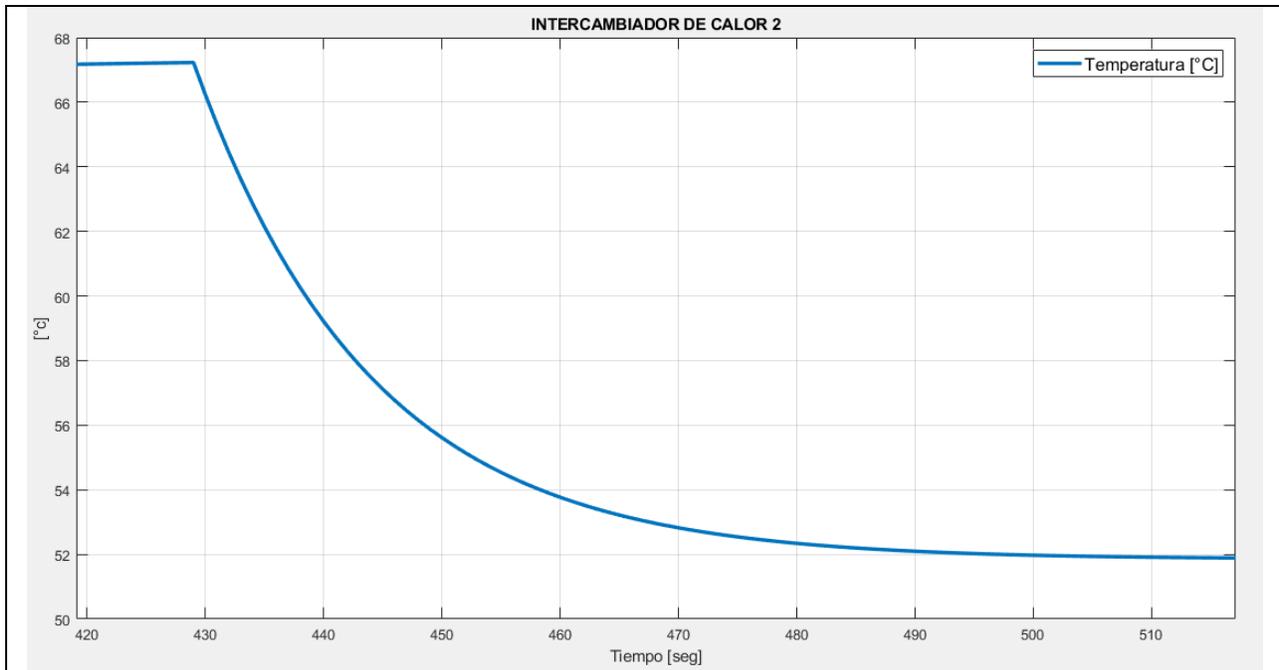


Figura 10 Temperatura de salida del intercambiador de calor 2 obtenida en la prueba escalón.

Los datos obtenidos en la prueba escalón realizada para el intercambiador de calor 2, se graficaron en Matlab y se observó que la temperatura se estabilizó en un valor de 51.89 °C

Luego se procedió a encontrar un modelo de primer orden más tiempo muerto mediante el método de dos puntos de Smith, el cual fue posteriormente validado mediante el software Matlab, para ver el procedimiento de identificación del modelo del intercambiador de calor 2, remitirse al anexo B. El modelo del proceso obtenido para el intercambiador de calor 2 se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$G_P(s) = \frac{-0,8 e^{-21s}}{15s + 1} \quad (\text{Ecuación 14})$$

La ecuación obtenida anteriormente es una función de transferencia de primer orden más tiempo muerto, en la que el retardo de tiempo tiene un valor de 21 segundos y la constante de tiempo del proceso tiene un valor de 15 segundos, lo que indica que la relación retardo de tiempo/constante de tiempo de la planta es igual a 1.4, con esto se puede observar que el proceso de disminución de temperatura de la leche presenta un retardo de tiempo dominante.

El modelo de primer orden más tiempo muerto obtenido para el intercambiador de calor 2 se comparó con la curva de respuesta que se obtuvo de los datos tomados en la prueba escalón, dando el siguiente resultado, ver figura 11.

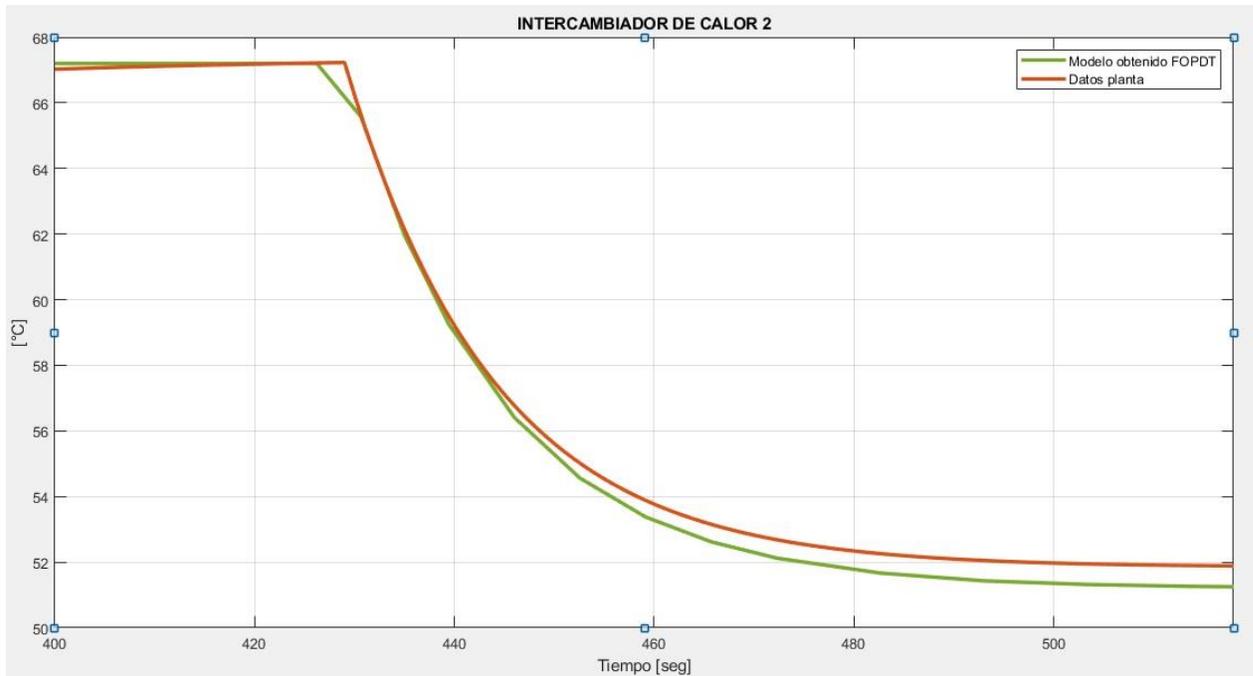


Figura 11 Validación del modelo FOPDT obtenido para el intercambiador de calor 2

En la figura 11 se presenta la validación del modelo FOPDT obtenido mediante el proceso de identificación, se comparó la curva de respuesta del modelo de primer orden más tiempo muerto identificado para el intercambiador de calor 2, con la curva de respuesta de los datos reales obtenidos, se observa que las dos curvas son semejantes, aunque difieren un poco al alcanzar el estado estable, la curva de respuesta de datos reales se estabilizó en 51.89 °C, mientras que con el modelo FOPDT se alcanzó un valor de 52 °C.

Una vez obtenido el modelo del proceso que representa a cada uno de los intercambiadores de calor de la etapa de pasteurización de la leche, se probaron en simulación mediante Matlab/Simulink diferentes técnicas de sintonización y se eligieron los tres métodos que mejores resultados obtuvieron, para ver más detalles dirigirse al anexo B.

2.3 Sintonización de los PID convencionales en la etapa de pasteurización de la leche

Después de realizar la identificación de los modelos de proceso de los intercambiadores de calor de la planta de fabricación de kumis, se encontraron los parámetros K_p , T_i , T_d de diferentes métodos de sintonización y se probaron en simulación mediante el Software Matlab/Simulink, donde se observaron las curvas de respuesta de cada uno de ellos y se eligieron los tres métodos que mejores respuestas presentaron, las curvas obtenidas en simulación mediante Matlab/Simulink se presentan en el anexo B. Con los métodos seleccionados se realizaron las pruebas de sintonización de los PID convencionales de la planta de fabricación de kumis, mediante seguimiento de consigna y ante la presencia de disturbios.

2.3.1 Pruebas de sintonización del controlador PID convencional para el intercambiador de aumento de temperatura

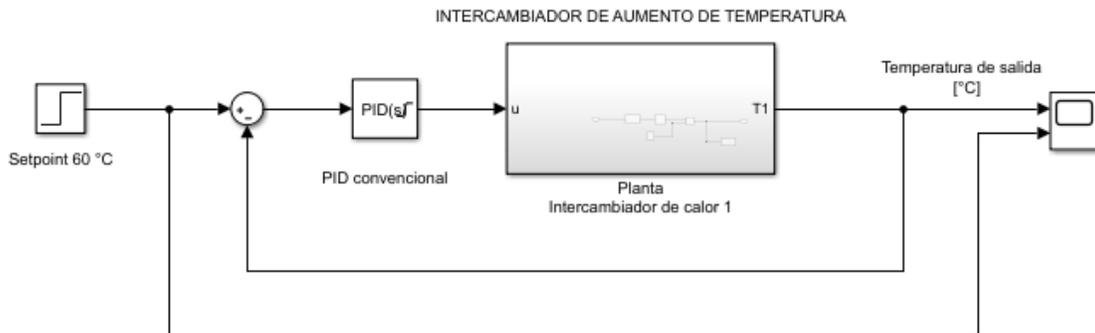


Figura 12 Diagrama de bloques que representa la etapa de aumento de temperatura de la leche en la planta de fabricación de kumis

La figura 12 presenta el diagrama de bloques de lazo cerrado que representa el control en la etapa de aumento de temperatura de la planta de fabricación de kumis, donde el Setpoint se estableció en un valor de 60°C , el bloque PID convencional representa un controlador que puede ser un PI o un PID y el bloque planta representa el intercambiador de aumento de temperatura. Se realizaron las pruebas de sintonización con tres métodos seleccionados y se registraron los datos de la temperatura obtenidos ante seguimiento de consigna y ante la presencia de disturbios. Los métodos de sintonización que fueron seleccionados por presentar mejores respuestas en cuanto a sus parámetros de respuesta transitoria son el propuesto por Chien, Hrones y Reswick, el método

de López et Al., y la sintonización Lambda. En la tabla 7 se presentan las condiciones iniciales que se fijaron para llevar a cabo las pruebas de sintonización del PID convencional en la etapa de aumento de temperatura y en la tabla 8 se presentan los parámetros obtenidos mediante los tres métodos de sintonización de controladores que fueron seleccionados.

Tabla 7

Condiciones iniciales del proceso para la sintonización del PID de aumento de temperatura

Variable	Valor	Descripción
HV1	100%	Porcentaje de apertura de la válvula para ingreso de leche al tanque de almacenamiento.
Tin	18 °C	Temperatura de entrada de la leche
Setpoint	60 °C	Valor deseado para la temperatura de la leche

Tabla 8

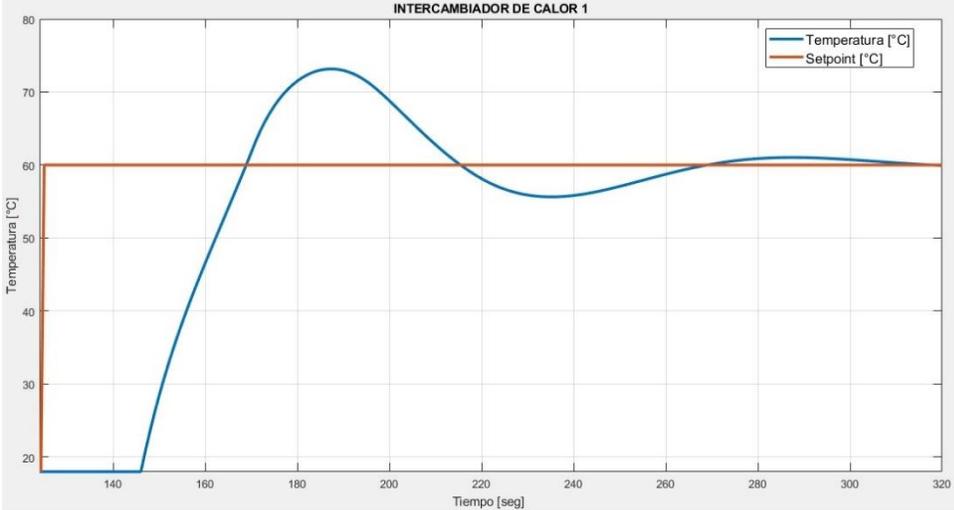
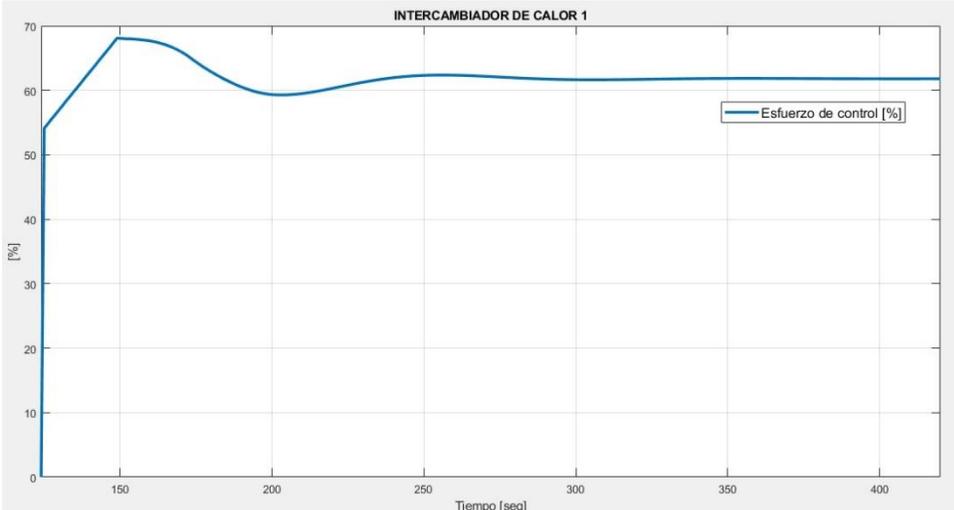
Parámetros obtenidos con los métodos de sintonización seleccionados

Método de sintonización	Kp [%/°C]	Ti [seg]	Td [seg]
CHR	0.486	12.213	10.406
López Et Al.	0.509	27.847	0
Lambda	0.232	9	11

Después de fijadas las condiciones iniciales en la planta virtual de fabricación de kumis se procedió a ingresar los parámetros de sintonización del PID 1 y se puso en marcha el proceso, se esperó hasta que el sistema se estabilizara en el valor de referencia de 60 °C y se registraron los datos obtenidos, posteriormente se aplicaron diferentes disturbios para observar el comportamiento del proceso, en las tablas 9, 10 y 11 se registraron las curvas de respuesta de la variable controlada, ante seguimiento de consigna y ante la presencia de disturbios, como también las curvas del esfuerzo de control.

Tabla 9

Resultados de sintonización del PID convencional en la etapa de aumento de temperatura con el método CHR

Respuesta del PID convencional	Descripción
 <p data-bbox="203 1024 1123 1098">Figura 13 Curva de respuesta de la temperatura ante seguimiento de consigna</p>	<p data-bbox="1166 443 1437 499">En la figura 13 se observa la curva de respuesta de la temperatura del intercambiador de aumento, obtenida ante el seguimiento de la referencia de 60 °C, se observa que se estabiliza en un valor constante, pero inicialmente presenta un sobreimpulso del 21.67%. Los parámetros de respuesta transitoria encontrados se registran a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li data-bbox="1166 856 1437 913">-Tiempo de levantamiento (Tr)= 18 segundos <li data-bbox="1166 913 1437 989">-Tiempo de establecimiento (Ts) = 136 segundos <li data-bbox="1166 989 1437 1045">-Sobreimpulso (Mp) = 13 °C <li data-bbox="1166 1045 1437 1125">-Error de seguimiento en estado estacionario E = 1.03 °C
 <p data-bbox="365 1682 961 1717">Figura 14 Respuesta del esfuerzo de control</p>	<p data-bbox="1166 1241 1437 1587">En la figura 14 se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método de CHR, se observa que no supera el valor máximo de salida, pero no presenta una curva suave alcanzando un valor de hasta 68 % para luego estabilizarse en 61 %</p>
	<p data-bbox="1166 1734 1437 1896">Se observa la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, el primero es la apertura de válvula SV 102-1 con incremento del flujo de leche hacia el</p>

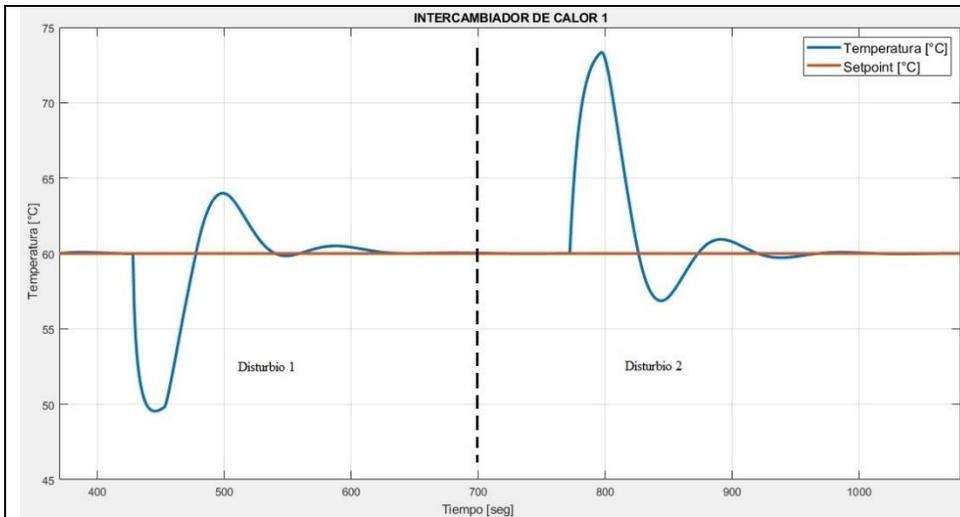


Figura 15 Respuesta de la variable temperatura ante disturbios 1 y 2

intercambiador de calor 1, al ingresar el disturbio se observa que la temperatura de la leche alcanza un valor mínimo de 48 °C, y luego regresa al valor de referencia con un error de seguimiento en estado estacionario de 0.0433 °C. Se aplicó un segundo disturbio que fue incrementar el flujo de vapor hacia el intercambiador de calor 1, donde la temperatura alcanzó un valor máximo de 74 °C, volviendo posteriormente al valor de referencia, con un error de seguimiento de 0.03 °C. Los errores de seguimiento en estado estacionario (E) obtenidos son:
 $E_1 = 0.0433 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $E_2 = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$

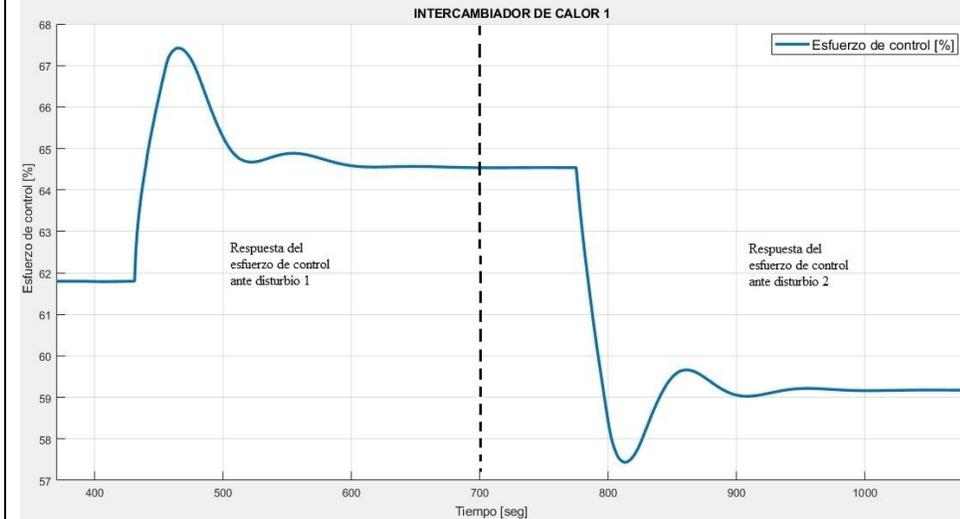


Figura 16 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbio 1 y 2

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 61 % y al ingresar el primer disturbio, presenta una respuesta agresiva alcanzando un valor de 67 % para después estabilizarse en 64%. Luego ingresa el segundo disturbio y el esfuerzo de control disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 57%, para luego estabilizarse en 59%.

Tabla 10

Resultados de sintonización del PID convencional en la etapa de aumento de temperatura con el método López Et Al.

