

BENCHMARK 2009-10
Grupo Temático de Ingeniería de Control de CEA

Control de una caldera (versión: febrero 2010)

F. Morilla
Departamento de Informática y Automática
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática. UNED.
C/. Juan del Rosal 16, 28040-Madrid
fmorilla@dia.uned.es

1. Introducción

Este documento recoge la propuesta definitiva 2009-10 del concurso de diseño de controladores, que a iniciativa del Grupo de Ingeniería de Control de CEA se viene convocando anualmente.

En el primer apartado se presenta cualitativamente el proceso elegido (una caldera industrial), lo que se puede esperar de él y de su sistema de control. En el segundo apartado se presenta el modelo de caldera, programado expresamente para este benchmark en Simulink, y se comentan sus principales características dinámicas. En el tercer apartado se presenta el esquema general de control multivariable, programado expresamente para este benchmark en Simulink, sobre el que se testearán todos los controladores que se presenten al concurso. Y también se presenta el control descentralizado que servirá de referencia para evaluar a todos los controladores.

En el cuarto apartado se describen, a modo de ejemplo, dos experiencias de control descentralizado, suficientes para mostrar que la caldera se puede operar de esta forma, aunque no sea la más efectiva, y para que los concursantes conozcan cómo se comporta el controlador de referencia en este concurso y cómo con un simple reajuste de los parámetros de control es posible mejorar el comportamiento del sistema. En el quinto apartado se describen las condiciones del concurso y se presenta el índice relativo que constituirá una parte importante en la evaluación de las propuestas realizadas por los concursantes. En el sexto apartado se presenta toda la documentación relativa a este concurso, con especial atención a las variables, programas, funciones y modelos a los que los concursantes tienen acceso. La documentación se puede descargar en la página: http://www.dia.uned.es/~fmorilla/benchmark09_10/.

Como se acordó el día 3 de septiembre de 2009 en las Jornadas de Automática de Valladolid, comienza ahora la fase de concurso, que se prolongará hasta el 31 de mayo. Durante estos meses, los concursantes deberán enviar por correo electrónico (fmorilla@dia.uned.es) al profesor F. Morilla un documento sobre la metodología de diseño y los aspectos más característicos de la estrategia propuesta, así como el bloque “Controlador” y las funciones específicas para que pueda ser evaluada.

Se recuerda que los ganadores se darán a conocer en las XXXI Jornadas de Automática que tendrán lugar del 8 al 10 de septiembre de 2010 en Jaén, y estarán invitados a publicar sus resultados en la Revista Iberoamericana de Automática e Informática

Industrial. Esperamos que profesores e investigadores de Control Automático animen a sus alumnos de Máster y de Doctorado a participar en este concurso.

2. Caldera de vapor industrial

El proceso elegido, que se ha implementado en Simulink, reproduce con pequeñas modificaciones al modelo de caldera propuesto por G. Pellegrinetti y J. Bentsman en 1996. Se trata de la caldera nº 2 de la Planta de Abbott en Champaign, IL. La caldera forma parte de una unidad de cogeneración usada para calefacción y generación de energía eléctrica diseñada para suministrar un caudal de vapor de 22.10 kg/s a una presión de 2.24 MPa. Este proceso se muestra esquemáticamente en la figura 1.

El agua que se introduce en el calderín es convertida en vapor mediante la transferencia de calor a través del metal de los tubos. El aire y el combustible se mezclan y queman en el hogar, que suele estar formado por paredes de tubos de agua que reciben el calor radiante de la llama y es por tanto donde se produce la máxima transferencia de calor. Los gases de combustión, como resultante de esta pérdida de calor, se enfrían y abandonan el hogar.

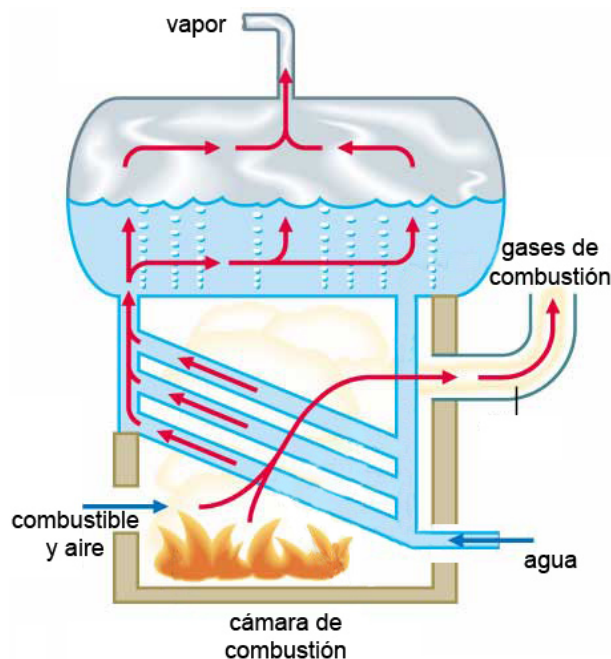


Fig. 1 Planta industrial de generación de vapor.

El funcionamiento de la caldera debe satisfacer los siguientes requerimientos básicos:

- 1) El vapor que se produce debe mantenerse en unas condiciones óptimas de presión y temperatura a pesar de las variaciones en la cantidad de vapor demandada por los usuarios. En esta ocasión vamos a suponer que la temperatura está internamente regulada y que el sistema de control sólo tiene información instantánea de la presión de vapor.
- 2) La caldera debe ser capaz de operar a distintas cargas, entre un mínimo y un máximo, y todo ello será posible con una combustión eficaz. De ahí que la

mezcla de combustible y aire en el hogar deba satisfacer los estándares de seguridad, eficiencia energética y condiciones ambientales. Este último requisito se suele cumplir fijando un porcentaje de oxígeno en exceso respecto a la combustión estequiométrica. Por tanto es normal que el sistema de control tenga medida instantánea del exceso de oxígeno en los gases de combustión.

