

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

Evaluación de los controladores (septiembre 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. Controladores presentados a concurso

Se han recibido los siguientes cuatro controladores.

	Autor/es	Situación	Universidad	Tutores
C ₁	M. Garrido	Alumno de primer año del Máster “Automática, Robótica y Telemática”	Universidad de Sevilla	M. Ruiz M. G. Ortega
C ₂	J. M. Milla	Alumno de primer año del Máster “Automática, Robótica y Telemática”	Universidad de Sevilla	M. Ruiz M. G. Ortega
C ₃	I. Fernández C. Rodríguez	Alumnos del programa de doctorado	Universidad de Almería	J. L. Guzmán M. Berenguel
C ₄	GCPOH	Grupo de investigación de Control Predictivo y Optimización Heurística	Universidad Politécnica de Valencia	

2. Evaluación en simulación de los controladores

Los cuatro controladores se probaron funcionalmente en el entorno de Matlab+Simulink, comprobando que todos cumplían los requisitos; podían arrancar al proceso en el punto de operación (60%,50%,50%) sin necesidad de tener instalados otros Toolboxes. A continuación se le sometieron a las mismas condiciones de cambio en la demanda de vapor descritas en la propuesta del concurso, obteniendo los siguientes índices relativos (0.1477, 0.1438, 0.1796, 0.6804). Esta prueba, que puede servir como carta de presentación pues todos los concursantes la han podido realizar, nos muestra un comportamiento muy similar de los tres primeros controladores y una clara diferenciación respecto a ellos del cuarto controlador.

2.1 Pruebas seleccionadas para la evaluación de los controladores

En la propuesta del benchmark se adelantaban los cuatro tipos de pruebas a los que se iban a someter los controladores presentados al concurso, pero faltaba concretarlas. Se han concretado de la siguiente forma:

Evaluación en el punto de operación. El sistema de control deberá mantener a la caldera funcionando en torno al punto de operación (60%,50%,50%) durante 300 sg 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 (65%,70%,50%), como consecuencia de un cambio brusco y simultáneo en las consignas de la presión de vapor y del oxígeno en exceso. El cambio se producirá a los 100 sg y la prueba tendrá una duración de 1200 sg.

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 (60%,50%,50%), sin que se alteren significativamente la presión de vapor, la combustión y el nivel de agua en el calderín. La prueba tendrá una duración de 4200 sg y la demanda de vapor evolucionará desde el valor inicial 46.36% con el perfil de la figura 1.

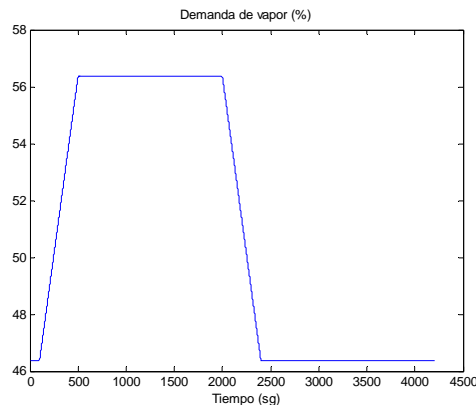


Figura 1: Evolución de la demanda de vapor en la prueba 3.

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 (60%,50%,50%) aunque las características energéticas del combustible varíen. La variación en las características energéticas del combustible se va a simular como una perturbación brusca multiplicativa en el caudal de combustible, con cambio de 1 a 0.75 a los 100 sg y la prueba tendrá una duración de 900 sg.

2.2 Resultados de las pruebas

En la propuesta del benchmark se indicaba que por cada evaluación a la que se sometiera el sistema de control utilizando un controlador a concurso se computaría el índice relativo de funcionamiento. En tanto que el índice relativo final, que serviría para establecer una clasificación entre todos los controladores presentados al concurso, se obtendría como la media aritmética de los índices relativos obtenidos por cada controlador en las evaluaciones realizadas (las mismas para todos los controladores). La siguiente matriz recoge los índices relativos obtenidos con cada controlador en cada una de las cuatro pruebas, los cuatro controladores ocupan las columnas y las pruebas están por filas.

$$\begin{pmatrix} 0.9510 & 1.0497 & 0.7337 & 1.0351 \\ 0.5236 & 0.5995 & 0.6589 & 0.6726 \\ 0.1603 & 0.1557 & 0.1811 & 0.6304 \\ 0.6475 & 0.5664 & 0.7822 & 0.8085 \end{pmatrix}$$

Y el siguiente vector recoge los índices relativos finales para los cuatro controladores,

$$(0.5706 \quad 0.5928 \quad 0.5890 \quad 0.7867)$$

Observando la matriz y el vector podemos concluir que todos los controladores presentados a concurso han conseguido mejorar las prestaciones del controlador de referencia. Además, como ocurría con la prueba “carta de presentación”, esta evaluación nos muestra una gran similitud entre los tres primeros controladores y una clara diferenciación respecto a ellos del cuarto controlador. Pero si sólo atendemos al valor del índice, el ganador del conjunto de las pruebas en simulación sería el controlador 1.

A continuación se muestran las gráficas relacionadas con todas estas pruebas, junto con otras consideraciones que nos han llevado a proponer los siguientes ganadores para cada una de las pruebas (no siempre el de menor índice).