Respuesta del PID convencional	Descripción
	Se presenta la curva de respuesta de la temperatura

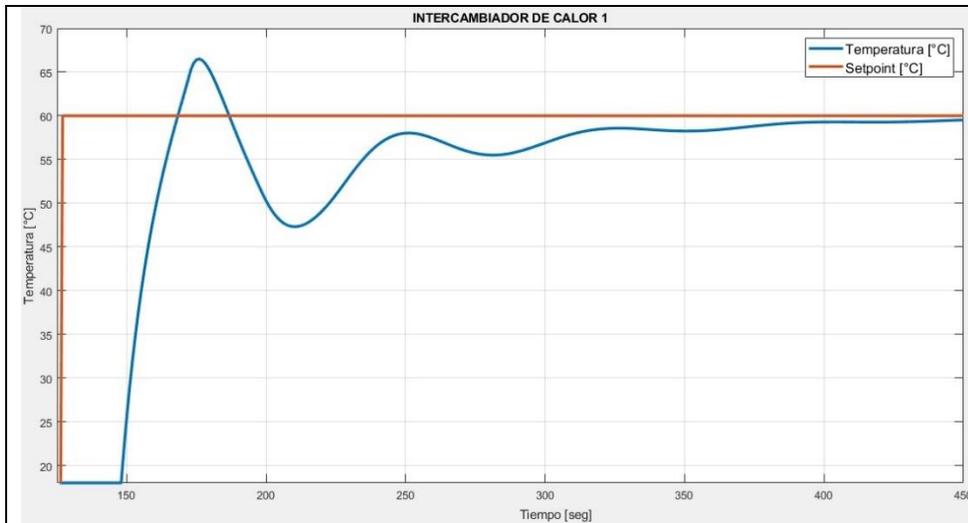


Figura 17 Respuesta de la temperatura por el método de López Et Al.,
ante seguimiento de consigna

obtenida ante el seguimiento de la referencia de 60 °C, se observa que se estabiliza en un valor constante, pero inicialmente presenta un sobreimpulso del 11.67% y tarda en alcanzar el valor de referencia. Los parámetros de respuesta transitoria registrados son:

- Tr = 18 segundos
- Ts = 136 segundos
- Mp = 13 °C

-Error de seguimiento en estado estacionario es $E = 1.03$ °C

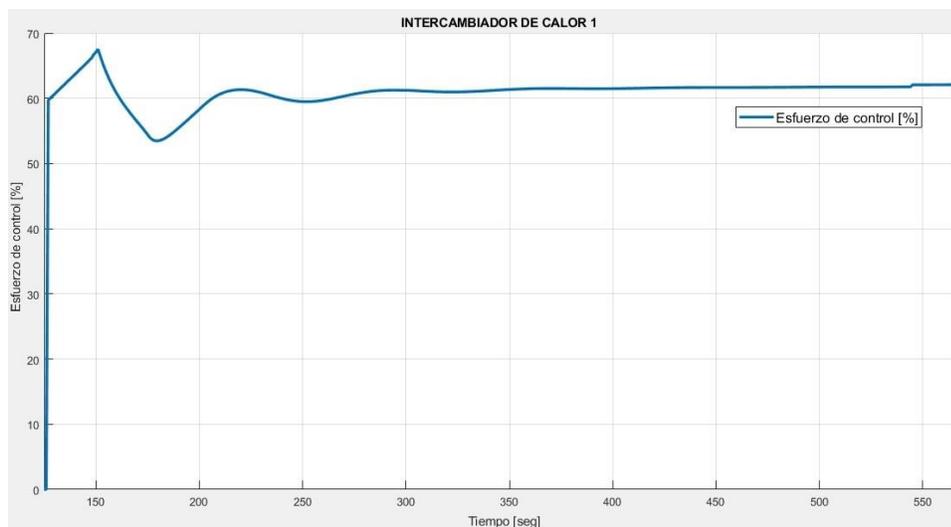


Figura 18 Respuesta del esfuerzo de control por el método de López Et Al.

Se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método de López Et Al., se observa que no supera el valor máximo de salida, pero no presenta una curva suave alcanzando un valor de hasta 68 % con oscilaciones posteriores para finalmente estabilizarse en 62 % .

Se observa la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, al ingresar el primer disturbio se observa que la variable controlada presenta oscilaciones alcanzando un valor mínimo de 49 °C y se estabiliza en la referencia con un error de seguimiento en estado estacionario de 0.2 °C. Se aplicó un segundo disturbio donde la

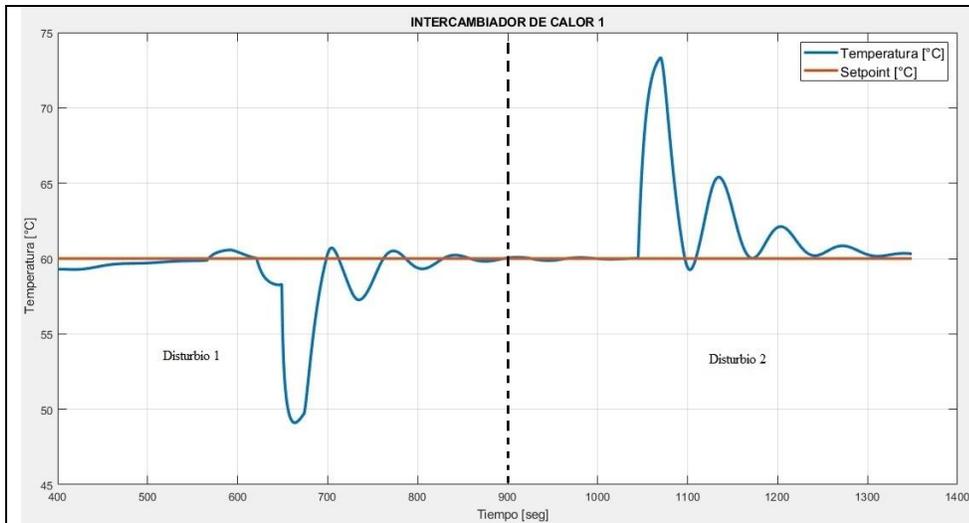


Figura 19 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al.

temperatura alcanzó un valor máximo de 74 °C, presentando oscilaciones y posteriormente regresó a su valor de referencia con un error de seguimiento de 0.3 °C.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

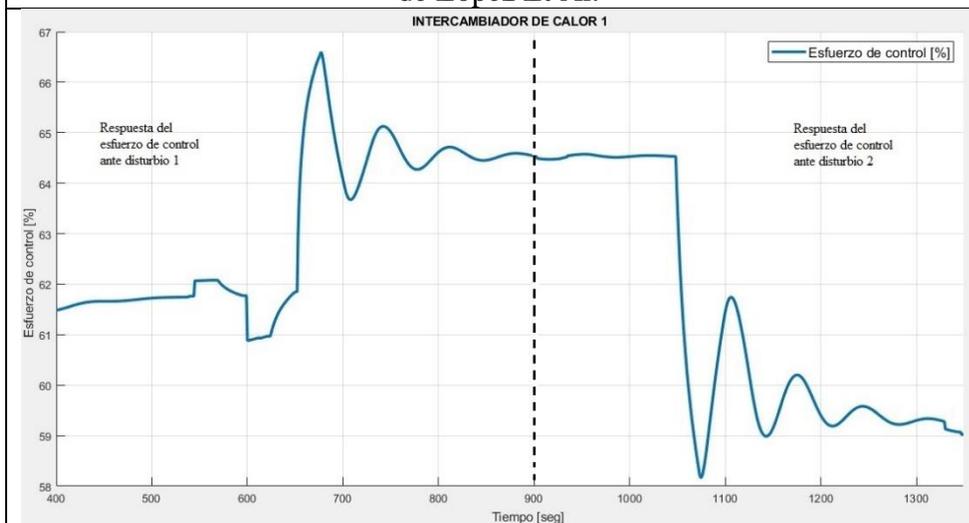


Figura 20 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al.

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 61 % y luego presenta una respuesta agresiva al ingresar el primer disturbio alcanzando un valor máximo de 66 % para después estabilizarse en 64%. Luego ingresa el segundo disturbio y el esfuerzo de control disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 58%, para luego estabilizarse en 59%.

Tabla 11

Resultados de sintonización del PID convencional en la etapa de aumento de temperatura con el método Lambda

Respuesta del PID convencional	Descripción
--------------------------------	-------------

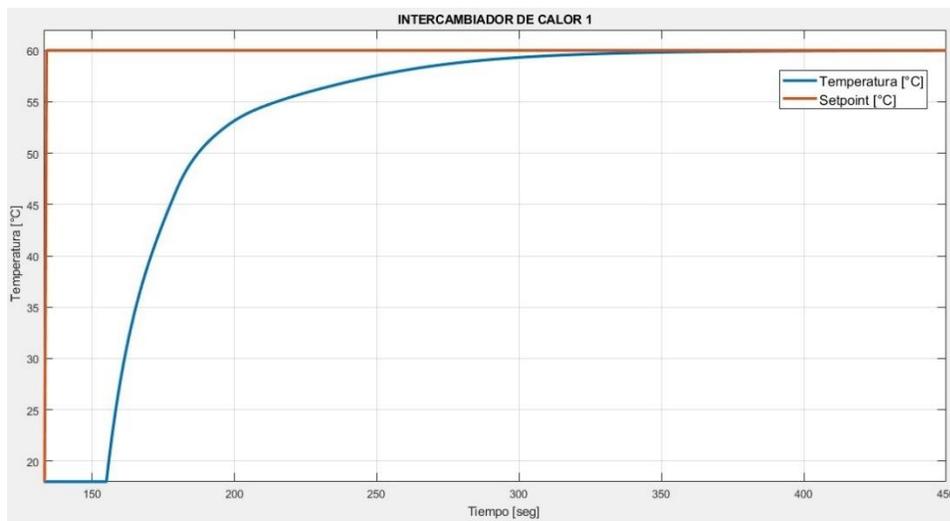


Figura 21 Respuesta de la temperatura por el método Lambda ante seguimiento de consigna

Se presenta la curva de respuesta de la temperatura, se observa que alcanza el valor de referencia y no presenta sobreimpulso. Los parámetros de respuesta transitoria registrados son:

- $T_r = 67$ segundos
- $T_s = 146$ segundos
- $M_p = 0$ °C

-Error de seguimiento en estado estacionario
 $E = 0.1$ °C

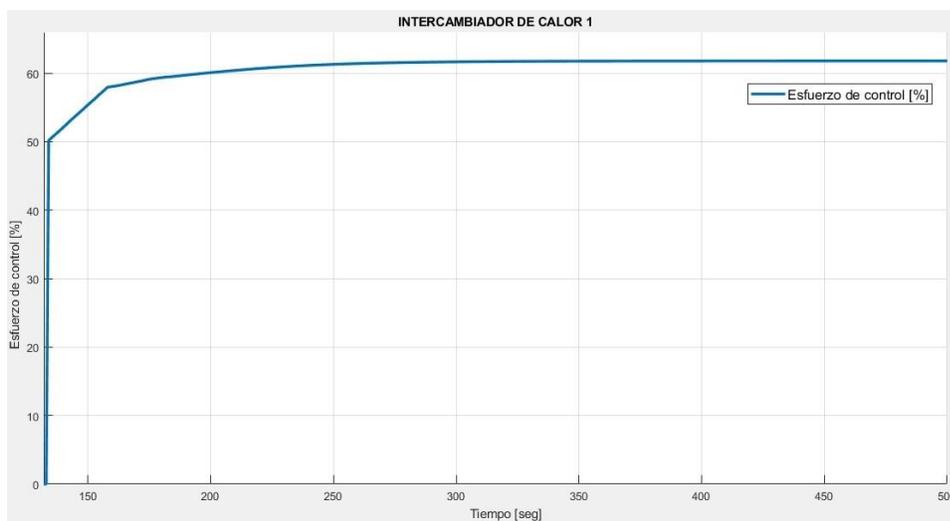


Figura 22 Respuesta del esfuerzo de control por el método Lambda

Se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método de Lambda, se observa que presenta un comportamiento suave, estabilizándose en un valor de 61 %.

Se observa la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, al ingresar el primer disturbio se observa que la variable controlada alcanza un valor mínimo de 49 °C y posteriormente se estabiliza en el valor de referencia.

Se aplicó un segundo disturbio donde la temperatura alcanzó un valor máximo de 74 °C y

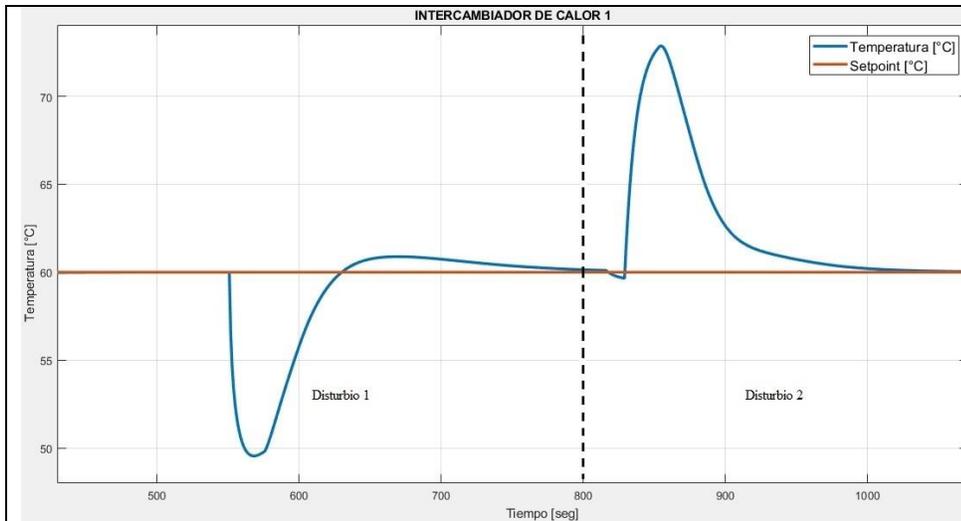


Figura 23 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método Lambda

posteriormente regresó a su valor de referencia.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

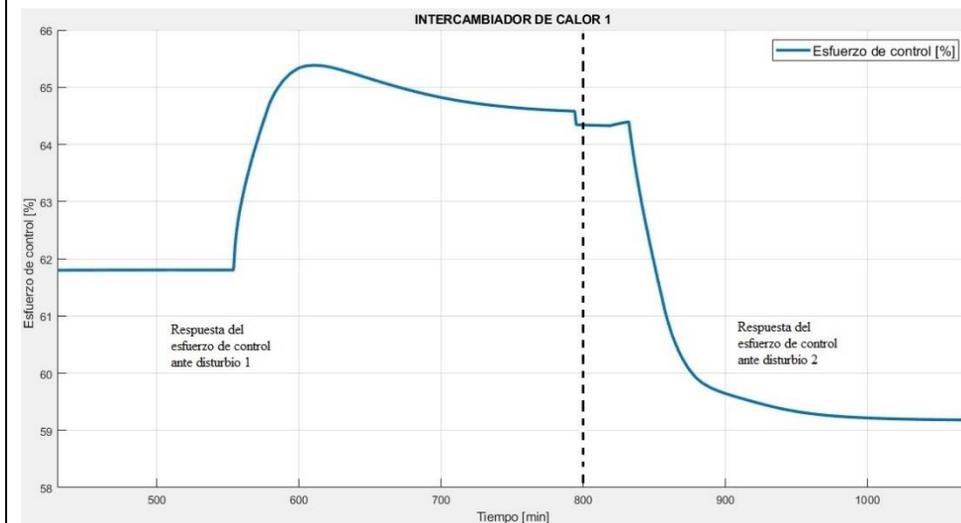


Figura 24 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2 por el método de Lambda

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 61 % y luego con el ingreso del primer disturbio alcanza un valor máximo de 65%, posteriormente, con el ingreso del segundo disturbio el esfuerzo de control disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 59 %, en el cual se estabiliza.

2.3.2 Pruebas de sintonización del controlador PID convencional para el intercambiador de disminución de temperatura

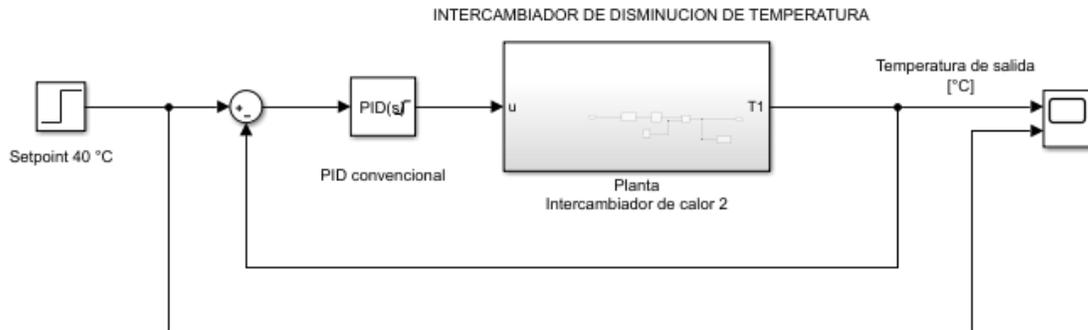


Figura 25 Diagrama de bloques que representa la etapa de disminución de temperatura de la leche en la planta de fabricación de kumis

La figura 25 presenta el diagrama de bloques de lazo cerrado que representa el control en la etapa de disminución de temperatura de la planta de fabricación de kumis, donde el Setpoint se estableció en un valor de 40°C, el bloque PID convencional representa un controlador que puede ser un PI o un PID y el bloque planta representa el intercambiador de disminución de temperatura, se realizaron las pruebas de sintonización con tres métodos seleccionados (Anexo B) y se registraron los datos de la temperatura obtenidos ante seguimiento de consigna y ante la presencia de disturbios. Los métodos de sintonización que fueron seleccionados por presentar mejores respuestas en cuanto a sus parámetros de respuesta transitoria son el propuesto por Chien, Hrones y Reswick, el método de López et Al., y la sintonización Lambda. En la tabla 12 se presentan las condiciones iniciales que se fijaron para llevar a cabo las pruebas de sintonización del PID convencional en la etapa de disminución de temperatura y en la tabla 13 se presentan los parámetros obtenidos mediante los tres métodos de sintonización de controladores que fueron seleccionados.

Tabla 12

Condiciones iniciales del proceso para la sintonización del PID de disminución de temperatura

Variable	Valor	Descripción
----------	-------	-------------

HV1	100%	Porcentaje de apertura de la válvula para ingreso de leche al tanque de almacenamiento.
Tin	18 °C	Temperatura de entrada de la leche al tanque de recepción.
Setpoint	40 °C	Valor deseado para la temperatura de la leche
Temperatura del agua	4 °C	Temperatura del agua para realizar el choque térmico.

Los valores obtenidos para las constantes Kp, Ti y Td, para cada uno de los métodos de sintonización aplicados en la planta de fabricación de kumis se presentan en la tabla 13.

Tabla 13

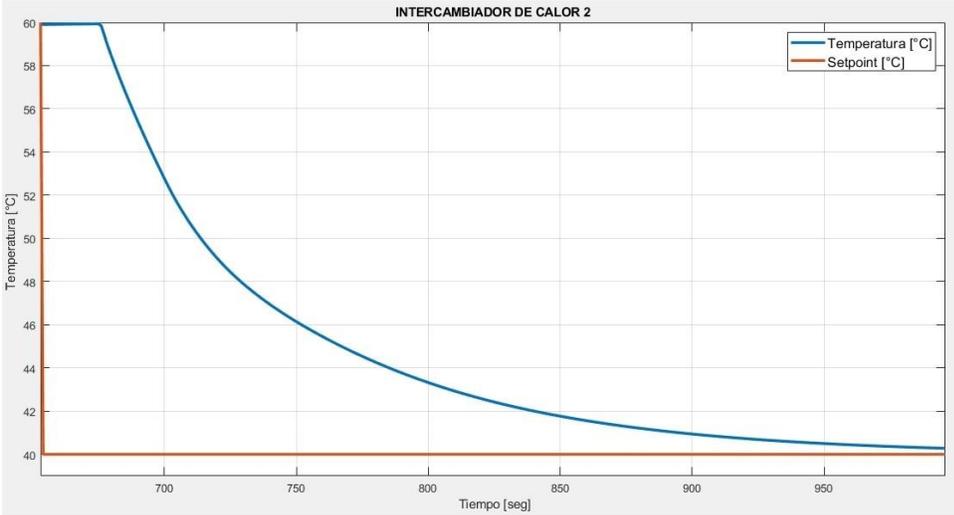
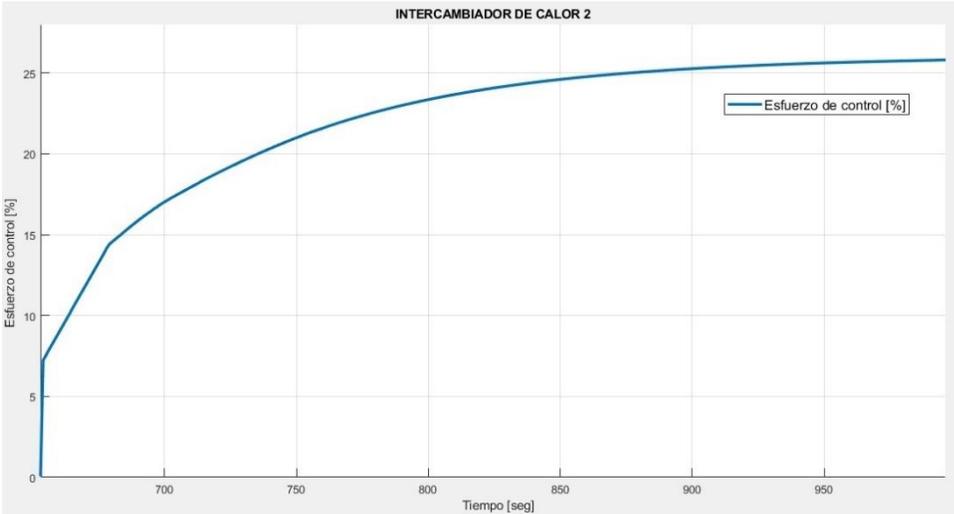
Parámetros para los distintos métodos de sintonización del controlador de disminución de temperatura

Método de sintonización	Kp [%/°C]	Ti [seg]	Td [seg]
CHR	0.848	20.355	9.933
López Et Al.	0.773	27.977	0
Lambda	0.298	15	0

Después de que la leche circuló a través del intercambiador de calor de aumento de temperatura y alcanzó un valor estable de 60 °C, se procedió a realizar las pruebas de sintonización del PID 2 para realizar el choque térmico que consiste en llevar la temperatura de la leche desde un valor inicial de 60 °C hasta un valor final de 40°C, las pruebas se realizaron ante seguimiento de consigna y ante la presencia de disturbios, las curvas de respuesta obtenidas se presentan en la tabla14, tabla 15 y tabla 16.