- 3) El nivel de agua en el calderín debe mantenerse en torno a un valor deseado con tal de evitar sobrecalentamiento de los componentes del calderín o las inundaciones de las líneas de vapor. De ahí que el sistema de control tenga información del rango permitido a este nivel y disponga de su medida instantánea.

En definitiva, el sistema de control de una caldera industrial debe mantener la presión de vapor, el nivel de oxígeno en la cámara de combustión y el nivel de agua en el calderín a unos valores especificados. Para conseguirlo, el sistema de control puede actuar sobre los caudales de combustible, aire y agua de alimentación. Como el proceso está expuesto a variaciones en la demanda del caudal de vapor, a variaciones en las características energéticas del combustible, y de otras perturbaciones como son las temperaturas ambientales, es habitual que el sistema de control disponga al menos de una medida directa o indirecta del consumo de vapor.

2. Modelo de la caldera

El modelo de la caldera, representado como un bloque MIMO (multiple input- multiple output) en la figura 2, tiene tres variables de entrada que pueden ser manipuladas en el rango de 0% al 100% para modificar los caudales de combustible, de aire y de agua de alimentación respectivamente. Tan sólo en el caudal de aire existe además una limitación en la velocidad de cambio; la limitación actual es de 1%/s. Pero todas ellas están afectadas de ciertos retardos desconocidos.

El modelo facilita a través de sus tres variables de salida, candidatas a variables controladas, información acerca de: la presión de vapor en la caldera, el porcentaje de oxígeno en exceso en los gases procedentes de la combustión y el nivel de agua en el calderín. Todas las salidas se facilitan en % de un rango de instrumentación, y están afectadas de ruido en la medida para simular unas condiciones similares a la planta industrial.

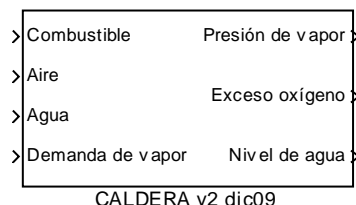


Figura 2 Bloque MIMO que representa a la caldera

El modelo dispone además de una cuarta entrada (Demanda de vapor), considerada variable exógena y por tanto no manipulable, cuyo valor en el rango de 0% al 100% permitirá solicitar que la caldera genere el vapor necesario para atender la demanda.

Esta cuarta entrada tiene por tanto la categoría de perturbación medible para la estructura de control que se desee incorporar en este proceso. Aunque también está afectada por una parte no medible, simulada como ruido a la entrada de la planta. En el modelo se ha incluido también una perturbación no medible, por tanto no accesible en el bloque de la figura 2, que permitirá simular variaciones en las características del combustible.

En el último apartado de este documento, relativo a la documentación de este concurso, se comenta cómo hacer uso de este modelo y se describen los programas y funciones que lo hacen posible. Por ahora sólo nos interesa saber que el punto de operación en el que se iniciarán todas las experiencias de control con la caldera va a estar determinado por los siguientes valores de entrada y de salida:

Combustible(0) \cong 35.21% , Aire(0) \cong 36.01% , Agua(0) \cong 57.57%
 Demanda de vapor(0) \cong 46.36%
 Presión de vapor(0) = 60% , Exceso de oxígeno (0) = 50%, Nivel de agua(0) = 50%

Sobre este punto de operación se han analizado las respuestas a cambios bruscos en todas y cada una de las entradas, llegando a las siguientes conclusiones:

El caudal de aire sólo influye en el exceso de oxígeno en los gases.

El exceso de oxígeno sólo está afectado por los caudales de combustible y de aire, y más concretamente por su proporción.

La presión de vapor presenta un comportamiento estable para los dos caudales (combustible y agua) que le afectan y para la demanda de vapor.

El nivel en el calderín tiene carácter integrador para los dos caudales (combustible y agua) que le afectan y para la demanda de vapor. Al que se añade un comportamiento de fase no mínima para el caudal de combustible y para la demanda de vapor (propio de los fenómenos de esponjamiento y de contracción).

Este comportamiento de fase no mínima se tendría también que presentar, si el modelo fuera más realista, para el caudal de agua.

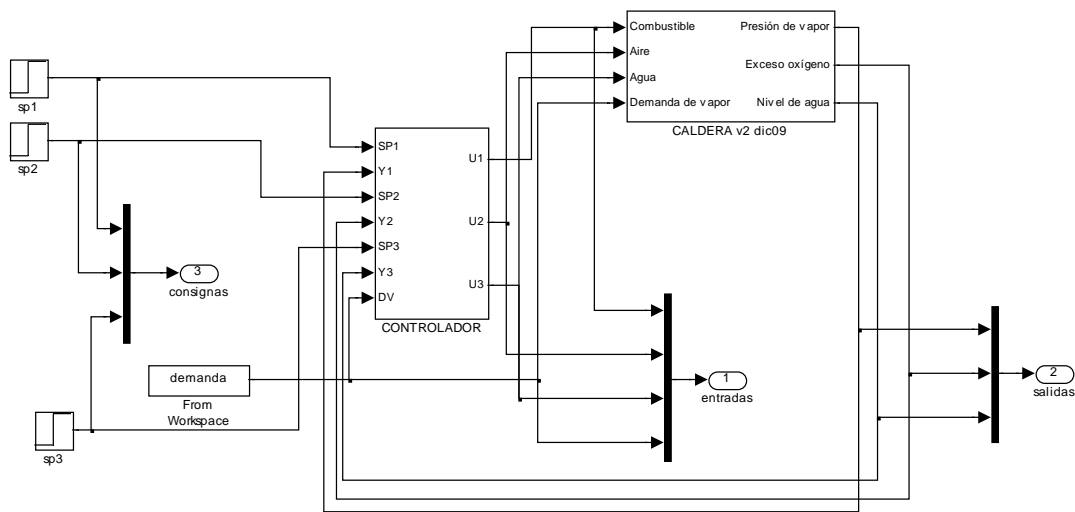
Este análisis permite postular un modelo lineal en el punto de operación descrito por la siguiente ecuación matricial entre las funciones de transferencia de las entradas y de las salidas

