

Proyecto de Laboratorio de Control Avanzado

II PAO 2023
Enero 2024

Caso de estudio

Para este proyecto se utilizará como caso de estudio el proceso descrito en esta sección. El objetivo de este proyecto es utilizar los conocimientos adquiridos tanto en el componente práctico como en el componente teórico del curso para lograr diseñar controladores que permitan obtener cierto desempeño del sistema; realizando cada uno de los pasos previos necesarios para este fin.

El control de las calderas es muy esencial en diversos procesos; una de sus aplicaciones es en la industria alimentaria donde se requiere controlar la temperatura deseada para la correcta cocción de los alimentos. La cocción de los alimentos en las temperaturas ideales es fundamental para la purificación evitando la aparición de bacterias que puedan afectar gravemente a la salud humana mediante la aparición de enfermedades mortales. La industria hospitalaria es otra de las aplicaciones de las calderas donde es crucial el control de temperatura, pues la principal función es en la esterilización de instrumentos en áreas de trabajo que permitirá la eliminación de toda la vida microbiana, incluidas las endosporas bacterianas. Un control pobre de temperatura puede afectar económicamente por medio de pérdidas de productos alimenticios representando una baja financiera en negocios asociados, y en malas prácticas médicas afectando considerablemente a los pacientes y a organizaciones médicas.

Usted es un especialista en control y una empresa alimenticia requiere de sus servicios profesionales para que brinde asesoramiento en la optimización de recursos aplicando ingeniería de control. El proceso del cual la empresa requiere su ayuda corresponde a una caldera la cual tendrá como función principal aumentar la temperatura del agua sin llevarla directamente a su punto de ebullición. Se dispone de una caldera pirotubular la cual está conformada por un tanque donde se alojará el agua a ser calentada y un hogar donde se produce la combustión que permitirá calentar el agua. La dinámica del volumen y temperatura del agua son esenciales para la cocción de los productos alimenticios que se llevará a cabo en una etapa posterior.

El hogar se encargará principalmente de la combustión mediante la reacción química del aire y combustible. Los gases calientes liberados se propagarán en el ambiente como humo a través de un tubo que intercambiará calor con el agua alojada en el tanque y de esa manera obtener la temperatura deseada. El diagrama del proceso se muestra en la figura 1.1.

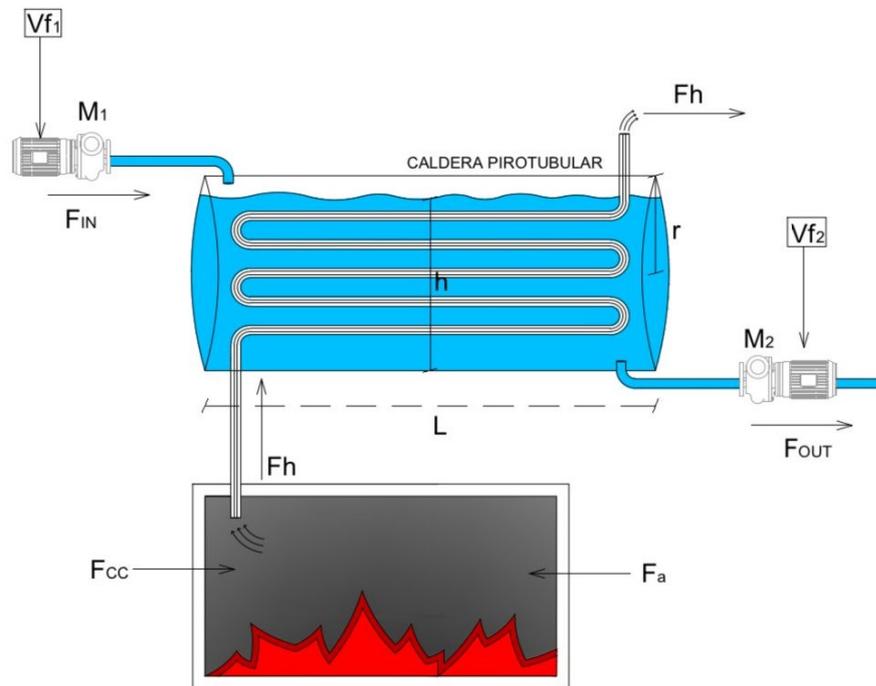


Figura 1.1: Diagrama del proceso

Considere lo siguiente:

- El balance másico del tanque corresponde a la tasa de cambio de la masa del agua por efecto de la entrada y salida de los flujos másicos, es decir, F_{in} y F_{out} respectivamente.
- Para el balance másico del hogar, considere que no hay variación de la masa de los gases calientes que se distribuyen a lo largo de la tubería.
- El calor proveniente de la combustión se distribuye en el humo y agua. Dicho calor es proporcional al flujo másico, al poder calorífico del combustible y al rendimiento de la combustión.
- Para el balance de energía del tanque, también considere el aporte energético de los flujos másicos de entrada y salida del tanque. Asuma que el tanque está aislado térmicamente, de manera que no hay pérdidas de energía al ambiente y que la temperatura ambiente no afecta el proceso en estudio.

En la siguiente tabla se presentan algunos parámetros conocidos del sistema, los demás los encontrará de acuerdo a su número de grupo en el archivo de Excel adjunto:

Descripción	Valor	Unidad
Radio del tanque	1.5	metros
Largo del tanque	4	metros
Poder calorífico del combustible L_{cc}	$14.4 * 10^6$	$[J/Kg]$
Temperatura del humo T_h	220	$[^{\circ}C]$
Capacidad calorífica específica del fluido c_w	4182	$[J/(Kg^{\circ}C)]$
Capacidad calorífica específica del humo c_h	1007	$[J/(Kg^{\circ}C)]$
Rendimiento de la combustión η_{cc}	0.85	
Dosado f_d	0.0937	

La lista de variables a utilizar para el presente proyecto se muestra a continuación:

- $V_w(t)$: Volumen del líquido en el tanque, $[m^3]$
- $T_{in}(t)$: temperatura del flujo de entrada del tanque, $[^{\circ}C]$
- $T_w(t)$: temperatura del flujo de salida del tanque, $[^{\circ}C]$
- $F_{in}(t)$: flujo másico de entrada del tanque, $[Kg/s]$
- $F_{out}(t)$: flujo másico de salida del tanque, $[Kg/s]$
- $F_{cc}(t)$: flujo másico de combustible del hogar, $[Kg/s]$
- $F_a(t)$: flujo másico de aire del hogar, $[Kg/s]$
- $F_h(t)$: flujo másico de humo del hogar, $[Kg/s]$
- $Vf_1(t)$: Voltaje del variador de frecuencia que comanda el flujo de entrada del tanque, $[V]$
- $Vf_2(t)$: Voltaje del variador de frecuencia que comanda el flujo de salida del tanque, $[V]$

Considere que inicialmente el tanque se encuentran parcialmente lleno con un volumen igual al punto de operación V_{wop} y que la temperatura inicial del agua en el tanque es igual a la temperatura de operación del líquido de entrada (T_{inop}). Finalmente, se conoce que los flujos másicos de entrada y salida del tanque son proporcionales a los correspondientes voltajes de los variadores de frecuencia. Dichas constantes se obtienen de las siguientes expresiones, donde K_1 es la constante de proporcionalidad del flujo de entrada y K_2 es la constante de proporcionalidad del flujo de salida:

$$K_1 = \frac{(0.05/60) \times \rho_1^2}{(Vf_{2op} * \rho_2)} \quad (1.1)$$

$$K_2 = \frac{(0.05/60) \times \rho_2}{Vf_{2op}} \quad (1.2)$$

Parte 1: Controladores PID discretizados

Registre el procedimiento y comentarios de las gráficas obtenidas en el reporte de su proyecto. Recuerde generar las gráficas con los datos del workspace y que las figuras presenten cuadrícula, título y nombres de los ejes. De ser necesario, incluya leyenda y marquillas.