Ganador de la prueba 1: Controlador 3
Ganador de la prueba 2: Controlador 4
Ganador de la prueba 3: Controlador 3
Ganador de la prueba 4: Controlador 4

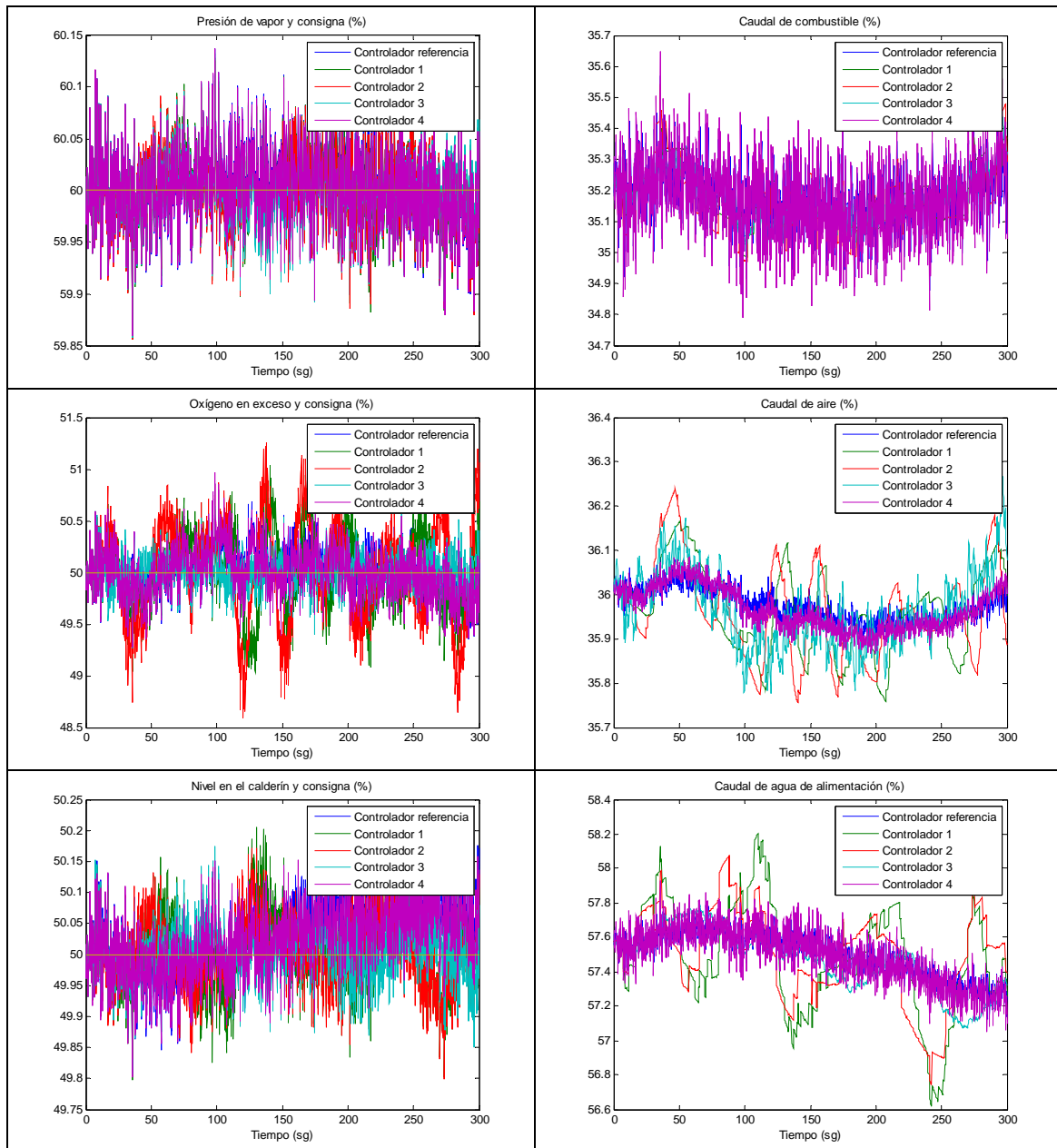


Figura 2. Salidas de la planta y sus tres consignas (columna izda) y señales de control (columna dcha) durante la prueba 1. Por simple observación es difícil encontrar diferencias entre los controladores a concurso y el controlador de referencia, pero los índices relativos resultantes (0.9510, 1.0497, **0.7337**, 1.0351) permiten proclamar vencedor de esta prueba al controlador 3.