Tabla 14

Resultados de sintonización del PID convencional en la etapa de disminución de temperatura por el método de CHR

Respuesta del PID convencional	Descripción
 <p data-bbox="256 997 1068 1087">Figura 26 Respuesta de la temperatura por el método CHR ante seguimiento de consigna</p>	<p data-bbox="1166 527 1442 1020">Se observa la curva de respuesta de la temperatura del intercambiador de respuesta de la temperatura del intercambiador de disminución, obtenida ante el seguimiento de la referencia de 40 °C, se observa que se estabiliza en un valor constante y no presenta sobreimpulso. Los parámetros de respuesta transitoria encontrados se registran a continuación:</p> <ul data-bbox="1166 856 1442 1020" style="list-style-type: none"> - Tr = 159 segundos - Ts = 259 segundos - Mp = 0 °C -Error de seguimiento en estado estacionario E = 0.5 °C
 <p data-bbox="256 1696 1068 1732">Figura 27 Respuesta del esfuerzo de control por el método CHR</p>	<p data-bbox="1166 1304 1442 1549">Se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método CHR, se observa que presenta un comportamiento suave, estabilizándose en un valor de 26 %.</p>
	<p data-bbox="1166 1787 1442 1875">Se presenta la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, al ingresar el</p>

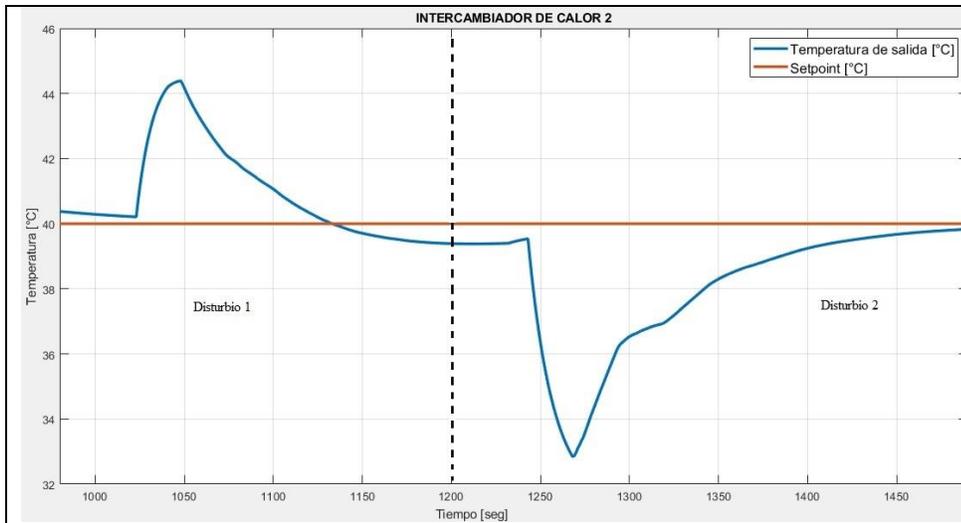


Figura 28 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método CHR

primer disturbio, que fue la apertura de la válvula SV 103_1 con incremento del flujo de leche hacia el intercambiador de calor 2, se observa que la variable controlada alcanza un valor máximo de 45 °C y posteriormente disminuye, luego se ingresa un segundo disturbio que fue el incremento del flujo de agua hacia el intercambiador de calor 2, con el que la variable controlada alcanzó un valor mínimo de 33 °C y posteriormente regresó a su valor de referencia.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.6 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

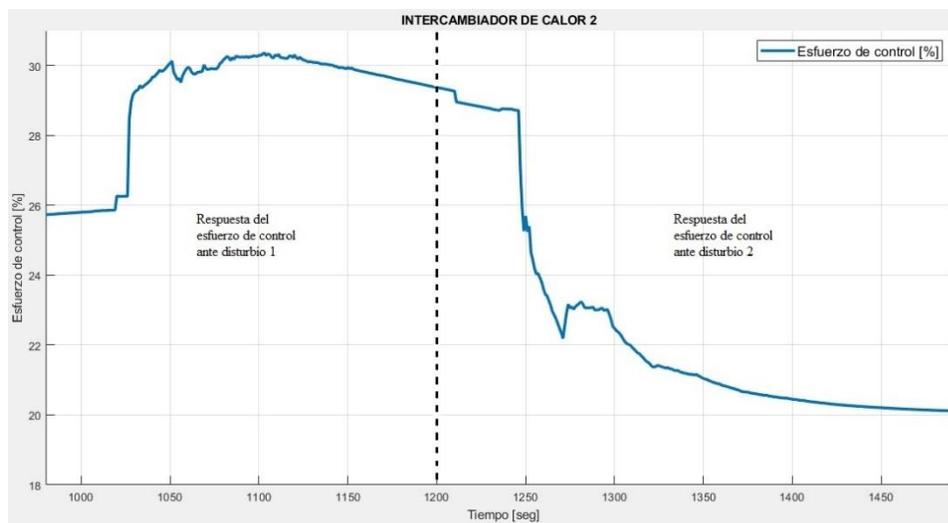
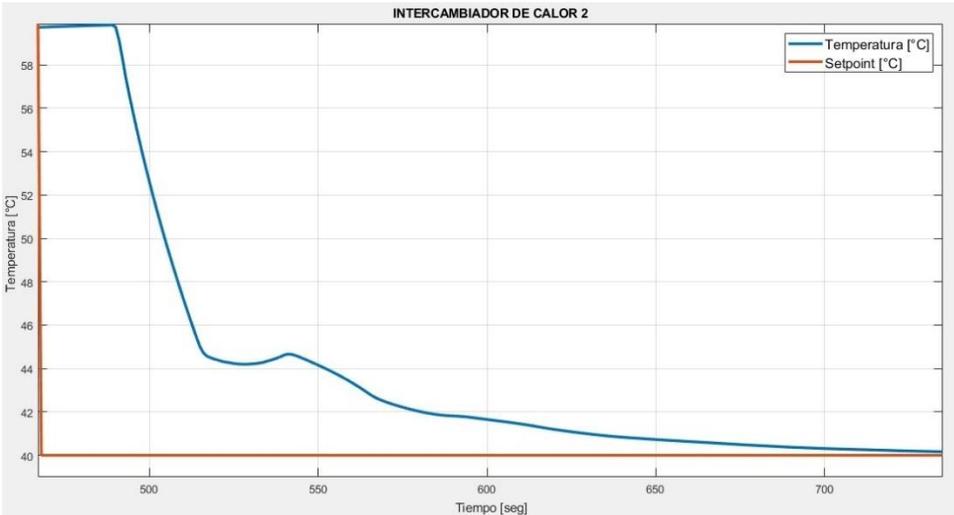
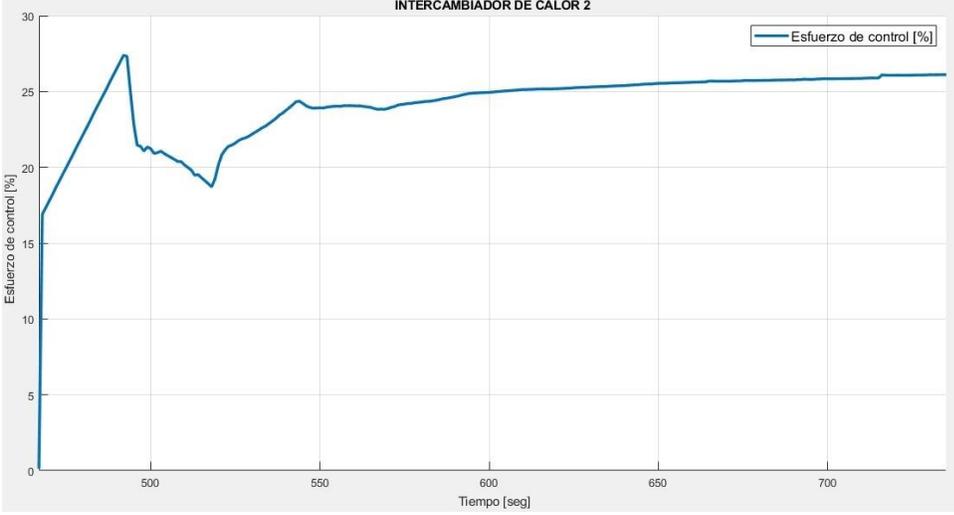


Figura 29 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 25 % y luego con el ingreso del primer disturbio incrementa hasta 31% presentando algunas oscilaciones, posteriormente ingresa un segundo disturbio donde el esfuerzo de control disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 20 %, en el cual se estabiliza.

Tabla 15

Resultados de sintonización del PID convencional en la etapa de disminución de temperatura por el método de López

Respuesta del PID convencional	Descripción
 <p>Figura 30 Respuesta de la temperatura por el método de López Et Al, ante seguimiento de consigna</p>	<p>Se presenta la curva de respuesta de la temperatura del intercambiador de disminución, obtenida ante el seguimiento de la referencia de 40 °C, se observa que se estabiliza en un valor constante. Los parámetros de respuesta transitoria encontrados se registran a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Tr = 139 segundos - Ts = 232 segundos - Mp = 0 °C -Error de seguimiento en estado estacionario E = 0.3 °C
 <p>Figura 31 Respuesta del esfuerzo de control por el método de López Et Al.</p>	<p>Se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización del PID por el método López Et Al, se observa que no supera el valor máximo de salida, alcanzando un valor máximo de 27%, para luego estabilizarse en un valor de 26 %.</p>
	<p>Se presenta la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, al ingresar el primer disturbio se observa que la variable controlada alcanza un valor máximo de 45 °C y posteriormente</p>

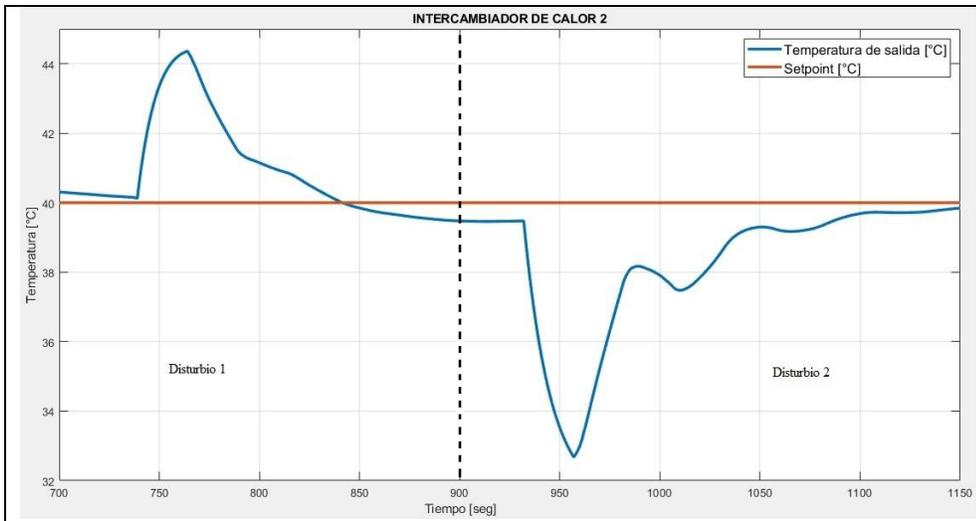


Figura 32 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al.

disminuye hasta un valor de 39.5 °C, luego ingresa el segundo disturbio con el que la temperatura alcanza un valor mínimo de 33 °C y posteriormente presenta oscilaciones hasta alcanzar nuevamente el valor de referencia de 40 °C. Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:
 $E_1 = 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $E_2 = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$

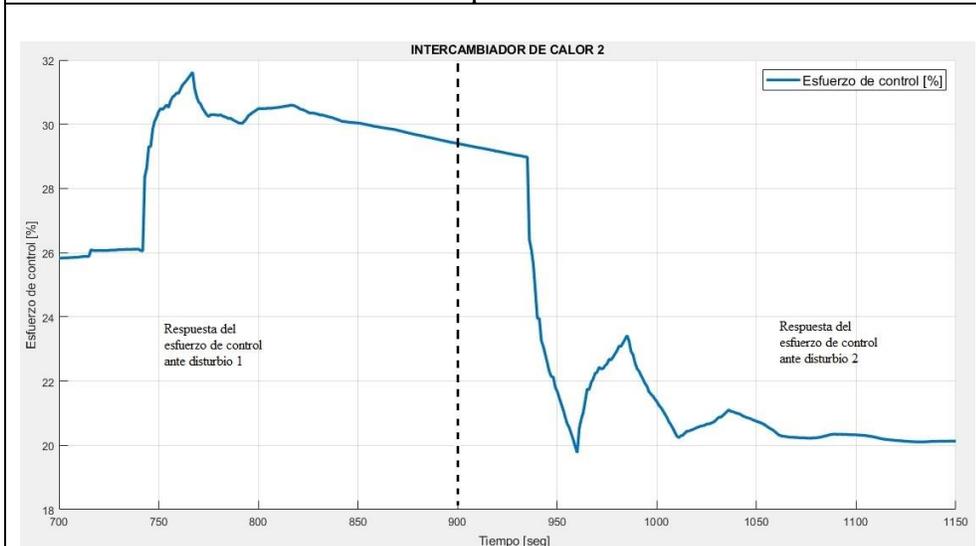


Figura 33 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 26 % y con el ingreso del primer disturbio incrementa hasta 32% presentando algunas oscilaciones, posteriormente ingresa un segundo disturbio donde el esfuerzo de control presenta una respuesta también con oscilaciones, hasta estabilizarse en un valor de 20 %.

Tabla 16

Resultados de sintonización del PID convencional en la etapa de disminución de temperatura por el método de Lambda

Respuesta del PID convencional	Descripción
	Se presenta la curva de respuesta de la variable controlada, obtenida ante el seguimiento de la referencia de 40 °C, se observa que se estabiliza en un valor constante de

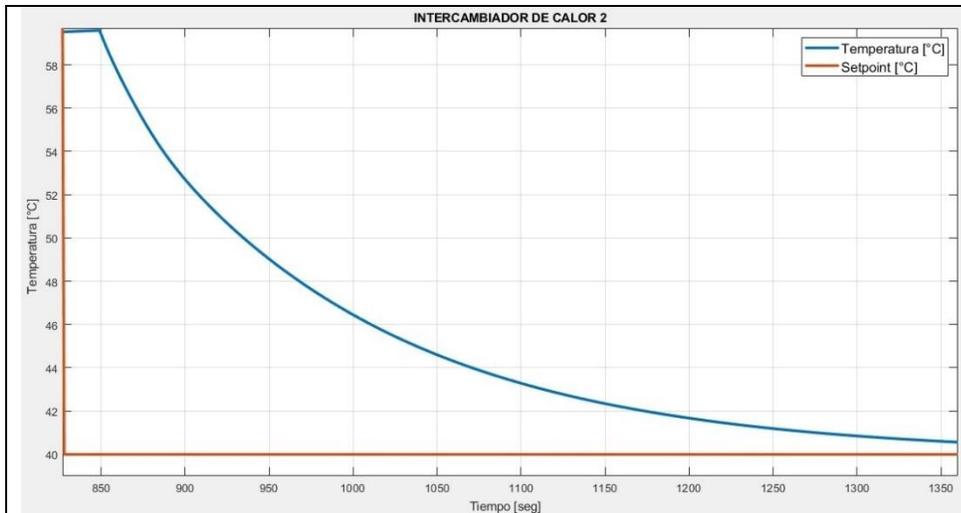


Figura 34 Respuesta de la temperatura por el método de Lambda ante seguimiento de consigna

40.7 °C. Los parámetros de respuesta transitoria encontrados se registran a continuación:

- Tr = 256 segundos
- Ts = 478 segundos
- Mp = 0 °C
- Error de seguimiento en estado estacionario es de: E = 0.7 °C

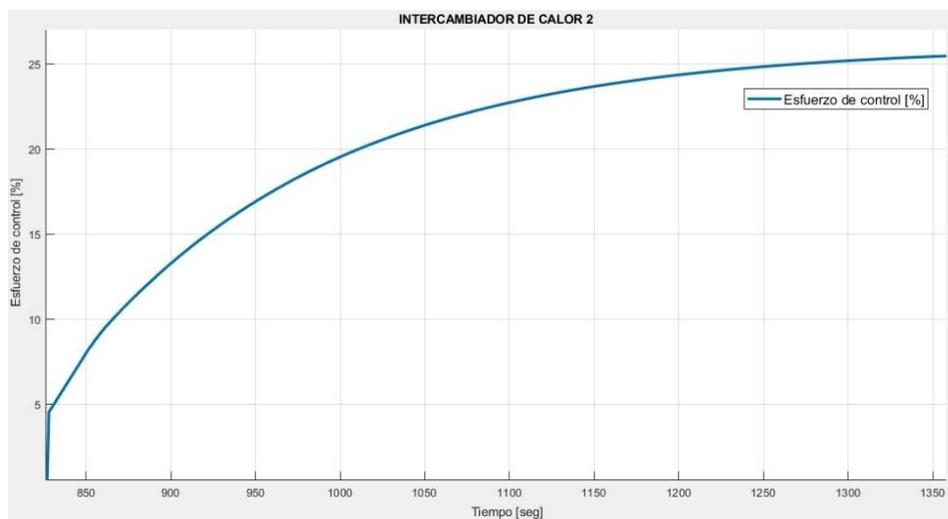


Figura 35 Respuesta del esfuerzo de control por el método Lambda

Se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización del PID por el método Lambda, se observa que presenta una curva suave, no supera el valor máximo de salida, y alcanza un valor máximo de 26%.

Se presenta la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, al ingresar el primer disturbio, se observa que la variable controlada alcanza un valor máximo de 45 °C y posteriormente disminuye hasta estabilizarse en el valor de referencia, luego ingresa un segundo disturbio, con el que la

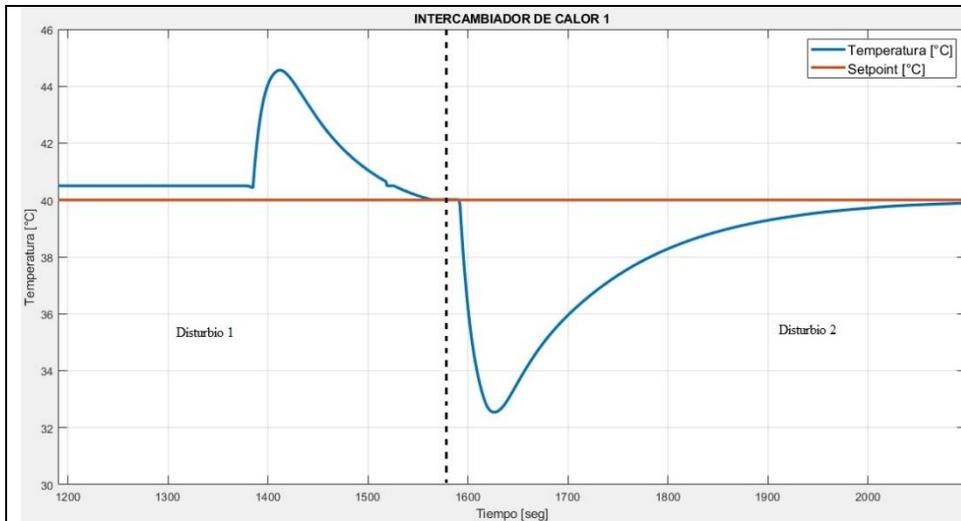


Figura 36 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método Lambda

variable controlada alcanzó un valor mínimo de 33 °C y posteriormente regresó a su valor de referencia.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.17 \text{ } ^\circ\text{C}$$

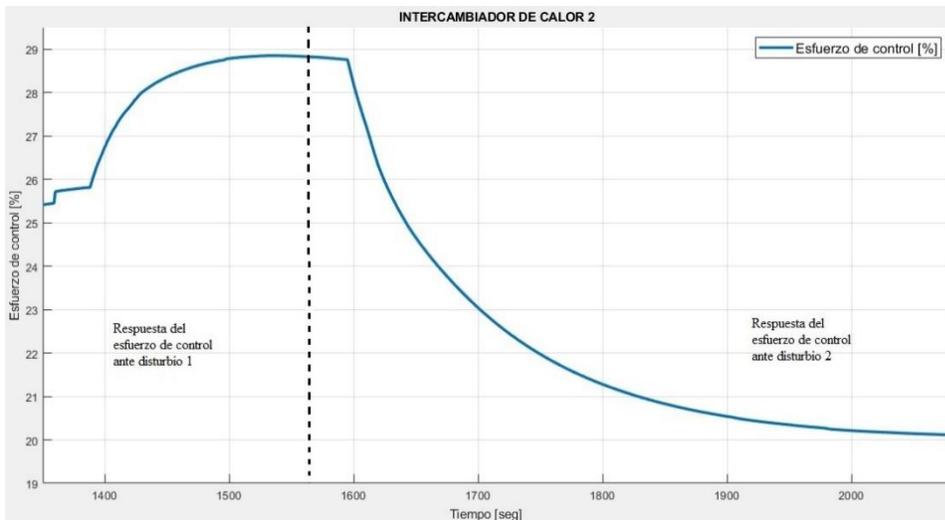


Figura 37 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 25 % y con el ingreso del primer disturbio incrementa hasta 29 % donde se estabiliza, posteriormente ingresa un segundo disturbio donde el esfuerzo de control presenta una respuesta más lenta y se estabiliza en 20 %.

Con la obtención de las curvas de respuesta del PID convencional de las etapas de aumento y disminución de temperatura de la planta de fabricación de kumis, ante seguimiento de consigna y ante la presencia de disturbios se dio por finalizado el capítulo 2. En el capítulo 3 se presentará el predictor de Smith con el que se va a realizar el control en las etapas de aumento y disminución de temperatura, para posteriormente comparar las respuestas de este, con las obtenidas para el PID convencional.

Capítulo 3 : Diseño e implementación del predictor de Smith para los intercambiadores de calor de la planta virtual de fabricación de kumis

En el capítulo 3 se presenta el predictor de Smith para el control de los intercambiadores de calor de la planta de fabricación de kumis del PIAI, donde inicialmente se presentarán las curvas de respuesta de este compensador de tiempo muerto, simuladas mediante el software Matlab/Simulink y compararlas con la respuesta que se obtuvo para el controlador convencional que fue simulado en el software mencionado anteriormente. Posteriormente se presentarán los resultados de la implementación del predictor de Smith en la planta de fabricación de kumis.

3.1 Predictor de Smith simulado mediante Matlab/Simulink

En esta parte del documento se presenta el predictor de Smith simulado mediante el software Matlab/Simulink haciendo uso del modelo de primer orden más tiempo muerto que fue identificado y validado previamente para cada uno de los intercambiadores de calor, y las curvas obtenidas se comparan con las curvas obtenidas del PID convencional simulado en Matlab/Simulink.

3.1.1 Predictor de Smith para el intercambiador de aumento de temperatura simulado en Matlab/Simulink

El predictor de Smith es una estructura compensadora de tiempo muerto cuyo principio radica en lograr que la respuesta del sistema con retardo tenga las mismas características dinámicas del sistema sin retardo, pero desplazada en el tiempo el valor del retardo, haciendo uso de un modelo del proceso sin el retardo de tiempo para predecir su salida y este nuevo proceso es controlado por un controlador convencional. A continuación, se presenta el diagrama de bloques del predictor de Smith para la etapa de aumento de temperatura.