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ Y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & 0 & g_{13}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & 0 \\ g_{31}(s) & 0 & g_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ U_3(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{1d}(s) \\ 0 \\ g_{3d}(s) \end{bmatrix} D(s) \quad (1)$$

3. Control de la caldera

El conocimiento del proceso, resumido en el apartado 2, aconseja controlar el proceso con una estrategia de control multivariable como se muestra en la figura 3, donde el bloque “CONTROLADOR” se encarga de generar acciones para las tres variables manipuladas (Combustible, Aire y Agua de alimentación). Para ello recibe información de las tres variables controladas (Presión de vapor, Exceso de oxígeno y Nivel de agua), de sus respectivas consignas y de la perturbación medible (Demanda de vapor).

Pero también, basándonos en el análisis realizado en el apartado anterior, podemos probar a controlar el proceso con la estrategia multivariable más simple, la estrategia descentralizada (Morilla 2007), donde tres controladores PID monovariables, como se muestra en la figura 4, se encargan independientemente de controlar cada una de las variables controladas sin necesidad de conocer la demanda de vapor. El primer PID se encarga de controlar la salida 1 (la presión de vapor) manipulando la entrada 1 (el caudal de combustible), el segundo se encarga de controlar la salida 2 (oxígeno en exceso) manipulando la entrada 2 (el caudal de aire) y el tercero se encarga de controlar la salida 3 (nivel de agua en el calderín) manipulando la entrada 3 (caudal de agua de alimentación).



Benchmark Ingeniería de Control 2009-2010. F. Morilla, diciembre 2009

Figura 3 Esquema Simulink del sistema de control de la caldera.

Los tres controladores PID deberían disponer de mecanismos de anti-windup para garantizar que sus respectivas señales estén siempre en el rango del 0% al 100%, pero además el anti-windup del segundo controlador debería tener en cuenta la limitación de velocidad de cambio que se ha impuesto por diseño del proceso al caudal de aire. De ahí que en esta ocasión se haya decidido programar el mismo bloque funcional PID, representado en la figura 5, para los tres controladores. Se trata de una implementación digital, mediante una función S en Simulink, del algoritmo PID estándar (no interactivo) con filtro en la acción derivativa descrito por la ecuación (Dormido y Morilla, 2006)

$$U(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_D s}{\alpha T_D s + 1} \right) E(s) \quad (2)$$

En este bloque está también previsto poder seleccionar el tipo de estructura: PID si se quiere que las tres acciones de control (proporcional, integral y derivativa) realimenten la señal de error, PI-D si se desea que la acción derivativa realimente únicamente la salida del proceso, o I-PD si sólo la acción integral debe realimentar la señal de error. En el último apartado de este documento se describe cómo hacer uso de la correspondiente función S "PIDdiscretoA_awRVC", programada expresamente para este benchmark.

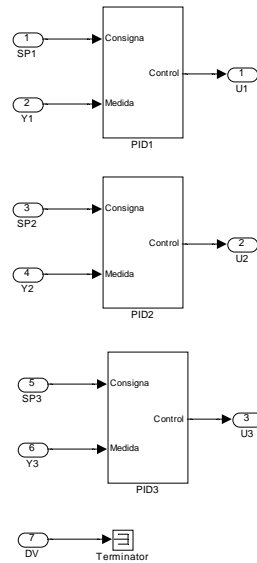


Figura 4 Esquema Simulink del controlador descentralizado

Controlador PID discreto preparado para funcionar en modo AUTOMATICO con: filtro derivativo, antiwindup por rango y por velocidad de cambio
F. Morilla, sep. 2009



Figura 5 Esquema Simulink del controlador PID

El sistema de control de la figura 3, con el controlador descentralizado de la figura 4 o con el controlador que hayan diseñado los concursantes, permitirá entre otras cosas explorar otros puntos de operación distintos al punto de operación habitual. En el último apartado de este documento se describe cómo hacerlo.

4. Experiencias de control descentralizado de la caldera

A continuación se describen dos experiencias de control descentralizado, suficientes para comprobar que la caldera se puede operar de esta forma, aunque no sea la más efectiva. En ambas experiencias se ha decidido prescindir de las acciones derivativas de los tres controladores ($T_D=0$), utilizar la estructura PI en todos ellos, considerar el mismo rango (0% a 100%) en los tres controladores e imponer la limitación por velocidad de cambio de 1%/s en el segundo controlador. Por tanto las dos experiencias difieren únicamente en los parámetros de control utilizados, véase la tabla 1. La primera experiencia se considerará como el “Caso referencia” y la segunda experiencia como el “Caso a evaluar”.