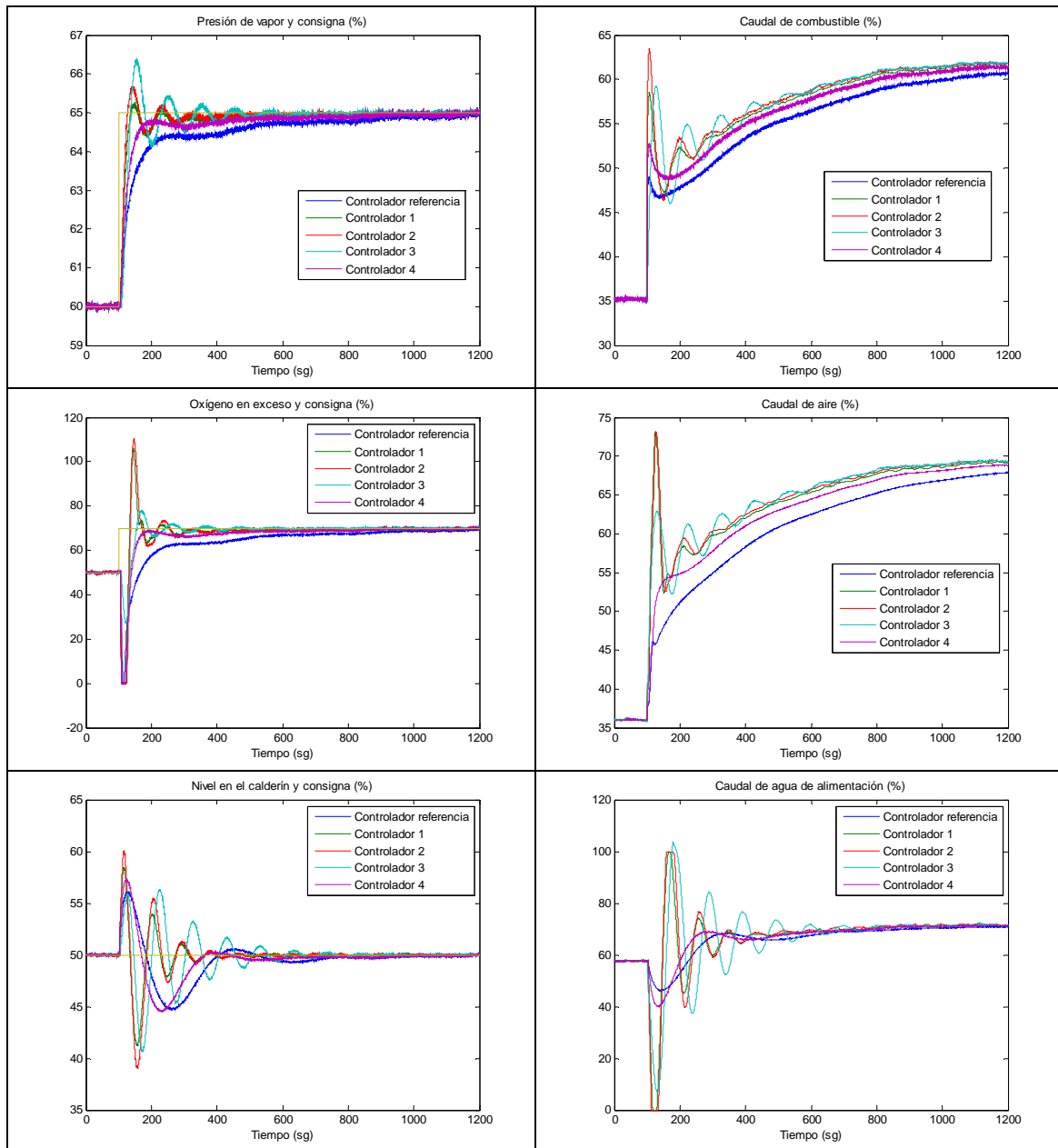


Figura 3. Salidas de la planta y sus tres consignas (columna izda) y señales de control (columna dcha) durante la prueba 2. Por simple observación se comprueba que todos los controladores consiguen una respuesta más rápida del sistema, similar comportamiento de los controladores 1 y 2, y comportamientos dispares de los controladores 3 y 4, el más y el menos oscilatorio respectivamente. Los índices relativos resultantes (0.5236, 0.5995, 0.6589, 0.6726) no permiten proclamar un vencedor claro en esta prueba, aunque por el valor del índice, el vencedor de esta prueba sería controlador 1. Todos los controladores, salvo el controlador 3, permiten grandes variaciones del oxígeno en exceso (gráfica central izquierda) que serían inadmisibles en una caldera industrial. Además se observa que tan sólo el controlador 4, como el controlador de referencia, provoca una evolución en el caudal de agua de alimentación (gráfica inferior derecha) admisible en una caldera industrial. Mientras que los controladores 1, 2 y 3 provocan grandes fluctuaciones en el agua de alimentación, el controlador 3 incluso ha permitido que este caudal esté transitoriamente por encima del máximo permitido. Un análisis sobre la velocidad de cambio del caudal de aire (la limitación impuesta fue del 1%/s) confirma que en esta prueba sólo la cumplen el controlador 4 y el de referencia, pero el resto de controladores la violan durante el transitorio. Por lo que el controlador 4 sería un justo vencedor de esta prueba.