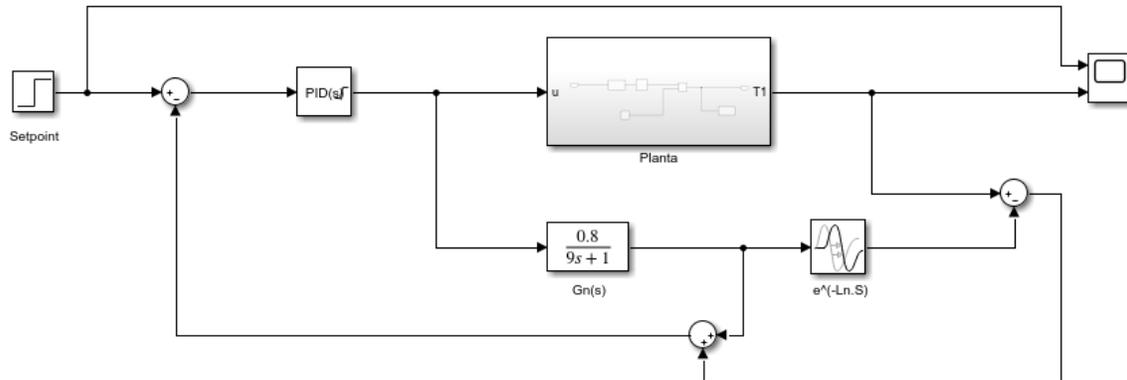


Figura 38 Diagrama de bloques del predictor de Smith para el intercambiador de aumento de temperatura.

En la figura 38 se presenta el diagrama de bloques del predictor de Smith para la etapa de aumento de temperatura, el cual está compuesto por dos partes fundamentales, por un controlador primario que puede ser un PI o un PID y la parte del predictor que está compuesta por un modelo del proceso sin retardo de tiempo, en este caso $G_n(s) = \frac{0.8}{9s+1}$, el cual hace posible predecir la salida de la planta y está conectado en paralelo a la misma y compuesto también por un modelo de retardo de tiempo e^{-22s} . A continuación, se presenta la respuesta para cada uno de los métodos de sintonización que fueron aplicados anteriormente y se comparan con las respuestas obtenidas del PID convencional. Para la realización de las pruebas de sintonización con el predictor de Smith simulado en Matlab/Simulink se asignaron los siguientes parámetros, ver tabla 17.

Tabla 17

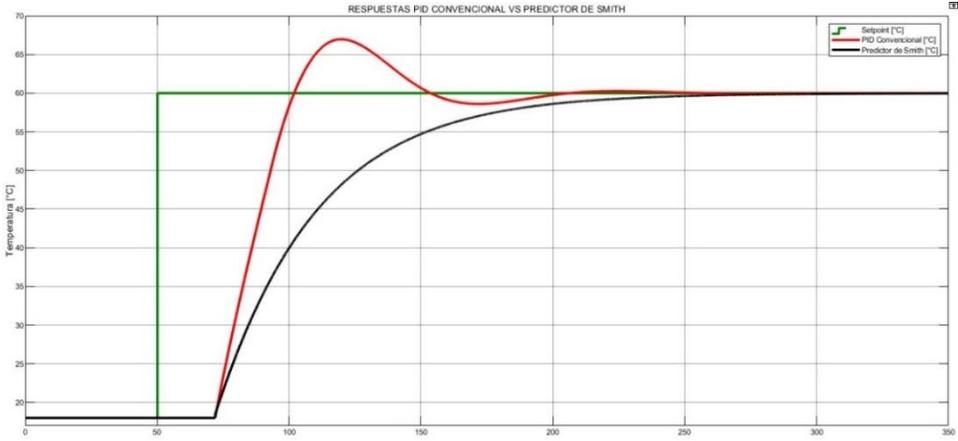
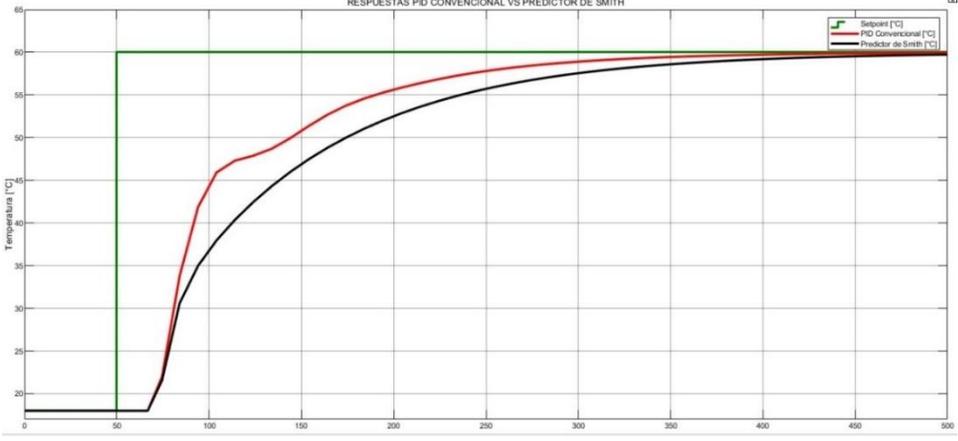
Parámetros de simulación del predictor de Smith de la etapa de aumento de temperatura realizado en Matlab/Simulink

Parámetros de simulación	
Tiempo de paso	50 segundos
Valor inicial	18 °C
Valor final	60 °C
Retardo de tiempo	22 segundos

Después de asignadas las condiciones iniciales del sistema se procedió a realizar la simulación con cada uno de los métodos que fueron seleccionados en capítulos anteriores y se obtuvieron los siguientes resultados, que son comparados con la respuesta del PID convencional.

Tabla 18

Comparación de las curvas de respuesta obtenidas para el predictor de Smith y el PID convencional simulados en Matlab/Simulink para el intercambiador de calor de la etapa de aumento de temperatura

Respuestas obtenidas en simulación Matlab/Simulink	Descripción
 <p data-bbox="207 1171 1123 1239">Figura 39 Respuestas del predictor de Smith y PID convencional por el método de CHR</p>	<p data-bbox="1166 682 1442 1249">En la figura 39 se observan las curvas de respuesta ante seguimiento de consigna obtenidas con el predictor de Smith y con el PID convencional, se asignó un valor de referencia de 60 °C, en un tiempo de 50 segundos y se observa que una vez transcurrido el retardo de tiempo de 22 segundos, las dos curvas empiezan a incrementar, pero para el PID convencional se presenta un sobreimpulso que alcanza un valor máximo de 67 °C, mientras que la curva de respuesta del predictor de Smith no presenta oscilaciones.</p>
 <p data-bbox="207 1738 1123 1801">Figura 40 Respuesta del predictor de Smith y PID convencional por el Método de López Et Al</p>	<p data-bbox="1166 1354 1442 1701">Se observa que la respuesta del PID convencional oscila un poco mientras que con el predictor de Smith se observa una curva más suave, también se observa que no se presenta sobreimpulso en las respuestas de los controladores y ambas incrementan lentamente.</p>

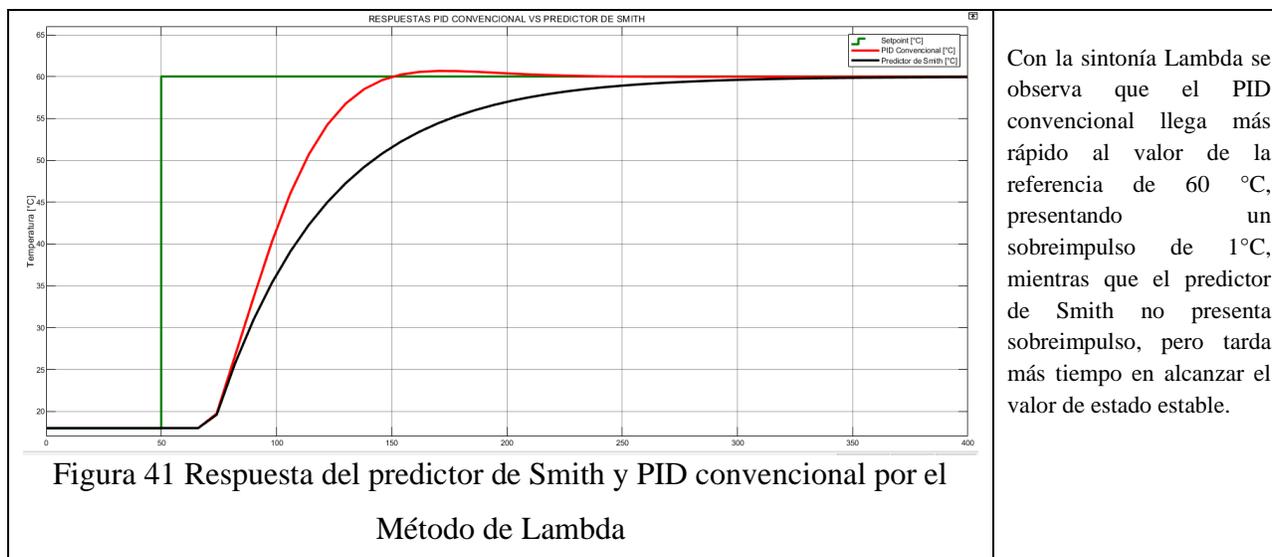


Figura 41 Respuesta del predictor de Smith y PID convencional por el Método de Lambda

Después de realizadas las pruebas del Predictor de Smith en Matlab/Simulink con los tres métodos seleccionados para la etapa de aumento de temperatura y de comparar su curva de respuesta con la obtenida para el PID convencional, se presentan los resultados obtenidos en cuanto a sus parámetros de respuesta transitoria, ver tabla 19.

Tabla 19

Parámetros de respuesta transitoria del PID convencional y el Predictor de Smith de la etapa de aumento de temperatura simulados en Matlab/Simulink

Método de sintonización	PID Convencional			Predictor de Smith		
	Tr (seg)	Ts (seg)	Mp (°C)	Tr (seg)	Ts (seg)	Mp (°C)
CHR	26	130	7	74	143	0
López Et Al.	221	245	0	177	314	0
Lambda	63	90	0.7	106	195	0

En la tabla 19 se presentan los resultados comparativos de las respuestas temporales del PID convencional y el Predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura donde se observa que para el método CHR la implementación del predictor de Smith no tuvo sobreimpulso mientras que el PID convencional tuvo un sobreimpulso de 7 °C, aunque tanto el tiempo de levantamiento como el tiempo de establecimiento fueron mayores en el predictor de Smith. Para la prueba de sintonización con el método de López et Al, se observa que el predictor de Smith

tuvo un tiempo de levantamiento más rápido que el PID convencional, pero tardó más tiempo en estabilizarse y en ninguno se presentó sobreimpulso. En cuanto a la prueba realizada por el método Lambda el tiempo de levantamiento y establecimiento del Predictor de Smith fue superior al PID convencional.

3.1.2 Predictor de Smith para el intercambiador de disminución de temperatura simulado en Matlab/Simulink

El diagrama de bloques para el predictor de Smith de la etapa de disminución de temperatura se presenta a continuación en la figura .

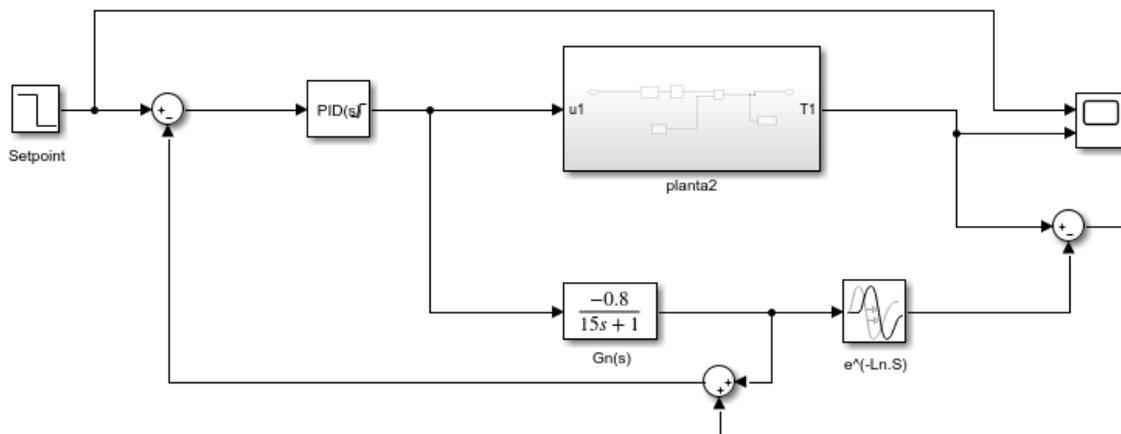


Figura 42 Diagrama de bloques del Predictor de Smith de la etapa de disminución de temperatura

En la figura 42 se presenta el diagrama de bloques del predictor de Smith para la etapa de disminución de temperatura, para la realización de las pruebas en Matlab/Simulink se asignaron las siguientes condiciones iniciales, ver tabla 20.

Tabla 20

Parámetros de simulación del predictor de Smith de la etapa de disminución de temperatura simulado en Matlab/Simulink

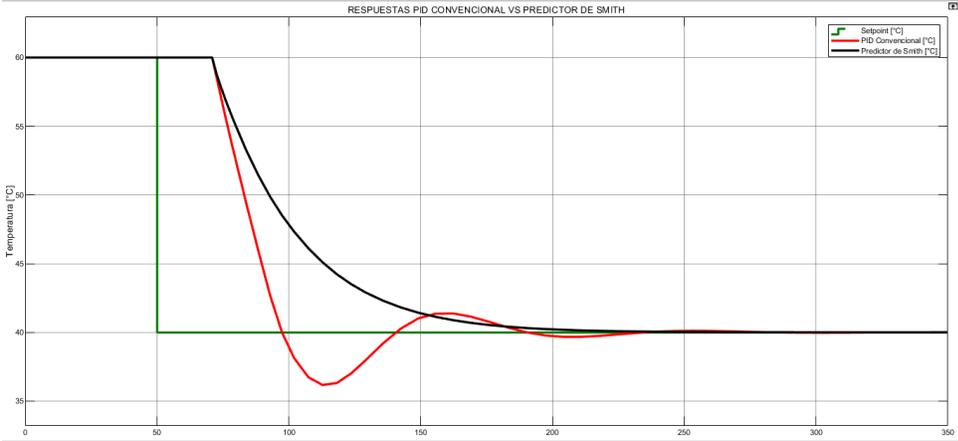
Parámetros de simulación	
Tiempo de paso	50 segundos

Valor inicial	60 °C
Valor final	40 °C
Retardo de tiempo	21 segundos

Después de asignadas las condiciones del sistema se procedió a realizar la simulación para cada método de sintonización del controlador y se obtuvieron los siguientes resultados, ver tabla 21.

Tabla 21

Comparación de las curvas de respuesta obtenidas con el predictor de Smith y el PID convencional simulados en Matlab/Simulink para el intercambiador de calor de la etapa de disminución de temperatura

Respuestas obtenidas en simulación Matlab/Simulink	Descripción
 <p data-bbox="207 1444 1122 1535">Figura 43 Respuestas del predictor de Smith y PID convencional por el método de CHR</p>	<p data-bbox="1166 940 1442 1539">En la figura 43 se observan las curvas de respuesta ante seguimiento de consigna obtenidas con el predictor de Smith y con el PID convencional, se asignó un valor de referencia de 40 °C, en un tiempo de 50 segundos y se observa que una vez transcurrido el retardo de tiempo de 21 segundos, las dos curvas empiezan a descender para alcanzar el valor de la referencia, pero para el PID convencional se presentan oscilaciones, alcanzando un valor mínimo de 36 °C, mientras que la curva de respuesta del predictor de Smith no presenta oscilaciones.</p>

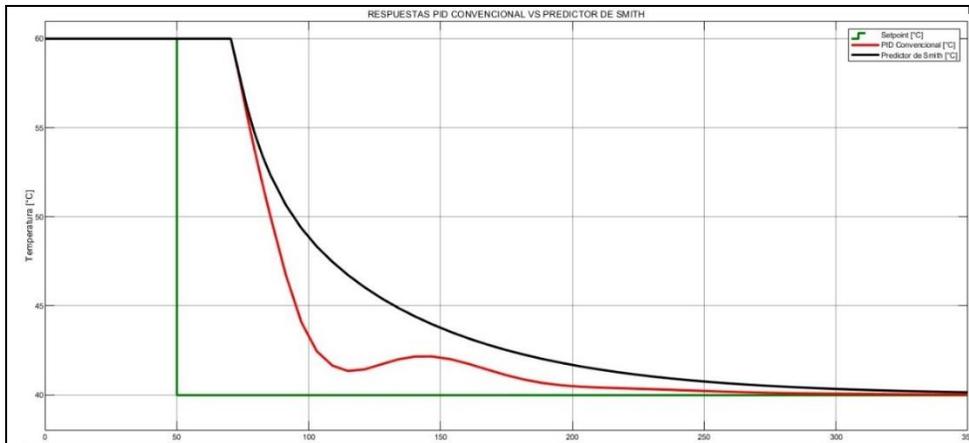


Figura 44 Respuesta del predictor de Smith y PID convencional por el Método de la integral del error criterio IAE

Se observa que la respuesta del PID convencional oscila un poco hasta alcanzar el valor de referencia de 40 °C, mientras que con el predictor de Smith se observa una curva más suave, sin oscilaciones.

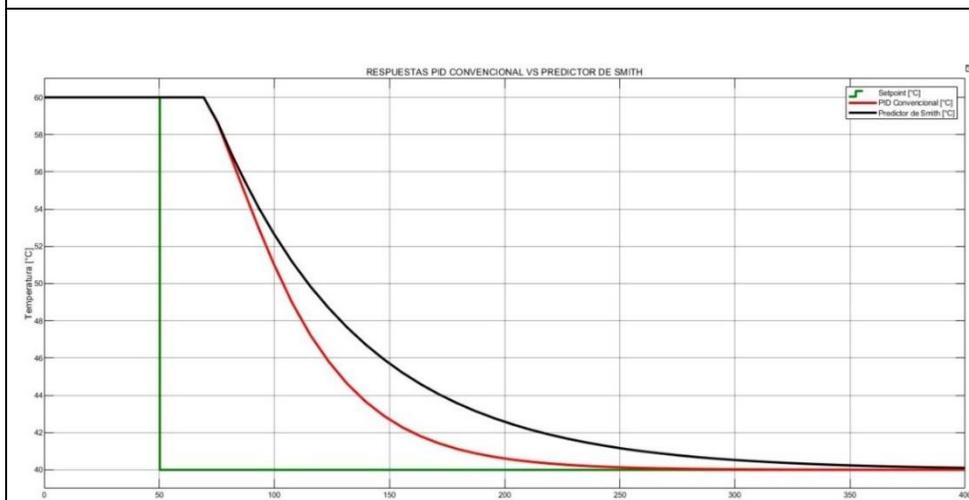


Figura 45 Respuesta del predictor de Smith y PID convencional por el Método de Lambda

En la figura 45 se muestran las curvas de respuesta del Predictor de Smith y el PID convencional simulados en Matlab/Simulink, donde se observa que con la sintonía Lambda el PID convencional llega más rápido al valor de la referencia de 40 °C, mientras que el predictor de Smith tarda más tiempo en alcanzar el valor de estado estable de 40 °C.

Anteriormente se realizaron las pruebas de sintonización del Predictor de Smith simulado en Matlab/Simulink con los tres métodos seleccionados para la etapa de disminución de temperatura y se compararon con las respuestas del PID convencional, los resultados de respuesta transitoria para ambos controladores se presentan en la tabla 22.

Tabla 22

Parámetros de respuesta transitoria del PID convencional y Predictor de Smith de la etapa de disminución de temperatura simulados en Matlab/Simulink

Método de sintonización	PID Convencional			Predictor de Smith		
	Tr (seg)	Ts (seg)	Mp (°C)	Tr (seg)	Ts (seg)	Mp (°C)
CHR	24	120	4	66	115	0
López Et Al.	34	135	0	115	196	0
Lambda	84	142	0	138	222	0

En la tabla 22 se presentaron los resultados comparativos de las respuestas temporales obtenidas con el PID convencional y con el Predictor de Smith en la etapa de disminución de temperatura, donde se observa que con la sintonización por el método CHR la implementación del predictor de Smith no tuvo sobreimpulso mientras que el PID convencional presentó un sobreimpulso de 6°C, en cuanto al tiempo de establecimiento, se observó que el predictor de Smith arrojó una mejor respuesta con un tiempo de establecimiento de 115 segundos, frente a un tiempo de 120 segundos del PID convencional. En cuanto a la prueba realizada con el método de López et Al, se observa que no hubo sobreimpulso en la temperatura controlada con el PID convencional ni con el predictor de Smith, pero el predictor de Smith tuvo un mayor tiempo de levantamiento y de establecimiento. En la prueba realizada con el método de Lambda, el tiempo de levantamiento y establecimiento del Predictor de Smith fue mayor al tiempo obtenido con el PID convencional.

3.2 Implementación del Predictor de Smith en los intercambiadores de calor de la etapa de pasteurización de la planta de fabricación de kumis

Después de finalizada la simulación del Predictor de Smith en Matlab/Simulink y de comparar su respuesta con el PID convencional, se realizó la implementación de esta estructura compensadora de tiempo muerto en el PLC ControlLogix 1756-L61, mediante texto estructurado, para esto fue necesario realizar la discretización del modelo del proceso y obtener las ecuaciones necesarias para poder realizar el control de la temperatura, la discretización del modelo del proceso y las ecuaciones del predictor de Smith se desarrollaron en el anexo C.

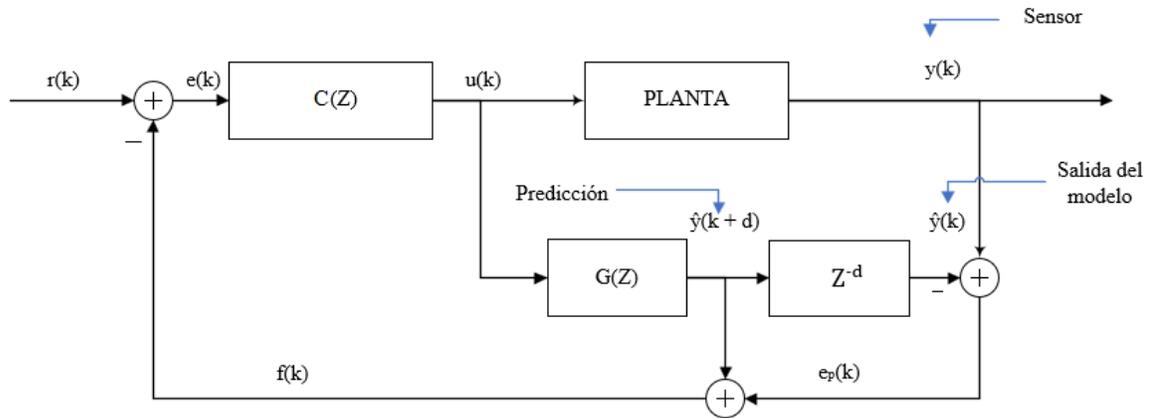


Figura 46 Diagrama de bloques en tiempo discreto del predictor de Smith

En la figura 46 se presenta la estructura del Predictor de Smith en tiempo discreto donde $r(k)$ representa la referencia, $e(k)$ es la señal de error, $C(z)$ es un controlador que puede ser PI o PID, $u(k)$ es la señal del esfuerzo de control, $G(z)$ es el modelo matemático del proceso en tiempo discreto con el que se va a estimar el comportamiento del intercambiador de calor como si este no tuviera ningún retardo de tiempo y Z^{-d} representa al retardo de tiempo en tiempo discreto, cabe resaltar que, las señales ahora no dependen del tiempo sino que dependen de muestras o instantes k .

