

BENCHMARK CEA-IFAC 2009-10

1. INTRODUCCIÓN

Este documento acompaña a una propuesta de control presentada por D. José Manuel Milla Carrillo, alumno del Máster de Automática, Robótica y Telemática de la Universidad de Sevilla, para el concurso de diseño de controladores del Grupo de Ingeniería de Control de CEA, en su edición 2009-10, cuyo sistema a controlar consiste en una caldera industrial de cogeneración para calefacción y generación de energía eléctrica.

La ejecución de la simulación y la evaluación del controlador puede hacerse desde el programa “*pJoseMMilla_control.m*”.

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

Siguiendo el modelo de la caldera presentado en el apartado 2 del documento del concurso, se ha procedido a identificar cada una de las funciones de transferencia que relacionan las señales de control (% caudal de combustible, % caudal de aire, % caudal de agua) y la perturbación medible (% demanda de vapor) con cada una de las salidas del sistema (% presión de vapor, % exceso de oxígeno, % nivel de agua). Para ello, se ha considerado la demanda de vapor como una cuarta entrada al sistema.

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ Y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & 0 & g_{31}(s) & g_{41}(s) \\ g_{12}(s) & g_{22}(s) & 0 & 0 \\ g_{13}(s) & 0 & g_{33}(s) & g_{43}(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ U_3(s) \\ U_4(s) \end{bmatrix}$$

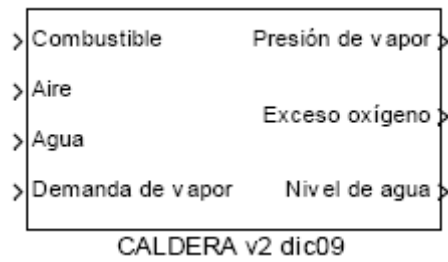


Figura 1: Bloque MIMO que representa a la caldera, donde pueden apreciarse las 4 entradas (incluyendo la perturbación medible) y las 3 salidas.

La identificación se ha realizado en bucle abierto, tras llevar previamente el sistema al punto de funcionamiento, y mediante la medición de la respuesta aparecida en cada salida frente a una excitación de tipo escalón introducida, una por una, en cada una de las cuatro entradas. De este estudio, se calculan los modelos linealizados de primer orden con retardo para cada una de las funciones de transferencia $g_{ij}(s)$, que relacionan la entrada i con la salida j , resultando las mismas de la forma

$$g_{ij}(s) = \frac{k_{ij}}{\tau_{ij}s + 1} e^{-L_{ij}s}$$

(salvo $g_{33}(s)$, que consiste en un integrador y, por lo tanto, no posee constante de tiempo):

$k_{11} = 0.3184$	$\tau_{11} = 25.8$	$L_{11} = 5$
$k_{12} = -6.2865$	$\tau_{12} = 5$	$L_{12} = 6.2$
$k_{13} = -0.0051$	$\tau_{13} = 18$	$L_{13} = 3.5$
$k_{22} = 5.8346$	$\tau_{22} = 6.8$	$L_{22} = 6.2$
$k_{33} = 0.0107$	---	$L_{33} = 7$
$k_{41} = -0.7244$	$\tau_{41} = 240.4$	$L_{41} = 13$
$k_{43} = -0.001465$	$\tau_{43} = 15$	$L_{43} = 3$

Tabla 1: Valores obtenidos durante la identificación para los parámetros de cada una de las funciones de transferencia; k_{ij} es la ganancia estática (adimensional), τ_{ij} es la constante de tiempo (en segundos) y L_{ij} es el retardo (en segundos).

Las siguientes figuras muestran la respuesta de las tres salidas del sistema frente a escalones en las distintas entradas. Como puede apreciarse en las figura 5, el efecto de u_3 sobre y_1 es prácticamente despreciable, por lo que consideraremos $g_{31}(s) = 0$.

