

Diseño Multiobjetivo de controladores PID para el benchmark 2009-2010

Gilberto Reynoso-Meza, gilreyme@posgrado.upv.es

Xavier Blasco, xblasco@isa.upv.es

Javier Sanchis, jsanchis@isa.upv.es

Miguel Martínez Iranzo, mmiranzo@isa.upv.es

Universidad Politécnica de Valencia, Camino de Vera s/n, 46022 Valencia, España

Resumen

En el siguiente documento se da una breve explicación de la propuesta para el Benchmark de Ingeniería de Control del Comité Español de Automática. La metodología desarrollada emplea controladores PI robustos los cuales han sido ajustados a partir de una optimización multiobjetivo que considera indicadores de desempeño, estabilidad y robustez. **Palabras clave:** optimización multiobjetivo, algoritmos evolutivos, controladores PI, control multivariable.

1. Introducción

El diseño de controladores debe considerar toda una serie de requerimientos e indicadores de desempeño para su implementación. Tales pueden ser índices basados en el error o en su robustez. Sin embargo, es de esperarse que algunos de estos índices entren en conflicto entre sí, por lo que debe buscarse una solución de compromiso cuyas prestaciones se encuentren dentro de los requerimientos de operación. Esto se hace muchas veces asignando pesos a los indicadores que representan la importancia relativa entre ellos.

La optimización multiobjetivo (MOO) considera globalmente a todos los objetivos involucrados en la fase de diseño, mediante la optimización simultánea de todos ellos. De tal manera, es de esperarse como resultado un conjunto de soluciones, todas ellas óptimas entre sí, que difieren únicamente unas de otras por el grado de compromiso entre objetivos. De tal forma, el diseñador cuenta con una variedad de soluciones que le conceden una mayor flexibilidad en la selección de uno de ellos.

Este tipo de optimización es empleado para determinar los modelos nominales del sistema multivariable (metodología moea4pi [3]) y para determinar un conjunto de soluciones de controladores PI robustos (metodología moea4ct [3]) en el benchmark que organiza el grupo temático de Ingeniería de Control del CEA. Dicho benchmark consiste en el control de una caldera cuyas especificaciones

se encuentran en [2]. El resto de este documento se organiza como sigue: en la sección 2 se describen brevemente algunas ideas y conceptos relacionados con la optimización multiobjetivo. En el apartado 3 se comentan los modelos nominales empleados para el diseño de los controladores presentados en la sección 4. Finalmente, algunas pruebas preliminares y conclusiones de este trabajo son presentadas.

2. Optimización Multiobjetivo

El problema de optimización multiobjetivo consiste, sin pérdida de generalidad, en la minimización de k objetivos todos ellos de igual importancia y que suelen competir entre sí.

$$\min_{\theta \in \mathbb{R}^n} \mathbf{J}(\theta) = [J_1(\theta), \dots, J_m(\theta)] \in \mathfrak{R}^m \quad (1)$$

Tal condición generalmente conduce a determinar un conjunto de soluciones, todas ellas óptimas, diferentes únicamente por el grado de compromiso entre los m objetivos. El conjunto de soluciones óptimas conforma lo que se conoce como conjunto de pareto $\Theta_{\mathcal{P}}$ y su proyección en el espacio de objetivos como frente de pareto $\mathbf{J}_{\mathcal{P}}$. Cada punto del frente de pareto se dice es una solución no-dominada.

Definition 1 (Dominancia): dada una solución θ^1 con valor en la función de costo $\mathbf{J}(\theta^1)$ domina a una segunda solución θ^2 con función de costo $\mathbf{J}(\theta^2)$ si y sólo si:

$$\begin{aligned} & \{\forall i \in [1, 2, \dots, m], J_i(\theta^1) \leq J_i(\theta^2)\} \wedge \\ & \{\exists q \in [1, 2, \dots, m] : J_q(\theta^1) < J_q(\theta^2)\} \end{aligned}$$

lo cual se denota como $\theta^1 \prec \theta^2$

El problema de optimización multiobjetivo busca determinar la mejor aproximación posible $\Theta_{\mathcal{P}}^*$ del conjunto de Pareto $\Theta_{\mathcal{P}}$ que genera el frente de Pareto $\mathbf{J}_{\mathcal{P}}^*$. Para determinar $\Theta_{\mathcal{P}}^*$ se ha empleado el algoritmo *sp - MODE* [4, 3, 5] el cual es un algoritmo evolutivo de optimización multiobjetivo (MOEA).