3.2.1 Predictor de Smith para la etapa de aumento de temperatura

Para la implementación del Predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura en primer lugar se realizó la discretización del modelo del proceso que se obtuvo con la identificación presentada en el capítulo 2, dando como resultado la siguiente ecuación en tiempo discreto, para ver el proceso de discretización remitirse al anexo C.

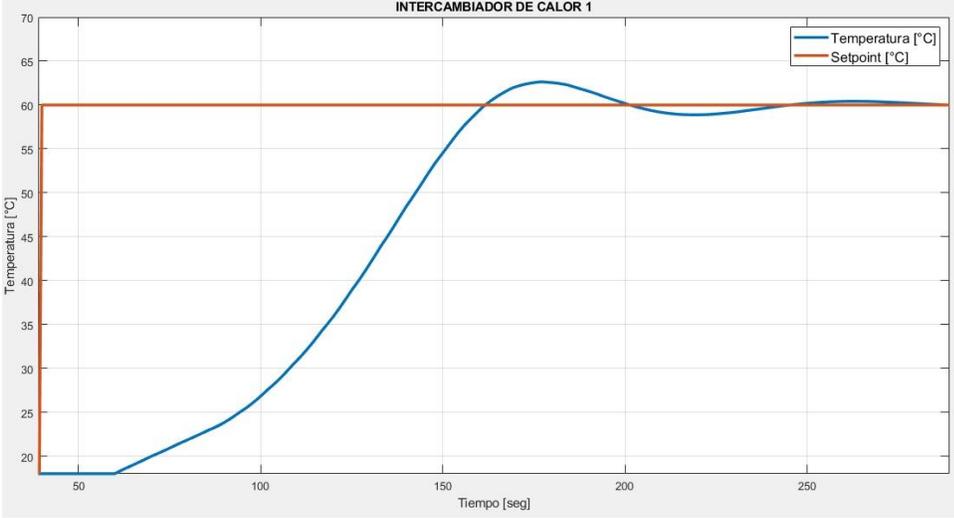
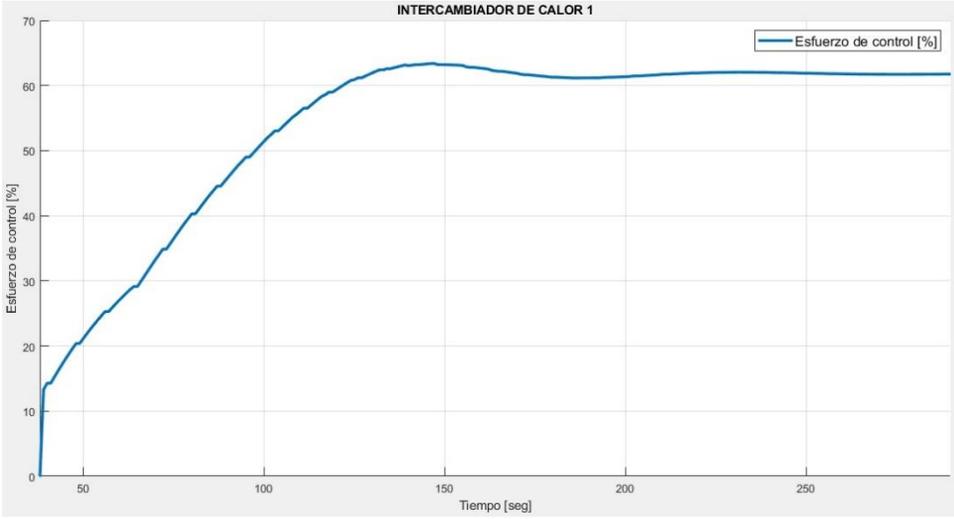
$$G(s) \frac{0.8}{9s + 1} e^{-22s} \quad \text{en tiempo discreto} \quad G(z) \frac{0.08413}{z - 0.8948} z^{-22} \quad (\text{ecuación 15})$$

Una vez discretizado el modelo de la planta se procedió a implementar el predictor de Smith en el PLC mediante texto estructurado y probarlo aplicando diferentes técnicas de sintonización, para esto se ingresaron las condiciones iniciales del proceso, que fueron presentadas en la tabla 7 y posteriormente se ingresaron los parámetros de cada método de sintonización, que se

presentaron en la tabla 8, las curvas obtenidas con el predictor de Smith se presentan en la tabla 23.

Tabla 23

Resultados de sintonización del Predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura mediante la sintonización CHR

Respuesta con Predictor de Smith	Descripción
 <p data-bbox="232 1129 1096 1213">Figura 47 Respuesta de predictor de Smith por el método CHR ante seguimiento de consigna</p>	<p data-bbox="1166 632 1438 1010">En la figura 47 se observa la curva de respuesta de la temperatura del intercambiador de aumento, obtenida ante el seguimiento de la referencia de 60 °C, se observa que se estabiliza en un valor constante, y presenta un sobreimpulso del 3%. Los parámetros de respuesta transitoria encontrados se registran a continuación:</p> <ul data-bbox="1166 1016 1438 1178" style="list-style-type: none"> -Tr = 70 segundos -Ts = 152 segundos -Mp = 2 °C -Error de seguimiento en estado estacionario E = 0.4 °C
 <p data-bbox="253 1831 1075 1864">Figura 48 Respuesta del esfuerzo de control por el método CHR</p>	<p data-bbox="1166 1392 1438 1671">En la figura 48 se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método de CHR, se observa que presenta un comportamiento suave alcanzando un valor estable de 61 %.</p>

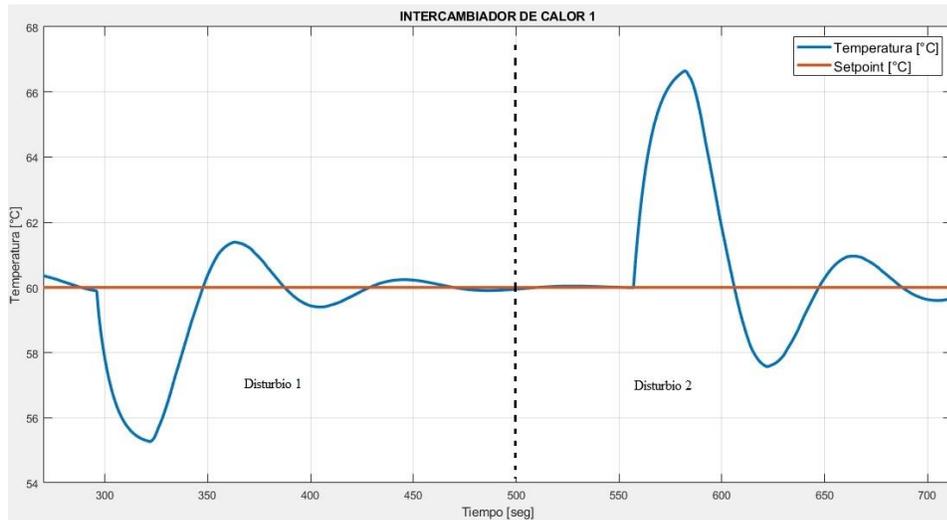


Figura 49 Respuesta de la variable temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método CHR

Se observa la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, el primero es la apertura de válvula SV 102-1 con incremento del flujo de leche hacia el intercambiador de calor 1, al ingresar el disturbio se observa que la temperatura de la leche alcanza un valor mínimo de 55 °C, y luego regresa al valor de referencia de 60 °C.

Luego se aplicó un segundo disturbio que fue incrementar el flujo de vapor hacia el intercambiador de calor 1, donde la temperatura alcanzó un valor máximo de 67 °C, estabilizándose posteriormente en el valor de referencia.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

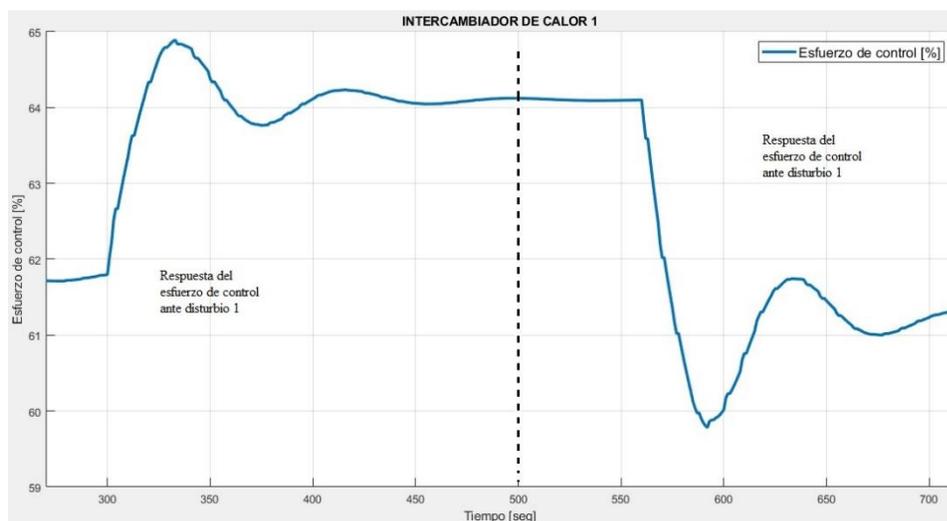
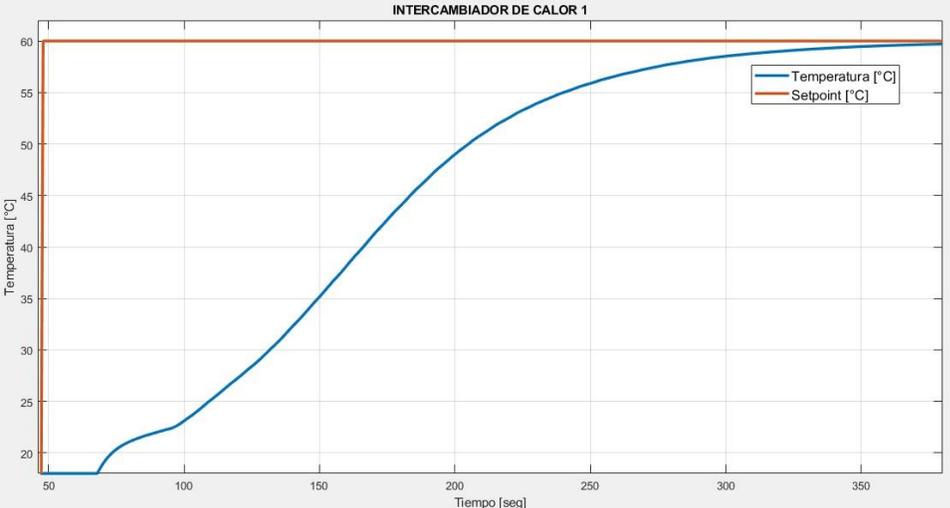
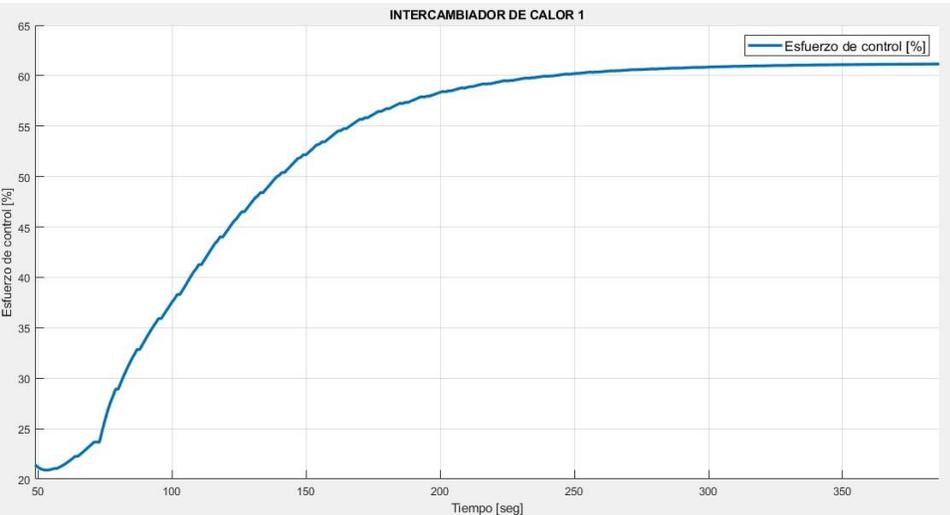


Figura 50 Respuesta del esfuerzo de control para disturbios 1 y 2

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 61 % y al ingresar el primer disturbio alcanza un valor cercano a 65 %, para después estabilizarse en 64%. Luego ingresa el segundo disturbio y el esfuerzo de control disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 59%, para luego alcanzar un valor de 61%.

Tabla 24

Resultados de sintonización con el Predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura con la sintonización de López Et Al

Respuesta con Predictor de Smith	Descripción
 <p>Figura 51 Respuesta de la temperatura por el método de López Et Al, ante seguimiento de consigna</p>	<p>Se observa la curva de respuesta de la temperatura del intercambiador de aumento con el método de López Et Al., obtenida ante el seguimiento de la referencia de 60 °C, se observa que no presenta sobreimpulso. Los parámetros de respuesta transitoria encontrados se registran a continuación:</p> <ul style="list-style-type: none"> -Tr = 156 segundos -Ts = 262 segundos -Mp = 0 °C -Error de seguimiento en estado estacionario E = 0 °C
 <p>Figura 52 Respuesta del esfuerzo de control por el método de López Et Al</p>	<p>En la figura 52 se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método de López Et Al., se observa que presenta un comportamiento suave alcanzando un valor estable de 61 %.</p>
	<p>Se observa la respuesta de la temperatura ante la presencia de dos</p>

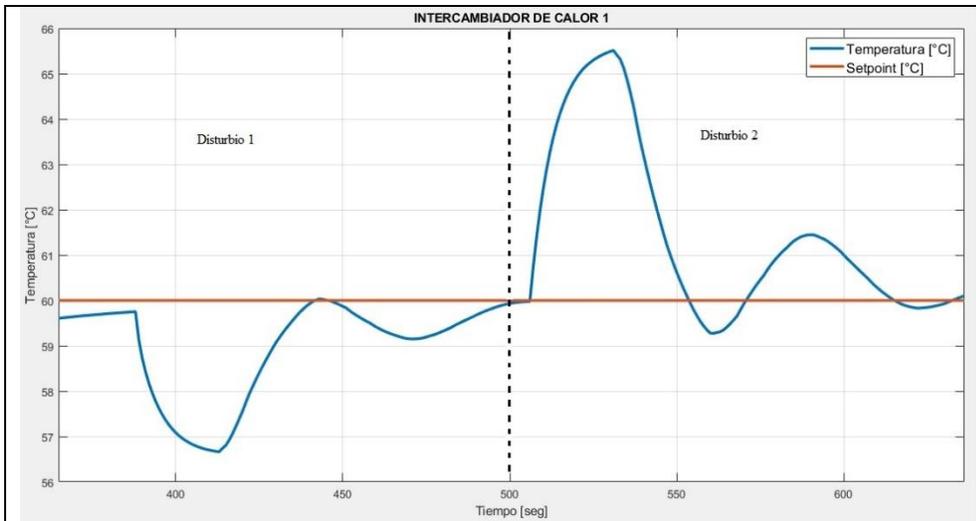


Figura 53 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al

disturbios, al ingresar el primer disturbio se observa que la temperatura de la leche alcanza un valor mínimo de 56 °C y luego regresa al valor de referencia de 60 °C presentando algunas oscilaciones. Luego se aplicó un segundo disturbio, donde la variable controlada alcanzó un valor máximo de 65 °C, presentando oscilaciones y posteriormente se estabilizó en el valor de referencia. Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:
 $E_1 = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$
 $E_2 = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$

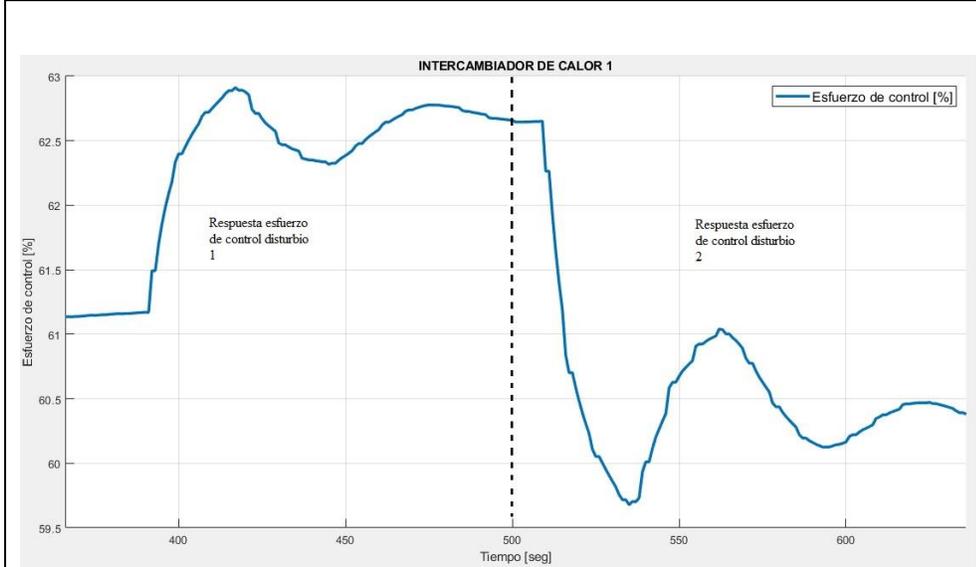


Figura 54 Respuesta del esfuerzo de control para disturbios 1 y 2

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 61 % y al ingresar el primer disturbio alcanza un valor cercano a 63 %, para después estabilizarse en 62%. Luego ingresa el segundo disturbio y el esfuerzo de control presenta oscilaciones hasta alcanzar un valor estable de 60%.

Tabla 25

Resultados de sintonización del Predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura con la sintonización de Lambda

Respuesta con Predictor de Smith	Descripción

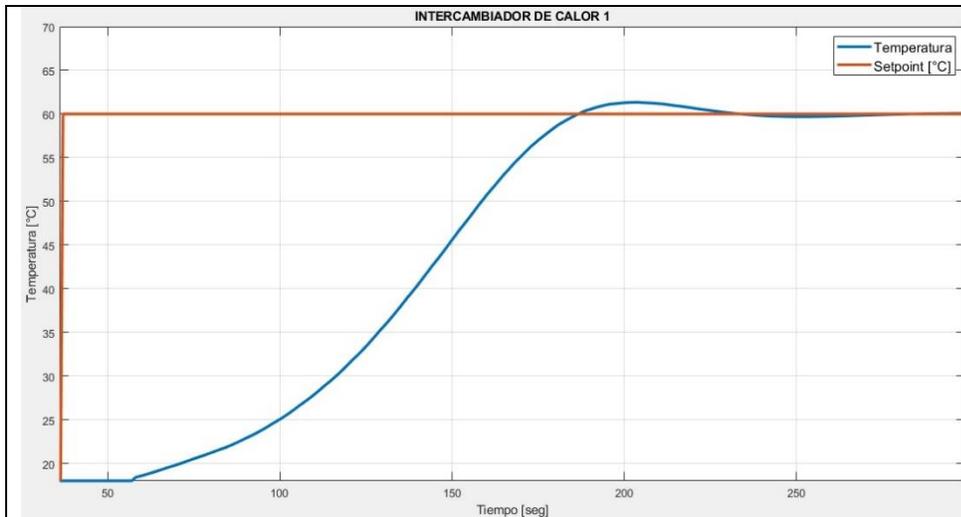


Figura 55 Respuesta de la temperatura por el método Lambda ante seguimiento de consigna

Se observa la curva de respuesta de la temperatura del intercambiador de aumento obtenida ante el seguimiento de la referencia de 60 °C. Los parámetros de respuesta transitoria encontrados se registran a continuación:

- Tr = 85 segundos
- Ts = 144 segundos
- Mp = 1 °C
- Error de seguimiento en estado estacionario E = 0.3 °C

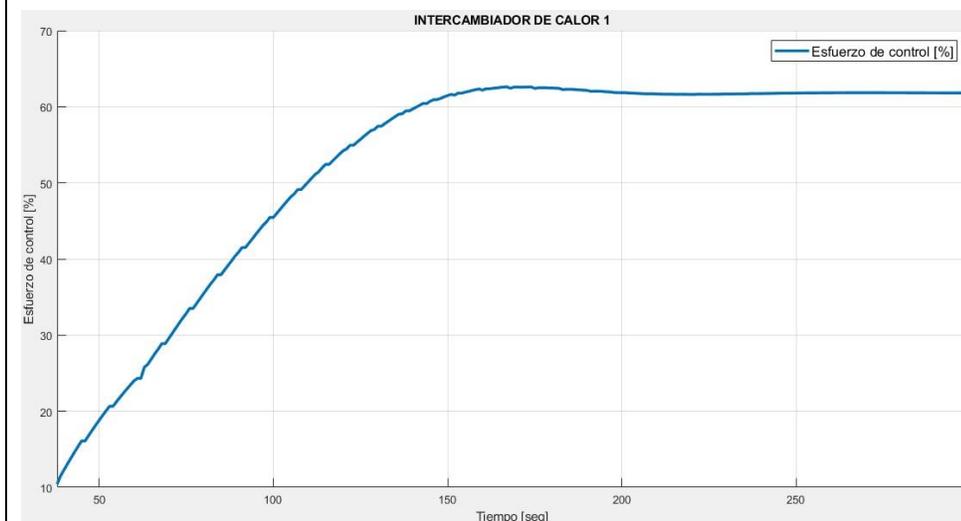


Figura 56 Respuesta del esfuerzo de control por el método Lambda

En la figura 56 se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método de Lambda., se observa que presenta un comportamiento suave alcanzando un valor estable de 61 %.

