

diciembre, 2023

Informe Trabajo LOOP-PRO

Alberto García Martín



VNiVERSIDAD
D SALAMANCA

Máster en Sistemas Inteligentes
Universidad de Salamanca

Índice

1. Introducción	1
2. Descripción del sistema	1
3. Simulación y análisis	3
4. Obtención experimental del modelo del proceso	7
4.1. Obtención del modelo gráficamente	7
4.2. Obtención del modelo con LOOP-PRO Tuner	10
5. Control P en lazo cerrado	12
6. Control PI en lazo cerrado	15
7. Conclusiones	19

1. Introducción

En este trabajo se ha utilizado el simulador LOOP-PRO¹ para realizar el estudio del comportamiento dinámico de un proceso, en concreto el de un intercambiador de calor. Los objetivos de este trabajo son analizar el proceso y obtener el modelo experimental en lazo abierto, sintonizar controladores tipo PID², tanto mediante prueba y error como con LOOP-PRO Tuner, y analizar el comportamiento transitorio y estacionario del sistema en lazo cerrado, comprobando el rechazo de la referencia y el rechazo de perturbaciones.

2. Descripción del sistema

En la Figura 1 se muestra el esquema del intercambiador de calor, este es el proceso central del sistema, donde se transfiere calor desde un fluido (caliente) a otro (frío) sin que estos se mezclen. El fluido caliente entra por la parte superior del intercambiador y sale por la parte inferior, mientras que el refrigerante entra por el lado izquierdo y sale por el derecho. El fluido caliente se mezcla con un flujo de líquido templado antes de entrar en el intercambiador. El caudal del refrigerante depende de la presión de la cabecera del surtidor de refrigerante.

Los sensores del sistema son:

- Temperatura del fluido al entrar en el intercambiador.
- Temperatura del fluido al salir del intercambiador.
- Caudal del líquido templado.
- Caudal del refrigerante.

El actuador del sistema es la válvula de control del caudal del refrigerante, que en un caso de lazo cerrado sería controlada mediante el controlador PID.

Las variables principales del sistema son:

- **Entrada:** Temperatura del fluido al entrar en el intercambiador y caudal del refrigerante.
- **Salida:** Temperatura del fluido al salir del intercambiador.
- **Perturbaciones:** Caudal del líquido templado y presión de la cabecera del refrigerante.

¹<https://controlstation.com/pid-loop-tuning/process-data/>

²Controlador proporcional, integral y derivativo

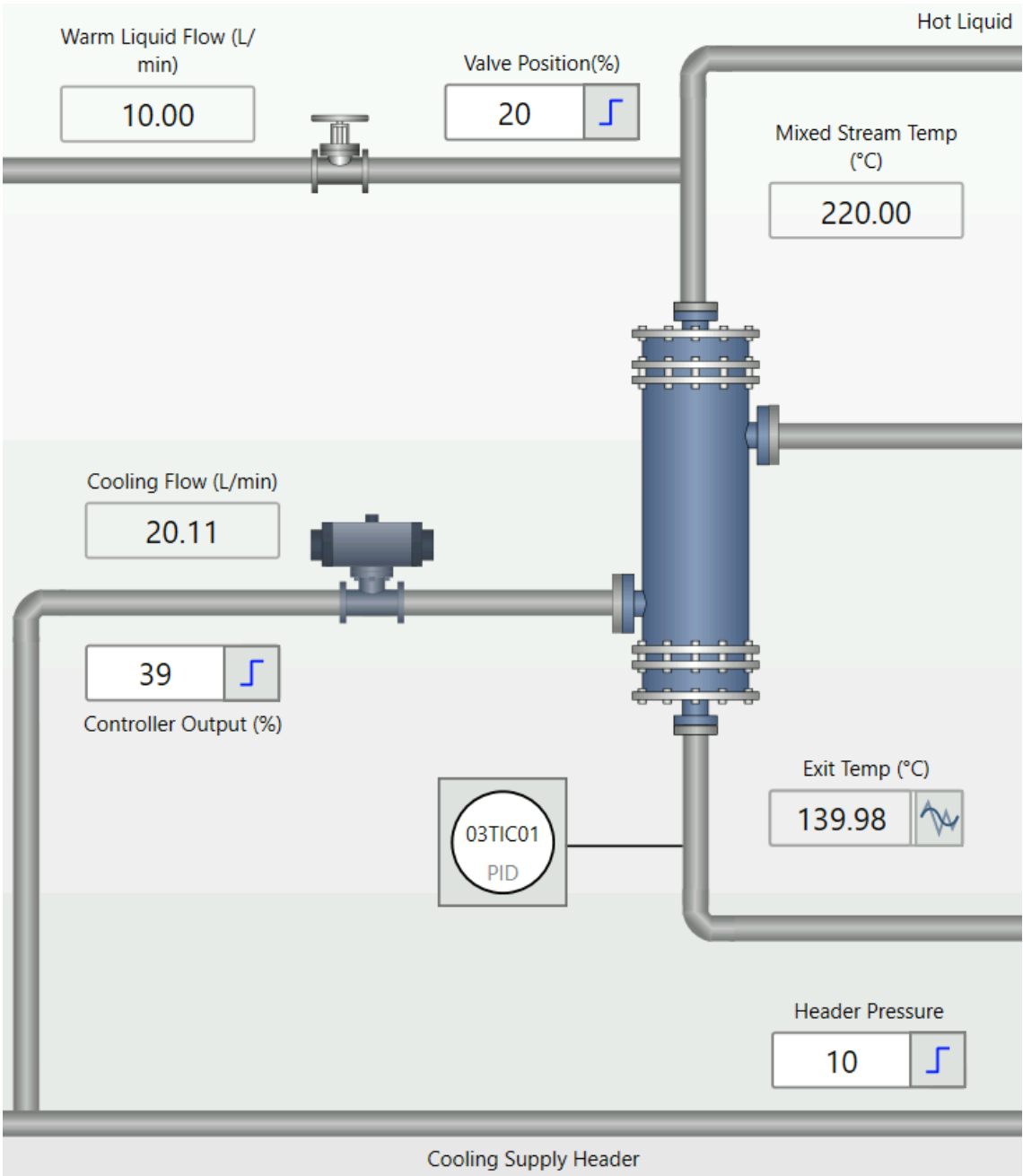


Figura 1: Representación del sistema al inicio.

3. Simulación y análisis

En esta sección se analizará el comportamiento del sistema en lazo abierto, es decir, en operación manual. Para ello se realizarán cambios tanto en la entrada como en las perturbaciones, y se analizará el comportamiento del sistema.

Primero se incrementa el porcentaje de apertura de la válvula de control del refrigerante del 39 % al 44 %. Se puede observar en la Figura 2 que al aumentar el caudal del refrigerante, la temperatura del fluido al salir del intercambiador disminuye después de aproximadamente 3:30 minutos, pasando de 140°C a 137.4°C. Esto tiene sentido, ya que al aumentar el caudal del refrigerante, la temperatura del fluido al salir del intercambiador debe disminuir.

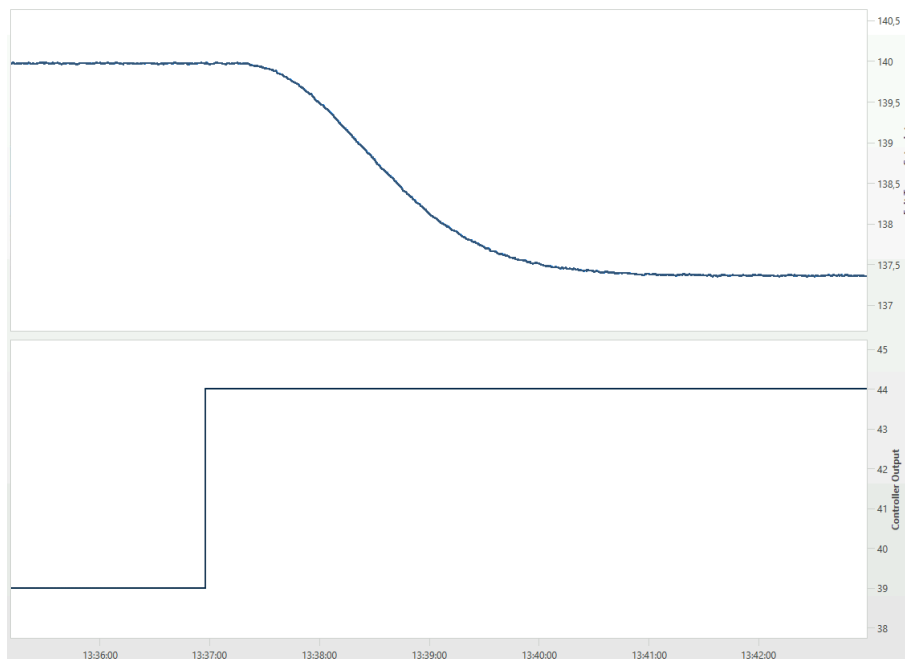


Figura 2: Salto en caudal del refrigerante de 39 % al 44 %.