Esta identificación servirá para diseñar un conjunto de controladores feedforward con los que compensar el efecto de la perturbación medible sobre la salida del sistema.

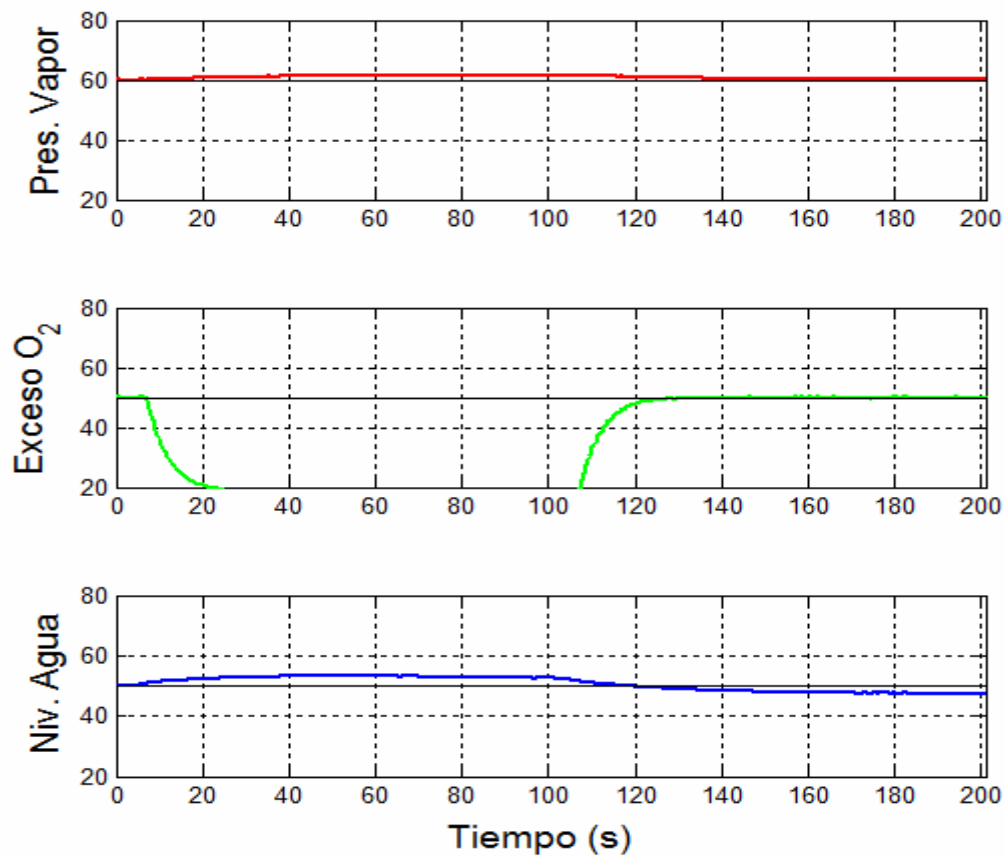


Figura 2: Respuesta frente a un escalón de magnitud 5 introducido en u_1 en el rango $t=[0,100]$.