Se observa la respuesta de la temperatura ante la presencia de dos disturbios, al ingresar el primer disturbio se observa que la temperatura de la leche alcanza un valor mínimo de 55 °C y luego se estabiliza en el valor de referencia de 60 °C. Luego se aplicó un segundo disturbio, donde la variable controlada

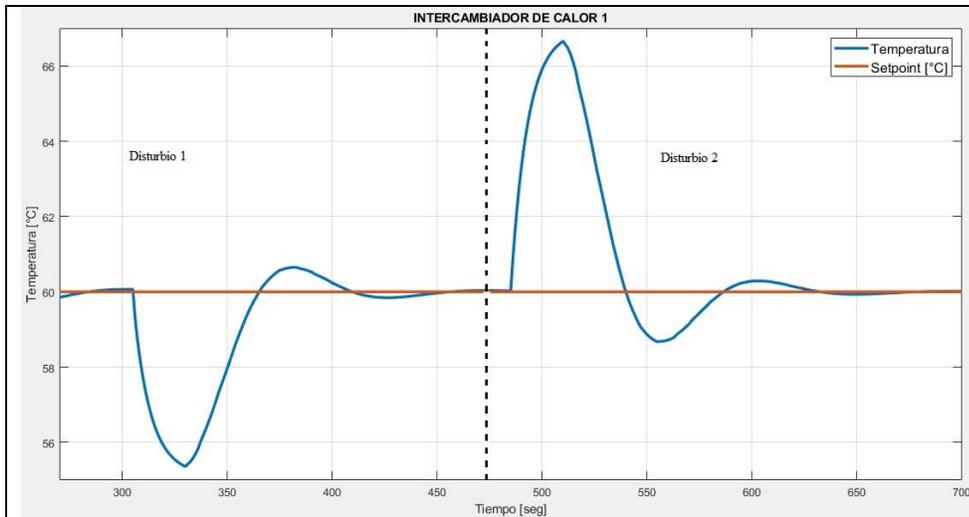


Figura 57 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método Lambda

alcanzó un valor máximo de 67 °C y posteriormente se estabilizó en el valor de referencia.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.07 \text{ } ^\circ\text{C}$$

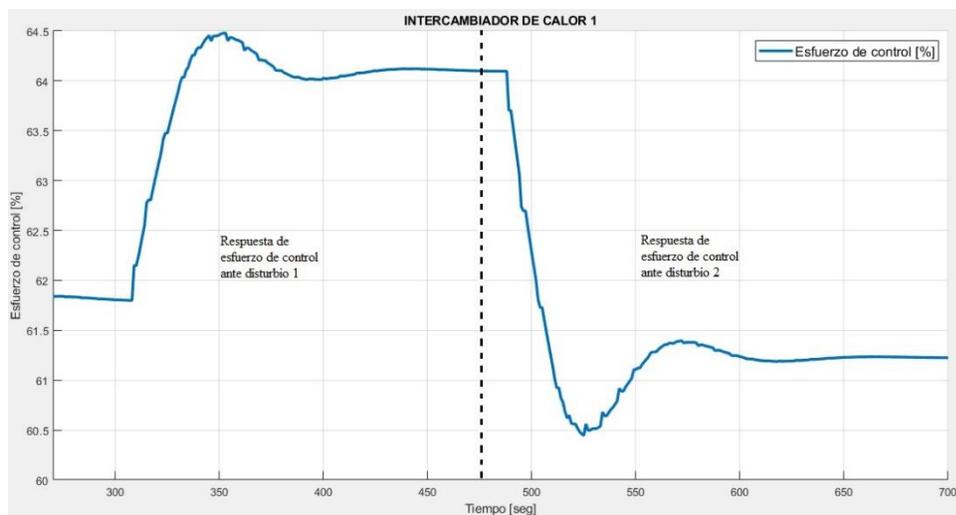


Figura 58 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2 por el método de Lambda

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en un valor cercano a 62 % y al ingresar el primer disturbio alcanza un valor máximo de 64.5 %, para después estabilizarse en 64%. Luego ingresa el segundo disturbio y el esfuerzo de control disminuye hasta alcanzar un valor de 60% y luego se estabiliza en 61%.

3.2.2 Predictor de Smith para la etapa de disminución de temperatura

Para la implementación del Predictor de Smith en la etapa de disminución de temperatura, en primer lugar, se realizó la discretización del modelo del proceso que se obtuvo con la

identificación presentada en el capítulo 2, dando como resultado la siguiente ecuación en tiempo discreto, para ver el proceso de discretización remitirse al anexo C.

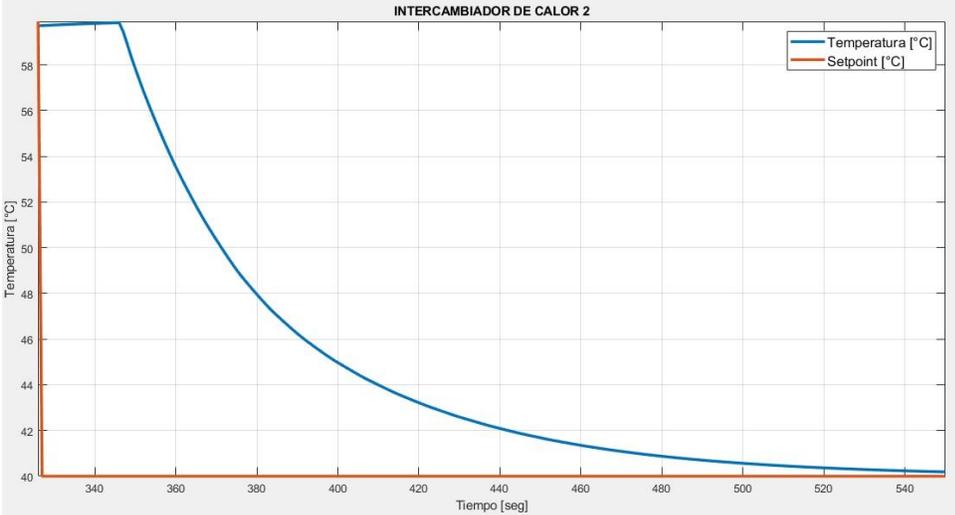
$$G(s) \frac{-0.8}{15s+1} e^{-21s} \quad \text{en tiempo discreto} \quad G(z) \frac{-0.05159}{z-0.9355} z^{-21} \quad (\text{ecuación 16})$$

Una vez discretizado el modelo de la planta se procedió a implementar el predictor de Smith en el PLC mediante texto estructurado y probarlo aplicando diferentes técnicas de sintonización.

Las pruebas con el predictor de Smith de la etapa de disminución de temperatura se realizaron después de que la temperatura de la leche se estabilizó en un valor de 60 °C, y se asignó un valor de Setpoint de 40°C para realizar el choque térmico, las condiciones iniciales del proceso se presentaron en la tabla 12 y posteriormente se ingresaron los parámetros de cada método de sintonización, estos se registraron en la tabla 13, las curvas obtenidas para el predictor de Smith se presentan en la tabla 26.

Tabla 26

Resultados de sintonización con el Predictor de Smith en la etapa de disminución de temperatura

Respuesta con Predictor de Smith	Descripción
 <p data-bbox="232 1686 1096 1753">Figura 59 Respuesta de predictor de Smith por el método CHR ante seguimiento de consigna</p>	<p data-bbox="1166 1165 1437 1491">Se observa la curva de respuesta de la temperatura del intercambiador de temperatura de disminución, obtenida ante el seguimiento de la referencia de 40 °C, se observa que se estabiliza en un valor constante y no presenta sobreimpulso. Los parámetros de respuesta transitoria encontrados se registran a continuación:</p> <ul data-bbox="1166 1495 1437 1654" style="list-style-type: none"> - Tr = 93 segundos - Ts = 155 segundos - Mp = 0 °C - Error de seguimiento en estado estacionario E = 0.2 °C

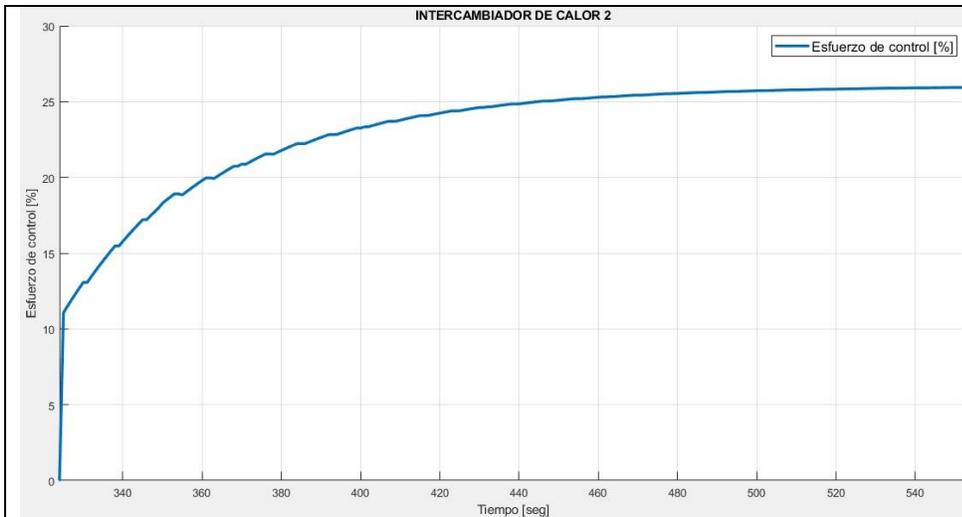


Figura 60 Respuesta del esfuerzo de control por el método CHR

Se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método CHR, se observa que presenta un comportamiento suave, estabilizándose en un valor de 26 %.

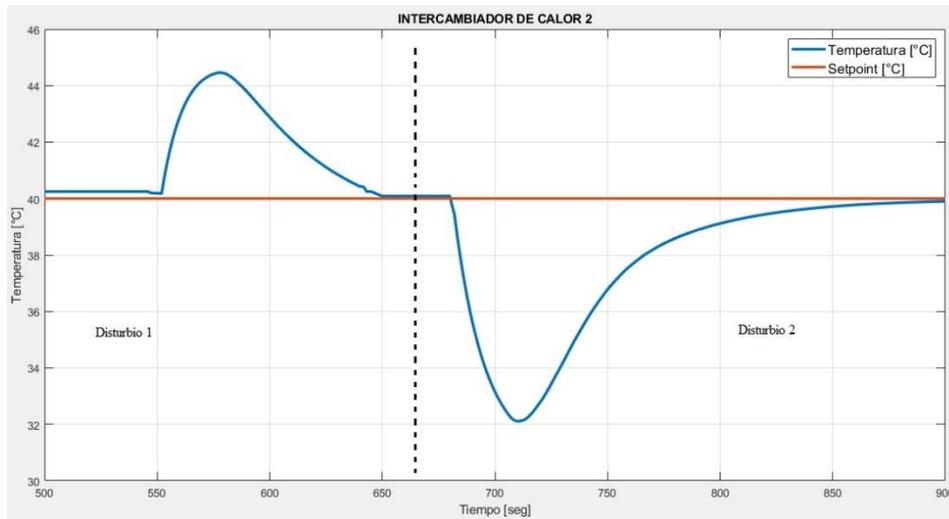


Figura 61 Respuesta de la variable temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método CHR

Se presenta la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, al ingresar el primer disturbio, se observa que la variable controlada alcanza un valor máximo de 45 °C y posteriormente disminuye, luego se ingresa un segundo disturbio con el que la variable controlada alcanzó un valor mínimo de 32 °C y posteriormente regresó a su valor de referencia.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

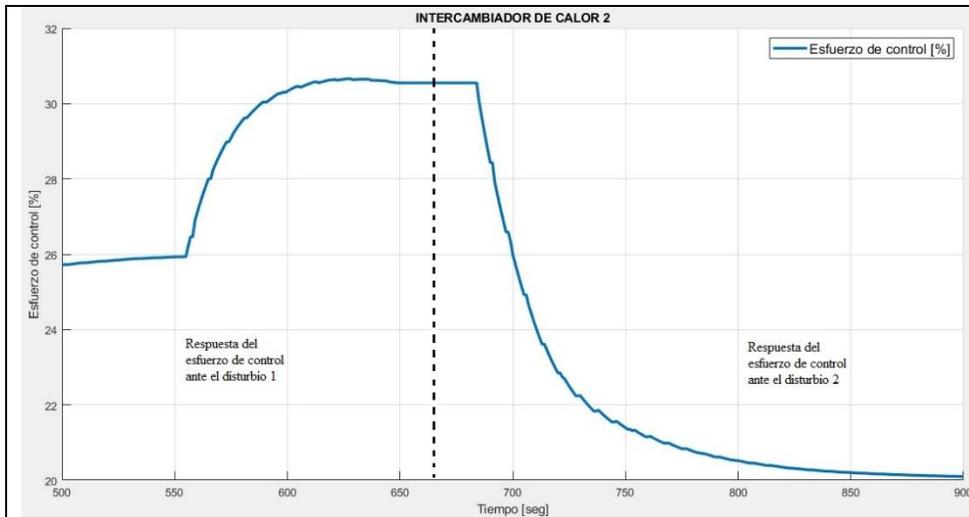
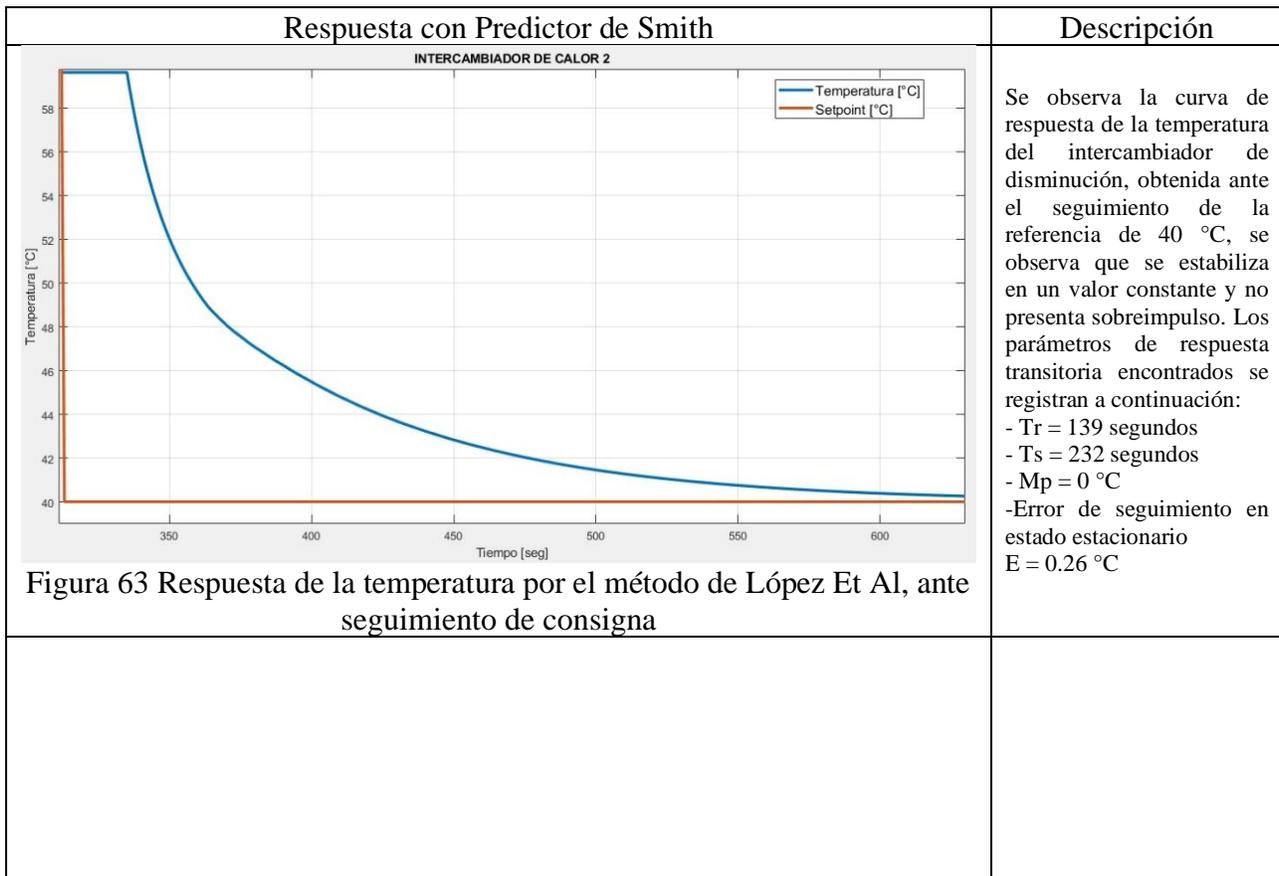


Figura 62 Respuesta del esfuerzo de control para disturbos 1 y 2

Se observa que el esfuerzo de control inicialmente está en 26 % y luego con el ingreso del primer disturbio incrementa hasta 31% donde se estabiliza, posteriormente ingresa un segundo disturbio donde el esfuerzo de control disminuye hasta alcanzar un valor mínimo de 20 %, en el cual se estabiliza.

Tabla 27

Resultados de sintonización del Predictor de Smith en la etapa de disminución de temperatura por el método de López Et Al.



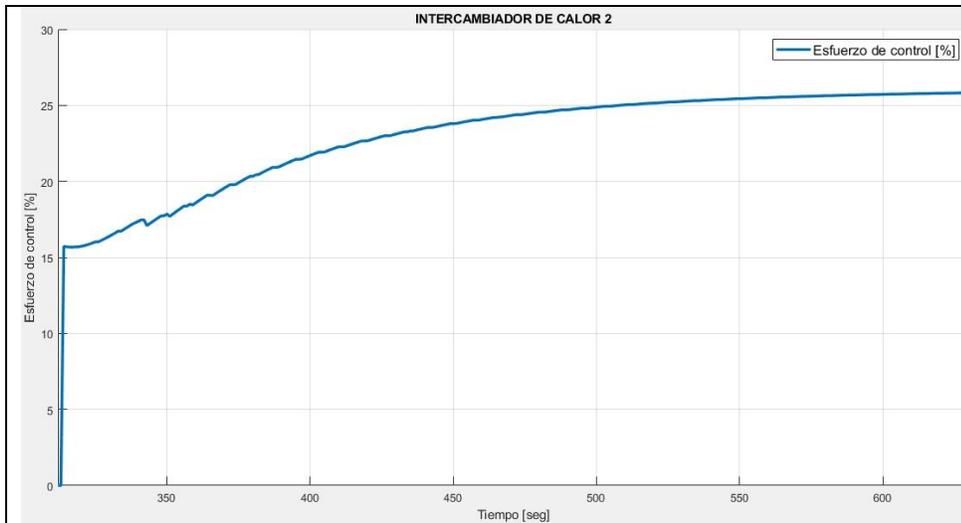


Figura 64 Respuesta del esfuerzo de control por el método de López Et Al.

Se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método de López Et Al., se observa que presenta un comportamiento suave, estabilizándose en un valor de 25 %.

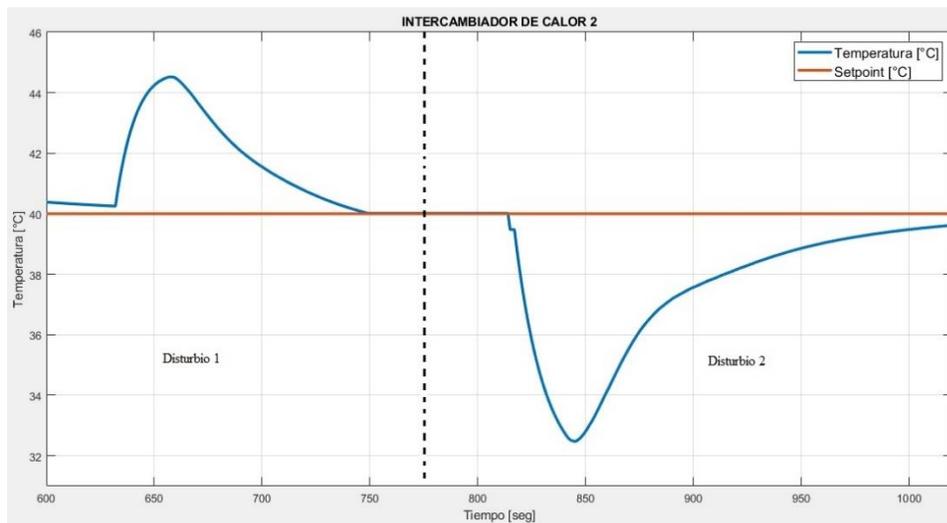


Figura 65 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método de López Et Al

Se presenta la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, al ingresar el primer disturbio, se observa que la variable controlada alcanza un valor máximo de 45 °C y posteriormente disminuye, luego se ingresa un segundo disturbio con el que la variable controlada alcanzó un valor mínimo de 33 °C y posteriormente regresó a su valor de referencia.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.08 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