1. Descargue los archivos adjuntos a este documento y ubíquelos en una misma carpeta. Haga que dicha carpeta sea el directorio actual de trabajo de MATLAB®.
2. Con el modelo del sistema dado, obtenga la respuesta en lazo abierto del sistema para variaciones de F_{cc} y T_{in} . Considere el tiempo de arranque del sistema (Step time) de manera que se observe que la salida del sistema se estabiliza completamente en su punto de operación antes del cambio en la entrada. Utilice el punto de operación y variación especificados en el archivo de Excel para configurar cada entrada escalón. El porcentaje de variación hace referencia a la amplitud de la entrada escalón.
3. Obtenga la gráfica de entrada y salida del sistema usando subplot y seleccione un tiempo de muestreo adecuado para el sistema. Recuerde que a partir del tiempo de estabilización del sistema se puede estimar el valor de la constante de tiempo τ y a su vez esta permite estimar el ancho de banda del sistema.
4. Con el modelo del sistema dado arme el diagrama de bloques del sistema en lazo cerrado para un controlador PID analógico.
5. Se requiere sintonizar un controlador para regular el volumen del tanque. Para tener una buena calidad en la producción y para que la planta opere de manera segura se requiere que de ser posible la respuesta del sistema ante una entrada escalón tenga un sobrenivel porcentual mayor al 10% pero inferior al 20%, error de estado estacionario igual a cero y tiempo de estabilización entre 150 y 250 segundos.
6. También se requiere sintonizar un controlador para regular la temperatura de salida (T_w). Presente, de ser posible, una respuesta con sobrenivel porcentual mayor a 10% y menor al 20%, error de estado estacionario igual a cero y tiempo de estabilización entre 10000 y 20000 segundos.

NOTA

Diseñe y pruebe un controlador a la vez. Para controlar T_w utilice F_{cc} y para controlar V_w utilice $V f_1$. Al diseñar un controlador, recuerde mantener las otras entrada en el punto de operación

asignado. De ser posible, también realice pruebas con las señales de perturbación; es decir con variaciones pequeñas de T_{in} y $V f_2$ alrededor de sus respectivos puntos de operación.

7. Obtenga las gráficas de entrada y salida del sistema y señal de control para cada controlador diseñado tal como se realizó en la práctica 5. Verifique que se hayan cumplido los índices de desempeño solicitados de manera experimental.
8. Con el modelo del sistema dado y usando diferentes tiempos de muestreo para el controlador discretizado, simule el sistema en lazo cerrado usando:
 - Controlador PID discreto en forma posicional regular
 - Controlador PID discreto en forma posicional trapezoidal.

Para cada PID discreto realice al menos tres simulaciones:

- Tiempo de muestreo máximo posible para que el sistema se estabilice aunque no cumpla los índices de desempeño solicitados.
 - Tiempo de muestreo máximo que permita cumplir los índices de desempeño solicitados aunque la respuesta no se asemeje a la obtenida con el PID analógico.
 - Tiempo de muestreo que permita obtener un desempeño similar al del PID analógico.
9. Obtenga las gráficas de entrada y salida del sistema, y señal de control tal como se realizó en la práctica 5. Estime los índices de desempeño de manera experimental para cada controlador y cada tiempo de muestreo. Tabule estos resultados usando tablas.
 10. Indique cuáles controladores discretos y qué tiempo de muestreo utilizaría para la implementación del lazo de control. Justifique su respuesta.

NOTA

Para crear los diagramas de bloques utilice el bloque **Model** y configúrelo de manera que este apunte al modelo adjunto a este proyecto. Como parámetros del modelo configure los valores de $\rho_2, K_1, K_2, V_{wop}$ y T_{inop} que le correspondan separados por una coma.