$\min_{\theta \in \mathbb{R}^{3,4,5}} J(\theta) \in \mathbb{R}^3$
$J_1 = J_{AE} = \frac{1}{N} \sum y_k - \hat{y}_k $
$J_2 = J_{RE} = \frac{1}{N} \sum \left \frac{y_k - \hat{y}_k}{\hat{y}_k} \right $
$J_3 = J_{E+} = \max y_k - \hat{y}_k $

Cuadro 1: Planteamiento MOO para el problema de identificación de modelos nominales.

3. Identificación de modelos multivariable

Se identificará un modelo nominal multivariable alrededor de la zona de operación descrita en el Benchmark (ecuación 2) para acercarse en lo posible a una solución aplicable en un entorno industrial. Se parte del supuesto de que el modelo no-lineal no está disponible para usarlo implícitamente en el controlador y por ello es necesario un modelo nominal.

$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ Y_3(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{11}(s) & 0 & g_{13}(s) \\ g_{21}(s) & g_{22}(s) & 0 \\ g_{31}(s) & 0 & g_{33}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ U_3(s) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g_{1d}(s) \\ 0 \\ g_{3d}(s) \end{bmatrix} D(s) \quad (2)$$

Para cada función de transferencia se ha elaborado una identificación multiobjetivo minimizando los índices del cuadro 1, donde y_k representa la salida del proceso y \hat{y}_k la salida del modelo en el instante k .

Como modelo nominal $\hat{g}_{ij}(s)$, ha sido seleccionado en cada caso aquel modelo con la menor norma infinito N_∞ . Lo anterior asegura que se ha seleccionado dentro del frente obtenido el modelo con el mejor compromiso entre objetivos. Los modelos restantes del frente $g_{ij}^{\Theta^*}(s)$ son utilizados para determinar cotas ante incertidumbre paramétrica $C_{ij}(j\omega)^{-1}$, donde $C_{ij}(j\omega) = \frac{|g_{ij}^{\Theta^*}(j\omega) - \hat{g}_{ij}(j\omega)|}{|g_{ij}^{\Theta^*}(j\omega)|}$

4. Diseño del Conjunto de Controladores

Se ha optado como selección de esquema de control el empleo de tres controladores ISA-PI, con esquema de antiwind-up (ecuación 3). Aunque la optimización multiobjetivo puede ser empleada para el ajuste de cualquier tipo de controlador, se ha optado por el reajuste de los controladores PI que representan la capa básica de control en una caldera industrial. De esta forma, se puede ofrecer una solución viable de rápida implementación, ya

que no necesita de hardware o software adicional. Finalmente, se utiliza una ganancia por prealimentación para tratar la perturbación que origina el cambio en la demanda de vapor (vid. figura 2).

$$\begin{aligned} u_k = & K_c(bR_k - y_k) \\ & + \frac{KT_s}{T_i}(R_k - y_k) \\ & + offset \end{aligned} \quad (3)$$

donde u_k es la acción de control en el instante de muestreo k , R_k la referencia, y_k la señal medida del sistema, K_c la ganancia del controlador, T_s y T_i los tiempos de muestreo y de la acción integral respectivamente; finalmente, b es la ponderación de la referencia en la acción proporcional.

El diseño multiobjetivo será utilizado para sintonizar los parámetros K, T_i de los tres controladores. El tiempo de muestreo seleccionado para el controlador es de $T_s = 100ms$ y $b = 1$. El problema de optimización multiobjetivo para el ajuste de controladores (moea4ct) deberá tener en cuenta lo siguiente:

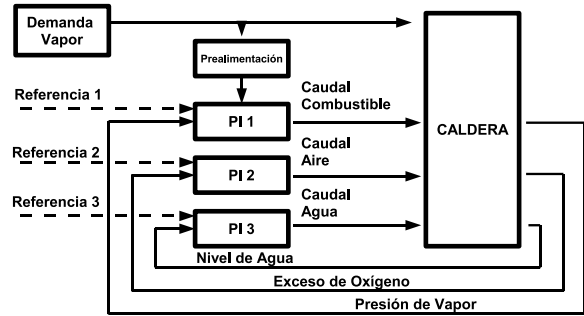


Figura 2: Propuesta de control implementada.

