

Guión de prácticas: El sistema heatflow

INTRODUCCIÓN

Esta práctica consta de dos partes bien diferenciadas, en la primera parte trabajará en modo simulación y en la segunda en modo remoto. Pero antes de enfrentarse a las tareas que se proponen en el apartado 5 es muy importante que lea atentamente los otros apartados de este guión y el documento que describe la interfaz de operación con el sistema Heatflow. Le permitirán hacerse una idea completa de lo que podrá experimentar con este sistema.

Como en otras prácticas, antes de solicitar reserva para la sesión remota será preceptivo haber entregado el informe sobre las tareas en modo simulación y que éste cuente con la evaluación favorable del equipo docente. Además, no olvide que con un buen entrenamiento en simulación tendrá más garantía de conseguir buenos resultados con la planta real en la franja horaria que se le haya asignado.

1. OBJETIVO DE LA PRÁCTICA

Los objetivos de esta práctica son los siguientes:

- Estudio de las características estáticas y dinámicas del sistema.
- Experimentación y análisis de un sistema de control PI de temperatura.
- Estudio del efecto de las perturbaciones sobre el sistema real.

Por ello el documento se ha estructurado de la siguiente manera: primeramente se realiza una descripción del sistema, que ayudará al alumno a la comprensión de su funcionamiento. A continuación se presentan dos posibles aproximaciones al modelo dinámico del sistema, es decir, a su descripción matemática. Posteriormente se presenta la estrategia de control de temperatura que se va a emplear y sus modos de operación. Y en el último apartado se incluyen las experiencias que el alumno deberá realizar con la planta tanto en modo simulación como en modo remoto.

2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

El sistema HeatFlow utilizado para el desarrollo del laboratorio virtual está basado en el equipo HeatFlow fabricado por la empresa canadiense Quanser Consulting (ver la Figura 1), al que tendrá acceso cuando acceda en modo remoto. La planta consiste en una caja equipada con los siguientes componentes: un calefactor y un ventilador colocados en un extremo de la estructura y tres sensores de temperatura S1, S2 y S3 localizados en diferentes posiciones.

La potencia liberada al calefactor es controlada mediante una señal analógica V_h . Igualmente, la velocidad del ventilador puede ser controlada usando una señal analógica V_b . Para medir la temperatura se usan transductores de platino por su rapidez de asentamiento en la medición. La velocidad de giro del ventilador se mide utilizando un tacómetro y se puede usar para diseñar controladores de

velocidad.

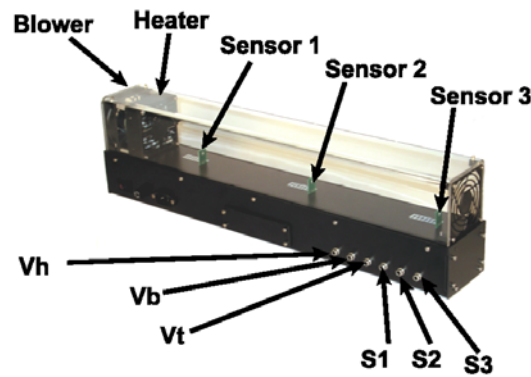


Fig. 1. El sistema HeatFlow de Quanser.

3. EL MODELO MATEMÁTICO

No es fácil programar un modelo termodinámico completo para este sistema. En principio se puede definir un modelo genérico de la siguiente forma:

$$\dot{T}_n = F(V_h, V_b, T_a, x_n) \quad (1)$$

Donde (ver la Figura 2):

- T_n es la temperatura en el sensor n .
- V_b es el voltaje aplicado al ventilador.
- V_h es el voltaje aplicado al calefactor.
- T_a es la temperatura ambiente.
- x_n es la distancia del sensor n al calefactor.

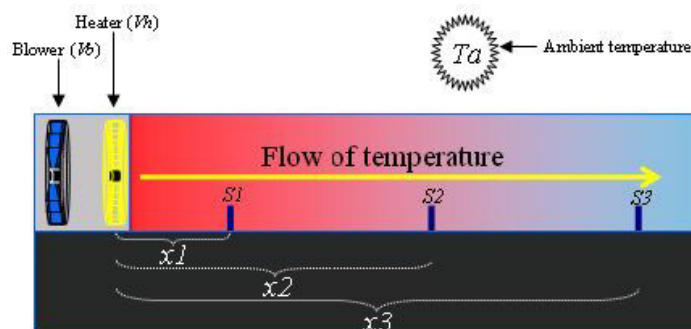


Fig. 2. Relación de variables del proceso.