Para la prueba del **sistema en lazo cerrado** considere una variación de 2 metros cúbicos y de 1.5 grados centígrados con respecto a los puntos de operación de las salidas que le correspondan. Recuerde que al tratarse de un modelo no lineal, la salida del controlador PID debe ser sumada al voltaje de operación correspondiente antes de alimentar la planta. Verifique en cada caso si las señales de control obtenidas se encuentran en rangos realistas de operación.

Parte 2: Diseño de controladores PID discretos

Registre el procedimiento y comentarios de las gráficas obtenidas en el reporte de su proyecto. Recuerde generar las gráficas con los datos del workspace y que las figuras presenten cuadrícula, título y nombres de los ejes. De ser necesario, incluya leyenda y marquillas. Incluya conclusiones y recomendaciones al final de su proyecto. Adjunte los diagramas de bloques utilizados compatibles con MATLAB® 2016b y el script creado correctamente documentado.

1. Abra el enlace adjunto al documento y descargue el archivo que le corresponda. Cargue dicho archivo en MATLAB® ; este contiene las funciones de transferencia a utilizar para el diseño de cada controlador.
2. Obtenga la función de transferencia discreta equivalente de cada función asignada usando uno de los tiempos de muestreo escogidos de la parte anterior del proyecto.
3. Usando sisotool, diseñe un controlador discreto de la familia PID para cada función asignada de manera que se cumplan las mismas especificaciones en la respuesta de lazo cerrado ante una entrada escalón unitario de la parte anterior.

Estas especificaciones han sido escogidas de manera que la dinámica del proceso sea más rápida y que no se requiera la intervención de los operadores. Además, se logra reducir la cantidad de producto desechado siempre que el controlador funcione correctamente.

En caso de que no logre cumplir con los tres requerimientos a la vez, dé prioridad al error de estado estacionario, luego al sobrenivel porcentual y finalmente al tiempo de estabilización.

Incluya capturas de pantalla de la respuesta escalón en lazo cerrado inicial y final mostrando sus características, y del lugar geométrico de las raíces inicial y final mostrando los contornos asociados a los requerimientos de diseño para cada controlador. De ser necesario utilice pre-filtro para mejorar el desempeño de cada controlador.

4. Obtenga los valores de los parámetros de cada controlador; es decir K_p , K_i y K_d .
5. Realice la simulación del sistema en lazo cerrado. Recuerde incluir el bloque **Bias** a la salida de cada PID para sumar el punto de operación que le corresponda y considerar el punto de

operación de las salidas para la configuración de las señales de referencia. Configure el Scope para que exporte los datos al workspace; además guarde los datos de las señales de control.

6. Grafique cada par de entrada-salida del sistema en lazo cerrado en una misma figura. Incluya cuadrícula, título, nombres de ejes y leyenda. Obtenga experimentalmente los índices de desempeño del sistema; resuma dichos resultados en una tabla. Incluya capturas de pantalla mostrando las marquillas utilizadas para las estimaciones.
7. Grafique las señales de control en una figura diferente y comente los resultados.

NOTA

Para la prueba del **sistema en lazo cerrado** considere una variación de 2 metros cúbicos y de 1.5 grados centígrados con respecto a los puntos de operación de las salidas que le correspondan. Recuerde que al tratarse de un modelo no lineal, la salida de cada controlador PID debe ser sumada al punto de operación de la entrada correspondiente antes de alimentar la planta. Verifique en cada caso si las señales de control obtenidas se encuentran en rangos realistas de operación.

Parte 3: Reubicación de polos por realimentación de estados

Registre el procedimiento y comentarios de las gráficas obtenidas en el reporte de su proyecto. Recuerde generar las gráficas con los datos del workspace y que las figuras presenten cuadrícula, título y nombres de los ejes. De ser necesario, incluya leyenda y marquillas. Incluya conclusiones y recomendaciones al final de su proyecto. Adjunte los diagramas de bloques utilizados compatibles con MATLAB® 2016b y el script creado correctamente documentado.