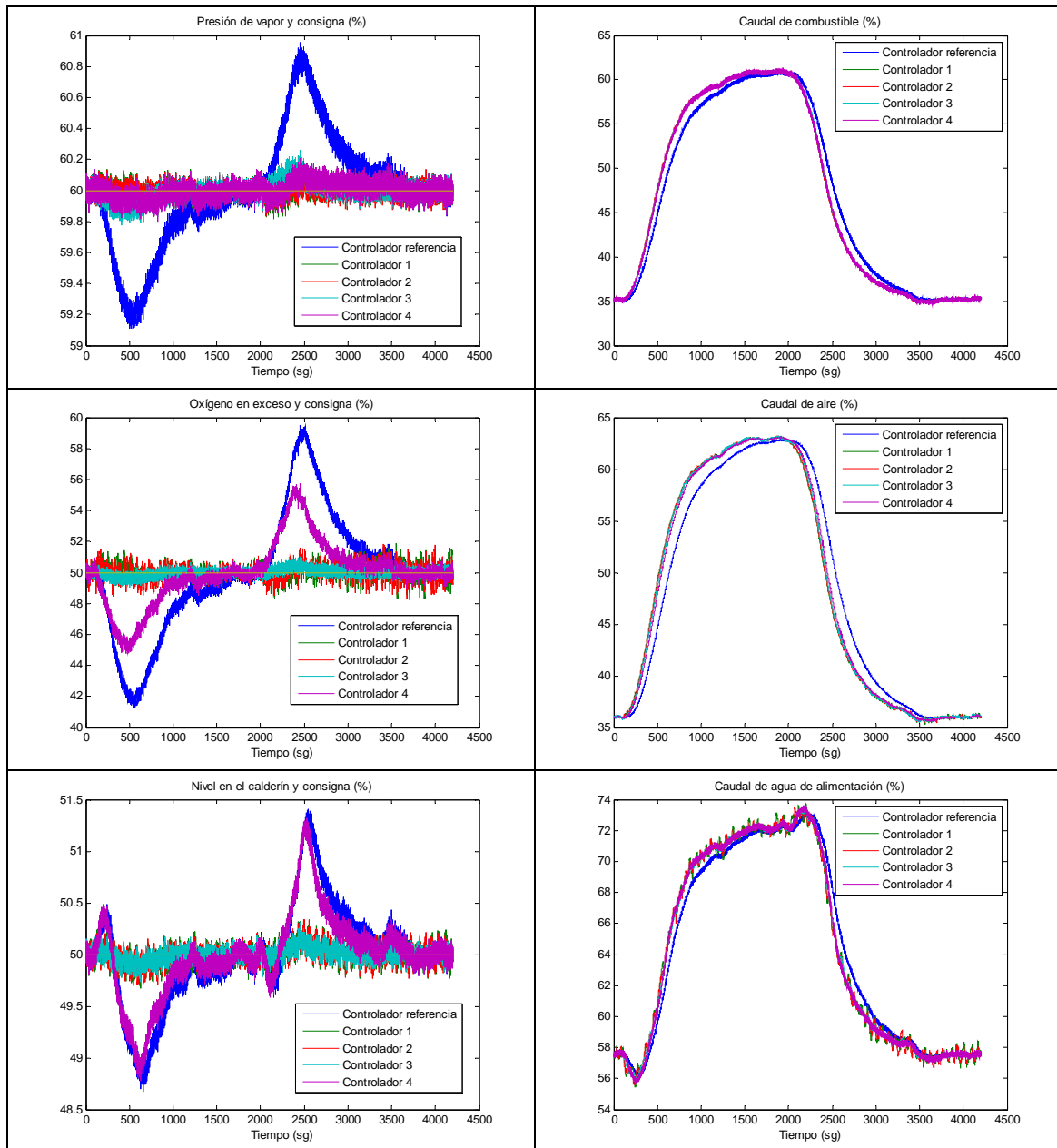


Figura 4. Salidas de la planta y sus tres consignas (columna izda) y señales de control (columna dcha) durante la prueba 3. Por simple observación se comprueba que todos los controladores, debido a la prealimentación en función de la perturbación, reaccionan más rápidamente que el controlador de referencia. Sólo es posible distinguir el peor comportamiento relativo, pero no malo, del controlador 4. Los índices relativos resultantes (0.1603, **0.1557**, 0.1811, 0.6304) son prueba de ello y permitirían proclamar vencedor de esta prueba al controlador 2. Sin embargo los controladores 1 y 2 presentan una desventaja respecto al controlador 3, dado que provocan continuas fluctuaciones del caudal de agua de alimentación, por lo que el controlador 3 sería un justo vencedor de esta prueba.

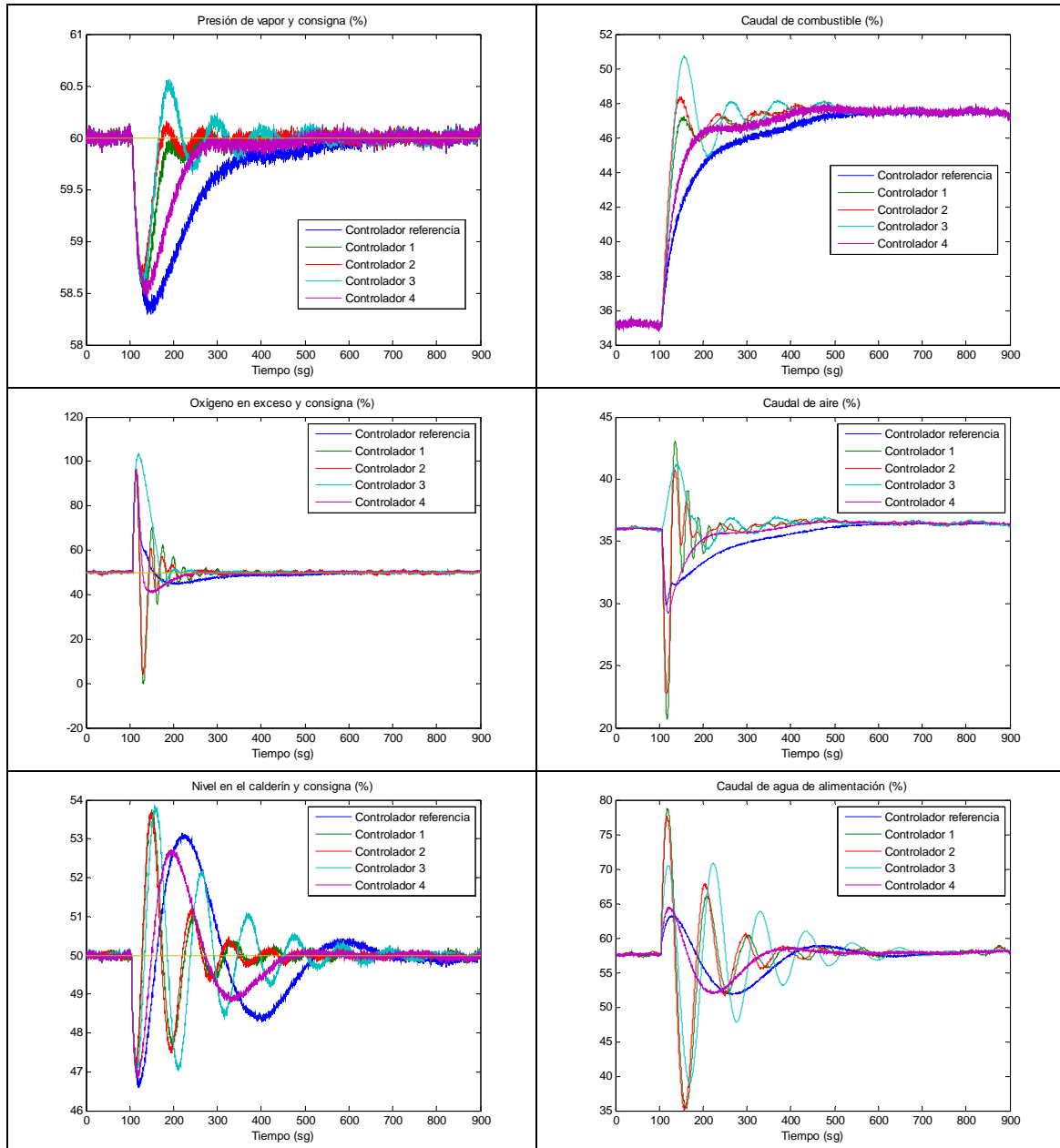


Figura 5. Salidas de la planta y sus tres consignas (columna izda) y señales de control (columna dcha) durante la prueba 4. Por simple observación, la respuesta del sistema manifiesta algunas diferencias entre los controladores 1 y 2 y comportamientos dispares de los controladores 3 y 4, el más y el menos oscilatorio respectivamente. Los índices relativos resultantes (0.6475, **0.5664**, 0.7822, 0.8085) no permiten proclamar un vencedor claro en esta prueba, aunque atendiendo únicamente al valor del índice, el vencedor de esta prueba sería el controlador 2. Los controladores 1 y 2 permiten grandes variaciones del oxígeno en exceso (gráfica central izquierda) que serían inadmisibles en una caldera industrial. Son los únicos que violan durante el transitorio la limitación de velocidad de cambio impuesta al caudal de aire. Y provocan grandes oscilaciones en el caudal de agua de alimentación (gráfica inferior derecha). El controlador 3 permite comportamientos muy oscilatorios, tanto en la presión de vapor como en el nivel del calderín. Mientras que el controlador 4 presenta mejoras respecto al controlador de referencia en todos los casos y no manifiesta ninguno de los problemas anteriormente comentados. Por lo que el controlador 4 sería un justo vencedor de esta prueba.