En ambas experiencias, recogidas en la figura 6, se hace trabajar a la caldera en el punto de operación inicial durante los 100 primeros segundos, estando únicamente sometida a las perturbaciones no medibles asociadas al ruido en las tres variables controladas y en

la demanda de vapor. Se observa que las tres variables de salida se mantienen perfectamente reguladas por los tres caudales. En el instante $t=100$ s se provoca un cambio brusco en la demanda de vapor (perturbación medible), incrementándola en un 20% como se puede ver en la primera de las gráficas de la figura 6. Como consecuencia de este cambio brusco se observa que las tres salidas resultan perturbadas y recuperan sus respectivas consignas, de una forma más o menos rápida (puesto que los parámetros de control utilizados en una y otra experiencia son diferentes) y con oscilaciones más o menos acusadas en el caso del nivel.

Tabla 1: Parámetros de control para las experiencias descentralizadas con tres PI. Las ganancias proporcionales son adimensionales porque estamos trabajando en % y las constantes de tiempo integrales están en segundos.

		K_P	T_I
Caso referencia	Controlador 1	2.5	50 s
	Controlador 2	0.1	20 s
	Controlador 3	1.25	50 s
Caso a evaluar	Controlador 1	5.0	25 s
	Controlador 2	0.2	10 s
	Controlador 3	2.5	25 s

En el siguiente apartado trataremos de reflejar estas diferencias en un índice de funcionamiento. Pero antes vamos a analizar con más detalle las diferencias entre ambas experiencias:

- Las salidas de la primera experiencia tardan aproximadamente 1900 segundos en recuperar sus respectivas consignas, pero este tiempo se acorta considerablemente hasta aproximadamente los 900 segundos al cambiar el ajuste de los controladores (segunda experiencia), mientras que los tres caudales necesitan en ambos casos, un tiempo similar cercano a los 1900 segundos para situarse en el nuevo punto de operación.
- La mayor desviación en la presión de vapor se sitúa en torno a -2.0% y -0.7%. del rango de instrumentación. La mayor desviación en el oxígeno en exceso se sitúa en torno al -18.0% y el -7.0%. Y la mayor desviación en nivel de agua en el calderín se sitúa en torno al -4.0% y el -2.2%.
- La evolución de los caudales es creciente y suave, salvo el caudal de agua de alimentación que responde inicialmente en dirección contraria debido a los fenómenos ya comentados.

