

7 EJEMPLO DE SISETMA DE CONTROL

En este capítulo veremos las ideas básicas del control de una planta simple. El desarrollo se basa en una implementación de laboratorio, tenemos una planta real que debemos entender, modelar, identificar y finalmente controlar.

Los puntos a ser tratados son:

- Descripción de la planta.
- Modelado.
- Diagrama de bloque del sistema.
- Sensores, actuadores y perturbaciones externas
- Identificación de parámetros
- Control ON OFF
- Control PID
- Criterios de sintonía.

7.1 Descripción de la planta.

En la terminología de los sistemas de control se le llama planta al sistema físico que se quiere controlar. En nuestro caso, la planta es un sistema de enfriamiento de una columna de aire. La columna tiene pared de aluminio y su base es un calentador al que se puede fijar la temperatura en forma externa. La columna se cierra con un ventilador que es el encargado de enfriar la planta.

De esta forma el funcionamiento puede describirse como:

- Hay una temperatura externa, forzada por el calentador de la base, que lleva el sistema a una temperatura alta. Pueden lograrse temperaturas de más de 100 C.
- La temperatura externa si fija con un controlador que no pertenece a nuestro sistema de control, es un lazo de control interno al calentador. Se toma la variación en esta temperatura como una perturbación al sistema.
- El objetivo del control es fijar la temperatura del aire en el interior de la columna.
- Como realimentación se tiene una medida de la temperatura en el interior de la columna.
- Como actuador se tiene un ventilador al que puede controlarse su velocidad de rotación.
- El control debe compensar las perturbaciones en la temperatura de la base, cambios en la temperatura ambiente de la sala y corrientes de aire exteriores que afectan el intercambio de calor con la sala.

La siguiente figura muestra un esquema de la planta y sus actuadores. Se definen las variables utilizadas en modelado y control.

T Temperatura en el interior de la columna. Es medida por un sensor colocado dentro de la misma.

T_b Temperatura de la base. Fija la condición de borde inferior, es controlada externamente por un calentador on-off al cual podemos fijar un punto aproximado de funcionamiento. Presenta variaciones de varios grados durante la operación lo que se toma como una perturbación externa al sistema.

T_{ext} Temperatura exterior o temperatura de la sala. Es variable durante el proceso, su variación se toma como una perturbación externa al sistema.

PWM Es la acción de control para mantener la temperatura constante en el valor deseado. El motor es un motor DC que se controla su velocidad de rotación con el voltaje aplicado en sus terminales. Este voltaje se fija cambiando el ancho de los pulsos aplicados (Pulse Wide Modulation)

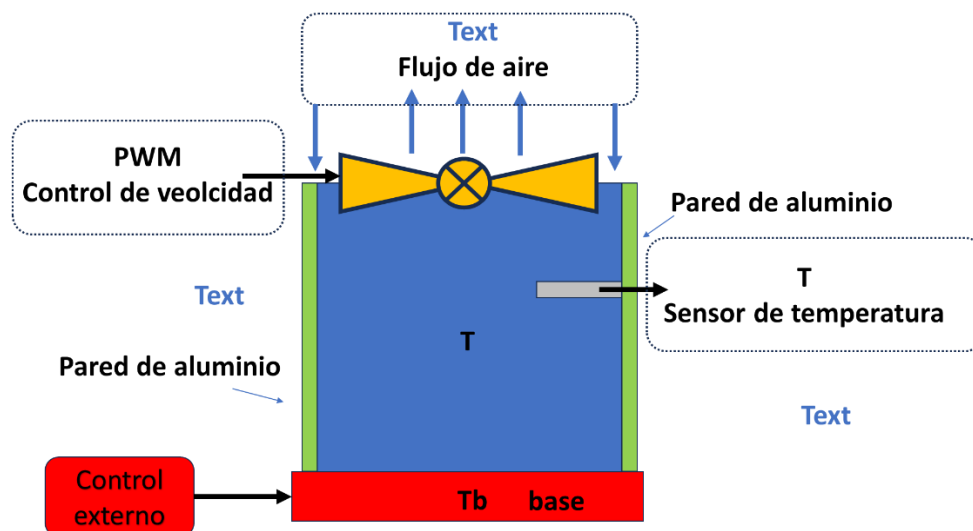


Figura 7.1 Layout de la planta



Figura 7.2 Foto de la planta construida para el laboratorio. 1 Columna de aluminio, 2 base termostaticada, 3 sensor de temperatura, 4 control externo de temperatura de la base.

7.2 Modelado.

Cuanta más información se tiene sobre la planta, más acertado será el sistema de control que puede implementarse. En nuestro caso se trata de un sistema complejo con varias dinámicas. El proceso de modelado puede resumirse en los siguientes pasos:

- Definir el objetivo de control del sistema.
- Identificar la dinámica de cada parte del sistema (subsistemas) y su relación con la variable objetivo.
- Estimar la incidencia de los subsistemas en la evolución de la variable objetivo.
- Definir entradas, salidas, perturbaciones y variables de estado.
- Escribir las ecuaciones simplificadas del modelo y las hipótesis simplificadoras del modelo.