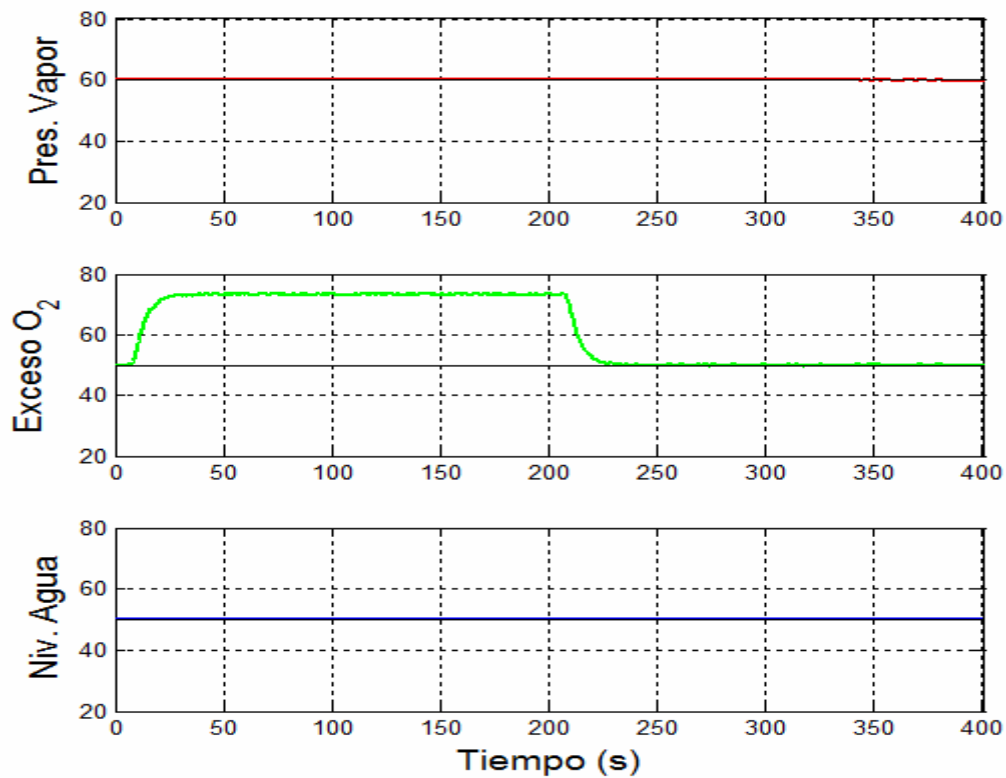


Figura 3: Respuesta frente a un escalón de magnitud 5 introducido en u_2 en el rango $t=[0,200]$.

