

# UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



R E C I B I D O	UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
	VICE-RECTORADO DE INVESTIGACIÓN
	244 13 OCT 2015
	HORA: 15:45 hr
	FIRMA: <i>[Signature]</i>

(IF)

INFORME FINAL DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CONTROLADORES

MULTIVARIABLES CLÁSICO Y AVANZADO PARA UNA

CALDERA INDUSTRIAL”

(IF)  
OCT 2015

AUTOR: M. SC., ING. NICANOR RAÚL, BENITES SARAVIA

(PERIODO DE EJECUCIÓN: 01 JULIO 2014 AL 30 DE JUNIO 2015)

(RESOLUCIÓN RECTORAL N° 473-2014-R)

CALLAO – PERU

2015

*[Signature]*

I.	ÍNDICE	1
1.1	ÍNDICE DE FIGURAS	3
1.2	ÍNDICE DE TABLAS	4
II.	RESUMEN y ABSTRACT	5
III.	INTRODUCCIÓN	7
3.1	Planteamiento del Problema de Investigación	7
3.2	Objetivos y Alcances de la Investigación	8
3.2.1	Objetivos	8
3.2.2	Alcances	8
3.3	Importancia y Justificación de la Investigación	9
3.4	Formulación de la Hipótesis	9
IV.	MARCO TEÓRICO	11
4.1	Introducción sobre la Caldera Industrial	11
4.2	Clasificación de las Calderas	11
V.	MATERIALES Y MÉTODOS	16
5.1	Modelado de la Caldera Industrial	16
5.1.1	Funcionamiento de la Caldera Industrial	16
5.1.2	Características del Modelo de la Caldera Industrial	17
5.1.3	Modelo de Matriz de Transferencia	19
5.2	Diseño de la estrategia de Control PID Multivariable Desacoplado	20
5.3	Diseño de la estrategia de Control Predictivo Multivariable Desacoplado	23
5.3.1	Introducción	23
5.3.2	Modelo del Predictor	24
5.3.3	El Controlador Predictivo	26
5.4	Diseño de la estrategia de Control Predictivo Multivariable Acoplado	29
VI	RESULTADOS	33
6.1	Resultados de la estrategia de Control PID Multivariable Desacoplado	33
6.2	Resultados de la estrategia de Control Predictivo Multivariable Desacoplado	37
VII	DISCUSION	42
7.1	Comparación de resultados	42
7.2	Conclusiones y recomendaciones	43
VIII	REFERENCIALES	44
IX	APÉNDICES	45

*July*

	APÉNDICE A	45
	Programa en Matlab de Inicialización de variables (Autoría propia)	
	APÉNDICE B	45
	Programa en Matlab de Prueba de Control (Autoría propia)	45
	APÉNDICE C	46
	Programa en Matlab de la Estrategia de Control PID	46
	Multivariable Desacoplado (Autoría propia)	
	APÉNDICE D	47
	Programa en Matlab de la Estrategia de Control Predictivo	47
	Multivariable Desacoplado (Autoría propia)	
X	ANEXOS	49
	• Matriz de Consistencia	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 4.1 Detalle de una caldera acuotubular	12
Figura 4.2 Detalle de una caldera pirotubular horizontal	13
Figura 5.1 Planta industrial de generación de vapor	16
Figura 5.2 Detalle de una caldera pirotubular horizontal	17
Figura 5.3 Bloque MIMO representativo de la caldera	18
Figura 5.4 Diagrama de bloques del modelo de la caldera	21
Figura 5.5 Estrategia del Control Predictivo	24
Figura 5.6 Esquemas representativos de los modelos paralelo y serie/paralelo	24
Figura 5.7 Implementación de los modelos Paralelo y Serie/Paralelo	26
Figura 5.8 Diagrama de bloques del Sistema de Control Predictivo Multivariable Acoplado	32
Figura 6.1 Salida controlada (Presión de vapor) vs Consigna	33
Figura 6.2 Salida controlada (Oxígeno) vs Consigna	34
Figura 6.3 Salida controlada (Nivel en el calderín) vs Consigna	34
Figura 6.4 Caudal de combustible	35
Figura 6.5 Caudal de aire	35
Figura 6.6 Caudal de agua de alimentación	36
Figura 6.7 Perturbación: Demanda de vapor	36
Figura 6.8 Salida controlada (Presión de vapor) Predictivo vs PID	37
Figura 6.9 Salida controlada (Oxígeno en exceso) Predictivo vs PID	38
Figura 6.10 Salida controlada (Nivel en el calderín) Predictivo vs PID	38
Figura 6.11 Señal de control (Caudal de combustible) Predictivo vs PID	39
Figura 6.12 Señal de control (Caudal de aire) Predictivo vs PID	39
Figura 6.13 Señal de control (Caudal de agua) Predictivo vs PID	41
Figura 6.14 Diagrama de bloques del Sistema de Control Predictivo Multivariable Desacoplado	41

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 5.1 Puntos de operación de entrada y salida de la caldera	22
Tabla 5.2 Valores de los parámetros de los controladores PI	22
Tabla 5.3 Parámetros del Controlador Predictivo Multivariable	29
Tabla 5.4 Resumen de resultados de las dos estrategias de control	42



## II. RESUMEN

Las calderas son sistemas complejos que presentan comportamientos no lineales, multivariables (más de una entrada y salida) y con numerosas interferencias o acoplamientos. Para su control la industria viene adoptando distintas estrategias, entre las que se pueden destacar: control de uno, dos y tres elementos, control maestro, control de combustión, con corrección de oxígeno, control de temperatura, de presión, etc. Todas estrategias mencionadas se basan principalmente en la aplicación de controladores PID a lazos simples, linealizando previamente el sistema entorno a un punto de trabajo, lo que supone una aproximación lineal; ya que el modelo de las calderas es no lineal. Estos métodos vienen siendo el estándar de aplicación en la industria de los últimos años. Sin embargo, en muchos casos resultan ser ineficientes provocando grandes consumos de combustible y contaminación.