Como primera aproximación se podría considerar que cada sensor de temperatura del sistema Heatflow responde como un **modelo dinámico de primer orden** en función del voltaje aplicado al calefactor. En ese caso, la función de transferencia que relaciona el voltaje aplicado al calefactor V_h con la temperatura T_n para cada sensor tendría la forma:

$$\frac{T_n(s)}{V_h(s)} = \frac{K}{1 + \tau s} \quad (2)$$

Donde la ganancia K y la constante de tiempo τ_n se pueden determinar experimentalmente para cada sensor mediante saltos escalón en lazo abierto.

No obstante, se ha comprobado experimentalmente que la dinámica del sistema es más compleja y que para simular algo mejor su comportamiento es conveniente considerar un **modelo de segundo orden** de la forma siguiente:

$$G(s) = \frac{T_n(s)}{V_h(s)} = \frac{K(1 + \tau_3 s)}{(1 + \tau_1 s)(1 + \tau_2 s)} \quad (3)$$

Donde cada sensor tendría su correspondientes ganancia (K) y constantes de tiempo (τ_1 , τ_2 y τ_3). Este tipo de modelo es el que se está utilizando en el laboratorio virtual.

4. CONTROL DE TEMPERATURA

Los procesos térmicos y en concreto el control de temperatura es algo que está muy presente en la vida cotidiana, basta pensar en los sistemas básicos de climatización. Generalmente son procesos muy fáciles de controlar, que durante muchos años se controlaban con actuaciones todo o nada, pero que actualmente cuentan con actuaciones de tipo continuo. El equipo Heatflow está diseñado con un objetivo claro, el poder practicar con un sistema de control de temperatura sobre un proceso con constantes de tiempo relativamente pequeñas. Como consecuencia, la conexión remota con este equipo permitirá que el alumno pueda realizar un número importante de experiencias en poco tiempo.

La instrumentación del Heatflow permite cerrar un lazo de control de temperatura del aire en uno de los tres puntos donde están situados los sensores. En la Figura 3 se muestra de forma esquemática la estrategia de control para este proceso, donde el controlador C manipula el voltaje del calefactor V_h con el objetivo de que la temperatura T_n en el sensor seleccionado siga o permanezca a su valor de consigna. La perturbación (el voltaje aplicado al ventilador), que no está representada en el esquema, influye en la temperatura a través del Sistema Heatflow.

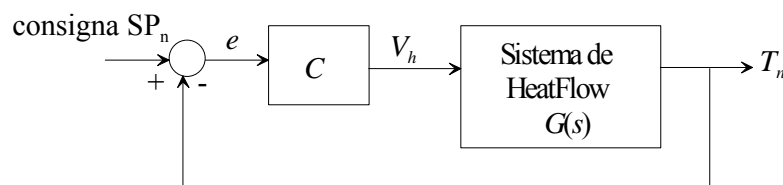


Fig. 3. Estrategia de control para el sistema de HeatFlow.

El sistema Heatflow se va a controlar desde un computador. Pero como se ha elegido un periodo de muestreo muy pequeño en comparación con sus constantes de tiempo, en el análisis y el diseño de este sistema de control se podrá suponer que tanto el controlador como el proceso vienen descritos por sus correspondientes funciones de transferencia continuas $C(s)$ y $G(s)$.

El laboratorio del sistema Heatflow contempla dos modos de operación:

- **Control manual.** Este modo de operación servirá para estudiar la respuesta del sistema en lazo abierto. Consistirá en controlar el sistema sin ninguna acción de control más que los cambios que el usuario estime oportunos sobre el voltaje aplicado al calefactor y sobre el voltaje aplicado al ventilador (únicamente disponible en remoto).
- **Control utilizando un controlador PID.** Este modo de operación reproduce la estrategia de control realimentado de la Figura 3 con un controlador de naturaleza PID. Ajustando adecuadamente los tres parámetros de control se podrán realizar experiencias muy interesantes de seguimiento de referencias y de rechazo a las perturbaciones. En concreto se verá que con un controlador PI es suficiente para controlar aceptablemente el equipo.

El controlador PI tiene la forma:

$$C(s) = K_p \left[1 + \frac{1}{T_i s} \right] \quad (4)$$

donde:

- K_p es la ganancia proporcional.
- T_i es el tiempo integral.

5. TAREAS EN MODO SIMULACIÓN Y REMOTO (Experimentos)

En este apartado se describen cada uno de los experimentos de laboratorio que el alumno deberá realizar tanto en modo simulación como remoto, y de los que deberá informar.