A continuación se incrementa la apertura de la válvula de control del líquido templado del 20 % al 25 %. Se puede observar en la Figura 3 que al aumentar el caudal del líquido templado, la temperatura del fluido al salir del intercambiador aumenta durante el primer minuto, pasando de 137.4 °C a 138.2 °C. Pasado este tiempo, en los 3 minutos posteriores la temperatura disminuye hasta 137 °C, inferior a la temperatura inicial, por lo que se puede afirmar que el líquido templado está a menor temperatura que el caliente, lo que contribuye a la reducción de temperatura tras el periodo transitorio.

En la Figura 4 se puede observar el comportamiento del sistema ante un cambio en la presión de la cabecera del refrigerante. En este caso, la presión pasa de 10 a 15, lo que provoca un aumento en el caudal del refrigerante. Se puede observar que la temperatura del fluido al salir del intercambiador disminuye considerablemente pasados 4 minutos, pasando de 137 °C a 129.8 °C.

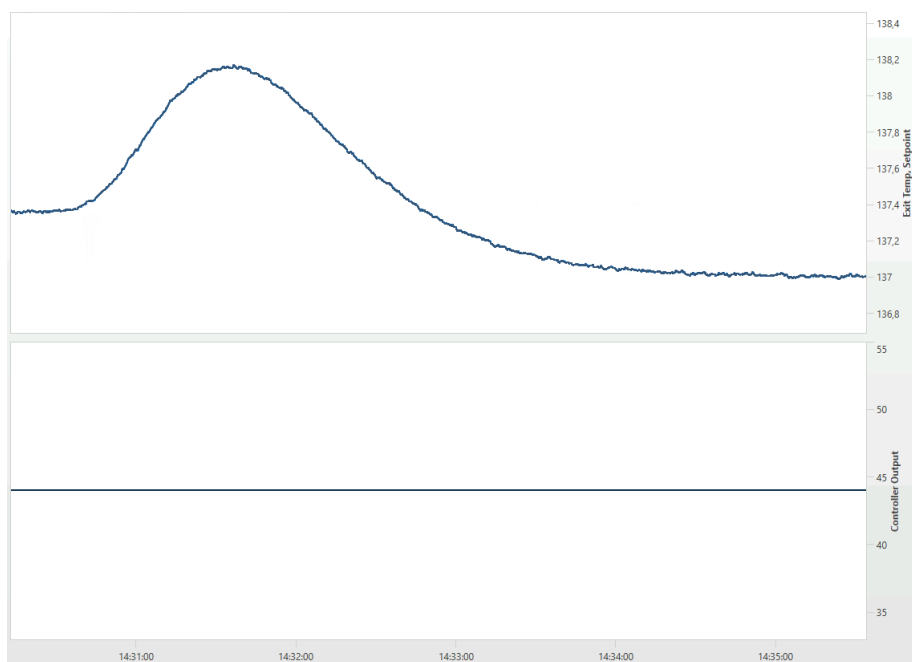


Figura 3: Salto en caudal del líquido templado de 20 % al 25 %.

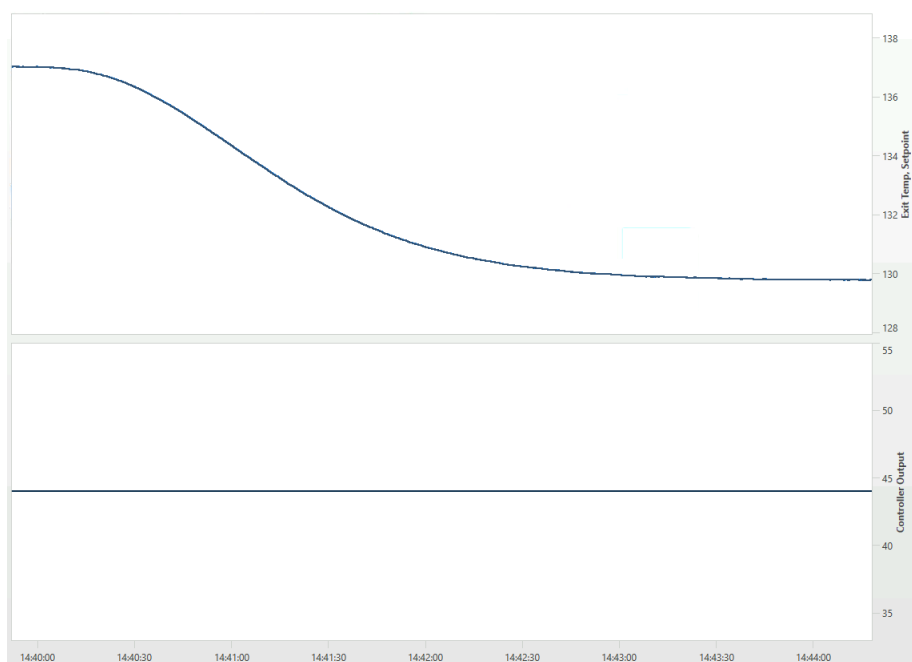


Figura 4: Salto en presión de la cabecera del refrigerante de 10 a 15.

Para comprobar como se comporta el sistema al invertir los cambios realizados anteriormente, se realizan los saltos en sentido contrario y se analiza el tiempo en el que el sistema vuelve al estado anterior. En la Figura 5 se puede observar que, al cambiar la presión de la cabecera del refrigerante de 15 a 10, el sistema vuelve al estado anterior en aproximadamente 4 minutos, de forma similar a como se comportó en el salto anterior.

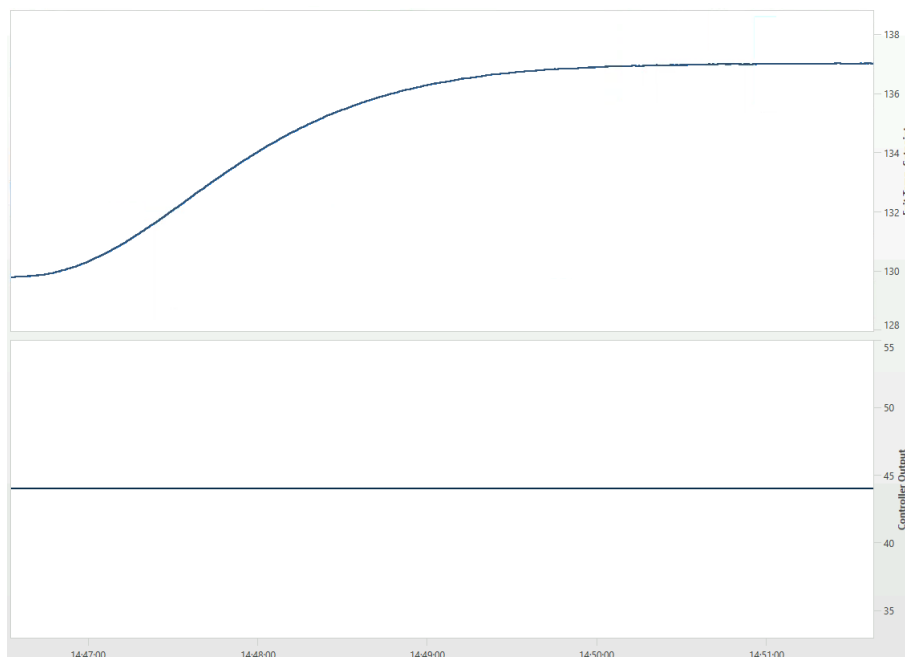


Figura 5: Salto en presión de la cabecera del refrigerante de 15 a 10.