7.2.1 Objetivo de control

Hay muchos objetivos posibles en un sistema de control. Los más comunes en los procesos industriales son:

- Alcance de un punto de funcionamiento o *setpoint*. En este tipo de control el sistema trata de alcanzar un punto de funcionamiento predeterminado por el usuario. En nuestro caso el objetivo de control es un *setpoint* de temperatura en el interior de la columna. Esta es la temperatura T medida en el interior.
- Rechazo a perturbaciones. En este tipo de sistemas el control está en un punto de funcionamiento y debe rechazar las perturbaciones producidas por variaciones del ambiente o condiciones de funcionamiento. Nuestro control también debe rechazar perturbaciones una vez alcanzado el *setpoint*.
- Seguimiento o tracking. Este tipo de control apunta a un objetivo variable que debe seguirse. Este puede ser fijado por el usuario o por condiciones del entorno. En principio nuestro control no es de seguimiento.

7.2.2 Dinámica de los subsistemas y su incidencia

En nuestro problema podemos identificar al menos cuatro dinámicas:

- Dinámica de la velocidad de giro del ventilador dependiendo del voltaje aplicado. Los motores eléctricos pueden modelarse como una masa (el rotor) que gira impulsada por un par eléctrico. El par eléctrico depende de la corriente por el bobinado del rotor que a su vez depende del voltaje aplicado. Esto da una dinámica de segundo orden.
- Dinámica del sensor de temperatura. El sensor tiene un tiempo de respuesta característico del orden de segundos. Esto afecta si queremos estudiar cambios bruscos de temperatura.
- Dinámica de la energía intercambiada por el ventilador. La relación entre el intercambio de aire y la velocidad de giro depende de la geometría de la

paleta y de régimen de flujo de aire. Es una relación complicada que en principio puede suponerse que hay una función $f(\omega, T, T_{ext})$ que describe el intercambio de energía producida por el flujo de aire.

- Dinámica de la temperatura de la base. Esta temperatura es fijada por un controlador externo de tipo on-off. Podemos asumir que tiene una temperatura media y que sus variaciones son una perturbación.
- Dinámica de la evolución de la temperatura en la columna de aire. Hay una evolución de la temperatura del aire (objetivo del control) y de la temperatura de la columna de aluminio. En principio puede modelarse como dos sistemas independientes (aire y columna de aluminio) o un sistema compuesto que engloba las características de los dos.
- Perturbaciones externas. Cambios en la temperatura del aire de la sala, cambios en la humedad de la sala, cambios en la temperatura de los componentes alrededor de la columna, etc. Esto afecta la dinámica, pero de una forma que no tenemos control ni realimentación, por ello los consideramos una perturbación que el sistema debe rechazar.

7.2.3 Entradas, salidas, variables de estado y perturbaciones

Variables de estado. Una forma simple de definir las variables de estado es ver la energía que se acumula en el sistema. En nuestro caso podrían definirse tres: la energía cinética de rotación del ventilador, la temperatura del aire en la columna y la temperatura de la pared de aluminio.

En nuestro caso consideraremos una única temperatura en el interior de la columna, es una hipótesis que simplifica el análisis y consideraremos despreciable la energía acumulada en el ventilador. Se considera instantánea la respuesta del ventilador.

De esta forma hay solo una variable de estado T .

Como entrada tomaremos el voltaje que controla el ventilador. Este se determina con un **PWM** que será explicado más adelante.

La salida coincide con la variable de estado T .

Los cambios en la temperatura ambiente T_{ext} , la temperatura de la base T_b y otras variables ambientales se consideran perturbaciones.

7.2.4 Ecuaciones del modelo

Hipótesis 1. Consideramos un sistema formado por la columna de aire y la pared de aluminio que poseen coeficientes de capacidad calorífica y masa equivalentes. Esto es una simplificación que se justifica si el modelo es adecuado para el control.

Hipótesis 2. El ventilador tiene una velocidad de giro proporcional al PWM (voltaje aplicado). En principio no consideraremos una zona muerta.

Hipótesis 3. La temperatura de la plancha y la del ambiente se consideran constantes

Hipótesis 4. El sistema aire-aluminio responde como un conjunto que tiene una capacidad calorífica y una masa equivalentes.

La dinámica puede escribirse como:

$$MC \frac{dT}{dt} = -k_e(T - T_{ext}) - k_p(T - T_p) - f(PWM, T, T_{ext}) \quad \text{Ec. 7.1}$$

MC es la masa y la capacidad calorífica del sistema conjunto formado por el aire y la pared de aluminio.

$k_e(T - T_{ext})$ intercambio de energía a través de la pared de aluminio y el ambiente.

$k_p(T - T_p)$ intercambio de energía con la plancha.

$f(PWM, T, T_{ext})$ intercambio de energía en el ventilador

Aunque es un modelo muy simplificado, es todavía muy complicado obtener relaciones cuantitativas que nos permita identificar los parámetros y simular su comportamiento. En particular se desconoce la función $f(PWM, T, T_{ext})$. Una aproximación mayor se obtiene linealizando en torno a un punto de equilibrio. Llamamos T_{SP} a la temperatura del setpoint y PWM_{SP} al valor de la modulación para obtener la velocidad del ventilador en régimen.

$$f(PWM, T, T_{ext}) = f(PWM_{SP}, T_{SP}, T_{ext}) + \left. \frac{\partial f}{\partial PWM} \right|_{SP} \Delta PWM + \left. \frac{\partial f}{\partial T} \right|_{SP} \Delta T + \left. \frac{\partial f}{\partial T_{ext}} \right|_{SP} \Delta T_{ext}$$

Suponiendo que la temperatura exterior se mantiene constante

$$\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau} T = a \Delta PWM + b \quad \text{Ec 7.2}$$

Los parámetros a y b dependen del setpoint y la temperatura externa.