3. Evaluación técnica de las propuestas

En la propuesta del benchmark se comentaba que la evaluación en simulación sería decisiva para proclamar al ganador del concurso pero no sería el único aspecto a tener en cuenta. En la evaluación final también intervendría un tribunal, nombrado al efecto, que tendría en cuenta la documentación presentada, la metodología de diseño y los aspectos más característicos de la estrategia propuesta.

3.1 Características de los controladores

M. Garrido y J. M. Milla, autores respectivos de los controladores 1 y 2, han utilizado la misma estrategia de control, véase figura 6, que incorpora:

- Tres controladores PID digitales con filtro no lineal (zona muerta más filtro digital de primer orden) y limitación por rango de la señal de control. Ambos utilizan la misma función con el mismo periodo de muestreo (el que se había empleado en la propuesta del concurso). Coinciden en no utilizar la acción derivativa y limitar las señales de control en el rango (0-100) establecido en el concurso. Aparentemente, ninguno de los dos toma precaución respecto a la limitación por velocidad de cambio impuesta en el concurso al caudal de aire. Cada autor ha elegido unos parámetros del filtro y del controlador PI ligeramente diferentes, como se mostrará más adelante.
- Atenuación de la interacción entre las entradas primera y tercera (caudal de combustible y caudal de agua) con la segunda salida (exceso de oxígeno). Esta atenuación se realiza con dos bloques dinámicos continuos y dos ganancias, pero ninguno de los dos la está empleando porque las ganancias están a valor cero. Los bloques dinámicos están calculados a partir de un modelo del proceso (el mismo en ambos casos, obtenido mediante experiencias en lazo abierto) pero por el diagrama de bloques utilizado se aprecia que la implementación no es correcta y daría lugar a una atenuación parcial de la interacción.
- Control por prealimentación de la perturbación medible (demanda de vapor) con tres bloques dinámicos continuos y tres ganancias. Los bloques dinámicos están calculados a partir del mismo modelo del proceso. Al tratarse de un proceso multivariable el control por prealimentación debería tener una estructura algo más compleja, la configuración elegida por estos autores supone haber despreciado las funciones de transferencia g_{13} y g_{31} . Es decir, haber considerado que la entrada 3 (caudal de agua) no influye en la salida 1 (presión de vapor) y que la entrada 1 (caudal de combustible) no influye en la salida 3 (nivel de agua). Los dos autores emplean casi los mismos valores en las ganancias.

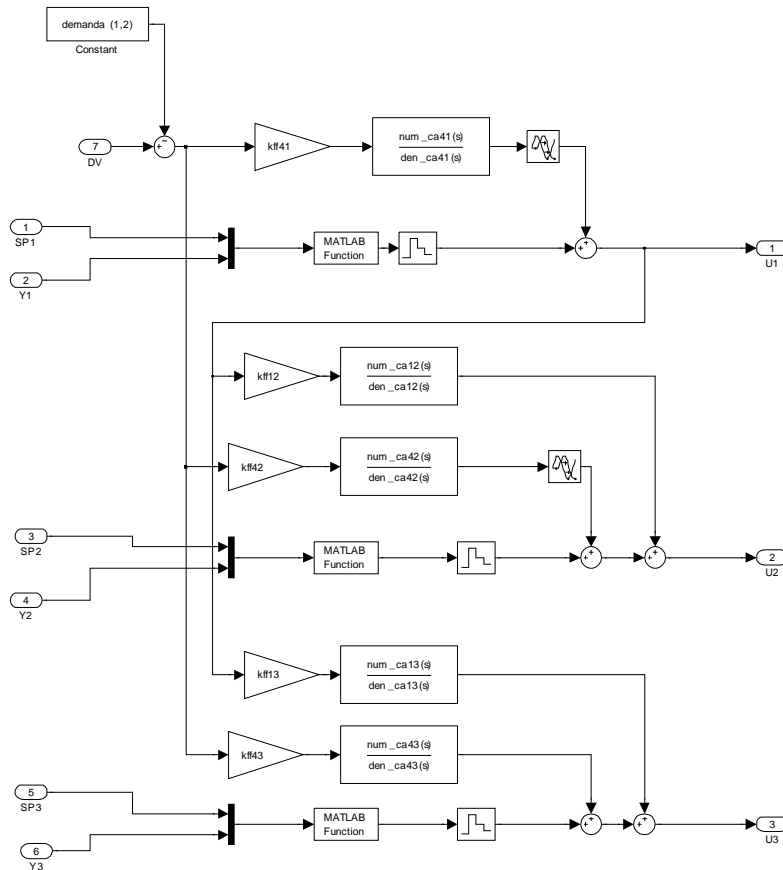


Figura 6: Estructura interna de los controladores 1 y 2.

El controlador 3 propuesto por I. Fernández y C. Rodríguez, véase figura 7, incorpora:

- Tres controladores GPC monovariables, con la estructura interna mostrada en la figura 8. Cada controlador utiliza un modelo discreto del correspondiente modelo continuo, los mismos que han utilizado M. Garrido y J. M. Milla pues se confirma que los alumnos de Almería han estado en contacto con los de Sevilla. Utilizan el mismo periodo de muestreo (0.2 sg) que se había empleado en la propuesta del concurso. Los tres controladores incluyen la restricción por rango para la señal de control y el segundo incluye además la limitación por velocidad de cambio impuesta en el concurso al caudal de aire. Los autores han utilizado también el polinomio T del controlador GPC con el objetivo de aumentar la robustez de los controladores y atenuar los efectos de los ruidos en las medidas. Los parámetros de control y su ajuste se comentarán más adelante.
- Atenuación de la interacción entre las entradas primera y tercera (caudal de combustible y caudal de agua) con la segunda salida (exceso de oxígeno). Esta atenuación se realiza con dos bloques dinámicos continuos, los mismos que han utilizado M. Garrido y J. M. Milla, y dos ganancias. Se aprecia que la estructura es correcta pero daría lugar a una atenuación parcial como reconocen los autores. Las ganancias de atenuación de la interacción se han determinado de forma heurística.
- Control por prealimentación de la perturbación medible (demanda de vapor) utilizando la misma configuración que M. Garrido y J. M. Milla, la única

diferencia con estos autores estriba en las tres ganancias. El ajuste se ha hecho de forma heurística, considerando además que la prealimentación no es necesaria en la entrada 2 (caudal de aire). La configuración elegida por estos autores supone haber despreciado las funciones de transferencia g_{13} , g_{21} y g_{31} , y por tanto equivale a considerar que el proceso es totalmente diagonal.