Se requiere diseñar un primer controlador que permita reubicar los polos del sistema de manera que se cumplan los requerimientos de sobrenivel porcentual y tiempo de estabilización de la **parte dos** del proyecto. Se deberá comprobar el funcionamiento del controlador usando el modelo lineal (State-Space).

Luego de probar el desempeño de dicho controlador, se debe diseñar el observador de estados de manera que pueda repetir la simulación realimentando ahora los estados estimados del observador. Para la simulación, se deberá utilizar el modelo no lineal del sistema (bloque Model usado previamente).

Después, deberá diseñar un segundo controlador que incluya seguimiento de referencia para obtener error de estado estacionario igual a cero tal como se realizó en la **parte dos** del proyecto. Finalmente, deberá simular el sistema con el observador de estados y el controlador integral, y comparar los resultados obtenidos con respecto a los avances anteriores.

Para poner a prueba los controladores en cada caso utilice una variación de 2 metros cúbicos y de 1.5 grados centígrados con respecto a los puntos de operación de las salidas que le correspondan. Recuerde que el modelo lineal trabaja con variables incrementales; en cambio el modelo no lineal considera los puntos de operación de las entradas y salidas del proceso.

1. Usando la matriz de transferencia del avance anterior, obtenga la representación del sistema en variables de estado.
2. Compruebe que el sistema sea completamente controlable, es decir que sea controlable y observable.
3. Encuentre el valor de los polos deseados según las especificaciones de diseño. En caso de requerir más polos, ubique los otros polos de manera que se eliminen ceros de lazo cerrado o

se mantenga la dominancia de los polos que permiten cumplir los requerimientos.

Para el **primer controlador**, asuma que tiene acceso directo a los estados del sistema.

4. Reubique los polos del sistema con la ayuda de MATLAB[®] y halle la matriz de realimentación K . Obtenga la nueva matriz de transferencia y verifique que los polos del sistema se hallan reubicado en las posiciones deseadas.
5. Realice una simulación del sistema en Simulink para observar el desempeño del controlador diseñado. Exporte los datos de entradas, salidas y señales de control.
6. Con los datos exportados, obtenga las gráficas de entradas y salidas del sistema controlado y señales de control. Incluya título, cuadrícula, nombres a los ejes y leyenda.
7. Para cada caso, utilice marquillas para hallar los índices de desempeño obtenidos. Registre el procedimiento, ley de control y diagrama de bloques utilizado en el reporte del proyecto y resuma los resultados obtenidos en una tabla.
8. Analice las señales de control en cada caso y observe el efecto de añadir saturadores.

Para la **siguiente parte**, se supondrá que no se tiene acceso directo a los estados del sistema pero sí a las entradas y salidas del mismo por lo que se debe diseñar un observador estados.

9. Determine los polos del observador de estados de manera que su dinámica sea “mucho más rápida” que la del sistema en lazo cerrado.
10. Diseñe el observador de estados con la ayuda de MATLAB[®] y repita los pasos 5, 6, 7 y 8 realimentando ahora los estados estimados del observador para la reubicación de polos del sistema. Recuerde usar el modelo no lineal del sistema.

Para el **segundo controlador**, se debe incluir seguimiento de la referencia para lograr error de estado estacionario cero ante entrada escalón. Realice las modificaciones necesarias al sistema para poder realizar control integral.

11. Presente las matrices aumentadas del sistema y actualice el vector de polos deseados del mismo. Justifique la elección de valores para dicho vector.
12. Reubique los polos del sistema con ayuda de MATLAB[®], halle la matriz de realimentación y obtenga las ganancias del control integral K_e .
13. Obtenga la nueva función de transferencia de lazo cerrado del sistema y verifique que los polos del sistema se hallan reubicado en las posiciones deseadas.
14. Repita los pasos 5, 6, 7 y 8 usando el control integral diseñado y el observador de estados.