Si logramos identificar los parámetros a , b y τ , podemos realizar un cambio de variables del tipo

$$\Delta T = T - T_{eq} \quad \text{Ec. 7.3}$$

En esta variable definida en torno al punto de equilibrio la ecuación descriptiva de la dinámica en el tiempo queda

$$\frac{d\Delta T}{dt} + \frac{1}{\tau} \Delta T = a \Delta PWM \quad \text{Ec 7.4}$$

Note que podemos utilizar PWM o su variación respecto al setpoint, esto produce diferentes valores del cambio de variable en Ec 7.3. En el dominio de Laplace la transferencia entre la temperatura y la entrada PWM se escribe como

$$H(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta PWM(s)} = \frac{a}{s + \frac{1}{\tau}} \quad \text{Ec. 7.5}$$

7.3 Diagrama de bloques del sistema.

Implementaremos un sistema de control realimentado, para ello lo primero es pensar el sistema globalmente, a nivel de bloques. El diagrama de bloques nos muestra la planta, muestra gráficamente las entradas y las salidas, los actuadores y sensores, la realimentación con el controlador y la fijación del setpoint. El setpoint es el punto de operación u objetivo de nuestro sistema de control.

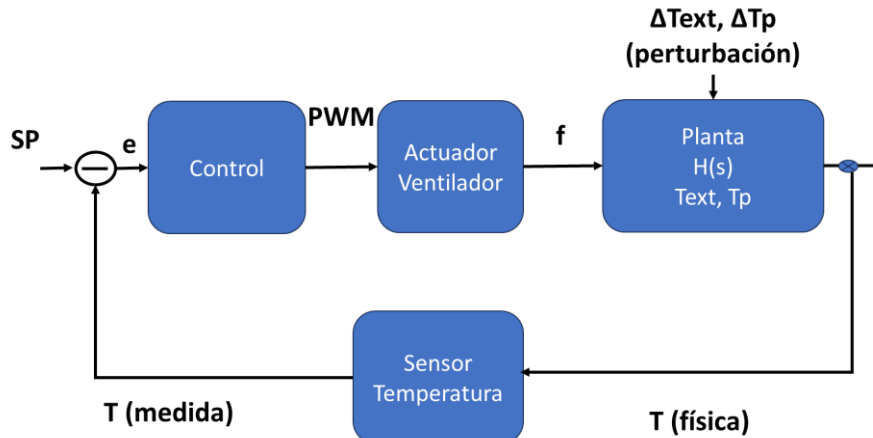


Figura 7.3 Diagrama de bloques

7.4 Sensores, actuadores y perturbaciones externas

En esta sección discutiremos las entradas y salidas del sistema en forma genérica. Las entradas generalmente son una variable física del sistema (o una combinación) que determinan su evolución. Estas pueden ser introducidas conscientemente, que es lo que llamamos propiamente entradas o ser generadas por el entorno del sistema. A estas últimas les llamamos perturbaciones.

Las entradas que introducimos generalmente toman los valores de las variables físicas utilizando sensores de medida. Debe considerarse la dinámica específica de cada sensor, su sensibilidad, la escala en que da la información, si es analógico o digital y el tiempo de respuesta asociado. Ejemplos de sensores son termómetros, medidores de presión, medidores de fuerza, phmetros, etc.

Como resultado los sistemas producen salidas. Muchas veces estas salidas provocan un cambio en el ambiente. El elemento que transforma el valor de la salida en un cambio físico se llama actuador. Ejemplos de actuadores son las electroválvulas, motores, dosificadores, etc.

7.4.1 Sensor de temperatura

Como sensor de temperatura se utiliza un DS18B20, que es un sensor de estado sólido que ya disponibiliza una salida digital en formato 1Wire. Hay disponibles librerías para leer su valor desde varios microprocesadores.

El sensor está protegido por una bayoneta de acero lo que hace que su dinámica dependa de las características térmicas del sensor y de la bayoneta.

La siguiente figura muestra una respuesta al escalón de este sensor. Esto nos permite evaluar la constante de tiempo asociada al mismo.

Figura 7.4 Respuesta al escalón DS18B20

El modelo simple de esta respuesta es como un sistema de primer orden que evoluciona como

$$T_{medida} = (T_{fin} - T_{ini}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{DS}}}\right) + T_{ini}$$

Realizando un ajuste numérico de los datos experimentales de la figura 7.4 se obtiene la constante de tiempo $\tau_{DS} = xx \text{ s}$

En principio la dinámica de este sistema es mucho más rápida que la del sistema térmico, por lo que su efecto será introducir un pequeño retardo en la respuesta al escalón.

7.4.2 Motor - ventilador

El ventilador es movido por un motor eléctrico de corriente continua CC del tipo sin escobillas (brushless) que genera el campo con un imán permanente en el rotor y tiene bobinados de corriente en el estator.