Estabilidad SISO: Cada controlador debe estabilizar su lazo de control. Lo anterior representa una restricción dura en el problema de optimización.

Robustez SISO: Cada controlador deberá ser capaz de controlar a la familia de plantas del frente de pareto del modelo nominal. Para ello, se minimizará el índice $|C_{ij}\mathcal{T}|$ donde \mathcal{T} es la función de sensibilidad complementaria.

Estabilidad MIMO: El conjunto de controladores debe estabilizar y controlar al sistema multivariable. Para tener un indicador de lo anterior, se minimizará el módulo logarítmico empleado en la técnica BLT (biggest log modulus tuning) de Luyben [1].

Desempeño MIMO: La solución debe garantizar un desempeño mínimo (respecto al controlador de referencia) en los índices IAE,

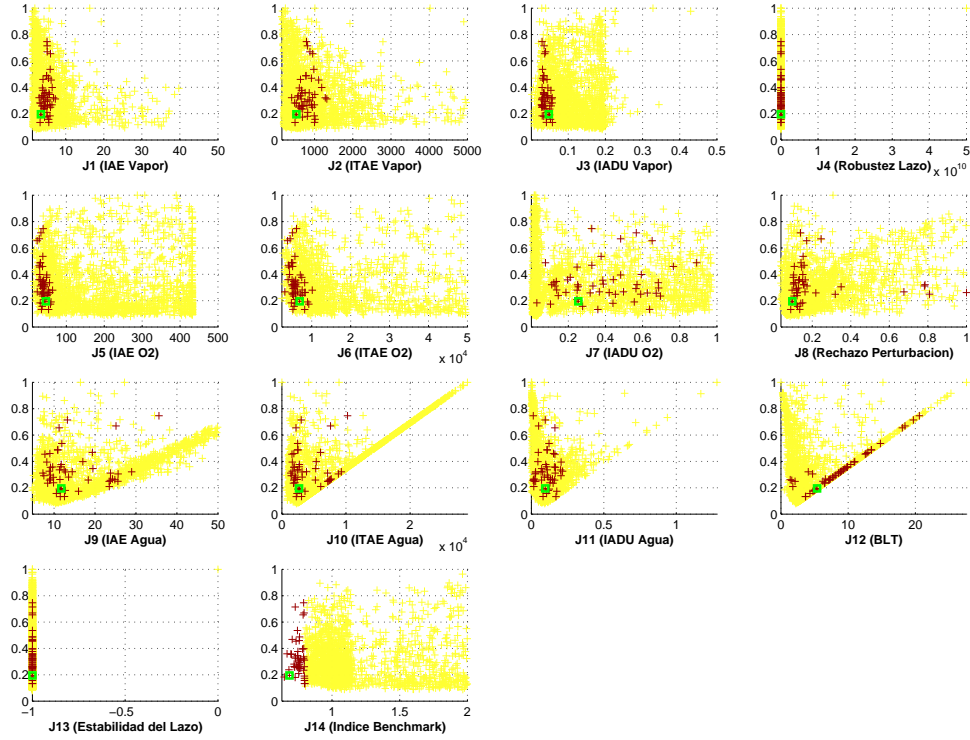


Figura 1: Frente de Pareto de controladores PI. La solución en cuadro señala la propuesta de este trabajo.

ITAE e IADU, por lo que serán minimizados. Como es importante evaluar el desempeño de los controladores en las condiciones lo más realistas posible, se ha desarrollado un modelo simulink del sistema multivariable con los procesos nominales seleccionados y el controlador digital a implementar. Aunque dicha simulación puede llevarse a cabo con el modelo desarrollado por los organizadores del benchmark (y donde será evaluada finalmente la propuesta de control), este no se ha usado en el proceso de optimización. El empleo del modelo no-lineal se ha limitado a la obtención de datos para la identificación y para pruebas finales de la solución implementada. Hacerlo de tal forma obedece a que en un entorno industrial los ensayos de control se harían con un modelo aproximado del proceso real.