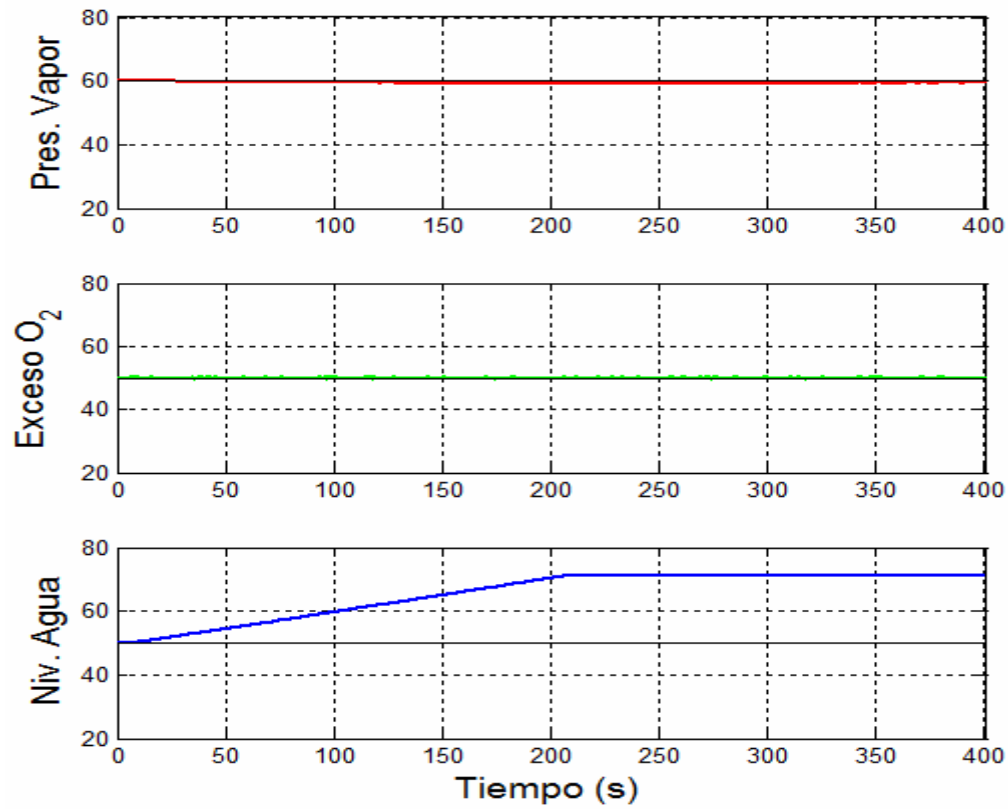


Figura 4: Respuesta frente a un escalón de magnitud 10 introducido en u_3 en el rango $t=[0,200]$.

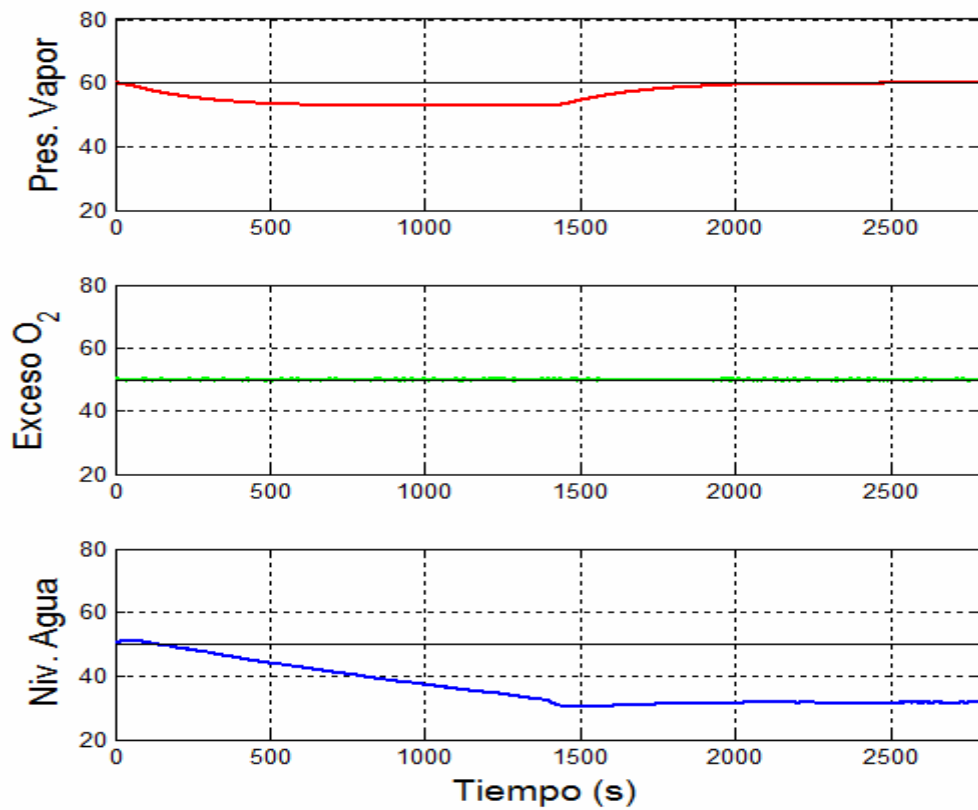


Figura 5: Respuesta frente a un escalón de magnitud 10 introducido en u_4 (perturbación medible) en el rango $t=[0,1400]$.

3. ESQUEMA DE CONTROL

Se ha adoptado un esquema de control descentralizado para el sistema, consistente en una combinación de prealimentación (feedforward) y retroalimentación (feedback), a la que se le ha añadido a las señales de salida un filtro para atenuar el ruido.