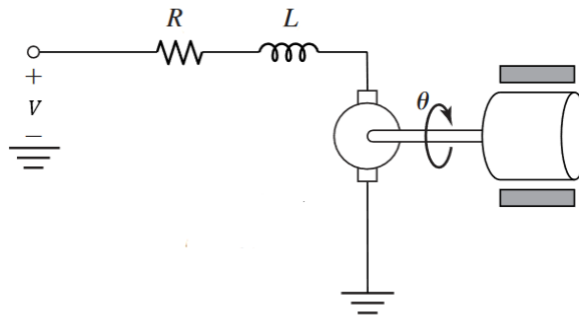


Figura 7.5 Circuito del motor DC

El funcionamiento del motor se describe con tres ecuaciones:

Newton en el eje de rotación (segunda cardinal)

$$J \frac{d\omega}{dt} = \mathcal{T}_e - \mathcal{T}_{eje} - b\omega$$

\mathcal{T}_e es el par eléctrico generado por el motor

\mathcal{T}_{eje} es el par resistente de la carga, es el que determina el trabajo realizado por el motor

b es la constante de fricción viscosa

El par eléctrico es proporcional a la corriente aplicada

$$\mathcal{T}_e = k_e I$$

La corriente puede deducirse de la malla del circuito

$$V(t) = RI + L \frac{dI}{dt} + fem$$

Donde la fem inducida en bornes del motor es proporcional a la velocidad angular

$$fem = k_{\omega} \omega$$

Combinando estas ecuaciones obtenemos la transferencia entre el voltaje y la velocidad angular cuando el único par externo considerado es proporcional a la velocidad angular.

$$\frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{b}{J} + \frac{k_{\omega} k_e}{JR} \right) \omega = \frac{k_e}{JR} V$$

Tenemos nuevamente una ecuación diferencial lineal de primer orden que puede escribirse como

$$\frac{d\omega}{dt} + c \omega = d \text{ RPM}$$

En principio la dinámica de este sistema es mucho mas rápida que la del sistema térmico, por lo que su efecto será introducir un pequeño retardo en la respuesta al escalón.

Tenemos un ensayo de las velocidades angulares de régimen para diferentes voltajes, verificando que la relación es lineal.

Figura xx. Velocidades angulares de régimen en el ventilador.

Un detalle importante es la aparición de una “zona muerta” en la respuesta del ventilador. Esto ocurre en muchos actuadores generalmente en el entorno de cero. En este caso el ventilador necesita un voltaje mínimo de aproximadamente 3 V para comenzar su movimiento, pero luego no se detiene hasta que el voltaje disminuye por debajo de 2,5 V.

7.5 Identificación de parámetros

Una vez que hemos comprendido el funcionamiento de la planta y hemos construido un modelo matemático de su dinámica, debemos proceder a la identificación de los parámetros de esta. Llamamos identificación al proceso de determinar teórica o experimentalmente los parámetros relevantes del modelo de la planta.

Note que hablamos de los parámetros del modelo, el modelo es una aproximación de la dinámica de la planta que es razonablemente válida en un entorno de funcionamiento. Para esté entorno, los parámetros del modelo toman valores concretos que deben ser determinados.

Repitiendo el modelo de la ecuación 7.2, el objetivo será determinar los parámetros a, b y τ del mismo.

$$\frac{d\Delta T}{dt} + \frac{1}{\tau} \Delta T = a \Delta PWM \tag{Ec 7.2}$$

La siguiente figura muestra un ensayo de respuesta al escalón cuando se enciende la plancha y el PWM vale cero. Esto nos da una idea aproximada de las constantes del modelo.

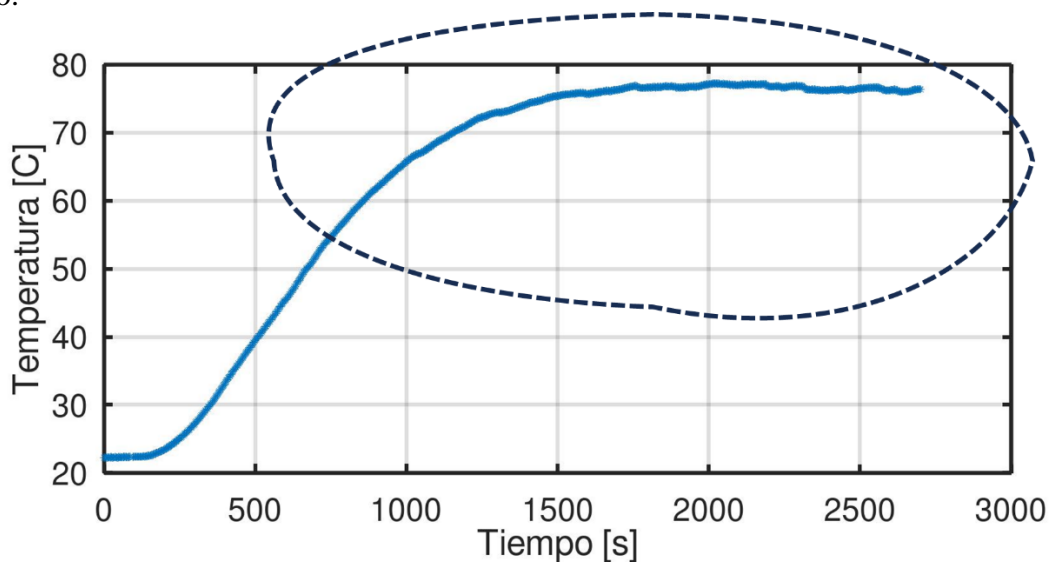


Figura 7.X Respuesta al escalón en T_p

Esta respuesta cambia mucho durante el proceso, tiene un tiempo de retardo importante y perturbaciones debidas al ciclo de encendido y apagado de la plancha. Por ello estudiamos el escalón en una ventana indicada por el punteado para obtener una primera aproximación a los parámetros de la Ec 7.1.