En la Figura 6 se puede observar que, al cambiar el caudal del líquido templado de 25 % a 20 %, en el primer minuto la temperatura del fluido al salir del intercambiador disminuye y en los 3 posteriores vuelve a aumentar, de forma simétrica al hacer el salto en el sentido opuesto.

Por último, en la Figura 7 se puede observar que, al cambiar el caudal del refrigerante de 44 % a 39 %, el sistema vuelve al estado original en aproximadamente 3:30 minutos, tardando el mismo tiempo que en el salto en sentido contrario. Tras estos saltos, la temperatura de salida vuelve a su valor original de 140 °C, y se puede determinar que el sistema se comporta de forma simétrica en todos los saltos realizados.

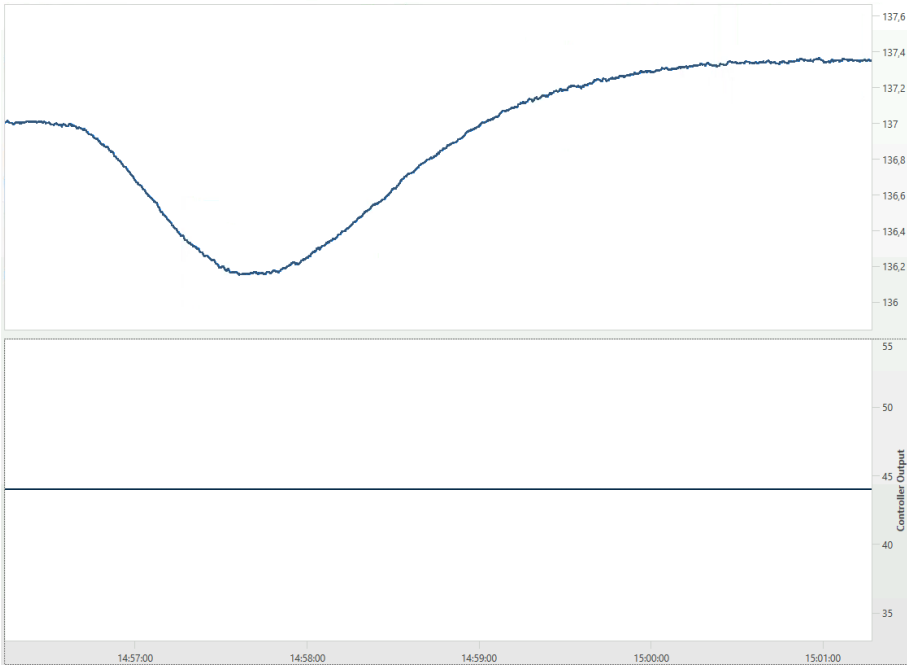


Figura 6: Salto en caudal del líquido templado de 25 % a 20 %.

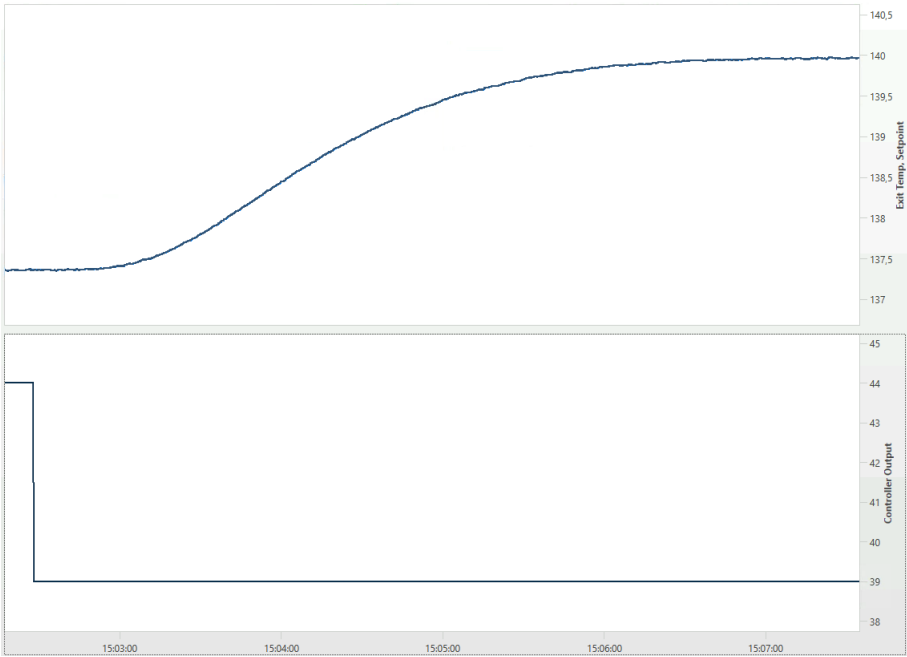


Figura 7: Salto en caudal del refrigerante de 44 % a 39 %.

4. Obtención experimental del modelo del proceso

En esta sección se obtendrá un modelo lineal de primer orden con retardo (FOPD) para el proceso, tras elegir un punto de operación. Para ello se realizará de dos formas, gráficamente, a partir de la representación de la respuesta a salto en la entrada, y usando la herramienta de diseño LOOP-PRO Tuner. Además se repetirá el proceso para un punto de operación diferente comparando los resultados, con el objetivo de comprobar si el proceso es lineal o no, es decir, si se comporta de la misma forma en diferentes puntos de operación.

El modelo FOPD tiene la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K}{1 + \tau s} e^{-\theta s} \quad (1)$$

Donde K es la ganancia, τ es la constante de tiempo y θ es el retardo.

4.1. Obtención del modelo gráficamente

En primer lugar se obtendrá el modelo gráficamente, para ello se elige como punto de partida el de defecto, donde la temperatura del fluido al entrar del intercambiador es de 220 °C, al salir de 139.97 °C y el caudal del refrigerante es de 20.1 L/min (válvula de control al 39%). Para obtener los parámetros del modelo se realiza un salto en la entrada, aumentando el caudal del refrigerante al 44%, y se obtiene la respuesta del sistema, como se puede observar en la Figura 8.

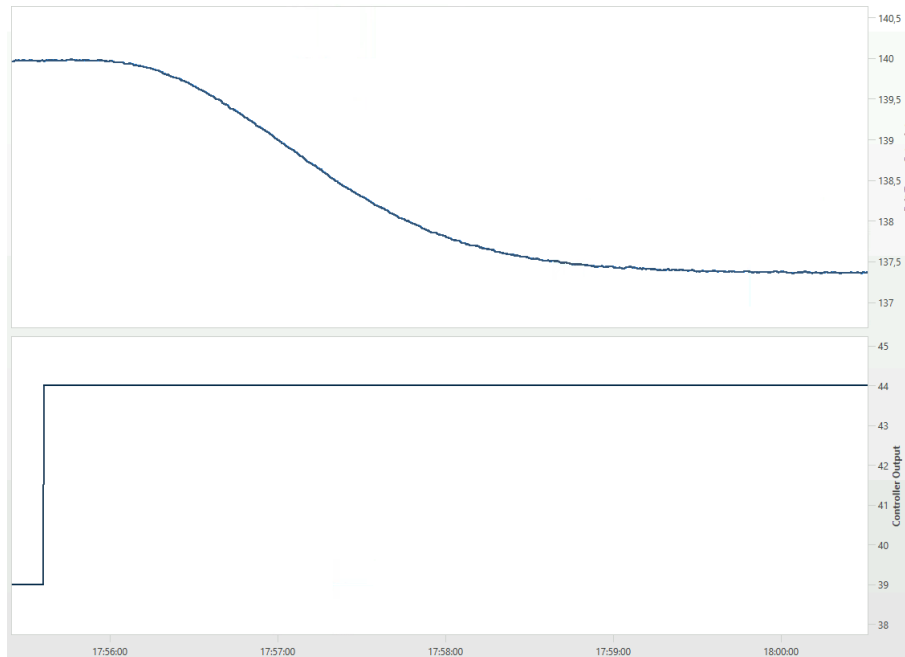


Figura 8: Salto en caudal del refrigerante de 39 % a 44 %.

K describe la dirección en la que se mueve la variable de salida y cuánto se mueve en respuesta a un cambio en el controlador. Teniendo en cuenta que la temperatura en la salida es de 137.37 °C, y que el cambio en el controlador es de 5 %, se puede calcular K como:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{137,37 - 139,97}{0,44 - 0,39} = \frac{-2,6}{5} = -0,52 \text{ C/ \%} \quad (2)$$

Donde ΔPV es el cambio en la variable de salida y ΔCO es el cambio en el controlador.