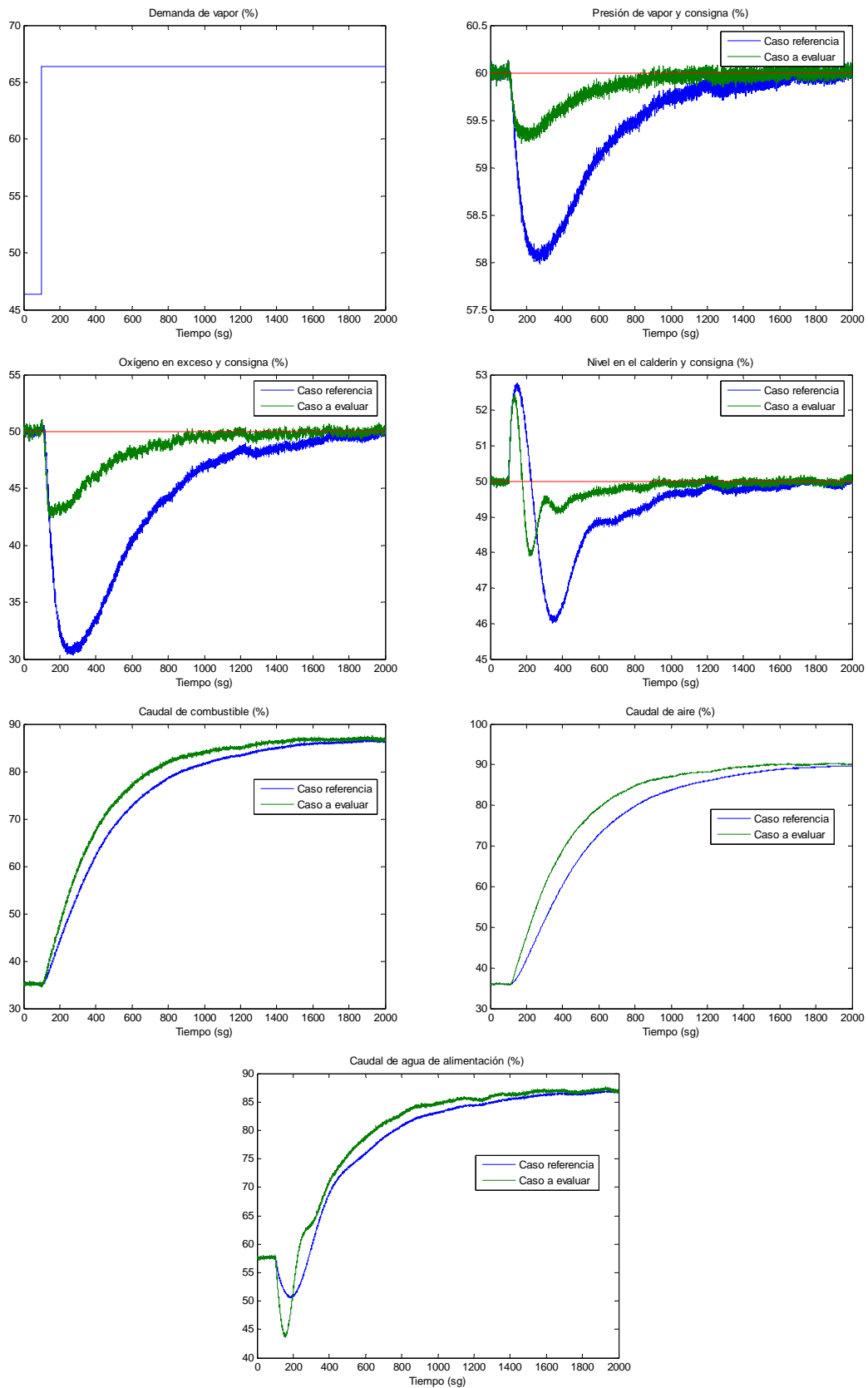


Figura 6 Respuestas del sistema y señales de control para un cambio brusco del 20% en la demanda de vapor en el instante $t=100$ s. Los trazos en azul corresponden al primer ajuste de los controladores PID (elegido como el Caso referencia) y los trazos en verde corresponden al segundo ajuste (corresponde al Caso que se quiere evaluar).

5. Condiciones del concurso

Las experiencias del apartado anterior muestran que con tres controladores PI es posible controlar la caldera descrita en este documento. Pero indudablemente, ésta no es la forma más efectiva. Además en el proceso existen unas interacciones que no se han tenido en cuenta y que sí deberían ser consideradas en el diseño de una estrategia de control avanzado, por tanto el principal objetivo de este concurso es poner un problema de control muy conocido en el mundo industrial, “el control de una caldera”, a disposición de las actuales metodologías de control multivariable. Se propone:

Diseñar cualquier tipo de estrategia de control que permita operar más eficientemente la caldera que con los tres controladores PI.

Con las siguientes condiciones:

1^a) *Posibles estrategias de control.* Dado que los tres controladores no están bien ajustados y sólo se están utilizando sus acciones proporcional e integral, se aceptará como solución (en principio la más simple) el reajuste de los tres controladores, haciendo un mejor uso de sus tres acciones de control (P, I y D) y de sus otros grados de libertad (filtro en la acción derivativa, estructuras PI-D, I-PD). Pero lo esperable en este concurso son estrategias de control más complejas, que prescindan de los tres controladores (la solución más ambiciosa) o que los utilicen como esclavos (la solución más industrial). En este último caso, también se permitirá el reajuste (en el sentido amplio) de los tres controladores.

Observación: las dos experiencias descritas en el apartado anterior podrían corresponder a dos soluciones simples del concurso. Además, con la particularidad de que los tres controladores se han elegido de tipo PI y únicamente se diferencian en sus parámetros (ganancia proporcional y constante de tiempo integral).

En cualquier caso todas las estrategias que se presenten al concurso deberán, con independencia de su complejidad, ser capaces de arrancar el proceso en el punto de operación comentado en el apartado 2.

2^a) *Entorno de evaluación.* Todas las estrategias de control que se presenten al concurso se evaluarán en el entorno de Matlab+Simulink, tomando como referencia el control descentralizado de la caldera con tres controladores PI de parámetros conocidos con antelación (el indicado como “Caso referencia” en la tabla 1). Por tanto todas las estrategias de control vendrán encapsuladas en un único bloque “CONTROLADOR” y deberán poderse ejecutar en el entorno de Matlab+Simulink, con el esquema de la figura 3, sin el requerimiento de que haya otros Toolboxes instalados.

3^a) *Evaluación.* Están previstas las siguientes cuatro tipos de evaluaciones en simulación, siempre iniciadas a partir del punto de operación de apartado 2, y con duraciones diferentes, adecuadas en cada caso para observar los comportamientos transitorios y estacionarios del sistema de control:

Evaluación en el punto de operación. El sistema de control deberá mantener a la caldera funcionando en torno al punto de operación del apartado 2 cuando las únicas

perturbaciones presentes en el sistema son los ruidos en las medidas y en la demanda de vapor.

Evaluación frente a cambios bruscos y simultáneos de las consignas. El sistema de control será capaz de llevar a la caldera a otro punto de operación, diferente al del apartado 2, como consecuencia de un cambio brusco en todas o algunas de las consignas y sin que haya cambiado la demanda de vapor.

Evaluación frente a demanda de vapor cambiante en el tiempo. El sistema de control conseguirá que la caldera sea capaz de atender una demanda de vapor diferente a la del punto de operación del apartado 2, sin que se alteren significativamente la presión de vapor, la combustión y el nivel de agua en el calderín.

Evaluación con variaciones en las características del combustible. El sistema de control conseguirá que la caldera sea capaz de funcionar en torno al punto de operación del apartado 2 aunque las características energéticas del combustible varíen.

Por cada evaluación al que se someta el sistema de control utilizando el controlador a concurso C_c se computará el índice relativo de funcionamiento J_e dado por (3). Este índice penaliza desviaciones excesivas en las tres variables controladas respecto a sus respectivas consignas y los cambios elevados en las tres señales de control. En el índice intervienen con el mismo peso (unitario) las integrales de los valores absolutos de las tres señales de error (IAE_i), las integrales ponderadas en el tiempo de los valores absolutos de las señales de error ($ITAE_i$) con el mismo peso (unitario) pero únicamente las asociadas a las salidas cuyas consignas hayan cambiado, y con menos peso (0.25) las integrales de los valores absolutos de las derivadas de las tres señales de control ($IADU_i$). Además, todas las integrales aparecen en (3) divididas por los valores que tendrían si se hubiera utilizado el controlador de referencia C_r , de manera que al sumarlas y dividir por la suma de los pesos utilizados se obtiene un índice relativo cuyo valor, si está por debajo de la unidad, mostrará la bondad del controlador presentado a concurso para esa evaluación concreta.