Rechazo a Perturbación: Cada controlador debe ser capaz de rechazar adecuadamente la perturbación ocasionada por un cambio en la demanda de vapor. Para ello, se minimizará la respuesta a la perturbación $\left| \frac{g_{id}(j\omega)}{1+K_i(j\omega)g_{ij}(j\omega)} \right|$.

Dado lo anterior, cada vector solución θ^i para sintonizar a los controladores será evaluado en un total de 13 objetivos. El algoritmo sp-MODE arroja un total de 2156 controladores en el espacio de objetivos. Todos los controladores son óptimos y difieren entre sí únicamente por el grado de compromiso que tienen con los 14 objetivos determinados anteriormente.

Como conjunto controladores, ha sido seleccionado aquél que ofrece un alto grado de compromiso entre el índice del concurso (garantizando desempeño en la prueba de entrenamiento usada en la optimización) el BLT (garantizando estabilidad y robustez) y el rechazo a la perturbación. En la figura 1 se muestra el controlador seleccionado. Cabe señalar que, aunque existen controladores con menor índice del concurso en la prueba utilizada durante la optimización, son controladores sin compromiso en la estabilidad MIMO (J_{1G2}). Finalmente, en las figuras 3, 4, 5 se compara el desempeño logrado de los controladores en una prueba similar a la efectuada durante el proceso de optimización (cambio suave simultáneo en las referencias, $\pm 5\%$). En las figuras 6, 7, 8 se presenta el desempeño de los mismos ante una prueba dura (cambios simultáneos mayores al $\pm 30\%$). En los últimos se observa el como el controlador selec-

$\min_{\theta \in \mathbb{R}^8} J(\theta) \in \mathbb{R}^{13}$	
$J_1 =$ IAE Presión Vapor	$K_1 \in [0, 10]$
$J_2 =$ ITAE Presión Vapor	$T_{i1} \in [1, 100]$
$J_3 =$ IADU Presión Vapor	$K_2 \in [0, 1]$
$J_4 =$ IAE Exceso de Oxígeno	$T_{i2} \in [0, 10]$
$J_5 =$ ITAE Exceso de Oxígeno	$K_3 \in [1, 100]$
$J_6 =$ IADU Exceso de Oxígeno	$T_{i3} \in [0, 1]$
$J_7 =$ IAE Nivel de agua	
$J_8 =$ ITAE Nivel de agua	
$J_9 =$ IADU Nivel de agua	
$J_{10} =$ BLT	
$J_{11} = \ C_{ij}T\ $	
$J_{12} = \left\ \frac{D_{ij}}{1+K_i G_{ij}} \right\ $	
$J_{13} =$ Estabilidad de los Lazos de Control	
$J_{14} =$ Desempeño Caso Referencia	

Cuadro 2: Planteamiento mpea4ct para el control de la caldera

cionado es capaz de lograr una estabilización mas suave en un rango mayor de operación.

5. Conclusiones

Se ha presentado una metodología para el diseño de controladores PI robustos para un entorno multivariable empleando herramientas de optimización multiobjetivo. Las mismas generan un conjunto de soluciones, todas óptimas pero con diferentes grados de compromiso en sus objetivos. La propuesta de control ha sido ajustada a partir de un modelo linealizado en la zona de operación del modelo No-Lineal. Dicho modelo no ha sido utilizado sino en la fase última de diseño, donde se ha probado la solución implementada.

Se ha demostrado que la metodología multiobjetivo es susceptible de encontrar un controlador de compromiso entre desempeño, robustez y rechazo a perturbación de fácil implementación. Este ajuste de la capa básica de control puede ser posteriormente mejorado con estrategias de control como MPC que utilicen a los controladores como esclavos.

Agradecimientos

Este trabajo es apoyado parcialmente por DPI2008-02133/DPI, Ministerio de Ciencia e Innovación, Gobierno de España.

Referencias

- [1] William L. Luyben. Simple method for tuning siso controllers in multivariable systems. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design*, (25):654–660, 1986.
- [2] F. Morilla. Benchmark 2009-10 grupo temático de ingeniería de control de cea-ifac: Control

de una caldera. Available at www.cea-ifac.es/w3grupos/ingcontrol, Febrero 2010.