5.1. Entorno de experimentación

Con este primer experimento se pretende que el alumno se familiarice con la aplicación. Para ello ejecutar los pasos siguientes:

- 1) Encender el ordenador.
- 2) Entrar en UNEDLabs (<http://unedlabs.dia.uned.es>) con el login y password asignados.
- 3) Navegar por el entorno hasta localizar el enlace del laboratorio virtual del Heatflow.
- 4) Acceder al laboratorio virtual del Heatflow para observar la interfaz de la aplicación desarrollada con Ejs.
- 5) Revisar el documento en el que se describe el laboratorio virtual y remoto desarrollado (InterfazHeatflow.pdf) e interactuar al mismo tiempo con la aplicación.

5.2. Control manual de la temperatura

En este apartado se proponen varias experiencias diferenciadas para simulación

y para remoto. Pero todas tienen un objetivo común, el de explorar las características estáticas del Heatflow mediante el modo de operación manual. Para ello debe proceder como sigue:

Si está en **simulación**:

- 1) Compruebe que la planta ha arrancado en modo MANUAL de control, que deberá mantener seleccionado casi todo el tiempo, y pulse el botón Play para comenzar los experimentos. Observe que la tensión del calefactor es de 3 V y anote los valores de temperatura T_1 , T_2 y T_3 que se alcanzan con esa tensión.
- 2) Modifique la tensión del calefactor hasta los 4.5 V en incrementos de 0.5 V, dejando un tiempo suficiente entre cambios para que se alcancen estados estacionarios en las tres temperaturas y anote los correspondientes valores.
- 3) Los resultados de estas experiencias las puede resumir en forma de tabla como sigue. ¿Qué conclusiones, relativas a la estabilidad y a la linealidad del modelo de Heatflow empleado en la simulación, puede extraer de la tabla?

V_h	T_1	T_2	T_3
3			
3.5			
4			
4.5			

- 4) Mediante prueba y error determine los valores que debería tener la tensión del calefactor para lograr los respectivos estados estacionarios de 60 °C en las temperaturas T_1 , T_2 y T_3 .
- 5) ¿Se ha ayudado de la tabla anterior para resolver la tarea anterior? Pruebe a hacerlo con ayuda del controlador PID, conmutando al modo AUTOMÁTICO y seleccionando el sensor correspondiente.

Si está en **remoto**:

- 1) Compruebe que la planta ha arrancado en modo AUTOMÁTICO de control con el objetivo de situar la temperatura T_1 a 40 °C. Tendrá que esperar un tiempo prudente, pues las condiciones iniciales de la planta y de su entorno no son variables controladas, hasta que se alcance el estado estacionario. Anote el valor aproximado en el que se ha estabilizado la tensión del calefactor, el que ha permitido conseguir esa consigna de temperatura, y anote también las tres temperaturas T_1 , T_2 y T_3 .
- 2) Conmute la planta a modo MANUAL de control, que deberá mantener seleccionado el resto del tiempo, y modifique la tensión del calefactor en tres incrementos sucesivos de 0.5 V, dejando un tiempo suficiente entre cambios para que se alcancen estados estacionarios en las tres temperaturas y anote los correspondientes valores.
- 3) Los resultados de estas experiencias los puede resumir en una tabla similar a la anterior. ¿Qué conclusiones, relativas a la estabilidad y a la linealidad de la planta Heatflow, puede extraer de la nueva tabla? ¿Observa alguna diferencia respecto a la simulación?
- 4) Mediante prueba y error determine el valor que debería tener la tensión del calefactor para lograr un estado estacionario de 60 °C en la temperatura T_1 . ¿Se podría haber ayudado de la tabla anterior y del controlador PID?
- 5) En todos los experimentos con el Heatflow real hay circulación de aire, debido a la tensión aplicada al ventilador, que hace la función de

perturbación. Hasta ahora esa tensión era de 3 V. Elija como punto de operación cualquiera de los analizados anteriormente y pruebe con otros dos valores (4 y 5) de la tensión para evaluar cualitativamente el efecto que esta variable tiene sobre las temperaturas. Los resultados de esta experiencia los puede presentar de forma numérica o de forma gráfica.