En las integrales, $e_i(t)=r_i(t)-y_i(t)$ representa el error instantáneo en la i-esima variable controlada, $u_i(t)$ es la i-esima variable manipulada, **tiempo** es la duración de la simulación, **tipodecambio_i** es cero salvo que la consigna de la i-esima variable controlada haya cambiado, en ese caso vale uno, y **tcambio** es el instante de tiempo en el que se ha provocado el correspondiente cambio en las consignas, en la demanda de vapor o en las características del combustible.

$$IAE_i = \int_0^{\text{tiempo}} |e_i(t)| dt \quad ; \quad ITAE_i = \int_{\text{tcambio}}^{\text{tiempo}} (t-\text{tcambio}) |e_i(t)| dt \quad ; \quad IADU_i = \int_0^{\text{tiempo}} \left| \frac{d u_i(t)}{dt} \right| dt$$

$$J_e(C_c) = \frac{\sum_{i=1}^3 \left(\frac{IAE_i(C_c)}{IAE_i(C_r)} + \text{tipodecambio}_i \frac{ITAE_i(C_c)}{ITAE_i(C_r)} + 0.25 \frac{IADU_i(C_c)}{IADU_i(C_r)} \right)}{3 + \sum_{i=1}^3 \text{tipodecambio}_i + 0.75} \quad (3)$$

El índice relativo final, que servirá para establecer una clasificación entre todos los controladores presentados al concurso, se obtendrá como la media aritmética (4) de los índices relativos obtenidos por cada controlador en las n evaluaciones realizadas (las mismas para todos los controladores).

$$J(C_c) = \frac{\sum_{e=1}^n J_e(C_c)}{n} \quad (4)$$

La clasificación de la fase de concurso será decisiva para proclamar al ganador del concurso pero no será el único aspecto a tener en cuenta. En la evaluación final también intervendrá un tribunal, nombrado al efecto, que tendrá en cuenta la documentación presentada, la metodología de diseño y los aspectos más característicos de la estrategia propuesta.

Ejemplo de evaluación: En el apartado 4 se presentaron dos experiencias de control descentralizado que difieren únicamente en los parámetros de control utilizados, véase la tabla 1. La primera experiencia se presentó como el “Caso referencia” y la segunda experiencia como el “Caso a evaluar”. Al tratarse de una simulación donde las tres consignas han permanecido constantes, las seis integrales relativas con valores en la tabla 2 son las que van a participar en esta evaluación. Se observa que el reajuste de parámetros de control ha provocado una reducción considerable en las integrales de los valores absolutos de los tres errores, en definitiva una respuesta más rápida al cambio brusco en la demanda. La mejora en la respuesta del sistema se ha conseguido con un mayor esfuerzo en las tres señales de control; se observa que las integrales de los valores absolutos de las derivadas de las tres señales de control han duplicado su valor respecto al “Caso referencia”. El índice relativo para esta evaluación se sitúa en un valor bastante aceptable de aproximadamente 0.64, también mostrado en la tabla 2. Por tanto podemos esperar que el “Controlador a evaluar” de la tabla 1 provocará un comportamiento más efectivo de la caldera que el “Controlador de referencia” cuando se produzcan otros cambios bruscos en la demanda de vapor.

Tabla 2: Índices sobre la efectividad del “Controlador a evaluar” de la tabla 1 respecto al “Controlador de referencia” basándonos en las experiencias del apartado 4.

$\frac{IAE_1(C_c)}{IAE_1(C_r)}$	$\frac{IAE_2(C_c)}{IAE_2(C_r)}$	$\frac{IAE_3(C_c)}{IAE_3(C_r)}$	$\frac{ITAE_1(C_c)}{ITAE_1(C_r)}$	$\frac{ITAE_2(C_c)}{ITAE_2(C_r)}$	$\frac{ITAE_3(C_c)}{ITAE_3(C_r)}$	$\frac{IADU_1(C_c)}{IADU_1(C_r)}$	$\frac{IADU_2(C_c)}{IADU_2(C_r)}$	$\frac{IADU_3(C_c)}{IADU_3(C_r)}$	$J_e(C_c)$
0.2735	0.2637	0.3466	-	-	-	1.9964	1.9434	2.1270	0.6401

6. Documentación

En este apartado se relaciona y comenta toda la documentación asociada a este benchmark, en total

2 archivos pdf: BenchmarkIC2009_10.pdf y Pellegrinetti_Bentsman96.pdf

1 archivo mdl: Control_Caldera.mdl

2 archivos m: Prueba_Control_Caldera.m y Evalua_Control_Caldera.m

7 archivos p: PIDdiscretoA_awRVC.p, boilerestados.p, evaluaJCaldera.p,
registro10.p, registro15.p, registro20.p y
restricciones_escalado.p

3 archivos mat: dat_in_caldera.mat, pruebaCaldera_CL1.mat y
pruebaCaldera_CL2.mat

Observación: Los archivos mdl, m, p y mat se han generado y probado con las siguientes versiones de Matlab y Simulink.

MATLAB	Versión 7.0.4	(R14SP2)
Simulink	Versión 6.2	(R14SP2)

Pero también se han probado en las versiones:

Matlab (Versión 7.1) y Simulink (Versión 6.3) de la Release 14 Service Pack 3
Matlab (Versión 7.6) y Simulink (Versión 7.1) de la Release 2008a.

Se ruega a los concursantes que notifiquen cualquier incompatibilidad que detecten con otras versiones.

BenchmarkIC2009_10.pdf. Es la versión electrónica de este documento.