- [3] Gilberto Reynoso-Meza. Design, coding and implementation of a multiobjective optimization algorithm based on differential evolution with spherical pruning: applications for system identification and controller tuning. Master's thesis, Universidad Politécnica de Valencia., Available at <http://ctl-predictivo.upv.es/trabajos.htm>, 2009.
- [4] Gilberto Reynoso-Meza, Xavier Blasco, Javier Sanchis, and Miguel Martínez. Multiobjective optimization algorithm for solving constrained single objective problems. In *Proceedings of the IEEE congress on evolutionary computation (CEC2010)*, page Accepted, July 2010.
- [5] Gilberto Reynoso-Meza, Javier Sanchis, Xavier Blasco, and Miguel Martínez. Multiobjective design of continuous controllers using differential evolution and spherical pruning. In Cecilia Di Chio, Stefano Cagnoni, Carlos Cotta, Marc Eber, Anikó Ekárt, Anna I.Esparcia-Alcaráz, Chi-Keong Goh, Juan J.Merelo, Ferrante Neri, Mike Preuss, Julian Togelius, and Georgios N.Yannakakis, editors, *Applications of Evolutionary Computation, Part I*, volume LNCS 6024, pages pp. 532–541. Springer-Verlag, 2010.

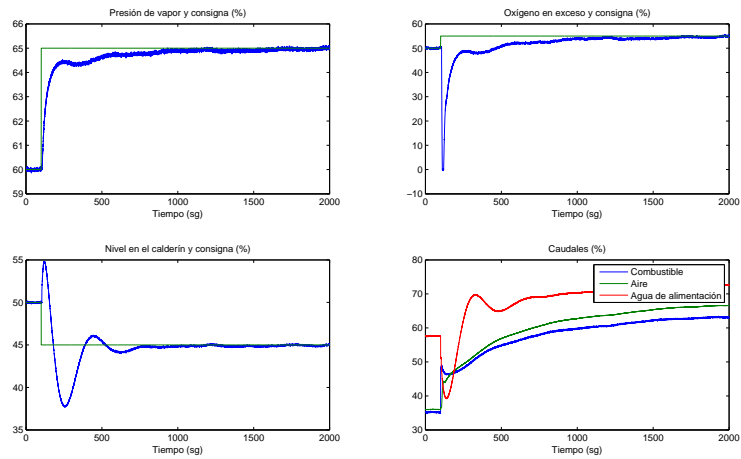


Figura 3: Desempeño del controlador de referencia (vid. [2]) ante una prueba suave.

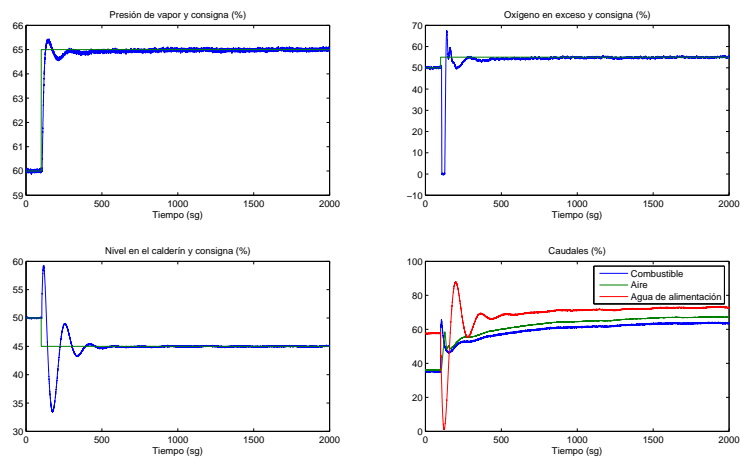


Figura 4: Desempeño del controlador a evaluar (vid. [2]) ante una prueba suave.

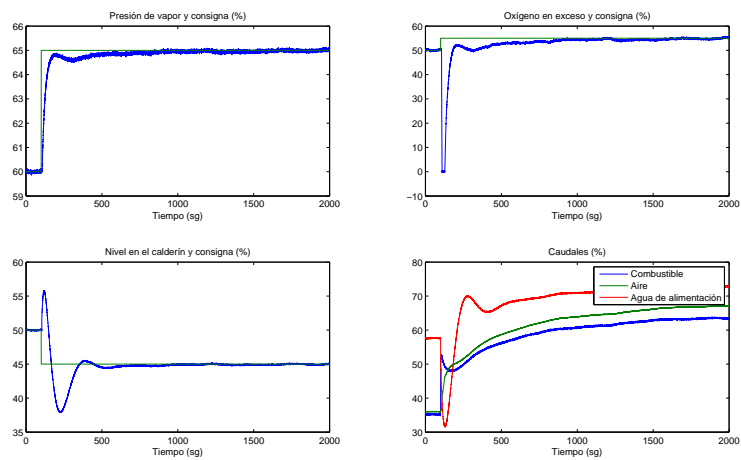


Figura 5: Desempeño del controlador moea4ct ante una prueba suave.