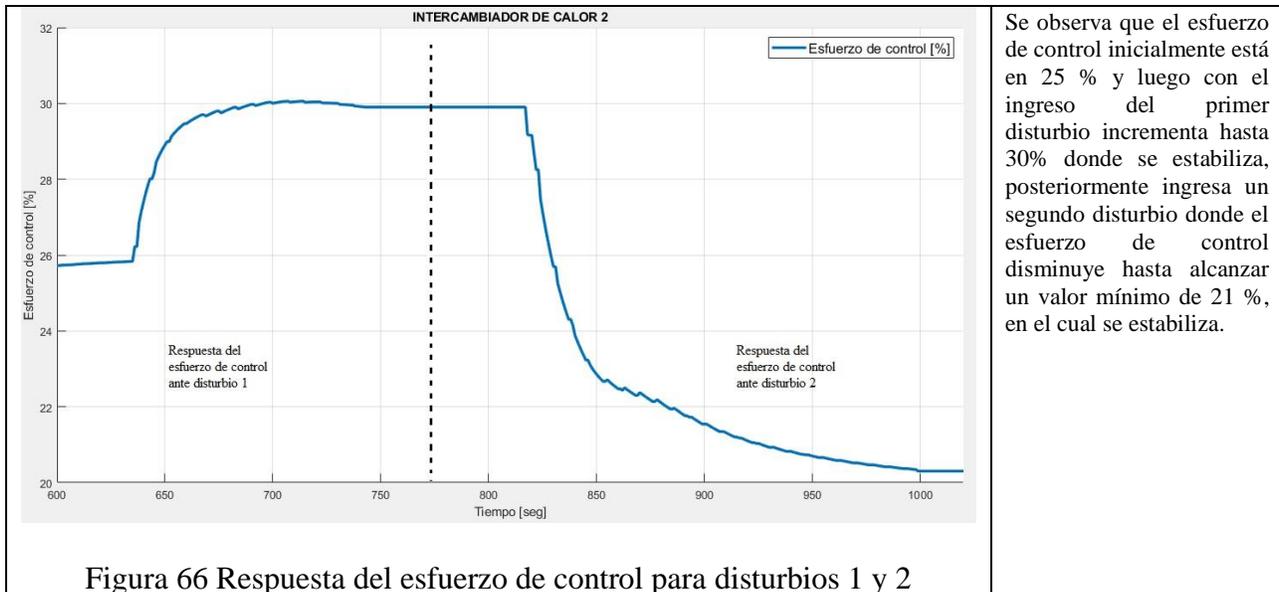
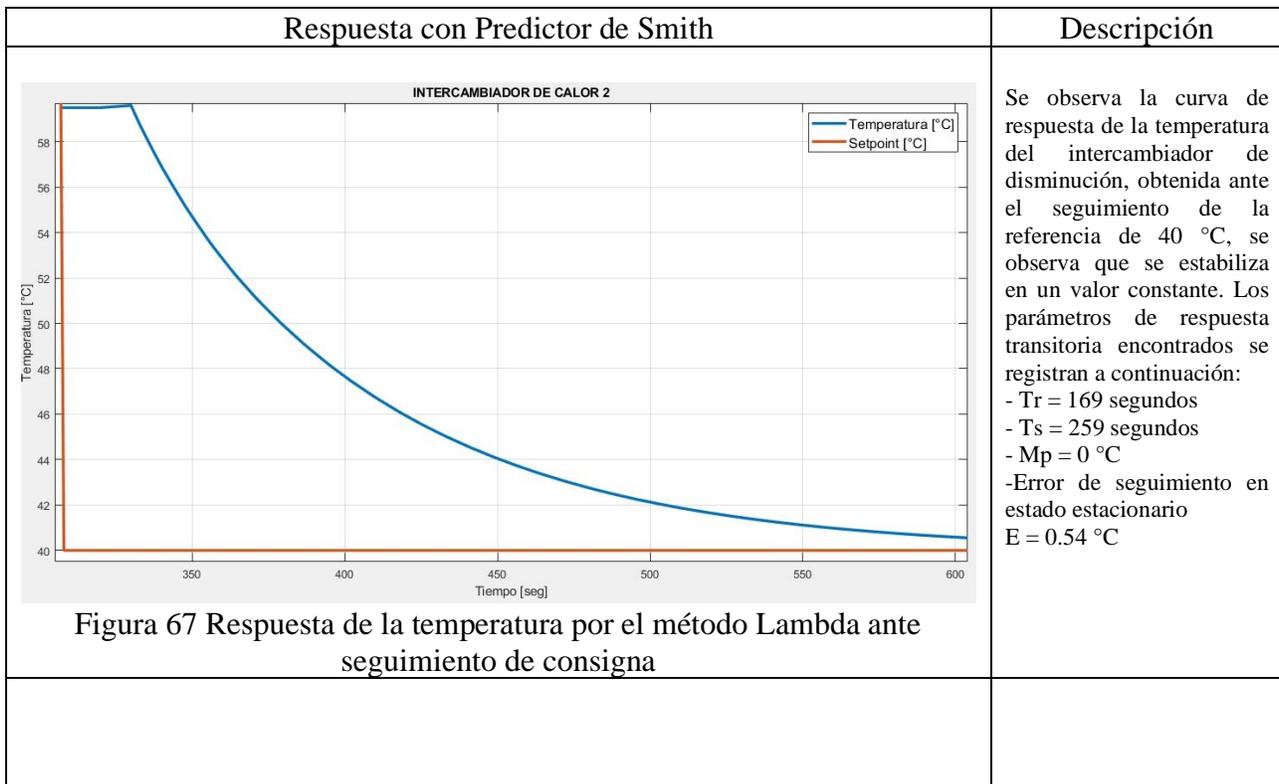


Tabla 28

Resultados de sintonización del Predictor de Smith en la etapa de disminución de temperatura por el método de Lambda



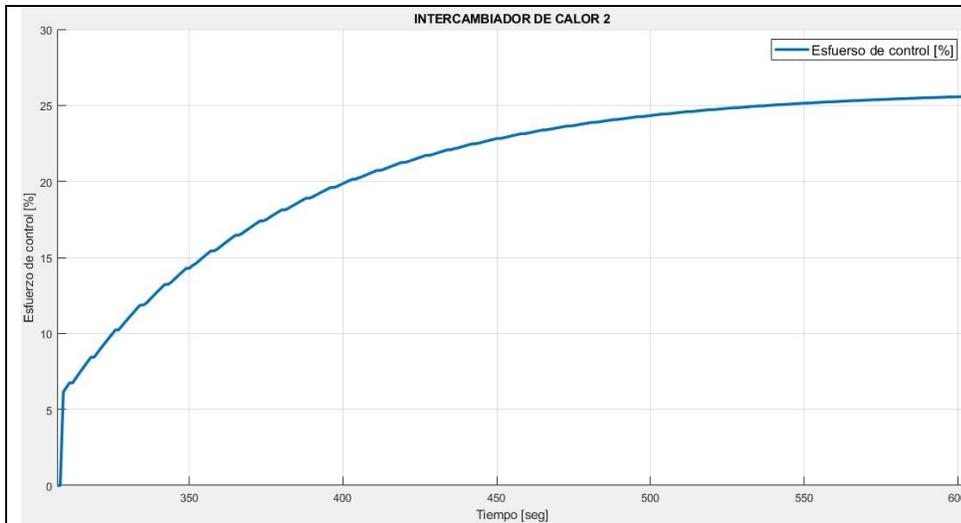


Figura 68 Respuesta del esfuerzo de control por el método Lambda

Se presenta el esfuerzo de control obtenido al realizar la sintonización por el método de Lambda, se observa que presenta un comportamiento suave, estabilizándose en un valor de 25 %.

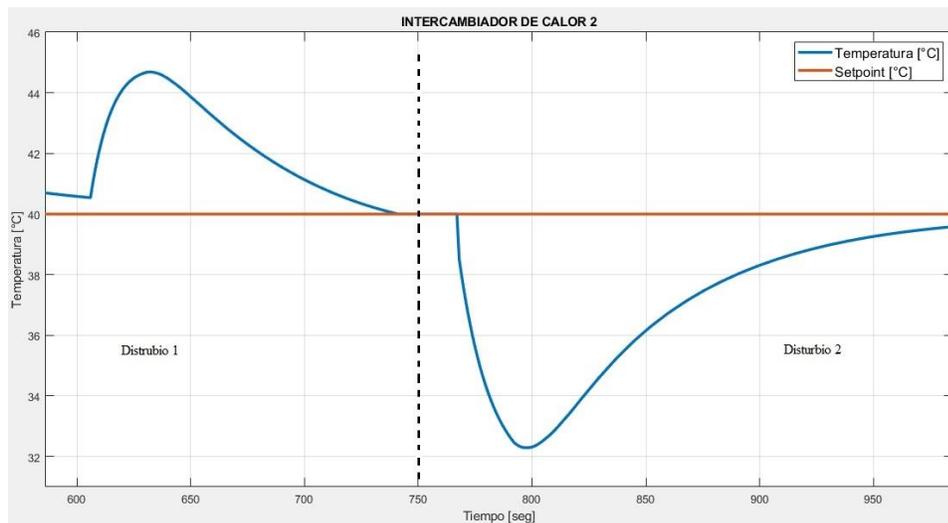


Figura 69 Respuesta de la temperatura ante disturbios 1 y 2 por el método Lambda

Se presenta la respuesta de la temperatura ante dos disturbios, al ingresar el primer disturbio, se observa que la variable controlada alcanza un valor máximo de 45 °C y posteriormente disminuye, luego se ingresa un segundo disturbio con el que la variable controlada alcanzó un valor mínimo de 33 °C y posteriormente regresó a su valor de referencia.

Los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos son:

$$E_1 = 0.05 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$E_2 = 0.43 \text{ } ^\circ\text{C}$$

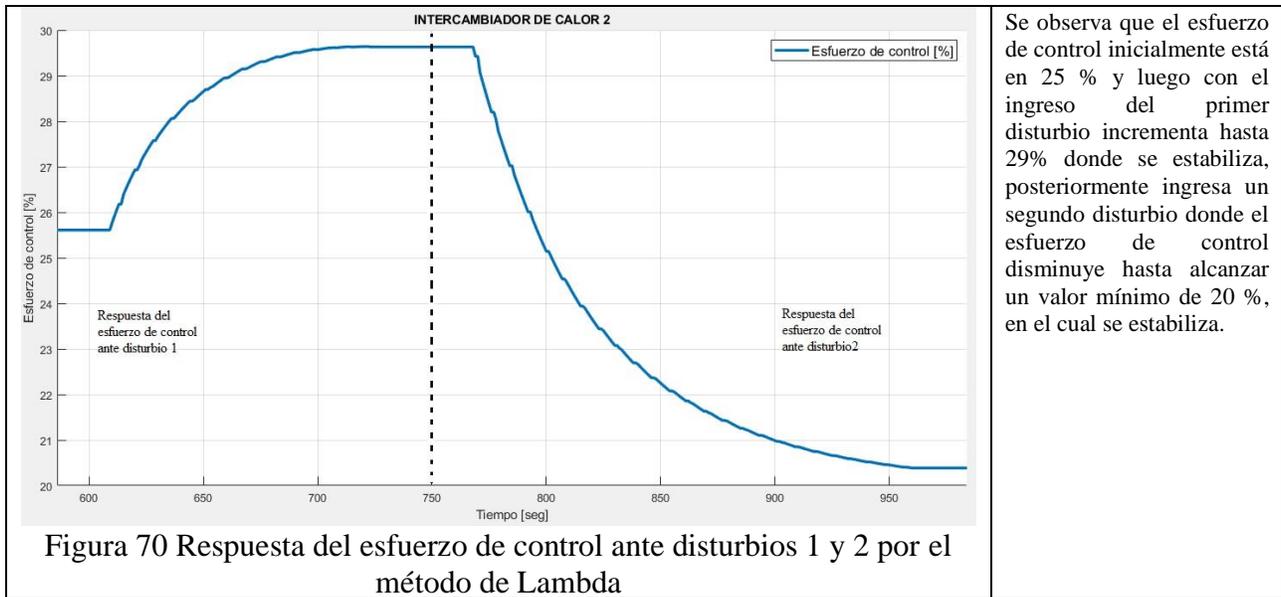


Figura 70 Respuesta del esfuerzo de control ante disturbios 1 y 2 por el método de Lambda

Después de realizadas las pruebas de sintonización con el predictor de Smith en la planta de fabricación de kumis se da por finalizado el capítulo 3 y en el capítulo 4 se presenta la comparación de resultados y conclusiones.

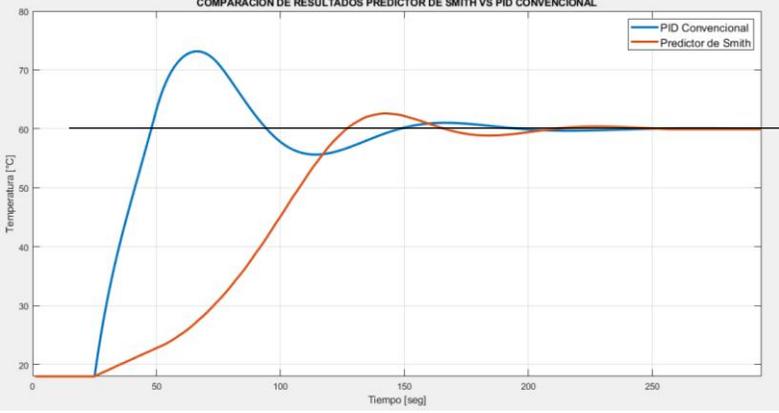
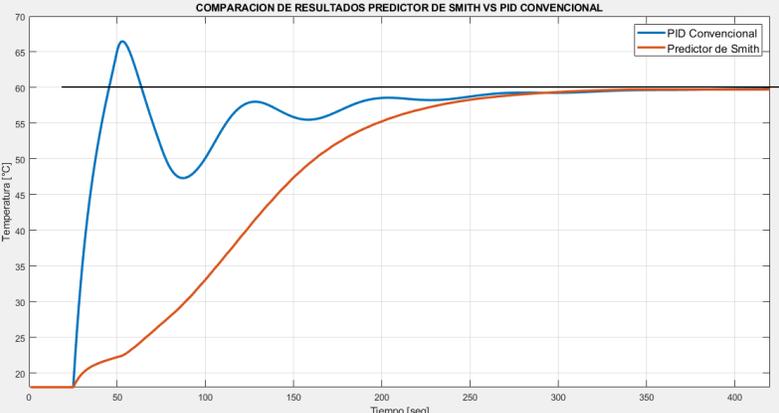
Capítulo 4: Resultados y conclusiones

4.1 Comparación de resultados obtenidos en la etapa de aumento de temperatura

A partir de la implementación del Predictor de Smith de la etapa de aumento de temperatura en el PLC ControlLogix 1756-L61, se realizaron diferentes pruebas de sintonización ante seguimiento de consigna y ante la presencia de disturbios, como se observó en el capítulo 3, estos resultados se comparan con los obtenidos en la sintonización de un PID convencional y los resultados se presentan a continuación.

Tabla 29

Comparación de respuestas obtenidas para PID convencional y Predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura

Respuestas obtenidas ante seguimiento de consigna	Descripción
 <p>Figura 71 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con la sintonización CHR</p>	<p>En la prueba de sintonía por el método de CHR se observa que el PID convencional mostró un tiempo de levantamiento más corto que el tiempo del predictor de Smith, siendo de 18 segundos para el PID convencional frente a 70 segundos que tardó el predictor de Smith. De igual manera el PID convencional alcanzó el estado estable en un tiempo menor que el predictor de Smith, pero con un sobreimpulso mucho mayor comparado con el que alcanzó el predictor de Smith.</p>
 <p>Figura 72 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con el método de López</p>	<p>En la prueba por el método López, el PID convencional presentó un tiempo de levantamiento más rápido con un valor de 16 segundos frente al predictor de Smith que tardó 156 segundos, pero el PID convencional presentó oscilaciones, hasta llegar a estabilizarse. En cuanto al tiempo de establecimiento el PID convencional presentó una respuesta más rápida, y con respecto al sobreimpulso el predictor de Smith arrojó un mejor resultado que el PID convencional.</p>

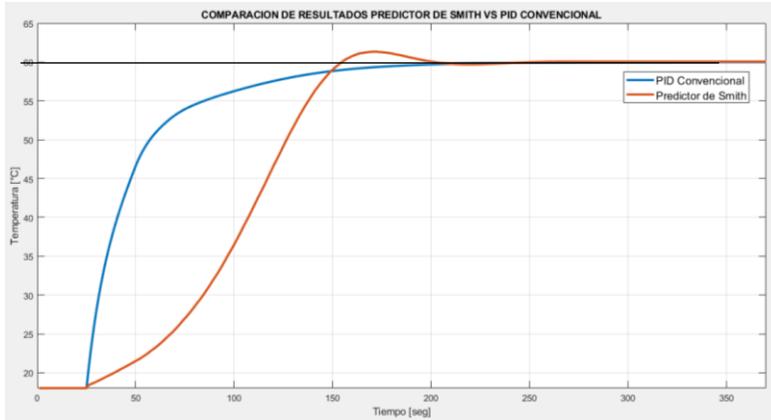


Figura 73 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con el método de Lambda

En la sintonización por el método Lambda el PID convencional tuvo un tiempo de levantamiento menor, con 67 segundos mientras que el predictor de Smith tuvo un tiempo de levantamiento de 85 segundos, en cuanto al tiempo de establecimiento el PID convencional fue un poco más veloz, y el predictor de Smith presentó un sobreimpulso de 1°C.

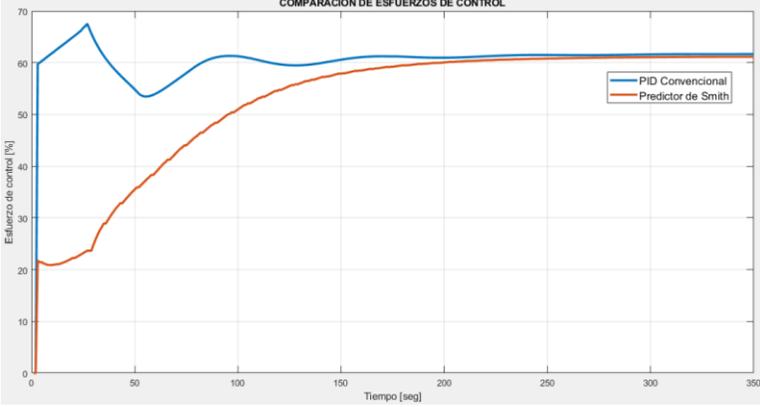
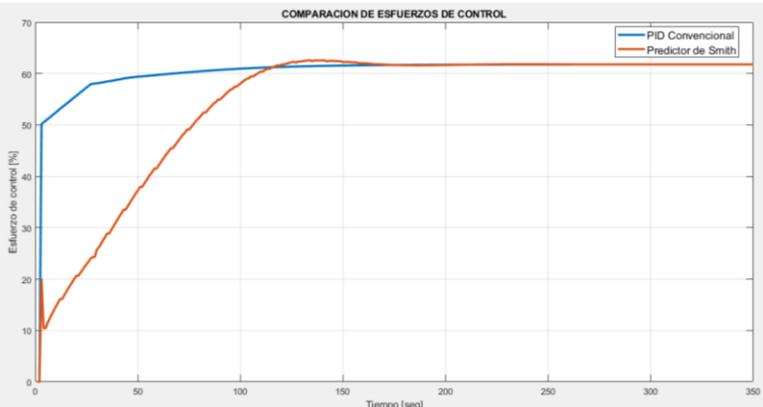
Como se observó en las figuras presentadas anteriormente con la implementación del Predictor de Smith se disminuye considerablemente el sobreimpulso causado por retardo de tiempo, pero así mismo la temperatura ahora tarda más tiempo en alcanzar el estado estable.

Tabla 30

Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y el Predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura

Respuestas obtenidas ante seguimiento de consigna	Descripción
<p>The graph shows control effort in percentage on the y-axis (ranging from 0 to 70) and time in seconds on the x-axis (ranging from 0 to 300). Two curves are plotted: a blue line for 'PID Convencional' and an orange line for 'Predictor de Smith'. The blue curve starts at 0%, rises sharply to a peak of approximately 68% at 25 seconds, then oscillates and settles around 60% after 100 seconds. The orange curve starts at 0%, rises more gradually to a peak of approximately 63% at 100 seconds, and then settles smoothly at 60% after 150 seconds.</p>	<p>En la sintonización por el método CHR, se observa que el PID convencional presento esfuerzo de control más agresivo que el esfuerzo de control del predictor de Smith que presenta un comportamiento más suave, y se estabilizaron en un valor de 60°.</p>

Figura 74 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización CHR

 <p>Figura 75 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización de López Et Al</p>	<p>En la sintonía por el método de López Et Al., se observa que el PID convencional presentó una respuesta más agresiva, con oscilaciones, mientras que el esfuerzo de control obtenido con el predictor de Smith presenta un comportamiento más lento y una curva de respuesta más suave.</p>
 <p>Figura 76 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización de Lambda</p>	<p>En la sintonización por el método de Lambda se observan las curvas del esfuerzo de control obtenidas donde se observa que el esfuerzo de control del predictor de Smith presentó un comportamiento suave pero fue más lento que el esfuerzo de control del PID convencional.</p>

En las gráficas del esfuerzo de control del PID convencional y del Predictor de Smith, presentadas anteriormente, se observa que para las tres pruebas realizadas el esfuerzo de control del predictor de Smith presentó una respuesta menos agresiva que la del PID convencional, por ello la variable controlada tardó más tiempo en llegar a su valor final.

En la tabla 31 se consignan los datos que se obtuvieron con las tres pruebas de sintonía para el PID convencional y la sintonía del predictor de Smith.

Tabla 31

Comparación de resultados obtenidos para el PID convencional y el predictor de Smith en la etapa de aumento de temperatura

Método de sintonización	PID Convencional				Predictor de Smith			
	Tr (seg)	Ts (seg)	Mp (°C)	E (°C)	Tr (seg)	Ts (seg)	Mp (°C)	E (°C)
CHR	18	136	13	1.03	70	152	2	0.4
López Et Al.	16	252	7	0.7	156	262	0	0
Lambda	67	146	0	0.1	85	144	1	0.3

Como se observa en la tabla 31 para las pruebas de sintonización que fueron realizadas, se puede decir que en cuanto al tiempo de levantamiento el PID convencional mostró una mejor respuesta en las tres pruebas, con tiempos de levantamiento más cortos, y de igual manera presentó mejores tiempos de establecimiento, pero en cuanto al sobreimpulso se observó que el predictor de Smith arrojó mejores resultados con valores de sobreimpulso más pequeños y presentando curvas más suaves. Con respecto al error de seguimiento en estado estacionario, el predictor de Smith presentó mejores resultados con errores de seguimiento en estado estacionario más pequeños.

Teniendo en cuenta que la leche, esta debe estar en un rango entre 60°C a 63°C, para que se realice una adecuada pasteurización, el predictor de Smith presentaría un mejor desempeño ya que su valor máximo de sobreimpulso en las pruebas fue de 2 °C.

Se aplicaron distintos disturbios tanto en el control con el PID convencional como con el Predictor de Smith, con el fin de observar el desempeño de estos cuando están sometidos al efecto de perturbaciones, los errores de seguimiento se tomaron una vez se corrigió el disturbio, los resultados se presentan en la tabla 32.

Tabla 32

Comparación del error de seguimiento en estado estacionario ante la presencia de disturbios (Etapa de aumento de temperatura)

Método de sintonización	PID Convencional		Predictor de Smith	
	Error ante la presencia del Disturbio 1	Error ante la presencia del disturbio 2	Error ante la presencia del Disturbio 1	Error ante la presencia del disturbio 2

	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
CHR	0.0433	0.03	0.1	0.4
López Et Al.	0.2	0.3	0.1	0.3
Lambda	0.4	0.2	0.03	0.07

A partir de los datos obtenidos se calculó la media y la desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario para cada uno de los controladores, como se muestra a continuación.

Para el cálculo de la media aritmética se presenta la siguiente ecuación,

$$\text{Media aritmética} = \bar{X} = \frac{\sum X_i}{n} \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde n : es el número de datos y $\sum X_i$: es la sumatoria de los datos que se tienen.

Y para el cálculo de la desviación estándar se tiene,

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde n: es el número de datos, Xi son los datos que se tienen y \bar{x} es la media aritmética.

La desviación estándar indica que tan alejados están los datos de la media aritmética.