Reporte 1

Debe elaborar un documento PDF que contenga lo siguiente:

- **Carátula:** Incluya su número de grupo, nombres completos, nombre y código de la materia y paralelo práctico.
- **Caso de estudio:** Resumen del caso de estudio indicando claramente **limitaciones de la planta** en cuanto a su operación e índices de desempeño esperados u obtenidos.
- **Sintonización de controladores y análisis:** Debe incluir las capturas de pantalla más relevantes de la sintonización y simulación de cada uno de los controladores solicitados así como el cálculo experimental de los índices de desempeño, tabla de errores, señales de control. Justifique por qué se priorizan ciertos índices de desempeño frente a otros.
- **Selección de controlador:** Debe seleccionar uno de los controladores diseñados y **justificar su respuesta** tomando en cuenta diferentes aspectos como simplicidad de diseño, cumplimiento de los requerimientos de diseño, saturaciones, rangos de operación, señales de control y su efecto en actuadores, entre otros.
- **Conclusiones y recomendaciones:** Al menos 3 conclusiones y 2 recomendaciones generales del proyecto.

NOTA

Al presentar el proyecto, recuerde adjuntar todos los scripts debidamente documentados y diagramas de bloques utilizados en el desarrollo de las distintas partes del proyecto que incluyan sus nombres.

Reporte 2

Debe elaborar un documento PDF que contenga lo siguiente:

- **Carátula:** Incluya su nombre completo, nombre y código de la materia y paralelo práctico.
- **Sintonización de controladores y análisis:** Debe incluir las capturas de pantalla más relevantes de la sintonización y simulación de cada uno de los controladores solicitados así como el cálculo experimental de los índices de desempeño, tabla de errores, señales de control. Justifique por qué se priorizan ciertos índices de desempeño frente a otros. Justifique su elección de tiempo de muestreo.
- **Conclusiones y recomendaciones:** Al menos 3 conclusiones y 2 recomendaciones generales del proyecto.

NOTA

Al presentar el proyecto, recuerde adjuntar todos los scripts debidamente documentados y diagramas de bloques utilizados en el desarrollo de las distintas partes del proyecto que incluyan su nombre.

REPORTE FINAL

Debe elaborar un documento PDF que contenga lo siguiente:

- **Carátula:** Incluya su nombre completo, nombre y código de la materia y paralelo práctico.
- **Caso de estudio:** Resumen del caso de estudio indicando claramente limitaciones de la planta en cuanto a su operación e índices de desempeño esperados u obtenidos.
- **Sintonización de controladores:** Debe incluir las capturas de pantalla más relevantes de la sintonización y simulación de cada uno de los controladores solicitados a lo largo de todo el proyecto así como el cálculo experimental de los índices de desempeño, tabla de errores, señales de control. Justifique por qué se priorizan ciertos índices de desempeño frente a otros. Justifique su elección de tiempo de muestreo.
- **Análisis:** Explique cómo los controladores afectan al funcionamiento de la planta y del proceso en general y, las posibles ventajas de implementar cada uno de los controladores diseñados usando las estrategias de control estudiadas.
- **Selección de controlador:** Debe seleccionar uno de los controladores diseñados y justificar su respuesta tomando en cuenta diferentes aspectos como simplicidad de diseño, cumplimiento de los requerimientos de diseño, saturaciones, rangos de operación, señales de control y su efecto en actuadores, entre otros.
- **Conclusiones y recomendaciones:** Al menos 3 conclusiones y 2 recomendaciones generales del proyecto.

NOTA

Al presentar el proyecto, recuerde adjuntar todos los scripts debidamente documentados y diagramas de bloques utilizados en el desarrollo de las distintas partes del proyecto que incluyan su nombre.

Compare los métodos utilizados, las señales de control y los resultados obtenidos en cada parte del proyecto. Su reporte final debe incluir procedimiento y resultados de cada uno de los avances presentados, objetivos generales del proyecto, conclusiones generales del proyecto y recomendaciones.