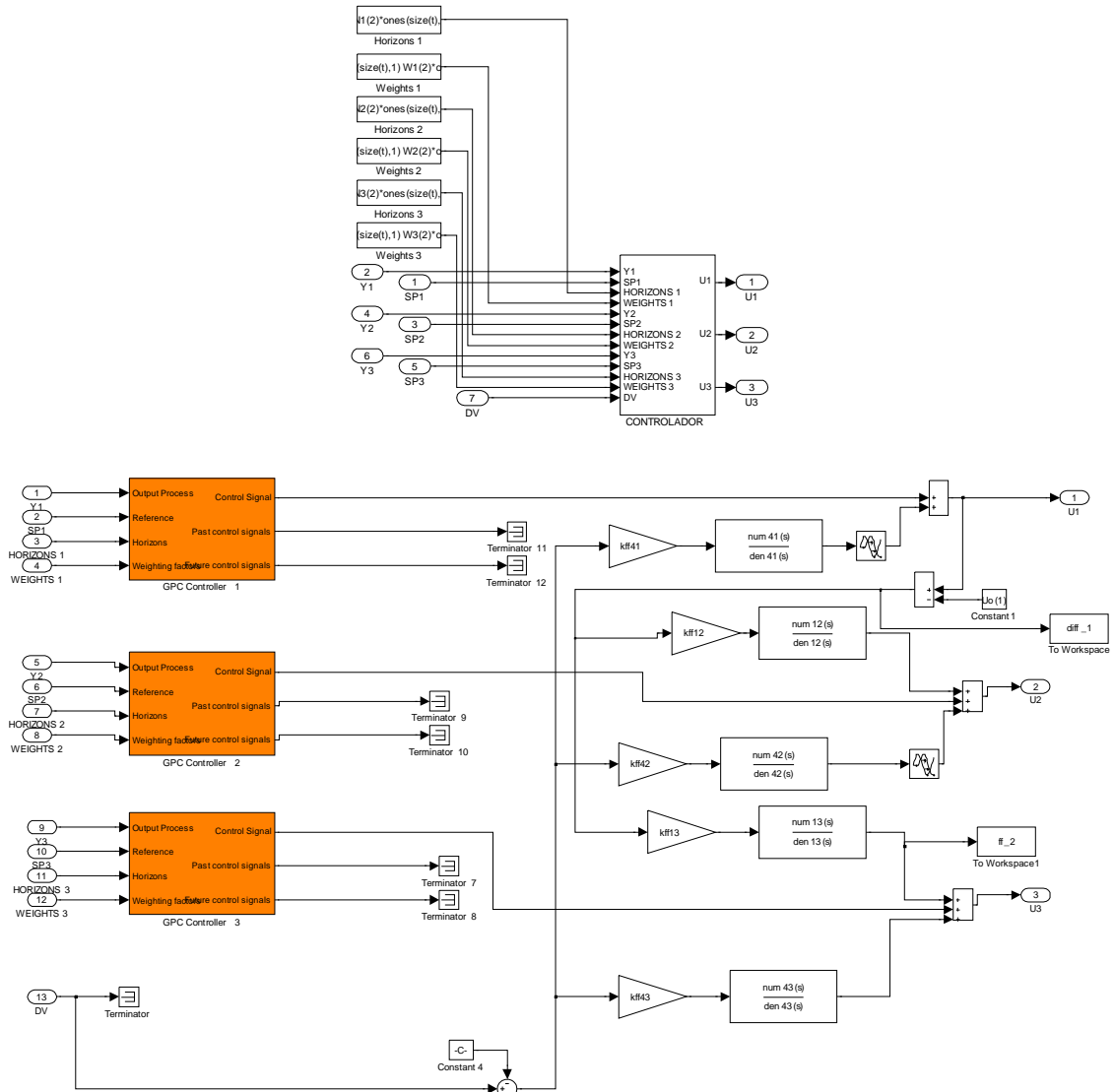


Figura 7: Estructura del primer y del segundo nivel en el controlador 3.

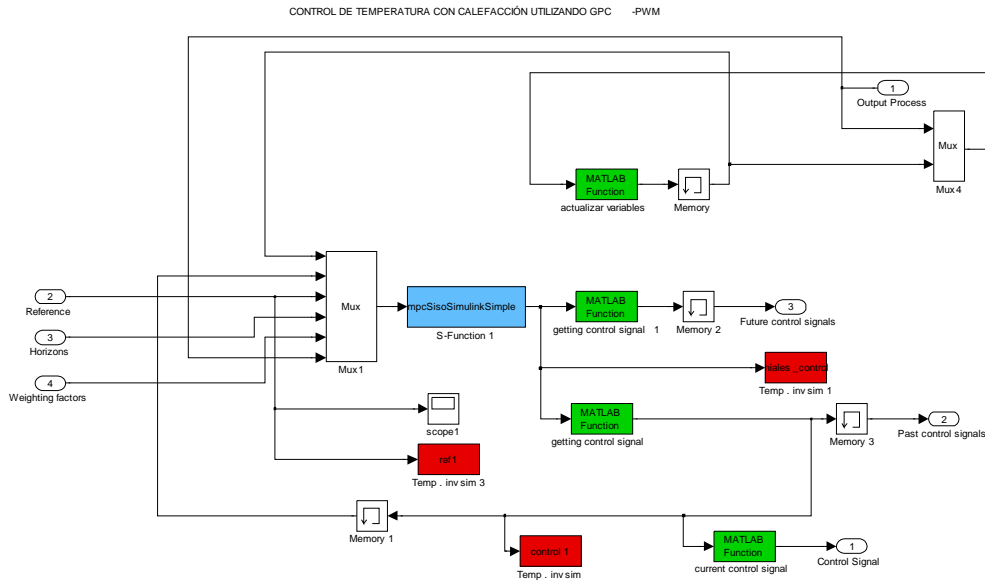


Figura 8: Estructura interna de los controladores predictivos empleados en el controlador 3.