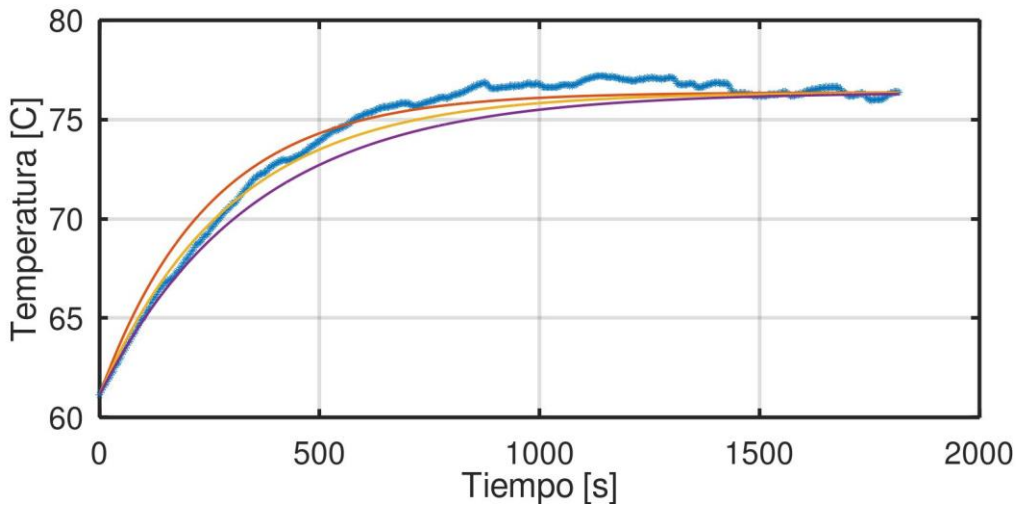


Figura 7.8 Respuesta al escalón en T_p para un entorno reducido de temperatura

Para este ensayo la plancha se encuentra apagada y el sistema a temperatura ambiente. El escalón se realiza encendiendo el control externo de temperatura de la plancha y se deja evolucionar hasta el equilibrio. Note que el modelo ajusta en forma aproximada el comportamiento físico, hay un efecto de dinámica no modelada en la simplificación realizada.

De todas formas, el sistema se comporta en forma aproximada con una respuesta de este tipo. En la figura se muestran tres curvas correspondientes a tres valores de τ , uno claramente mas lento y uno claramente mas rápido. Esto nos permite estimar un valor y un rango razonable de incertidumbre.

Línea	Constante de tiempo τ [s]	Teq
Roja	250	76
Amarilla	300	76
Violeta	350	76

De este ensayo esperamos un τ del orden de 300 s y el parámetro b es fuertemente dependiente del punto de funcionamiento. Note que esta estimación depende fuertemente del punto de equilibrio

Trataremos de estimar los parámetros a y b en el entorno de funcionamiento de la planta. Esto será en valores del PWM entre 5 y 20. La siguiente figura nos muestra las respuestas al escalón de cuatro ensayos realizados con valores de PWM = [5 10 15 25]. El punto inicial se normaliza a 75 °C.

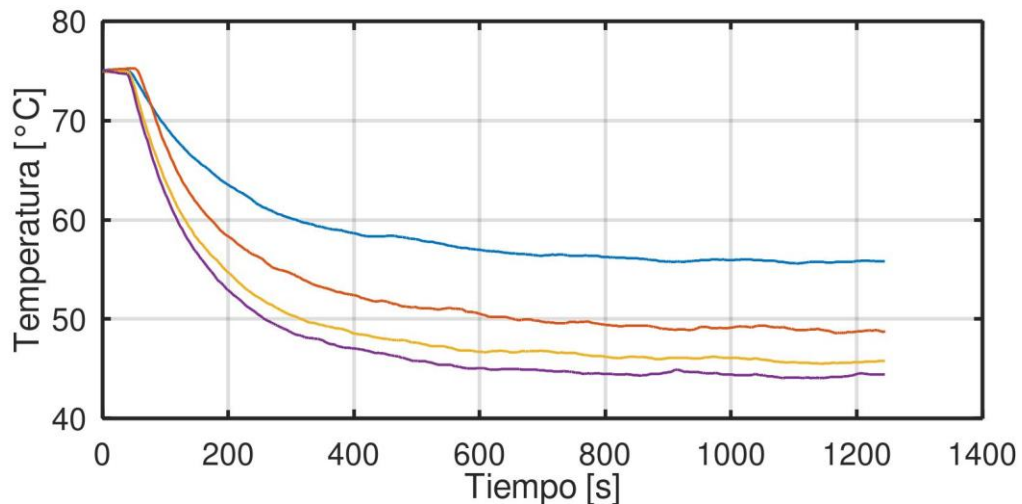


Figura 7.9 Respuesta a escalones en el PWM

La ecuación 7.2 predice una relación lineal entre las temperaturas de equilibrio y el valor del PWM. Se observa claramente en la figura que esto no es cierto para rangos grandes del PWM, pero puede ser una aproximación en el entorno de un punto de funcionamiento.

$$\Delta T = \tau a \Delta PWM \quad \text{Ec 7.2}$$

Línea	PWM	Temp. de equilibrio	τ
Azul	5	55.8	200
Roja	10	48.7	170
Amarilla	15	45.7	150
Violeta	20	44.4	130

Observamos que el valor de la constante de tiempo también depende del punto de operación, pero esta en el orden de 150 s.