3.1. Filtrado del ruido:

Primeramente, para atenuar el ruido observado a la salida del sistema, dichas señales se pasan por un filtro discreto de primer orden al que se le ha aplicado una zona muerta de umbral v que elimina los incrementos producidos en la salida del sistema que no se acumulan en instantes posteriores. En otras palabras, si en un instante k , el incremento en la señal con respecto a la última señal filtrada es menor que el umbral establecido, se considera que la señal filtrada y'_j permanece constante en dicho instante; en caso contrario, la señal y_j se hace pasar por el filtro de primer orden para obtener y'_j .

$$y'_{j,k} = \begin{cases} y'_{j,k-1} & \text{si } |y_{j,k} - y'_{j,k-1}| < v_j \\ a \cdot y'_{j,k-1} + (1-a) \cdot y_{j,k} & \text{si } |y_{j,k} - y'_{j,k-1}| \geq v_j \end{cases}$$

Los valores de los umbrales aplicados deben adecuarse a la amplitud observada en el ruido de cada una de las salidas ($v_1=0.07\%$, $v_2=0.52\%$, $v_3=0.11\%$). Por otra parte, se ha tomado $a=0.75$ para todos los casos.

3.2. Retroalimentación:

Para el control por retroalimentación se han elegido 3 controladores PI monovariantes, similares a los que se proponían por defecto en el documento del concurso y con el mismo emparejamiento de entradas y salidas, aunque con una implementación distinta, en la que a cada PI se le ha antepuesto el filtrado del ruido correspondiente a la salida que realimenta, con objeto de manejar directamente la interacción entre este último y el PI.

En concreto, lo que se persigue es utilizar, por una parte, la señal de salida filtrada para realimentar el término proporcional del PI y, por otra, la señal de salida sin filtrar para realimentar el término integral y asegurar así error en régimen permanente nulo. De esta manera, la señal de control resultante del PI quedaría de la siguiente forma, siendo $E(s)$ el error en la salida sin filtrar y $E'(s)$ el error en la señal filtrada:

$$U_{PI}(s) = K_P \cdot E'(s) + \frac{K_P}{T_I s} E(s)$$

A su vez, los tres PI han sido reajustados, obteniéndose los siguientes valores:

Controlador	K_P	T_I
PI ₁₁	4.4	20.1 s
PI ₂₂	0.16	9 s
PI ₃₃	4.8	20.1 s

Tabla 2: Parámetros de control resultantes para los tres PI.

3.3. Prealimentación:

Por último, a cada uno de los 3 lazos de control anteriores se le ha añadido un término de control proveniente de la perturbación medible, siguiendo un esquema de control feedforward como el que aparece en la *figura 6*, de donde se deduce que

$$K_{ff}(s) = -\frac{G_d(s)}{G_p(s)}$$

para cada uno de los lazos de control, resultando:

$$K_{ff41}(s) = -\frac{g_{41}(s)}{g_{11}(s)} \quad ; \quad K_{ff42}(s) = -\frac{g_{41}(s) \cdot g_{12}(s)}{g_{11}(s) \cdot g_{22}(s)} \quad ; \quad K_{ff43}(s) = -\frac{g_{43}(s)}{g_{33}(s)}$$

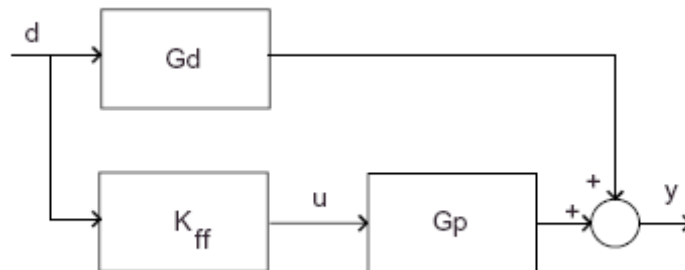


Figura 6: Esquema de control por prealimentación.

Hay que reseñar que en el tercer controlador se omiten los retardos, ya que el retardo correspondiente a $g_{43}(s)$ es menor que el de $g_{33}(s)$, por lo que se obtendría un adelanto, lo cual es físicamente imposible. En este caso, se asume que el controlador no funcionará totalmente como debiera.