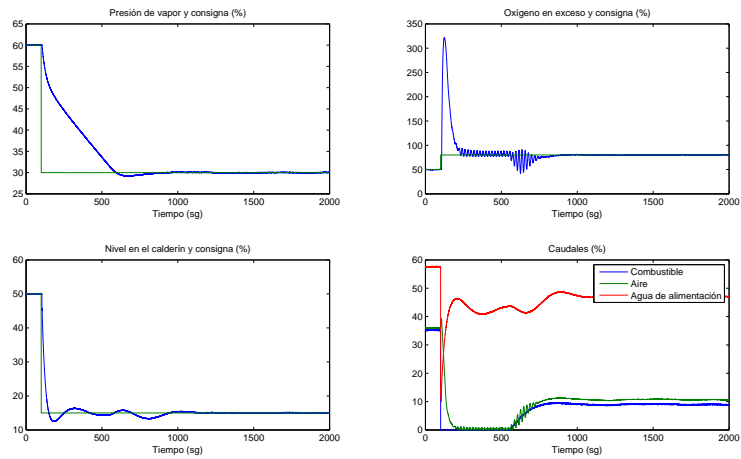


Figura 6: Desempeño del controlador de referencia (vid. [2]) ante una prueba dura.

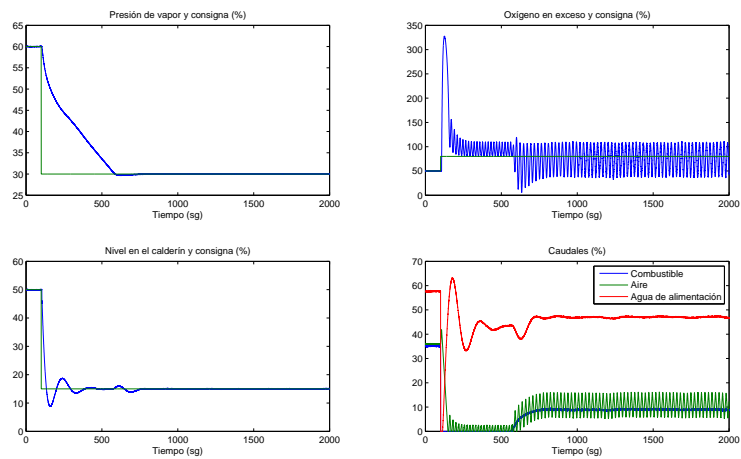


Figura 7: Desempeño del controlador a evaluar (vid. [2]) ante una prueba dura.

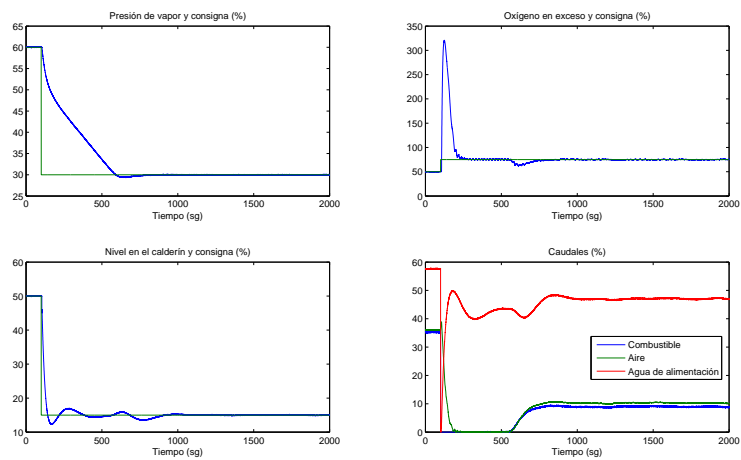


Figura 8: Desempeño del controlador moea4ct ante una prueba dura.