- 6) Ponga la tensión del calefactor a su valor mínimo (0 V) y la tensión del ventilador a su valor máximo (5 V). Observe que, transcurrido un tiempo prudencial, las tres temperaturas se habrán estabilizado a valores muy próximos. Con este valor se puede hacer una idea de a qué temperatura ambiente está trabajando la planta. Y cuál es la consigna mínima alcanzable para cualquiera de las temperaturas. ¿Qué información obtendría al poner la tensión del calefactor a su valor máximo (5 V) y la tensión del ventilador a su valor mínimo (3 V)? Si trata de determinarlo experimentalmente evite no prolongar la situación pues podría causar daños en la planta.

5.3. Estimación de las características del proceso

En el apartado 3 se han presentado dos posibles formas de describir el proceso que tiene lugar en cada uno de los sensores del Heatflow: como modelo de primer orden (2) o como modelo de segundo orden (3). Puesto que en el laboratorio virtual se están utilizando tres modelos del tipo (3) para simular el efecto que el voltaje aplicado al calefactor tiene sobre cada uno de los sensores. En este apartado se proponen una serie de experiencias en simulación, encaminadas a estimar los parámetros del modelo de primer orden y a analizar las diferencias entre ambos modelos.

Por otro lado, aunque el comportamiento del equipo real es algo más complejo y depende de otros factores, su descripción mediante funciones de transferencia de primer orden es apropiada para el diseño del controlador y para justificar el comportamiento tanto del sistema en lazo abierto como del sistema en lazo cerrado. De ahí que en este apartado se propongan también una serie de experiencias en remoto, encaminadas a estimar los parámetros del modelo de primer orden y a analizar la bondad del modelo.

*5.3.1. Aproximación de primer orden del sistema heatflow a partir de registros de las tres temperaturas en **simulación**.*

Para aproximar el sistema a un modelo de primer orden, basta con determinar la ganancia y la constante de tiempo que mejor ajustan el comportamiento de dicho modelo a la dinámica del sistema real. Para ello proceda de la siguiente manera:

- 1) Arranque o resetee el sistema (Pulsar el botón Reset) y espere a que las temperaturas alcancen el estacionario.
- 2) Cambie la tensión del calefactor de 3 a 4 V y registre la evolución de las tres temperaturas para dicho cambio.
- 3) Proceda, como se explica en el Anexo 1 (Características de la respuesta temporal), para estimar los valores de K y τ correspondientes a cada temperatura. Los resultados de esta tarea los puede resumir en forma de tabla como sigue:

n	1	2	3
K			
τ			

- 4) Con Matlab o cualquier otro programa de cálculo genere las respuestas

escalón de los modelos determinados en el paso anterior y compárelas gráficamente con los registros utilizados en la estimación. Informe sobre las conclusiones que se pueden sacar de estas comparaciones.

5.3.2. Aproximación de primer orden del sistema heatflow a partir de registros de la temperatura T_1 en **modo remoto**.

- 1) Consiga un registro similar al del apartado 5.3.1, pero límitese a estimar los valores de K y τ correspondientes a la temperatura T_1 .
- 2) Repita el paso anterior para un cambio de 4 V a 3 V en la tensión del calefactor.
- 3) Los resultados de los dos pasos anteriores los puede resumir en forma de tabla como sigue:

T_1	V_h de 3 a 4 V	V_h de 4 a 3 V
K		
τ		

- 4) Con Matlab o cualquier otro programa de cálculo generar las respuestas escalón de los modelos determinados en el apartado anterior y compararlas gráficamente con los registros utilizados en la estimación. Informar sobre las conclusiones que se pueden sacar de estas comparaciones.
- 5) Comente las posibles diferencias entre los modelos estimados para T_1 en modo remoto y el que estimó en simulación.

5.4. Control de Temperatura: Seguimiento de referencias

En este apartado se proponen varias experiencias de control de temperatura, diferenciadas para simulación y para remoto. Pero todas tienen un objetivo común, el de explorar las características dinámicas del Heatflow en el modo automático de operación con un controlador PI. Para ello debe proceder como sigue:

Si está en **simulación**:

- 1) La planta habrá arrancado en modo MANUAL de control y por tanto, lo primero que deber hacer es conmutar a modo AUTOMÁTICO de control. Observará que la tensión del calefactor se mantiene en el valor, 3 V, que tenía inicialmente y las tres temperaturas también permanecen a sus valores iniciales.
- 2) Para comprobar que el sistema de control es capaz de alcanzar otras temperaturas (seguimiento de referencias) tiene que modificar la consigna de T_1 , ya que el sensor seleccionado en el arranque para cerrar el lazo de control es S1. Pruebe por ejemplo a aumentar la consigna de temperatura en 5 °C y registre la respuesta del sistema.
- 3) Pruebe a realizar sucesivos cambios en la consigna de temperatura, dejando el tiempo necesario para que la temperatura se estabilice. Podrá así comprobar que el sistema de control funciona correctamente. ¿Qué tipo de respuesta ha observado en todos los casos?
- 4) Observe que en las pruebas anteriores estaba utilizando un controlador PI con los parámetros ($K_p=0,1$ y $T_i=2$ s) por defecto del entorno de experimentación. Repita experiencias similares pero con otros juegos de parámetros de control, procurando que de una experiencia a otra solo haya variado un parámetro de control, pues de esta forma podrá analizar de forma independiente el efecto que sobre la respuesta del sistema tiene un aumento de la ganancia proporcional o un aumento de la constante de

tiempo integral. Comente los resultados.

- 5) En función de los resultados del paso anterior decídase por utilizar unos parámetros de control distintos a los incluidos por defecto. Recupere el punto de operación inicial, realice el mismo experimento que en el punto (2) y registre la respuesta.
- 6) Justifique si las respuestas registradas en los puntos (2) y (5) tienen las características (máxima sobreelongación, tiempo de asentamiento, etc...) que se podían esperar de un análisis del sistema de control representado en la figura 2. Recuerde que en este análisis debería utilizar el modelo de primer orden estimado en el apartado 5.3.1 para la temperatura T_1 y el controlador PI con los respectivos juegos de parámetros de control.
- 7) Proceda a realizar otras experiencias de seguimiento de referencias, con los parámetros de control que decidió en el paso 5, pero cerrando el lazo de control con otro de los sensores S2 ó S3 de la planta. ¿Las respuestas que ha obtenido son satisfactorias o sería conveniente cambiar los parámetros de control? ¿Las respuestas están en concordancia con lo que se podía esperar a la vista de los tres modelos de primer orden estimados en el apartado 5.3.1?

Si está en **remoto**:

- 1) Le proponemos que todas las experiencias de control de temperatura sean sobre T_1 . Por tanto, asegúrese que la planta está en modo AUTOMÁTICO de control y que el sensor S1 está seleccionado. En primer lugar debería utilizar los parámetros de control por defecto ($K_p=0,1$ y $T_i=2$ s) y podría exigir una consigna de 40 °C. A continuación puede provocar sucesivos cambios para comprobar que el sistema de control funciona correctamente. ¿Ha observado el mismo tipo de respuesta en todos los casos? ¿Era esperable ese resultado? Comente las diferencias que haya podido observar respecto a las experiencias de seguimiento de referencias en simulación.
- 2) Registre una respuesta del sistema donde la tensión del calefactor haya permanecido en el rango de 3 a 4 V. Y no olvide anotar las condiciones en las que la ha generado, pues las tendrá que volver a poner cuando modifique los parámetros de control.
- 3) Repita experiencias similares pero con otro juego de parámetros de control. Este juego de parámetros de control podría ser el mismo que decidió en simulación o debería tener otro tipo de justificación. Entre las experiencias no olvide realizar y registrar una que sea comparable con la registrada en el punto anterior.
- 4) Justifique si las respuestas registradas en los puntos (2) y (3) tienen las características (máxima sobreelongación, tiempo de asentamiento, etc...) que se podían esperar de un análisis del sistema de control representado en la figura 2. Recuerde que en este análisis debería utilizar los modelos de primer orden estimados en el apartado 5.3.2 para la temperatura T_1 y el controlador PI con los respectivos juegos de parámetros de control.
- 5) Con los parámetros de control que haya decidido o por defecto trate de realizar y registrar una experiencia en la que, transitoriamente, la señal de control haya estado saturada.

5.5. Control de Temperatura: Rechazo de perturbaciones

Recuerde, del apartado 5.2, que la tensión aplicada al ventilador hace la función de perturbación en el Heatflow real. En este apartado, **que sólo realizará en modo remoto**, se pretende analizar la reacción del sistema de control cuando se produce un cambio brusco en la perturbación. Para ello debe proceder como sigue:

- 1) En todos los experimentos de seguimiento de referencias con el Heatflow, la tensión aplicada al ventilador habrá sido de 3 V. Elija como punto de operación y como controlador cualesquiera de los analizados anteriormente y cambie bruscamente a los otros dos valores (4 y 5) de la tensión. Evalúe cualitativamente el efecto que estos cambios tienen en la temperatura T_1 y sobre todo en la señal de control (V_h).
- 2) Adjunte algún registro representativo de los obtenidos en el paso anterior.