Pueden estimarse los parámetros aproximando la relación ΔPWM vs. ΔT por una recta. En el entorno de PWM = 10 %, De este ajuste se obtiene: $\tau = 170$ s, $a = -5.4 \times 10^{-3}$ °C/s, $Teq = 48,7$ °C (ΔPWM es un % adimensionado).

En el entorno del funcionamiento esperado, podemos escribir la transferencia como

$$\Delta T = T - 48.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta PWM = PWM - 10$$

$$H(s) = \frac{\Delta T(s)}{\Delta PWM(s)} = \frac{-5.7e-3}{s + \frac{1}{170}}$$

La siguiente figura muestra la comparación del modelo identificado con la respuesta al escalón usando la función “step”, temperatura inicial 55.8 °C y un escalón de amplitud de en el PWM. Tomando como referencia la figura 7.9, el sistema debería partir de la línea azul y llegar a la línea amarilla.

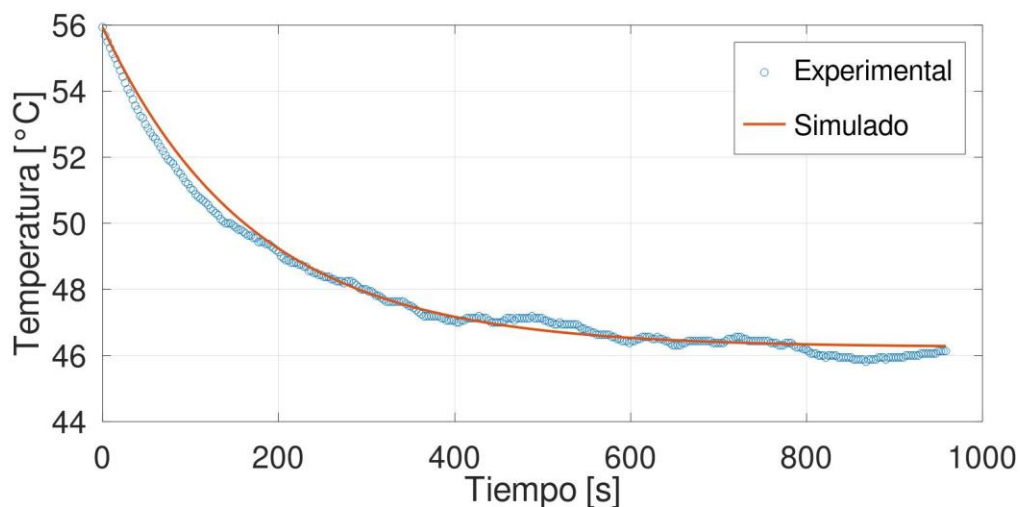


Figura 7.10. Respuesta al escalón simulada.

7.6 Control ON - OFF

Una estrategia muy simple de control que es aplicable en nuestra planta es el control on-off. Para implementar este tipo de control debemos definir tres valores:

Setpoint (SP). El objetivo de nuestro control es alcanzar un valor determinado de la temperatura. Introducimos este valor como un parámetro del sistema.

Ventana de histéresis (VH). El control actúa cuando la temperatura alcanza dos límites uno superior y uno inferior definidos a partir del SP. En nuestro caso tenemos

$$\text{Error} \quad e = T - SP$$

$$e > VH \quad \text{Prende el ventilador}$$

$$e < -VH \quad \text{Apaga el ventilador}$$

Nivel de actuación (NA). El ventilador puede prenderse en diferentes regímenes de trabajo. Si queremos una actuación mas brusca, podemos fijar el nivel de encendido al

100% de la capacidad del ventilador, mientras que, si queremos una actuación más suave, pero más lenta, podemos fijar el nivel de actuación en 50% de la capacidad del ventilador.

Note que debe observar si el nivel de actuación del ventilador es suficiente para alcanzar el SP. La figura 7.11 muestra el control on-off en acción con SP = 50 °C, VH = 2 °C y un NA de 100%.

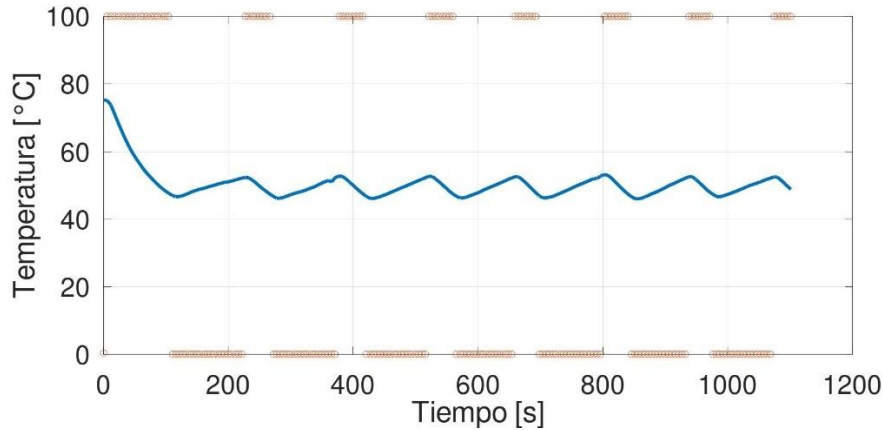


Figura 7.11 Control ON-OFF. Los círculos muestran la acción de control (0% a 100%)

7.7 Control PID

Una segunda estrategia simple de control es el llamado control PID. Este control toma como variable de entrada el error e y genera una salida que es suma de tres términos, un proporcional, un integral y un derivativo. Como antes el error se calcula

$$\text{Error} \quad e = T - SP$$

Note que la definición del error no depende del cambio de variables realizado en la ecuación 7.3.