Pellegrinetti_Bentsman96.pdf. Versión electrónica del artículo de G. Pellegrinetti y J. Bentsman en el que se ha inspirado este benchmark.

Control_Caldera.mdl. Modelo Simulink del sistema de control de la caldera, véase figura 3. Este modelo se facilita para que los concursantes puedan probar el controlador descentralizado y puedan probar sus controladores, se recuerda que sólo deberían enviar para su evaluación el bloque “CONTROLADOR” y los archivos que éste tenga asociados. Además se recuerda que estos archivos se deberían poder ejecutar sin necesidad de ningún toolbox auxiliar, y con el único requerimiento de que las siguientes variables (**Uo, Yo, Yf, demanda, tiempo, tm, tcambio, uo, xo**) tengan ya valores asignados en el espacio de trabajo de Matlab. Una forma de inicializar todas estas variables con los valores correspondientes al punto de operación habitual y las condiciones utilizadas en las experiencias descentralizadas del apartado 4 es cargar el archivo **dat_in_caldera.mat**.

Uo, Yo e **Yf** son vectores columna de tres componentes en el rango de 0 al 100%. **Uo** contiene los valores iniciales de los tres caudales de entrada a la caldera (Combustible, Aire y Agua de alimentación, por ese orden), **Yo** contiene los valores iniciales de las tres salidas de la caldera (Presión de vapor, Exceso de oxígeno y Nivel en el calderón, por ese orden) e **Yf** contiene los valores (consignas) a los que deben tender estas tres salidas durante la simulación.

demanda es un matriz de dos columnas y tantas filas como sean necesarias para definir una Demanda de vapor para la caldera dependiente del tiempo. La variable estará definida por tramos rectos y/o por valores discretos. La primera

columna contiene los instantes de tiempo y la segunda columna contiene los correspondientes valores de la demanda en el rango de 0 al 100%.

tiempo es un escalar que determina el tiempo, en segundos, que se desea simular.

tm es el periodo de muestreo, en segundos, que utilizará el controlador, si se decide que éste sea de tipo discreto, y también es el periodo con el se registrarán las variables generadas durante la simulación.

tcambio es el instante de tiempo, en segundos, en el que se producirá el correspondiente cambio en las tres consignas de forma simultánea, para ello basta que los todos los valores del vector Y_f sean distintos a los del vector Y_o . Pero también sirve para provocar un cambio brusco aislado en cualquiera de las consignas, basta que una de las componentes del vector Y_f difiera de la correspondiente componente en el vector Y_o . El instante de tiempo $tcambio$ también servirá para indicar que desde el inicio de la simulación hasta ese instante de tiempo ninguna de las variables de entrada a la caldera (los tres caudales y la Demanda de vapor) habrá modificado su valor. En las experiencias de control descentralizado descritas en el apartado 5 se ha utilizado la siguiente variable demanda:

```
[ 0          demanda inicial;  tcambio-tm demanda inicial;
  tcambio   nueva demanda;  tiempo    nueva demanda]
```

que da lugar a la primera gráfica de la figura 6.

uo es un vector columna de tres componentes, necesario para inicializar tres variables internas directamente relacionadas con los tres caudales de entrada.

xo es un vector columna de cuatro componentes, necesario para inicializar las cuatro variables de estado internas que tiene asociada la parte dinámica del modelo caldera.

Advertencia: Los concursantes pueden explorar el contenido del bloque “CALDERA” si quieren tener más información de las características del modelo, pero no deberían modificarlo, salvo para pruebas concretas, puesto que el modelo sobre el que se evaluarán sus controladores es único, el mismo para todos los concursantes.

Prueba_Control_Caldera.m. Programa en Matlab que se facilita para que los concursantes puedan realizar experiencias de control sobre la caldera sobre el punto de operación habitual.

El esqueleto de este programa contiene cuatro partes bien diferenciadas: en la primera parte se cargan, a través del archivo *dat_in_caldera.mat*, todas las variables correspondientes al punto de operación y las condiciones utilizadas en las experiencias descentralizadas del apartado 4. En la segunda parte se asignan los parámetros necesarios para la estrategia de control, en este caso los parámetros de control para los tres controladores PID. En la tercera parte se ejecuta la simulación. Y en la cuarta parte se presentan los resultados de forma gráfica y se guardan en el archivo *pruebaCaldera_CL.mat* para su posterior análisis o evaluación. Este archivo no sólo contiene los resultados de la simulación sino que añade cierta información relativa a las condiciones de simulación ($tcambio$, Y_o , Y_f), replicando parte del archivo previo *dat_in_caldera.mat*.

Los resultados de la simulación se recogen en el vector de tiempos t , con valores equidistantes el periodo de muestreo tm elegido, y en la matriz *registros*. Esta matriz contiene diez columnas, las tres primeras columnas registran la evolución

de los caudales (combustible, aire y agua de alimentación, por ese orden), la cuarta columna registra la evolución que ha experimentado la demanda de vapor, las siguientes tres columnas registran como han respondido las tres variables controladas de la caldera (presión de vapor, exceso de oxígeno y nivel de agua en el calderín) y las últimas tres columnas registran como han evolucionado las consignas de estas tres variables controladas.

Advertencia: Los concursantes pueden modificar el contenido de este programa, pero deberían limitarse a modificar la segunda parte, incluyendo todo lo relativo al controlador que desean probar. Y a incluir ciertas líneas que modifiquen las variables necesarias para probar otras condiciones de simulación diferentes a las contenidas en el archivo `dat_in_caldera.mat`.