τ describe la velocidad a la que se mueve la variable de salida en respuesta a un cambio en el controlador. Para calcular τ primero se calcula el cambio en la variable de salida, que como se vio anteriormente es de -2.6 °C. A continuación, se calcula el valor de PV que es el 63 % del cambio total que va a ocurrir, es decir, el estado estacionario inicial de $PV + 0.63 (\Delta PV)$:

$$139,97 + 0,63 \times (-2,6) = 138,332 \text{ C} \quad (3)$$

Se anota el instante de tiempo en el que el sistema alcanza este valor, que en este caso es 17:57:28. A este tiempo se le resta el instante de tiempo en el que se comienza a producir una respuesta en el sistema tras el cambio en el controlador, que en este caso es 17:56:04. De esta forma se obtiene τ :

$$\tau = 17 : 57 : 28 - 17 : 56 : 04 = 1 : 24 \text{ min} = 1,4 \text{ min} \quad (4)$$

θ describe el tiempo que tarda la variable de salida en responder a un cambio en el controlador. Para calcular θ se anota el instante de tiempo en el que se comienza a producir una respuesta en el sistema tras el cambio en el controlador, que como se ha visto anteriormente es 17:56:04. A este tiempo se le resta el instante de tiempo en el que se produce el cambio en el controlador de su valor inicial a su valor final, que en este caso es 17:55:36. De esta forma se obtiene θ :

$$\theta = 17 : 56 : 04 - 17 : 55 : 36 = 28 \text{ s} = 0,47 \text{ min} \quad (5)$$

Se obtiene que los parámetros del modelo son:

- $K = -0,52 \text{ C/ \%}$
- $\tau = 1,4 \text{ s}$
- $\theta = 0,47 \text{ s}$

Por lo que el modelo FOPD es:

$$G(s) = \frac{-0,52}{1 + 1,4s} e^{-0,47s} \quad (6)$$

Para comprobar si el proceso es lineal, se repite el proceso para un punto de operación diferente, en este caso se elige el punto de operación en el que la temperatura del fluido al entrar del intercambiador es de 220 °C, al salir de 125.75 °C y el caudal del refrigerante es de 44.61 L/min (válvula de control al 89 %). Como en el caso anterior, se realiza un salto en la entrada, aumentando el caudal del refrigerante al 94 %, y se obtiene la respuesta del sistema, como se puede observar en la Figura 9.

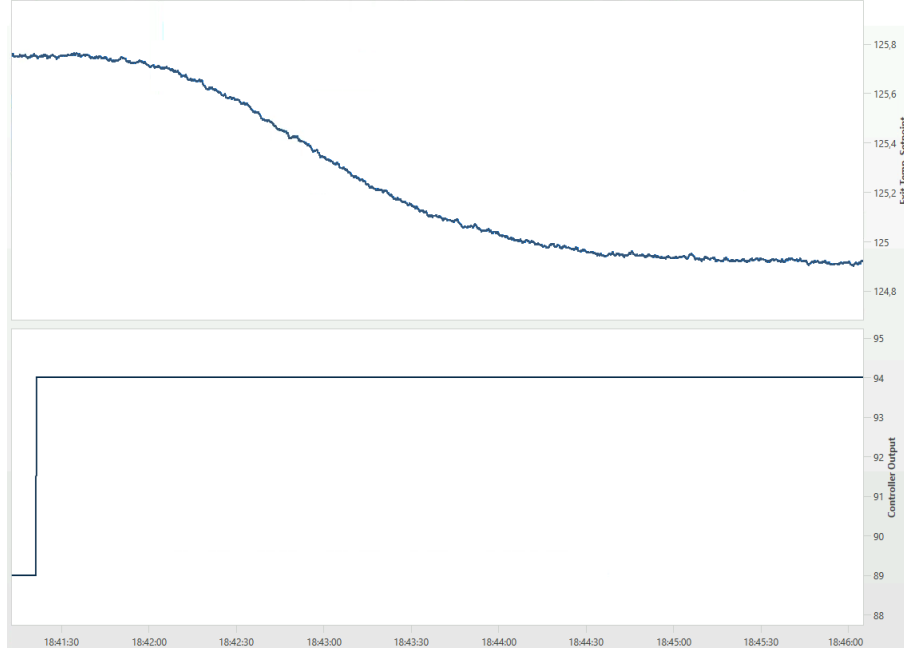


Figura 9: Salto en caudal del refrigerante de 89 % a 94 %.

Se repiten los cálculos realizados anteriormente para obtener los parámetros del modelo, obteniendo que los parámetros del modelo son:

$$K = \frac{\Delta PV}{\Delta CO} = \frac{124,9 - 125,75}{94 - 89} = \frac{-0,85}{5} = -0,17 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \quad (7)$$

$$\tau = 18 : 43 : 17 - 18 : 41 : 46 = 1 : 31 \text{ } min = 1,52 \text{ } min \quad (8)$$

$$\theta = 18 : 41 : 46 - 18 : 41 : 21 = 25 \text{ } s = 0,42 \text{ } min \quad (9)$$

Por lo que el modelo FOPD es:

$$G(s) = \frac{-0,17}{1 + 1,52s} e^{-0,42s} \quad (10)$$

Se puede observar que los parámetros del modelo son diferentes en ambos casos, por lo que se puede afirmar que el proceso no es lineal. El parámetro que más varía es la ganancia, que pasa de -0.52 a -0.17, por lo que se asume el cambio en la temperatura es menor cuando la válvula de control está más abierta, es decir, cuando el caudal del refrigerante es mayor.

4.2. Obtención del modelo con LOOP-PRO Tuner

Para obtener el modelo con LOOP-PRO Tuner se vuelve a realizar el mismo salto en la entrada que en el caso anterior, aumentando el caudal del refrigerante del 39 % al 44 %, esta vez se exportan los datos obtenidos de la simulación a un archivo de texto y se importan en LOOP-PRO Tuner, indicando el input y el output.

Como se puede ver en la Figura 10, los parámetros obtenidos son $K = -0,5732$, $\tau = 1,196 \text{ min}$ y $\theta = 0,8178 \text{ min}$, que son similares a los obtenidos gráficamente, aunque en este caso se obtiene un retardo mayor para compensar la forma sigmoide de la respuesta del sistema, que se aleja de un comportamiento de primer orden que se asume en el modelo FOPD.

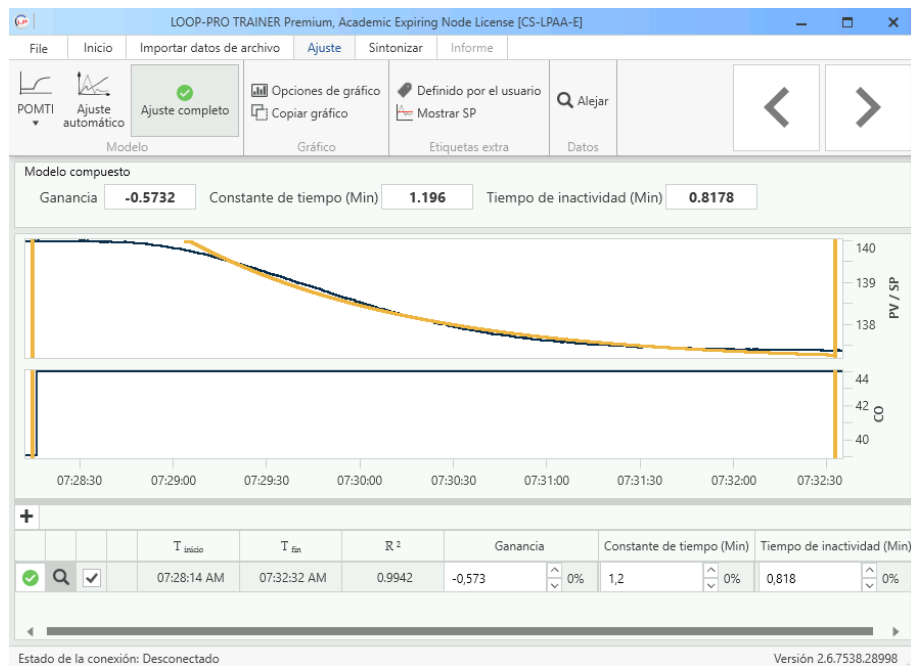


Figura 10: Obtención del modelo inicial con LOOP-PRO Tuner.