El PID da como resultado un valor del PWM teniendo como entrada la evolución del error en el tiempo. De forma simple puede escribirse la salida del PID como

$$PWM = K_p e + K_I \int e dt + K_D \frac{de}{dt} \quad \text{Ec. 7.X}$$

La función de transferencia de este controlador es:

$$C(s) = \frac{PWM(s)}{e(s)} = \frac{K_D s^2 + K_P s + K_I}{s} \quad \text{Ec. 7.X}$$

Para el caso particular del controlador PI, que es el más utilizado en la práctica porque no es sensible al ruido de medida y tiene un excelente comportamiento en el entorno del SP, la función de transferencia se simplifica a:

$$C(s) = \frac{PWM(s)}{e(s)} = \frac{K_P s + K_I}{s} \quad \text{Ec. 7.X}$$

Cuando queremos implementar este control en una computador o microprocesador, debemos pasar a una versión discretizada del mismo. En este caso la expresión de calculo se convierte en

$$PWM = K_p e + K_I \sum e \Delta t + K_D \frac{\Delta e}{\Delta t} \quad \text{Ec. 7.X}$$

Hay formulaciones equivalentes como, por ejemplo

$$PWM = K_p \left[e + \frac{1}{T_I} \sum e \Delta t + T_D \frac{\Delta e}{\Delta t} \right] \quad \text{Ec. 7.X}$$

Debe ponerse atención a la estructura utilizada porque esto determina el valor particular de las constantes, aunque sean equivalentes. El uso de T_D y T_I permite trabajar con una ganancia global, pero se puede lograr lo mismo con las dos estructuras.

Un efecto importante en el diseño de un controlador PID es la saturación de los actuadores. La salida del ventilador es finita, no se puede entregar un voltaje superior a la fuente de alimentación (12 V) esto corresponde a $PWM = 100 \%$.

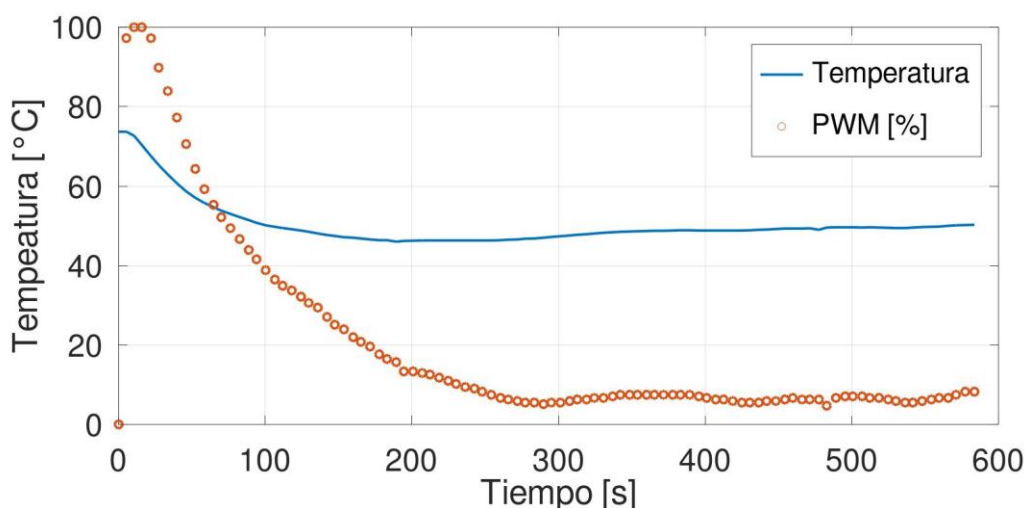
¿Qué ocurre cuando llegamos a 100% ? numéricamente el PID continúa aumentando su valor, pero esto no tiene efecto sobre la salida. El aumento del término integral de una forma no realista provocará una respuesta más lenta de lo esperado. Este problema es conocido como **windup**.

Hay diversas estrategias para evitar el *windup*, las dos más simples son:

Windup 1: Limitar el rango del término integral. Se fijan límites mínimos y máximos para el término integral independientemente del error y su acumulado.

Windup 2: Se realiza una integración condicional, esto es, el término integral se actualiza si la salida está en un cierto rango, caso contrario mantiene el valor anterior.

En nuestro PID se utilizará la estructura de la Ec 7.X y como estrategia anti-windup se limita la integración si la salida PWM supera el 75% . Esto limita la posibilidad de controlar en temperaturas bajas, pero da un margen mayor para evitar la saturación.