De acuerdo a lo anterior, entonces, la media aritmética del error de seguimiento en estado estacionario para el PID convencional es:

$$\bar{X} = \frac{0.0433 \text{ °C} + 0.2 \text{ °C} + 0.4 \text{ °C} + 0.03 \text{ °C} + 0.3 \text{ °C} + 0.2 \text{ °C}}{6} = 0.195 \text{ °C}$$

El valor promedio del error de seguimiento en estado estacionario para el PID convencional es de 0.195 °C

La desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario para el PID convencional es:

$$S = \sqrt{\frac{(0.0433 - 0.195)^2 + (0.2 - 0.195)^2 + (0.4 - 0.195)^2 + (0.03 - 0.195)^2 + (0.3 - 0.195)^2 + (0.2 - 0.195)^2}{5}} =$$

$$S = 0.0621 \text{ °C}$$

De la misma manera se calculó la media y la desviación estándar de los datos obtenidos para el predictor de Smith,

$$\bar{X} = \frac{0.1 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0.1 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0.03 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C} + 0.07 \text{ }^{\circ}\text{C}}{6} = 0.166 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

El valor promedio del error de seguimiento en estado estacionario para el Predictor de Smith es de 0.166 °C

Y la desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario para el Predictor de Smith es:

$$s = \sqrt{\frac{(0.1 - 0.166)^2 + (0.1 - 0.166)^2 + (0.03 - 0.166)^2 + (0.4 - 0.166)^2 + (0.3 - 0.166)^2 + (0.07 - 0.166)^2}{5}} =$$

$$S = 0.1477 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

En la tabla 33 se consignaron los datos obtenidos para la media aritmética y la desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario.

Tabla 33

Resultados obtenidos de la media aritmética y la desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario de la etapa de aumento de temperatura

Resultados obtenidos	Media aritmética [°C]	Desviación estándar [°C]
PID Convencional	0.195	0.0621
Predictor de Smith	0.166	0.1477

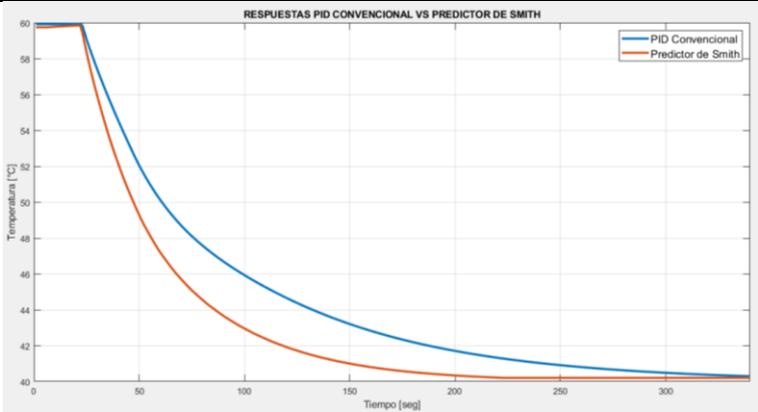
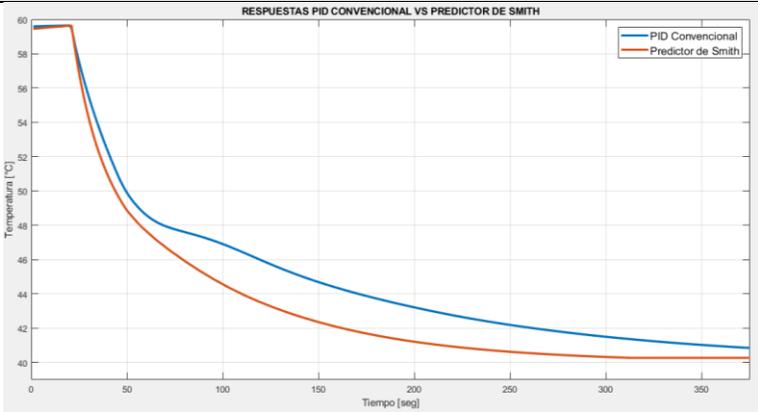
Con los datos obtenidos anteriormente se observó que, aunque para los controladores PID convencional y predictor de Smith se presentaron errores de seguimiento en estado estacionario pequeños, se observó una mejor respuesta del predictor de Smith, como lo indica la media aritmética del error en estado estacionario, con un valor de 0.166 °C, frente a la media aritmética del PID convencional con valor de 0.195 °C, es decir, que hubo una mejor respuesta de seguimiento en estado estacionario en el predictor de Smith, pero el PID convencional presenta una menor dispersión en los datos, es decir que para el PID convencional los valores no varían tanto.

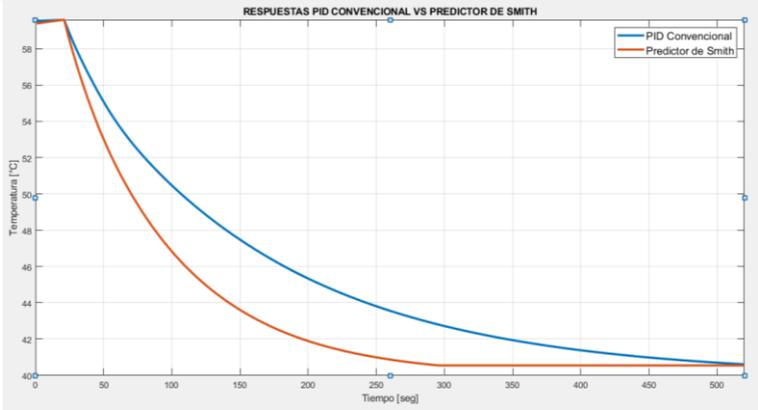
4.2 Comparación de resultados obtenidos en la etapa de disminución de temperatura

En la etapa de disminución de temperatura se realizaron diferentes pruebas de sintonización ante seguimiento de consigna y ante la presencia de disturbios, como se observó en el capítulo 3, estos resultados se comparan con los obtenidos en la sintonización de un PID convencional y se presentan a continuación. Las tablas 35 y 36 muestran la comparación de las curvas de respuesta que se obtuvieron del PID convencional y el predictor de Smith, como también la comparación del esfuerzo de control de estos controladores.

Tabla 34

Comparación de resultados del PID convencional y el Predictor de Smith en la etapa de disminución de temperatura

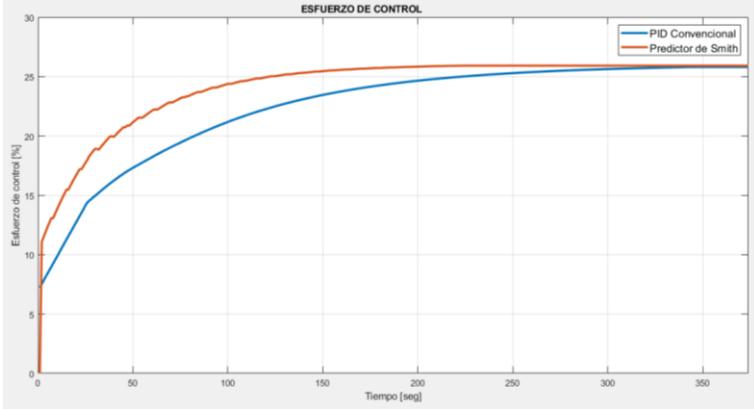
Comparación de respuestas obtenidas ante seguimiento de consigna	Descripción
 <p data-bbox="253 1310 1089 1402">Figura 77 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con la sintonización CHR</p>	<p data-bbox="1149 877 1440 1371">En la prueba realizada por el método de CHR para la etapa de disminución de temperatura, se deduce que el predictor de Smith presentó un tiempo de levantamiento más rápido que el PID convencional, siendo de 93 segundos para el predictor de Smith frente a 159 segundos del PID convencional. En cuanto al tiempo de establecimiento, el predictor de Smith tuvo una respuesta más rápida con 155 segundos, frente a 259 segundos que tardó el PID convencional.</p>
 <p data-bbox="253 1852 1089 1887">Figura 78 Comparación de respuestas del PID convencional y</p>	<p data-bbox="1149 1476 1440 1696">Para la prueba de sintonía por el Método de López el predictor de Smith presentó un tiempo de estabilización más rápido, frente al PID convencional, y también presentó un tiempo de estabilización más corto.</p>

predicador de Smith con el método de López	
 <p data-bbox="253 680 1089 768">Figura 79 Comparación de respuestas del PID convencional y predictor de Smith con el método de Lambda</p>	<p data-bbox="1146 247 1438 590">En la prueba de sintonía por el método de Lambda el predictor de Smith presentó un tiempo de levantamiento más rápido siendo de 159 segundos, frente a 256 segundos que tardó el PID convencional. En cuanto al tiempo de establecimiento el predictor de Smith se estabilizó en menor tiempo.</p>

Como se observó en las figuras presentadas anteriormente con la implementación del Predictor de Smith, se alcanzó un tiempo de levantamiento y un tiempo de establecimiento más rápido que con el PID convencional.

Tabla 35

Comparación de resultados del esfuerzo de control del PID convencional y el Predictor de Smith en la etapa de disminución de temperatura

Comparación del esfuerzo de control asociado a cada uno de los controladores	Descripción
 <p data-bbox="191 1801 945 1892">Figura 80 Comparación del esfuerzo de control del PID convencional y del predictor de Smith con la sintonización</p>	<p data-bbox="984 1423 1438 1730">En la prueba por el método de CHR se obtuvieron curvas de respuesta suaves para el esfuerzo de control sin embargo el esfuerzo de control del predictor de Smith aumentó con mayor rapidez.</p>

		(seg)	(°C)		(seg)	(°C)		
CHR	159	259	0	0.5	93	155	0	0.2
López Et Al.	139	232	0	0.3	88	176	0	0.26
Lambda	256	478	0	0.7	169	259	0	0.54

Como se observa en la tabla 36 para las pruebas de sintonización que fueron realizadas, se puede decir que en cuanto al tiempo de levantamiento el predictor de Smith mostró una mejor respuesta en las tres pruebas realizadas, con tiempos de levantamiento más cortos, y de igual manera presentó menores tiempos de establecimiento, alcanzando el valor de referencia sin presentar oscilaciones. Con respecto al error de seguimiento en estado estacionario, es posible decir que, el predictor de Smith presentó mejores resultados con errores de seguimiento en estado estacionario más pequeños.

Teniendo en cuenta que la etapa de enfriado de la leche, consiste de un choque térmico que debe hacerse rápidamente, es decir que, se debe llegar al valor de referencia en un corto tiempo el predictor de Smith presentaría una mejor respuesta puesto que en las tres pruebas el tiempo de levantamiento y el tiempo de establecimiento fueron más cortos en comparación al PID convencional.

Se aplicaron distintos disturbios tanto en el control con el PID convencional como con el Predictor de Smith, con el fin de observar el desempeño de estos cuando están sometidos al efecto de perturbaciones, los resultados se presentan a continuación.

Tabla 37

Comparación del error de seguimiento en estado estacionario ante la presencia de disturbios (Etapa de disminución de temperatura)

Método de sintonización	PID Convencional		Predictor de Smith	
	Error ante la presencia del Disturbio 1	Error ante la presencia del disturbio 2	Error ante la presencia del Disturbio 1	Error ante la presencia del disturbio 2
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
CHR	0.6	0.4	0.05	0.1

López Et Al.	0.5	0.3	0.08	0.3
Lambda	0.1	0.17	0.05	0.43

A partir de los datos obtenidos se calculó la media y la desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario para cada uno de los controladores, como se muestra a continuación.

Cálculo de la media aritmética del error de seguimiento en estado estacionario para el PID convencional:

$$\bar{X} = \frac{0.6 \text{ °C} + 0.5 \text{ °C} + 0.1 \text{ °C} + 0.4 \text{ °C} + 0.3 \text{ °C} + 0.17 \text{ °C}}{6} = 0.345 \text{ °C}$$

El valor promedio del error de seguimiento en estado estacionario para el PID convencional es de 0.345 °C

La desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario para el PID convencional es:

$$S = \sqrt{\frac{(0.6 - 0.345)^2 + (0.5 - 0.345)^2 + (0.1 - 0.345)^2 + (0.4 - 0.345)^2 + (0.3 - 0.345)^2 + (0.17 - 0.345)^2}{5}} = 0.1922 \text{ °C}$$

De la misma manera se calculó la media y la desviación estándar de los datos obtenidos para el predictor de Smith,

$$\bar{X} = \frac{0.05 \text{ °C} + 0.08 \text{ °C} + 0.05 \text{ °C} + 0.1 \text{ °C} + 0.3 \text{ °C} + 0.43 \text{ °C}}{6} = 0.168 \text{ °C}$$

El valor promedio del error de seguimiento en estado estacionario para el Predictor de Smith es de 0.168 °C

Y la desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario para el Predictor de Smith es:

$$S = \sqrt{\frac{(0.05 - 0.168)^2 + (0.08 - 0.168)^2 + (0.05 - 0.168)^2 + (0.1 - 0.168)^2 + (0.3 - 0.168)^2 + (0.43 - 0.168)^2}{5}} =$$

$$S = 0.159 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por lo tanto, en la tabla 38 se consignan los datos obtenidos de la media aritmética y la desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario.

Tabla 38

Resultados de media aritmética y desviación estándar del error de seguimiento en estado estacionario de la etapa de disminución de temperatura

Resultados obtenidos	Media aritmética [$^\circ\text{C}$]	Desviación estándar [$^\circ\text{C}$]
PID Convencional	0.345	0.1922
Predictor de Smith	0.168	0.159

De los datos presentados en la tabla 38 es posible decir que con la implementación del predictor de Smith se obtuvo un mejor comportamiento del proceso ya que presentó una media aritmética del error de seguimiento en estado estacionario más baja, siendo de 0.168°C , frente a 0.345°C que es el valor promedio del error de seguimiento del PID convencional, así mismo en el predictor de Smith se presentó una desviación estándar menor que para el PID convencional, lo que indica que hay una menor dispersión en los datos del error de seguimiento en estado estacionario del Predictor de Smith, lo cual quiere decir que hubo una menor dispersión en los datos del error de seguimiento en estado estacionario.

Conclusiones

- Los resultados obtenidos en las pruebas de sintonización realizadas en el intercambiador de aumento de temperatura permitieron comprobar que el predictor de Smith de esta etapa presentó un menor sobreimpulso, con curvas de respuesta más suaves que las presentadas en el PID convencional, pero así mismo presentó una respuesta más lenta ante el seguimiento de consigna.
- Teniendo en cuenta las necesidades/ requerimientos del proceso de aumento de temperatura de la leche, donde se requiere que la temperatura se mantenga en un rango de 60°C a 62°C y no se necesita tanta velocidad de respuesta del sistema, el predictor de Smith es una buena

opción ya que presentó un menor sobreimpulso en las pruebas realizadas, mientras que el PID convencional presentó valores de sobreimpulso mayores .

- Teniendo en cuenta los requerimientos de la etapa de enfriado de la leche que consiste en realizar un choque térmico, es decir, que la leche debe pasar rápidamente de un valor de 60 °C a un valor de 40 °C, el controlador más adecuado fue el predictor de Smith, debido a que no presentó oscilaciones y obtuvo tiempos de levantamiento y establecimiento más rápidos que los tiempos presentados en el PID convencional.
- Ante la presencia de disturbios, ambos controladores los corrigieron y regresaron a su valor de referencia, pero tanto en la etapa de aumento, como en la etapa de disminución de temperatura los errores de seguimiento en estado estacionario obtenidos con el predictor de Smith fueron menores que los obtenidos para el PID convencional, esto se pudo comprobar con la media aritmética y la desviación estándar, que mostraron valores menores para el predictor de Smith, dando como resultado una mejor respuesta ante seguimiento de consigna para este controlador.
- El desarrollo de las pruebas de comparación del predictor de Smith y el PID convencional, permitieron conocer como afecta el retardo de tiempo en el desempeño de un proceso industrial y de que manera se puede mejorar la respuesta del sistema de control.
- Se puede concluir que para sistemas con retardo de tiempo dominante el Predictor de Smith si generó un aporte en el lazo de control.

Bibliografía

- [1] Z. Yusuf, Z. Janin, and M. N. Taib, "Application of fuzzy PD controller with smith predictor for glycerin bleaching temperature control," in 2010 International Conference on Intelligent and Advanced Systems, ICIAS 2010, 2010.
- [2] A. Lucchesi, L. Capucchio, and G. Campomar, "Smith predictor implementation in a PLC, a lab experience," in 2015 16th Workshop on Information Processing and Control, RPIC 2015, 2016.
- [3] I. Dumitrache, I. Mihiu, and G. Musca, "Control of Time-Delay processes Based on Smith Predictors," IFAC Proc. Vol., vol. 30, no. 27, pp. 411–416, 1997.
- [4] I. Dumitrache and I. Mihiu, "Rule-Based Smith Predictor Controller," IFAC Proc. Vol., vol. 33, no. 25, pp. 329–333, 2000.
- [5] Z. Palmor, "Stability properties of smith dead-time compensator controllers," Int. J. Control, vol. 32, no. 6, pp. 937–949, 2015.
- [6] I. Benítez González and R. Rivas Pérez, "Predictor de Smith: revisión y desafíos," Rev. Científica Ing. Electrónica, Automática y Comun., vol. 38, no. 1, pp. 33–47, 2017.
- [7] V. J. Poorani and L. D. V. Anand, "Comparison of PID controller and Smith predictor controller for heat exchanger," in 2013 IEEE International Conference on Emerging Trends in Computing, Communication and Nanotechnology, ICE-CCN 2013, 2013, pp. 217–221.
- [8] J. E. Normey-rico and E. F. Camacho, "Unified approach for robust dead-time compensator design," J. Process Control, vol. 19, no. 1, pp. 38–47, 2009.
- [9] J. A. Herrera-Cuartas, J. Pelaez-Restrepo, and N. A. Correa-Rojas, "Análisis del Predictor de Smith Modificado," TecnoLógicas, p. 339, 2013.
- [10] B. Vargas Tamani, "Efectos del retardo en el control de lazo cerrado de plantas sobreamortiguadas," Ind. Data, vol. 15, no. 1, p. 110, 2014.
- [11] I. O. Benitez, R. Rivas, V. Feliu, and F. J. Castillo, "Temperature control based on a modified smith predictor for injectable drug formulations," IEEE Lat. Am. Trans., vol. 13, no. 4, pp. 1041–1047, 2015.

- [12] L. Ribeiro, R. César, C. Flesch, and J. E. Normey-rico, “Controlling industrial dead-time systems : When to use a PID or an advanced controller,” *ISA Trans.*, no. xxxx, 2019.
- [13] A. H. Ahmadi, “Robust Smith Predictor (RSP),” no. 4, pp. 1510–1515, 2016.
- [14] C. Grimholt, “Sholud we forget the Smith Predictor,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 51, no. 4, pp. 769–774.
- [15] F. De La Cruz and O. Camacho, “Controlador De Modos Deslizantes Basado En Predictor De Smith Y Modelo De Segundo Orden Para Procesos Con Elevado Retardo,” *Rev. Politécnica*, vol. 35, no. 2, pp. 1–7, 2015.
- [16] I. O. B. Instituto Superior Politécnico “José Antonio Echeverría,” R. R. Pérez, V. F. Batlle, and F. C. García, *Predictor de Smith modificado mediante un modelo interno robusto a perturbaciones externas no medibles*, vol. 30, no. 3. Ministerio de Educación Superior, 2011.
- [17] F. E. U. Reis, K. P. Santos, B. C. Torrico, P. P. Praça, R. P. T. Bascope, and T. R. F. Neto, “Filtered Smith Predictor applied to a boost converter for minimizing the effect of non-minimal phase and rejection of disturbances,” no. Ccm, pp. 5–10, 2017.
- [18] J. C. M. J. L. Guzmán, “Improvements on the Filtered Smith Predictor using the Clegg Integrator,” 1958.
- [19] T. S. Franklin and T. L. M. Santos, “Robust filtered Smith predictor for processes with time-varying delay: a simplified stability approach,” *European Journal of Control*, Jan-2020.
- [20] V. F. Kuzishchin, E. I. Merzlikina, and H. Van Va, “Study of the efficiency of the control system with smith predictor using a simulator based on controller owen PLC,” 2016 2nd Int. Conf. Ind. Eng. Appl. Manuf. ICIEAM 2016 - Proc., 2016.
- [21] D. Feng and D. Wencai, “A novel Smith predictor for wireless networked control systems with uncertainty delay,” *Proc. - 2009 Int. Conf. Environ. Sci. Inf. Appl. Technol. ESIAT 2009*, vol. 3, pp. 552–555, 2009.
- [22] J. Rehrl and M. Horn, “Supply air temperature control in an industrial HVAC pilot

plant based on Smith predictor and inward approach,” *CSSim 2009 - 1st Int. Conf. Comput. Intell. Model. Simul.*, vol. 1, pp. 220–225, 2009.

[23] A. Li and F. Yue, “Application of fuzzy Smith intelligent control in automatic control system of cone crusher,” *Proc. 2012 24th Chinese Control Decis. Conf. CCDC 2012*, pp. 2783–2787, 2012.

[24] C. Rodríguez, J. E. Normey-Rico, J. L. Guzmán, and M. Berenguel, “On the filtered Smith predictor with feedforward compensation,” *J. Process Control*, vol. 41, pp. 35–46, 2016.

[25] S. B. Prusty, S. Padhee, U. C. Pati, and K. K. Mahapatra, “Comparative performance analysis of various tuning methods in the design of PID controller,” *IET Conf. Publ.*, vol. 2015, no. CP683, pp. 43–48, 2015.

[26] A. O’Dwyer, “A Summary of PI and PID Controller Tuning Rules for Processes with Time Delay. Part 1: PI Controller Tuning Rules,” *IFAC Proc. Vol.*, vol. 33, no. 4, pp. 159–164, 2000.

[27] V. M. Alfaro Ruíz, “¿Son Todos Los Controladores Pid Iguales?,” *Revista Ingeniería*, vol. 3, no. 1. 2011.

[28] E. Pruna, E. R. Sasig, and S. Mullo, “PI and PID controller tuning tool based on the lambda method,” *2017 Chil. Conf. Electr. Electron. Eng. Inf. Commun. Technol. CHILECON 2017 - Proc.*, vol. 2017-January, pp. 1–6, 2017.

[29] M. Revelo, “Plataforma Hardware in the Loop Simulation para el laboratorio de control de procesos del PIAI,” 2019.

[30] A. B. C. Carlos A. Smith, *Control automático de procesos Teoría y práctica*. 2014.

[31] A. N. Standard, *ANSI/ISA–88.01. Batch Control Part 1: Models and Terminology*, no. October. 1995.