Si se repite el proceso para el segundo punto de operación, se obtienen los parámetros $K = -0,179$, $\tau = 1,17 \text{ min}$ y $\theta = 0,85 \text{ min}$. Como antes, los parámetros obtenidos son similares a los obtenidos gráficamente, aunque en este caso se obtiene un retardo mayor, como se puede observar en la Figura 11.

Tras esta validación utilizando LOOP-PRO Tuner, se puede afirmar que los resultados obtenidos gráficamente eran razonablemente similares por lo que el proceso seguido es correcto.

Además se confirma que el proceso no es lineal, ya que los parámetros obtenidos en los dos puntos de operación son diferentes en ambos casos. Esto se puede observar también si se hacen incrementos del mismo tamaño en la entrada, como se puede ver en la Figura 12, donde se ve que la variación en la temperatura de salida cambia en función del punto de operación.

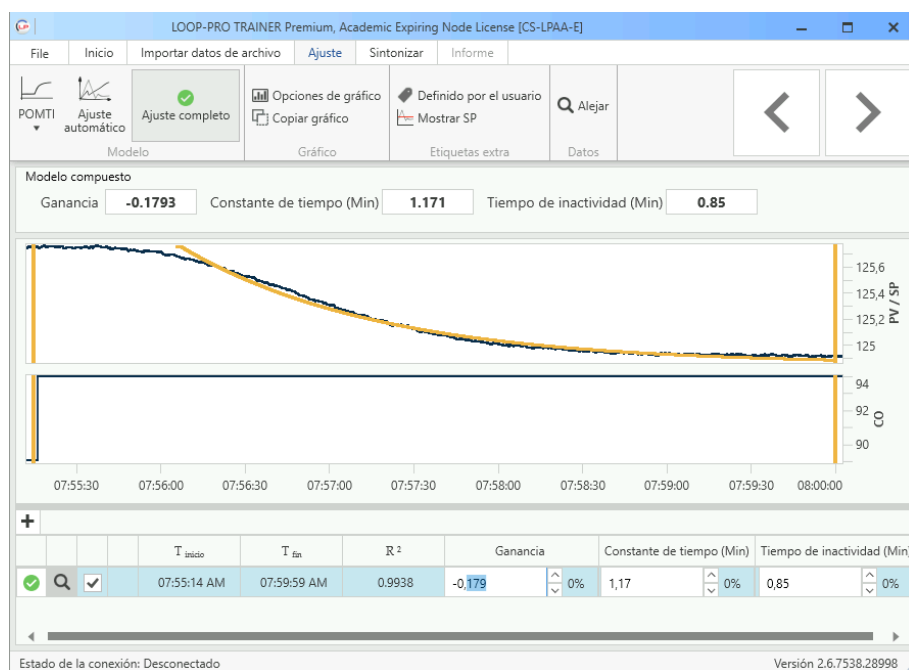


Figura 11: Obtención del segundo modelo con LOOP-PRO Tuner.

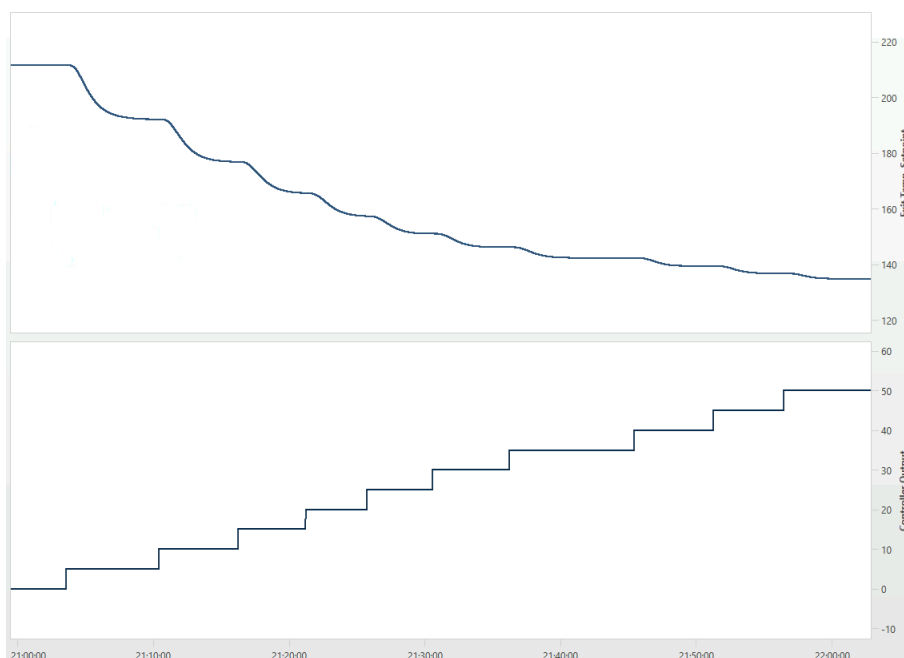


Figura 12: Respuesta del sistema ante incrementos de la misma magnitud en la entrada.

5. Control P en lazo cerrado

En esta sección se sintonizará un controlador P en lazo cerrado, es decir en operación automática, para ello se utilizará el modelo obtenido en la sección anterior en el primer punto de operación con LOOP-PRO Tuner. Se anotará que la temperatura antes del salto es de 139.97 °C y después de 137.37 °C, posteriormente se cambia el modo de operación del controlador a automático. Además se anota que el caudal del líquido templado es de 10.1 L/min (válvula de control al 20 %) y la presión de la cabecera del refrigerante es de 10.

Se asumirá que para que el controlador P funcione correctamente la temperatura objetivo ronda entre 140 °C y 137 °C, y que las perturbaciones se mantienen constantes o con muy poca variación.

Para obtener el valor de la ganancia proporcional (K_p) primero se utiliza el criterio empírico de ITAE (*Integral of Time-weighted Absolute Error*), mediante la fórmula:

$$K_p = \frac{0,2}{K} \times \left(\frac{\tau}{\theta}\right)^{1,22} = \frac{0,2}{0,5732} \times \left(\frac{1,196}{0,8178}\right)^{1,22} = 0,5548 \quad (11)$$

A continuación se compara con el valor obtenido mediante LOOP-PRO Tuner, para ello se ha seleccionado una constante de tiempo de lazo cerrado (τ_c) moderada, por lo que será igual al valor mayor entre τ y $8 \times \theta$ (en este caso $\tau_c = 8 \times 0,8178 = 6,5424$). Como se puede ver en la figura Figura 13, el valor de K_p obtenido es de 0.5601.

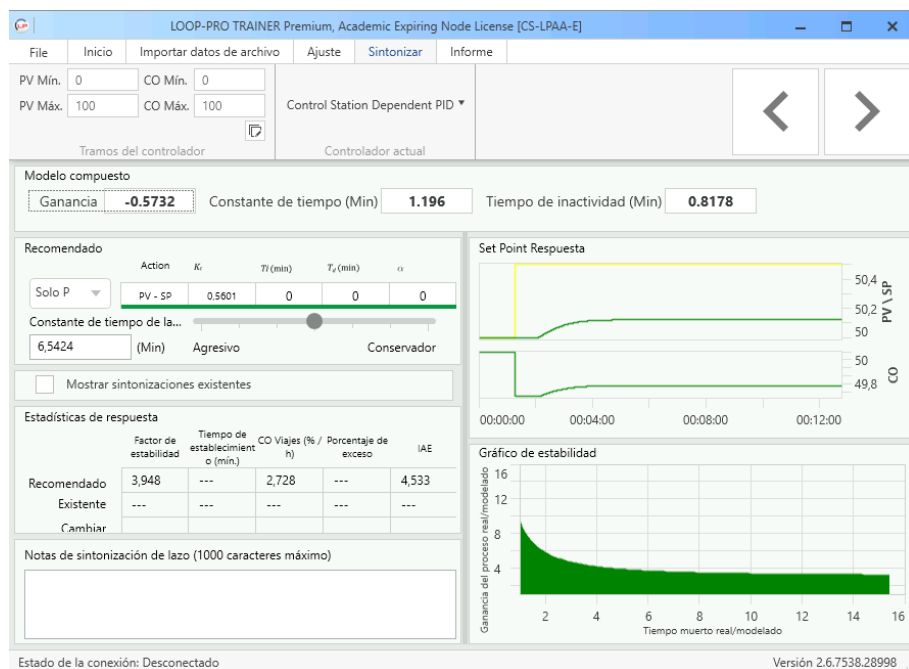


Figura 13: Obtención del valor de K_p con LOOP-PRO Tuner.