La figura 7.11 muestra la acción del controlador PID sobre la planta, donde se ha fijado $K_P = 10$, $K_I = 0.1$ y $K_D = 0$; Las bolitas indican la acción de control que estabiliza en PWM aproximadamente 8

7.8 Criterios de sintonía.

Finalmente veremos algunos criterios prácticos para una primera sintonía de un controlador PID.

Veremos dos criterios empíricos de sintonía, comúnmente conocidos como criterios de Zielger – Nichols. Por sintonía entendemos encontrar los valores K_P , K_I y K_D que produzcan una respuesta de lazo cerrado con unas características deseadas.

Podemos fijar algunas “características deseadas” de nuestra respuesta:

- 1) El sistema debe ser estable. Hay muchas definiciones de estabilidad, por ejemplo, la estabilidad BIBO (Bounded Input Bounded Output) pide que la salida se mantenga acotada cuando la entrada es acotada. Para el caso de sistemas lineales pedimos que la transferencia sea propia y que los polos caigan en el semiplano izquierdo. Esto es la salida no diverge
- 2) No debe tener oscilaciones sostenidas en torno al punto de equilibrio. Esto es debe converger asintóticamente a un punto de equilibrio. Si hay perturbaciones el sistema sale del equilibrio, pero vuelve a él. Claramente el control ON-OFF no cumple con esta condición.
- 3) No debe tener “error en estado estacionario”. Esto es, el sistema debe converger asintóticamente al setpoint y no a otro valor.
- 4) La respuesta del sistema a un escalón en el SP debe ser lo más rápida posible, pero evitando sobretiros grandes. Se toma como criterio 25% del SP como sobretiro máximo.

7.8.1 Sintonía de lazo abierto

Esta técnica es indicada para plantas que responden como un sistema de primer orden con un retardo. Esto se aplica para nuestra planta. Típicamente el sistema responde con una forma de “S” debido al retardo. Determinando los tiempos están tabulados los valores para los controladores P, PI y PID.

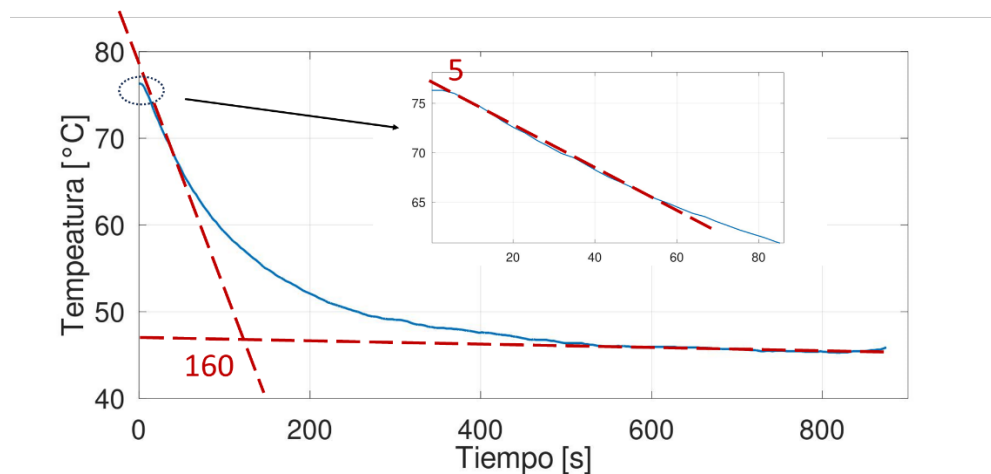


Figura 7.xx Respuesta al escalón para la planta

Se definen tres parámetros:

L “Lag”, es el retardo en el inicio de la respuesta. En nuestro caso es muy rápido y podemos estimarlo en el orden de 5 s.

R “Rise”, es el tiempo de subida, tomando como referencia una recta por el punto de máxima pendiente o donde se anula la derivada segunda. En nuestro caso podemos estimarlo en 155 s.

G, ganancia, es el valor del aumento de la salida dividido por la entrada escalón. En nuestro caso es $G = 32 \text{ }^\circ\text{C} / 20 = 1.6$

En base a estos dos valores Zielger y Nichols elaboraron una guía para dar una sintonía inicial a los controladores.

	KP	KI	KD
P	$R/(G L)$	0	0
PI	$0,9 R/(G L)$	$0,27 R/(G L^2)$	0
PID	$1,2 R/(G L)$	$2,4 R/(G L^2)$	$0,6 R/G$

Si usamos el controlador PI, en nuestro ejemplo daría:

$$R = 155 \text{ s}$$

$$L = 5 \text{ s}$$

$$G = 1.6 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (note que la entrada PWM es en \%)}$$

$$KP = 17.5$$

$$KI = 1$$

7.8.2 Sintonía de lazo cerrado

Esta técnica opera en lazo cerrado y consiste en aumentar la ganancia proporcional hasta que se observan oscilaciones sostenidas a la salida. Esta ganancia se llama ganancia crítica o KP_{crit} . Note que no todos los sistemas físicos admiten este tipo de ensayos. En la industria puede ser muy peligroso imponer una oscilación sobre la salida de una planta a controlar. Sin embargo, en nuestro es aplicable sin mayores problemas.

	KP	KI	KD
P	$0,5 KP_{crit}$	0	0
PI	$0,45 KP_{crit}$	$0,54 KP_{crit}/T_{crit}$	0
PID	$0,6 KP_{crit}$	$1,2 KP_{crit}/T_{crit}$	$0,075 KP_{crit} T_{crit}$