Evalua_Control_Caldera.m. Programa en Matlab que se facilita para que los concursantes puedan comparar sus diseños con el controlador de referencia o con cualquier otro. Esta comparación sólo tiene sentido si se han puesto las mismas condiciones de simulación en ambas experiencias.

El esqueleto de este programa contiene dos partes bien diferenciadas: en la primera parte se cargan, a través de sendos archivos `*.mat`, los resultados de las experiencias que se quieren comparar. La primera se asigna al controlador de referencia y la segunda se asigna al controlador que se quiere evaluar. En la segunda parte se comparan los resultados de forma gráfica y se evalúa la efectividad que supondría la sustitución del controlador de referencia por el nuevo controlador, usando el índice relativo dado por (3).

Observación: Las gráficas de la figura 6 han sido generadas por este programa al cargar las experiencias descentralizadas contenidas en los archivos `pruebaCaldera_CL1.mat` y `pruebaCaldera_CL2.mat`. Y el índice de la tabla 2 han sido generado por la última sentencia de este programa empleando un peso w de 0.25 para las integrales relativas a las señales de control.

boilerestados.p Función S, en formato codificado de Matlab, por tanto no es posible acceder a su contenido. Esta función, que modela la parte dinámica asociada a las cuatro variables de estado internas de la caldera, es utilizada en el bloque “CALDERA” de la figura 3. Sólo tiene un parámetro de entrada, el vector \mathbf{x}_0 con los valores iniciales de los cuatro estados internos de la caldera, que obligatoriamente deben estar asignados en el espacio de trabajo de Matlab antes de ejecutar la simulación.

PIDdiscretoA_awRVC.p Función S, en formato codificado de Matlab, que modela el controlador PID descrito en el apartado 3. Se emplea en cada uno de los bloques PID elementales de la figura 4, con la estructura de la figura 5 y asignando valores a sus correspondientes parámetros: *estructura*, *spini*, *uini*, *tm*, *kp*, *ti*, *td*, *alfa*, *umin*, *umax*, *lvcu*.

estructura es un vector fila con dos componentes, con [1 1] se elige la estructura de control PID, con [1 0] la estructura de control PI-D y con [0 0] la estructura de control I-PD. *spini* es el valor inicial de la variable de proceso que este controlador está controlando, en el rango de 0 a 100%. *uini* es el valor inicial que el controlador debe generar al arrancar la simulación, comprendido en el rango [umin umax]. *tm* es el periodo de muestro en segundos, indica la periodicidad con la que el controlador debe generar sus acciones de control. *kp*, *ti* y *td*, son los tres parámetros de control; la ganancia proporcional es

adimensional, las constantes de tiempo integral y derivativa en segundos. *alfa* es el factor de filtro derivativo en el rango de 0 a 1. *umin* y *umax* son dos escalares en % que determinan el rango en el que siempre estará comprendida la señal de control generada por el controlador. *lvcu* es un escalar, en %/s, para fijar el máximo cambio en valor absoluto que se permitirá a la señal de control.

evaluaJCaldera.p Función, en formato codificado de Matlab, que evalúa la efectividad de un controlador respecto a otro en unas condiciones concretas de funcionamiento de la caldera, las mismas para ambos controladores. La función se emplea en el programa *Evalua_Control_Caldera*, pero también se puede utilizar en línea de comando de Matlab, con los siguientes parámetros: *t*, *registros1*, *registros2*, *tcambio*, *Yo*, *Yf*, *w*.

t, *registros1* y *registros 2* contienen el correspondiente vector de tiempo y los registros de ambas experiencias, con el formato previamente comentado, el primer registro se asocia al controlador de referencia y el segundo al controlador que se desea evaluar. *tcambio* es el instante de tiempo, en segundos, en el que se produjo el correspondiente cambio en las variables del sistema. *Yo* e *Yf* contienen respectivamente los valores iniciales y los valores (consignas) a los que deben tender las tres salidas de la caldera (Presión de vapor, Exceso de oxígeno y Nivel en el calderón, por ese orden). *w* es el peso que se aplicará a las integrales de las señales de control para computar los respectivos índices.

registro10.p, ***registro15.p*** y ***registro20.p*** Funciones, en formato codificado de Matlab, programadas expresamente para este benchmark para simular retardos puros, haciendo uso de registros de desplazamiento, en ciertas variables de la caldera.

restricciones_escalado.p Función, en formato codificado de Matlab, programada expresamente para este benchmark para simular el escalado y las restricciones en las señales manipuladas de la caldera.

Agradecimientos

Agradezco la colaboración y comentarios recibidos durante la elaboración del primer documento (octubre de 2009). A mis compañeros F. Vázquez y J. Garrido del proyecto DPI 2007-62052. Al profesor M.G. Ortega de la Universidad de Sevilla, proponente en la edición anterior del benchmark. Y en especial a R. González de PETRONOR, por acercarme a la visión industrial del problema.

También agradezco los comentarios recibidos durante la fase preliminar de este benchmark (octubre a diciembre de 2009). A los profesores M. Ruiz Arahál y F. Rodríguez Rubio de la Universidad de Sevilla. Y al profesor P. Balaguer de la Universitat Jaume I.

Referencias

- G. Pellegrinetti and J. Bentsman. *Nonlinear Control Oriented Boiler Modeling – A Benchmark Problem for Controller Design*. IEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 4, nº 1, January 1996.
- S. Dormido y F. Morilla. *Aspectos prácticos del controlador PID*. Capítulo 2 del curso de doctorado "Controladores PID", UNED, 2006.
- F. Morilla. *Control Descentralizado*. Tema 3 del curso de doctorado "Control Multivariable", UNED, 2007.