Los valores de K_p obtenidos con ambos métodos son similares, por lo que se continúa con la comprobación del funcionamiento del controlador. Para ello se ajusta el valor de K_p a 0.5601 en el controlador y se inicia la simulación, a continuación se disminuye la temperatura objetivo a 137 °C, luego se aumenta a 143 °C para ver como se comporta fuera del rango objetivo y por último se vuelve a 140 °C. Se puede observar en la Figura 14 que el controlador actúa cuando se produce un cambio en la temperatura objetivo, sin embargo, nunca llega a alcanzar el valor objetivo, hay un error considerable entre el valor objetivo y el valor real. Tan solo se alcanza el valor objetivo cuando la temperatura objetivo es 140 °C.

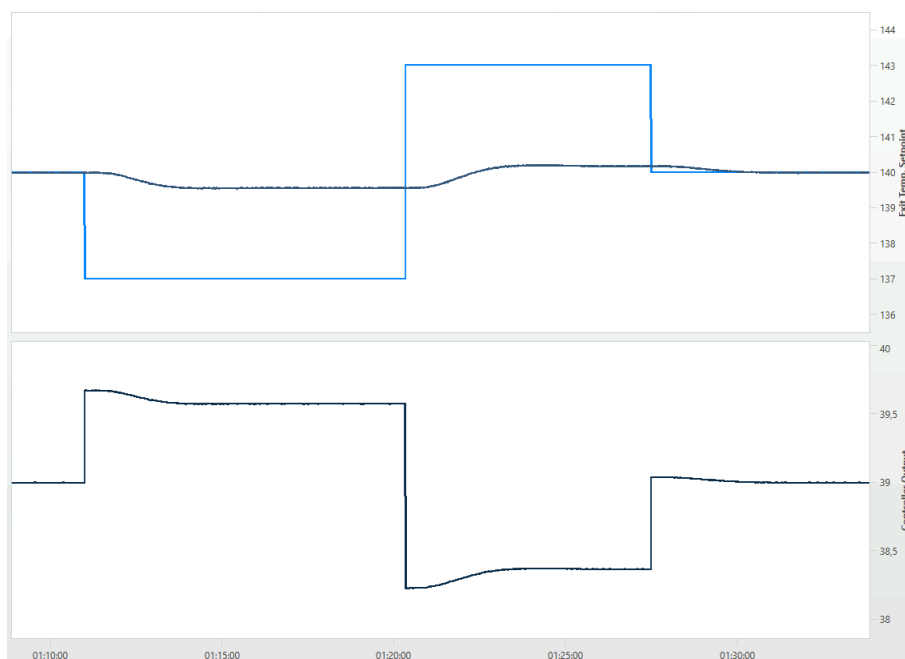


Figura 14: Respuesta del controlador P con K_p moderado.

Si se aumenta el valor de K_p a un valor más agresivo, como 2.24, se puede observar en la Figura 15 que el controlador actúa de forma más agresiva. Esto supone que se acerque más al valor objetivo, pero con un rebote en el periodo transitorio justo antes de alcanzar el estacionario. Este rebote se ve claramente cuando el valor objetivo vuelve a 140 °C, donde se puede observar que la temperatura real se sitúa por debajo del valor objetivo durante un periodo de tiempo.

Si por el contrario se disminuye el valor de K_p a un valor más conservador, como 0.14, se observa en la Figura 16 que el controlador actúa de forma muy suave, sin prácticamente tener variaciones en la temperatura.

Si se introducen perturbaciones en el sistema con una temperatura objetivo de 140 °C y un valor de K_p moderado, el controlador no es capaz de rechazarlas, como se puede observar en la Figura 17, donde se ha abierto la válvula del líquido templado al 30 % y luego se ha subido la presión a 15.

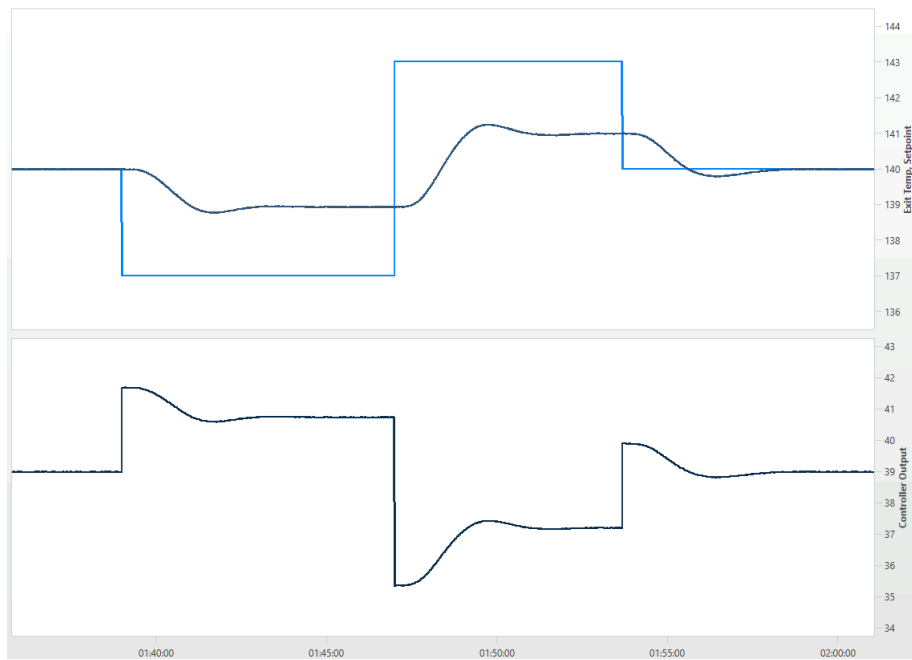


Figura 15: Respuesta del controlador P con K_p agresivo.

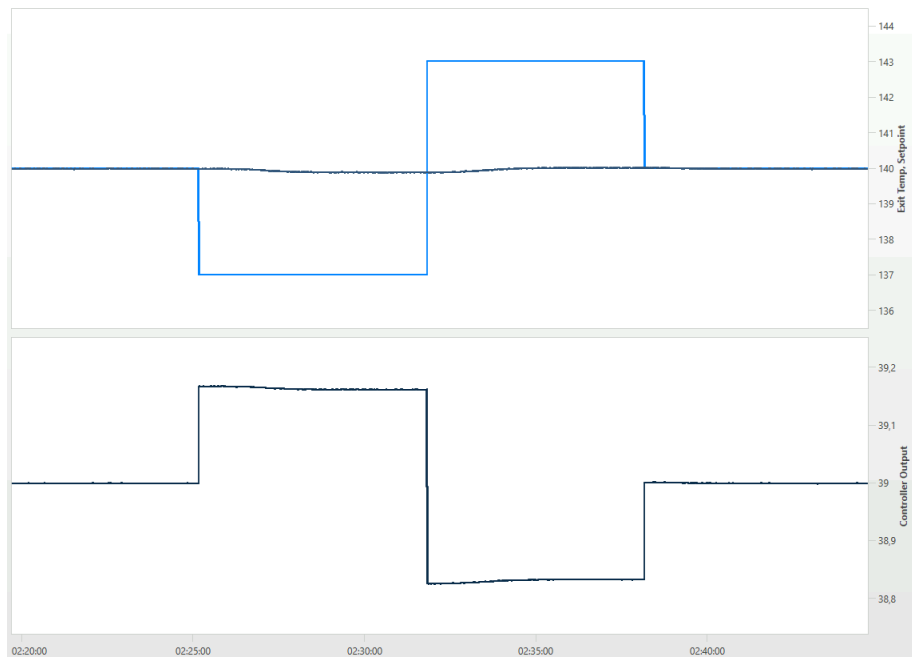


Figura 16: Respuesta del controlador P con K_p conservador.