El controlador 4 propuesto por el Grupo CPOH, véase figura 9, incorpora:

- Tres controladores PI digitales con filtro digital de primer orden y limitación por rango de la señal de control. El periodo de muestreo (0.1 sg) utilizado en estos controladores es justo la mitad del que se había empleado en la propuesta del concurso). Sorprende que los autores no hayan considerado necesario utilizar el filtro digital en los tres controladores.

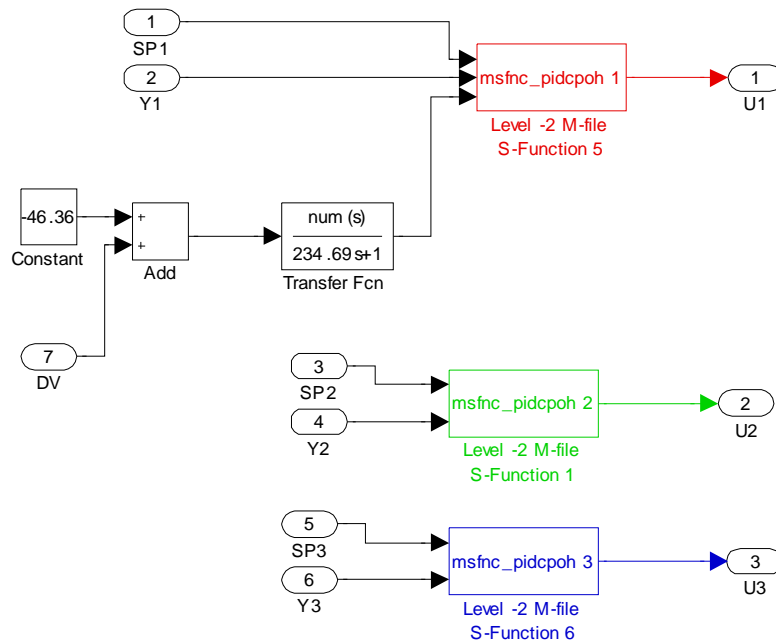


Figura 9: Estructura interna del controlador 4.

- Control por prealimentación de la perturbación medible (demanda de vapor) con un bloque dinámico continuo. Los autores consideran que únicamente deben

ejercer la prealimentación sobre la entrada 1 (caudal de combustible). La decisión no está justificada en el documento y tampoco describen cómo han determinado la función de transferencia para el bloque de prealimentación.

3.2 Parámetros de control

Las tablas 1 y 2 recogen los parámetros de control utilizados por M. Garrido y J. Milla en sus controladores (recordamos que ambos tienen la misma estructura). Los autores han llegado a estos parámetros de forma empírica y salvo en los parámetros que intervienen en los filtros, la justificación es muy breve. Las tablas ponen de manifiesto escasas diferencias entre los parámetros utilizados por ambos autores, de ahí que los resultados en las pruebas de simulación hayan sido tan similares.

Tabla 1. Parámetros utilizados por M. Garrido (C_1)

	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3
Zonas muertas	0.09%	0.49%	0.09%
Constante de tiempo del filtro continuo equivalente	0.9 sg		
Ganancias proporcionales	3.8	0.19	4.8
Constantes de tiempo	25 sg	10 sg	20 sg
Ganancias de la prealimentación	1.05	1.1	1

Tabla 2. Parámetros utilizados por J. M. Milla (C_2)

	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3
Zonas muertas	0.07%	0.52%	0.11%
Constante de tiempo del filtro continuo equivalente	0.7 sg		
Ganancias proporcionales	4.4	0.16	4.8
Constantes de tiempo	20.1 sg	9 sg	20.1 sg
Ganancias de la prealimentación	1	1	1

La tabla 3 recoge los parámetros de control utilizados por I. Fernández y C. Rodríguez, recordamos la gran similitud con la estructura empleada por los otros dos autores y el empleo de controladores predictivos en lugar de controladores PI. Los autores han seleccionado los horizontes (N_1 , N_2 y N_u) de los controladores GPC siguiendo la regla heurística: $N_1 = 1 + d$; $N_2 = d + 5$; $N_u = 5$; donde d es el retardo digital del modelo del proceso. La misma ponderación $\delta=1$ en la función de coste para las señales de error y ponderaciones diferentes $\lambda=5, 10$ y 8 para las variaciones en las tres señales de control. Respecto al filtro empleado en los controladores, no queda claro cuál ha sido la decisión final de los autores sobre las dos posibilidades que comentan en su informe. Por último, destacar que eligen ganancias para la prealimentación muy diferentes a las utilizadas por M. Garrido y J. M. Milla.

Tabla 3. Parámetros utilizados por I. Fernández y C. Rodríguez (C₃)

	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3
N ₁	26	31	36
N ₂	30	35	40
N _u	5		
δ	1		
λ	5	10	8
Constante de tiempo del filtro continuo equivalente	0.9 sg (no hay seguridad de que sea este valor)		
Ganancias de la prealimentación	0.33	0	0.4
Ganancias en la atenuación de la interacción	X	0.8	0.3

La tabla 4 recoge los parámetros de control utilizados por el grupo CPOH. Estos autores sí que justifican extensamente la metodología “optimización multiobjetivo” empleada en la estimación del modelo multivariable nominal del proceso (el conjunto de las ocho funciones de transferencia recomendadas en la propuesta) y en la búsqueda del controlador de compromiso mediante reajuste de los seis parámetros de control (tres ganancias proporcionales y tres constantes de tiempo integral). En la estimación del modelo minimizan varios índices de los errores entre las tres salidas del proceso no-lineal y del modelo. No queda claro si la optimización se hace en lazo abierto o en lazo cerrado.