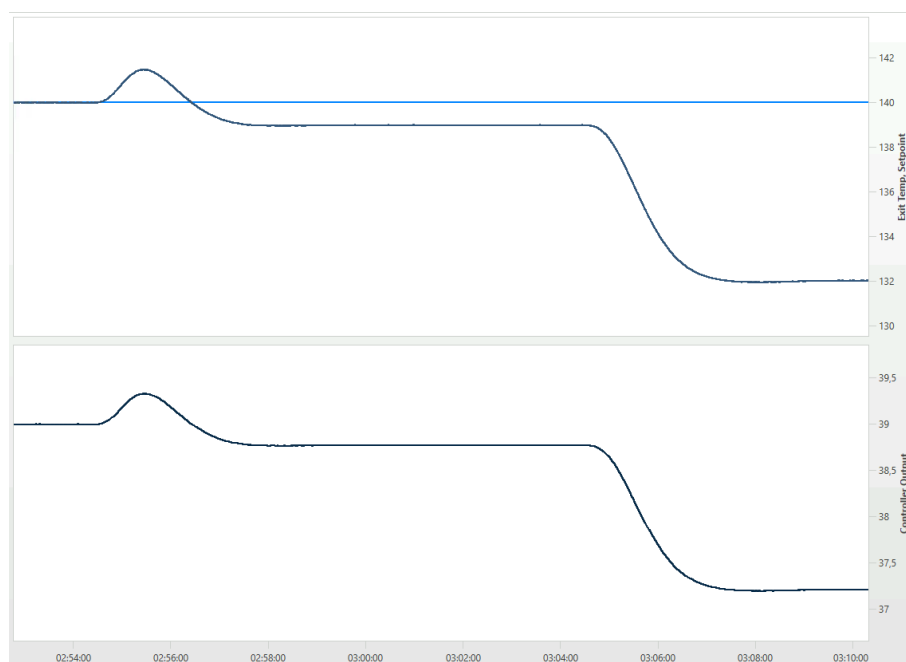
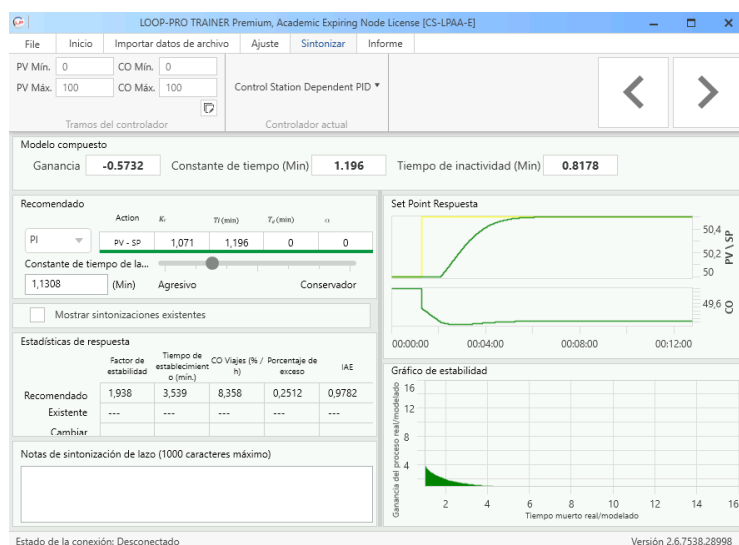


Figura 17: Respuesta del controlador P con perturbaciones.

6. Control PI en lazo cerrado

Para sintonizar un controlador PI en lazo cerrado se utilizará LOOP-PRO Tuner con el mismo modelo que en la sección anterior, con un valor de K_p moderadamente agresivo de 1.1308 que no permita que el valor de salida exceda el valor de referencia en el periodo transitorio. El tiempo integral (T_i) obtenido con LOOP-PRO Tuner es de 1.196 minutos, como se puede observar en la Figura 18.


 Figura 18: Obtención del valor de T_i con LOOP-PRO Tuner.

Se configura el controlador PI con los valores obtenidos y se inicia la simulación, siguiendo los mismos cambios de la temperatura objetivo que en el apartado anterior. Se puede observar en la Figura 19 que el controlador actúa considerablemente mejor que en el control solo P, ya que ahora sí se alcanza el valor de referencia. Además el periodo transitorio es razonablemente suave, sin sobrepasar el valor de referencia, y el estacionario es completamente estable.

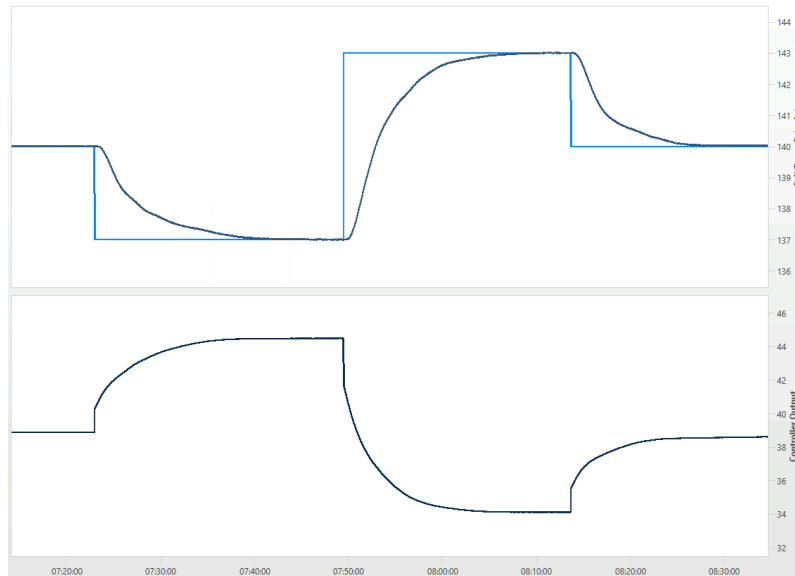


Figura 19: Respuesta del controlador PI con $K_p = 1,1308$ y $T_i = 1,196$.

Si se repiten los cambios en las perturbaciones realizados en el apartado anterior se puede observar en la Figura 20 que el controlador es capaz de rechazarlas, volviendo al valor de referencia en un periodo de tiempo razonable, y sin sobrepasarlo.

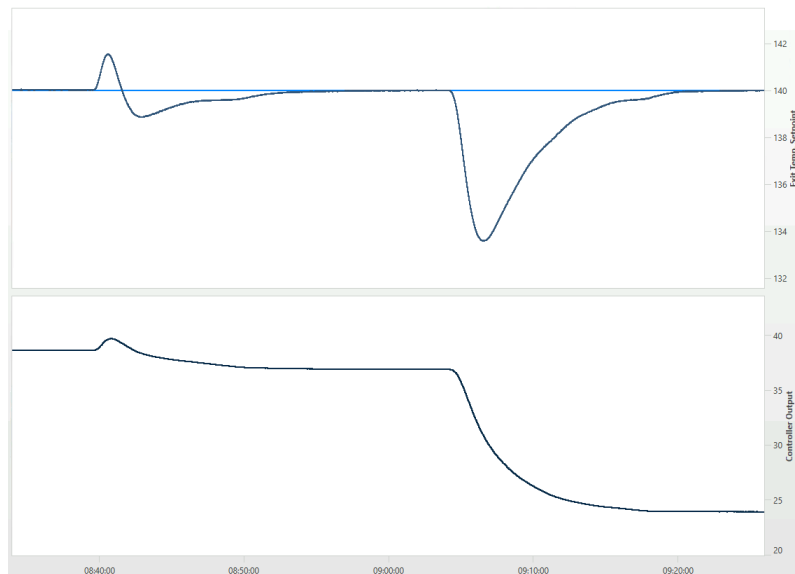


Figura 20: Respuesta del controlador PI con perturbaciones.

A continuación se comprueba el comportamiento del controlador en un punto de

operación alejado al de diseño, para ello se revierten las perturbaciones realizadas y se elige una temperatura objetivo de 125 °C. Como se ve en la figura Figura 21, el controlador alcanza el valor de referencia sin sobrepasarlo, aunque en un tiempo considerable, superior a 1 hora.

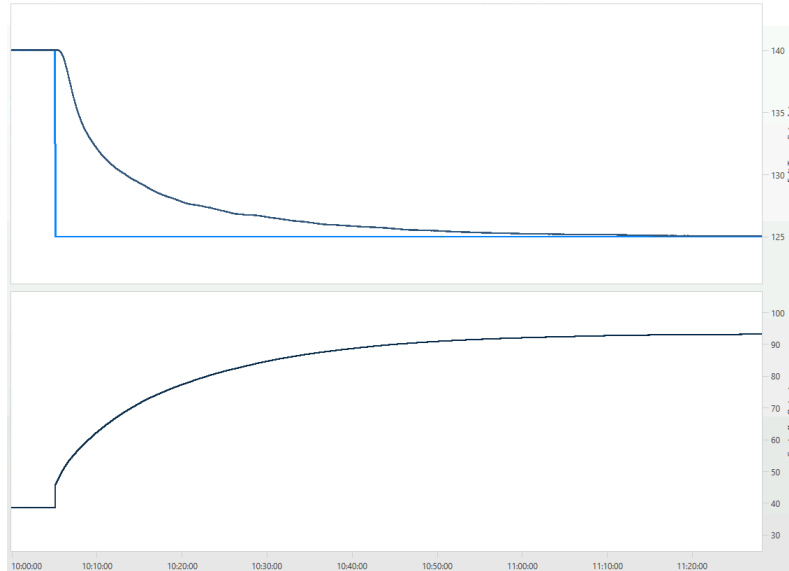


Figura 21: Respuesta del controlador PI en un punto de operación alejado al de diseño.

Al aumentar el valor de K_p a un valor más agresivo, de 2.098 y mantener el valor de T_i en 1.196, se puede observar en la Figura 22 que el controlador actúa de forma más agresiva, alcanzando el valor de referencia en un periodo de tiempo menor, aunque con un periodo transitorio algo menos suave, pero sin sobrepasar el valor de referencia. Mientras que si se cambia a un valor más conservador, de 0.04456, el controlador actúa demasiado suave, sin alcanzar el valor de referencia en un periodo de tiempo razonable.

Si por el contrario se aumenta T_i a 10.196 y se mantiene K_p el comportamiento es similar a cuando se disminuía K_p , el controlador actúa demasiado suave, sin alcanzar el valor de referencia en un periodo de tiempo razonable, como se puede observar en la Figura 23. Y si se disminuye T_i a 0.196, el controlador se comporta de forma oscilatoria, oscilando alrededor del valor de referencia, sin llegar a alcanzarlo, como se puede observar en la Figura 24.

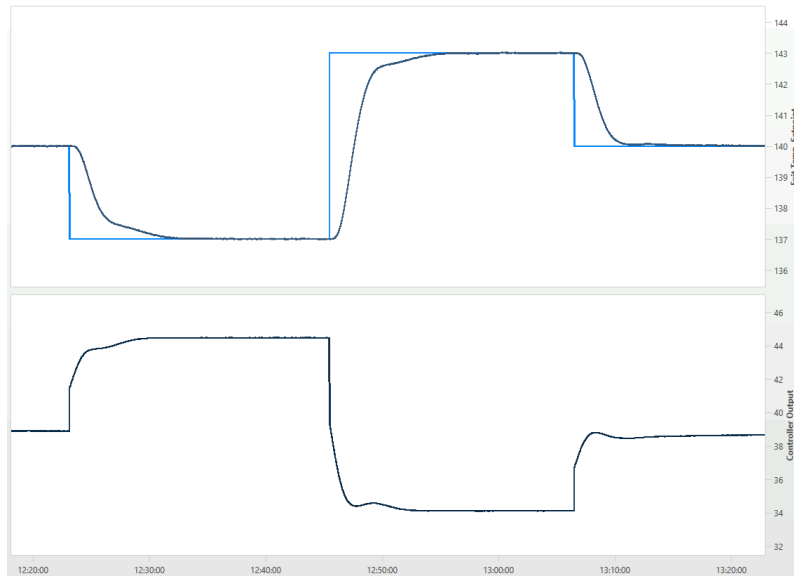


Figura 22: Respuesta del controlador PI con $K_p = 2,098$ y $T_i = 1,196$.

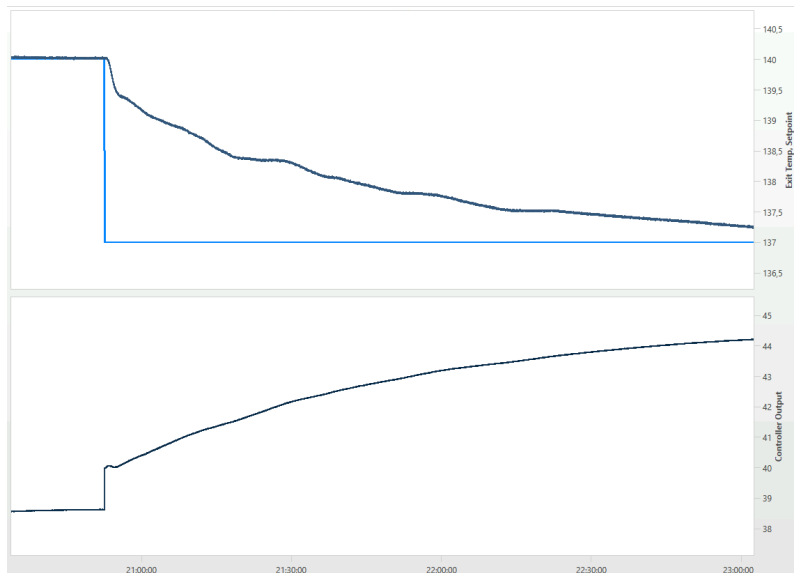


Figura 23: Respuesta del controlador PI con $K_p = 1,1308$ y $T_i = 10,196$.

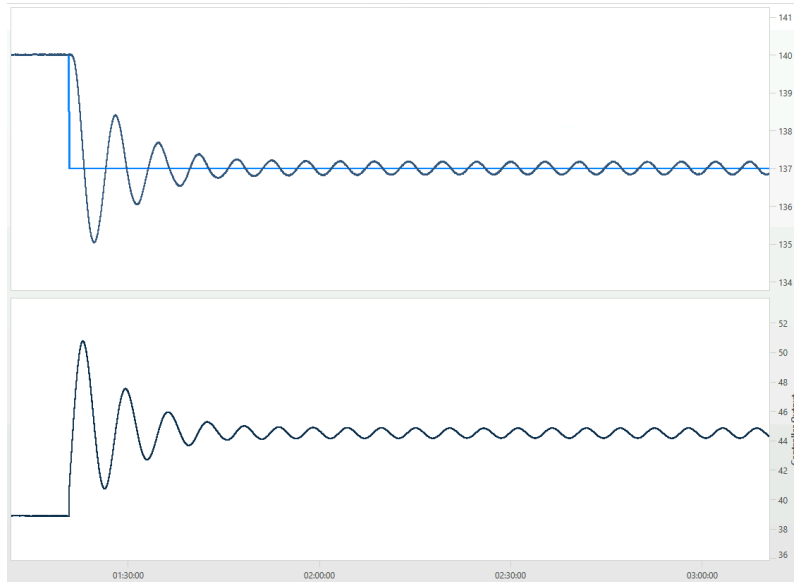


Figura 24: Respuesta del controlador PI con $K_p = 1,1308$ y $T_i = 0,196$.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado el estudio del comportamiento dinámico de un proceso, en concreto el de un intercambiador de calor. Se ha analizado el comportamiento del sistema en lazo abierto realizando cambios tanto en la entrada como en las perturbaciones, y se ha analizado el comportamiento del sistema. Se ha obtenido un modelo lineal de primer orden con retardo para el proceso, tras elegir un punto de operación, tanto gráficamente, como usando LOOP-PRO Tuner. Adicionalmente se ha comprobado que el proceso no es lineal.

Luego se ha pasado a lazo cerrado, sintonizando un controlador P. Se ha comprobado que el controlador actúa cuando se produce un cambio en la temperatura objetivo, sin embargo, nunca llega a alcanzar el valor objetivo, cuando la temperatura no es igual a la del punto de diseño. Además no es capaz de rechazar perturbaciones.

Por último se ha sintonizado un controlador PI, comprobando que el controlador actúa mejor, alcanzando el valor de referencia en un periodo de tiempo aceptable y sin sobrepasar el valor de referencia, siendo capaz de rechazar perturbaciones.

El controlador PI resulta suficiente para obtener un buen comportamiento en este sistema, aunque es posible que un controlador PID o un controlador PID con filtro mejoren el comportamiento del sistema, pero eso queda fuera del alcance de este trabajo.