En la búsqueda de parámetros de control por simulación intensiva los autores emplean el modelo multivariable nominal anteriormente estimado y valoran hasta 13 objetivos específicos, entre ellos criterios de estabilidad y robustez tanto monovariable (cada lazo independiente) como multivariable (el sistema completo). La búsqueda la realizan en rangos acotados de los seis parámetros de control, en condiciones de cambios simultáneos de las tres consignas del proceso. Tras llegar a 2156 juegos de parámetros de control, seleccionan el controlador de compromiso considerando como 14º objetivo el índice propuesto en el benchmark, garantizando estabilidad, robustez y rechazo a la perturbación.

Tabla 4. Parámetros utilizados por el Grupo CPOH (C₄)

	Lazo 1	Lazo 2	Lazo 3
Ganancias proporcionales	1.7786	0.0794	3.02
Constantes de tiempo	55.040 sg	7.8635 sg	32.69 sg

3.3 Documentación

M. Garrido y J. M. Milla han presentado una documentación de contenido muy similar. Además de los aspectos relativos a la estructura interna de control y sus parámetros resumidos en los apartados anteriores, ambos autores dedican un apartado específico a la identificación del modelo del proceso y a su validación. Para estimar las ocho funciones de transferencia que se recomendaban en la propuesta han sometido el proceso a entradas de tipo pulso en las tres variables manipuladas y en la perturbación. La duración del pulso y la duración de la experiencia elegida por los autores resultan pequeñas para algunas estimaciones. Los tipos de funciones de transferencia (de primer orden con retardo, con integrador y con cero de fase no mínima) sí están bien elegidas

por los autores pero en la fase de diseño se ven obligados, por temas de causalidad, a prescindir de ciertos retardos. Ambos autores son poco explícitos en la fase de diseño y en el ajuste de parámetros. Y tampoco describen alguna experiencia en lazo cerrado con sus respectivos controladores.

El documento presentado por I. Fernández y C. Rodríguez, autores de la propuesta C₃, es muy completo en todos sus apartados. En la fase de identificación han sometido el proceso a entradas de tipo escalón. La duración de todas las experiencias es de 2000 sg, que resulta excesiva para algunas estimaciones. Y el instante del cambio, a los 1000 sg, alarga excesivamente los registros sin necesidad. Sin embargo sorprende que en la fase de diseño y ajuste del controlador hayan utilizado las mismas funciones de transferencia que M. Garrido y J. M. Milla, y no hayan utilizado las que ellos tan bien describen y justifican en su documento. Estos autores describen resultados comparativos con el controlador de referencia del benchmark para cuatro experiencias en lazo cerrado. La primera experiencia coincide con el cambio en la demanda de vapor descrita en la propuesta del concurso, las otras tres experiencias corresponden respectivamente a cambios individuales en las consignas.

El documento presentado por el Grupo CPOH, también es completo en todos sus apartados. Los autores se extienden principalmente en la metodología “optimización multiobjetivo” empleada en la estimación del modelo multivariable nominal del proceso (el conjunto de las ocho funciones de transferencia recomendadas en la propuesta) y en la búsqueda del controlador de compromiso. Se echa en falta saber cuál ha sido el modelo nominal al que han llegado estos autores. El documento contiene resultados comparativos con el controlador de referencia del benchmark para dos experiencias en lazo cerrado. Ambas experiencias son de cambios simultáneos en las consignas, pero mientras en la primera estos cambios pequeños (prueba suave según los autores), en la segunda los cambios son importantes (prueba dura) llevando al sistema a situaciones de saturación y de oscilación.

3.4 Resultados de la valoración técnica

La tabla 5 recoge la valoración técnica concensuada por los tres miembros del jurado sobre cinco aspectos relevantes de las propuestas presentadas. Cada aspecto se ha puntuado entre 0 a 1 y la puntuación final es la media aritmética de las puntuaciones parciales.

Tabla 5. Valoración técnica de las propuestas

Aspectos valorados	C ₁₂	C ₃	C ₄
Base del controlador	0.8	0.7	0.7
Consideración de las interacciones	0	0.5	0
Consideración de la perturbación medible	0.6	0.5	0.4
Metodología de diseño	0.6	0.7	0.7
Documentación	0.7	0.9	0.8
Puntuación técnica final	0.54	0.66	0.52

Esta valoración técnica recoge la total similitud entre las propuestas C₁ y C₂, que el jurado ha decidido evaluar como si fuera una propuesta C₁₂ de dos autores. También se

ha observado una colaboración manifiesta entre las propuestas C1, C2 y C3, pero el jurado considera que existían diferencias suficientes para que la propuesta C3 se evaluara de forma separada.

4. Proclamación del ganador

De la evaluación en simulación se concluye que todas las propuestas han conseguido mejorar las prestaciones del controlador de referencia. Pero de la evaluación técnica se concluye que las propuestas no han cubierto todas las expectativas del benchmark, principalmente porque los autores han optado por abordar de forma parcial las interacciones, y ello ha provocado que los resultados de las pruebas en simulación no sean tan buenos como se esperaban.

En función de los resultados obtenidos en la evaluación en simulación y en la evaluación técnica, el jurado ha decidido otorgar el premio del Benchmark 2009-10 a la propuesta presentada por los alumnos de la Universidad de Almería.

Premio Benchmark 2009-10	Situación	Universidad	Tutores
I. Fernández C. Rodríguez	Alumnos del programa de doctorado	Universidad de Almería	J. L. Guzmán M. Berenguel

En segundo lugar el jurado sitúa a la propuesta C4 presentada por el Grupo de investigación de Control Predictivo y Optimización Heurística de la Universidad Politécnica de Valencia, y en tercer lugar a las propuestas C1 y C2 presentadas por los alumnos de la Universidad de Sevilla.

Agradecimientos

Agradezco la confianza que F. Gordillo, Coordinador del Grupo de Ingeniería de Control de CEA, depositó desde el principio en este benchmark. Así como su participación como miembro del jurado en la evaluación. Agradezco que R. González de PETRONOR, con su bagaje industrial, aceptara formar parte del jurado en la evaluación.

Y transmito mis felicitaciones y agradecimientos a todos los concursantes, pues sin ellos no hubiera tenido sentido este informe.