La necesidad de nuevas estrategias de control que ofrezcan mejores prestaciones a nivel de eficiencia, seguridad y de emisiones ha posibilitado la investigación y profundización de sistemas de control más avanzados como el predictivo, adaptativo o basado en redes neuronales.

En tal sentido, el objetivo específico del presente trabajo es diseñar un controlador que mejore sustancialmente, tanto en respuesta temporal como en estabilidad, el modelo de referencia basado en PID independientes (PID Multivariable Desacoplado). Para ello, se hará uso de otras teorías de control más avanzadas como el Control Predictivo Multivariable, para controlar la presión de vapor, exceso de oxígeno y nivel de agua y comparar sus resultados con las del Control PID Multivariable.

**PALABRAS CLAVES:** Controladores Multivariables, Caldera Industrial.

## II. ABSTRACT

Boilers are complex systems that have non-linear behaviors, multivariate (more than one input and output) and with numerous interference or links. Control industry is adopting different strategies, which include: control one, two and three elements, master control, combustion control, with correction of oxygen, control of temperature, pressure, etc. All mentioned strategies are based primarily on the application of PID controllers to loops single, previously linearising the system to a point of work environment, which is a linear approximation; since boilers model is non-linear. These methods are still standard application in the industry in recent years. However, in many cases they turn out to be inefficient, causing large consumption of fuel and pollution.

The need for new control strategies that offer better performance at the level of efficiency, safety and emissions has enabled research and deepening of the most advanced control systems such as the predictive, adaptive or based on neural networks.

Accordingly, the specific objective of this study is to design a controller that improves substantially, both time response and stability, the reference model based on independent PID (PID Multivariable uncoupled). To do so, will be other more advanced control theories as Multivariable Predictive Control, to control the vapor pressure, excess oxygen and water level and compare their results with the of the PID Multivariable Control.

**KEYWORDS:** Multivariable controllers, Industrial boiler.



### III. INTRODUCCION

#### 3.1 Planteamiento del Problema de Investigación

Las calderas son sistemas complejos que presentan comportamientos no lineales, multivariantes (más de una entrada y salida) y con numerosas interferencias o acoplamientos. Para su control la industria viene adoptando distintas estrategias entre las que se pueden destacar: control de uno, dos y tres elementos, control maestro, control de combustión, con corrección de oxígeno, control de temperatura, de presión, etc. Todas estrategias mencionadas se basan principalmente en la aplicación de controladores PID a lazos simples, linealizando previamente el sistema entorno a un punto de trabajo, lo que supone una aproximación lineal; ya que el modelo de las calderas es no lineal. Estos métodos vienen siendo el estándar de aplicación en la industria de los últimos años. Sin embargo, en muchos casos resultan ser ineficientes provocando grandes consumos de combustible y contaminación.

Actualmente los sistemas de control en la industria de procesos deben satisfacer criterios económicos, asociados con el mantenimiento de las variables de proceso en sus puntos de ajuste (*set points*) minimizando dinámicamente una función de costo de operación, criterios de seguridad, medioambientales, y de calidad en la producción, la cual debe satisfacer ciertas especificaciones sujetas a una demanda normalmente variable.

Por ello, se puede considerar que en la actualidad el objetivo de todo sistema de control consiste en actuar sobre las variables manipuladas de forma que puedan satisfacerse múltiples y cambiantes criterios de funcionamiento (económicos, de seguridad, medioambientales o de calidad) en presencia de cambios en las características del proceso.

La gran variedad de metodologías actuales de control de procesos se enfrenta al cumplimiento de este objetivo. La diferencia entre las diversas técnicas radica básicamente en los compromisos hechos en la formulación matemática de los criterios de funcionamiento y en la elección de la manera de representar el proceso.

Adicionalmente, en la industria de procesos, los reguladores PID solucionan bien la mayoría de los problemas de control monovariable, como lo son flujo, presión, temperatura etc., sin embargo, en sistemas más complejos con interacción entre sus variables, perturbaciones etc., como lo es una columna de destilación, las llamadas estructuras de control convencionales no siempre dan buenos resultados y son difíciles de mantener.

En consecuencia, el problema a resolver es diseñar controladores clásico y avanzado y demostrar que el Control Predictivo como una estrategia de control avanzado permitirá un mejor desempeño que el Control Clásico como es el PID. En tal sentido, es que se plantea la siguiente problemática:

¿Es posible diseñar un Controlador Multivariable Avanzado que permita un mejor desempeño que un Controlador Clásico?

## **3.2 Objetivos y Alcances de la Investigación**

### **3.2.1 Objetivos**

#### **Objetivo general**

El objetivo general del presente trabajo es diseñar un Controlador Avanzado que permita optimizar el desempeño de un Controlador Clásico en una Caldera Industrial.

#### **Objetivo específico**

El objetivo específico del presente trabajo es diseñar un controlador que mejore sustancialmente, tanto en respuesta temporal como en estabilidad, el modelo de referencia basado en PID independientes. Para ello, se tratará de optimizar dichos controles y se hará uso de otras teorías de control más avanzadas como el Control Predictivo Multivariable, para controlar la presión de vapor, exceso de oxígeno y nivel de agua y comparar sus resultados con el PID Multivariable Desacoplado.

### **3.2.2 Alcances**

Existen multitud de diseños de calderas con características particulares; pero las calderas se pueden clasificar básicamente en dos grandes grupos: pirotubulares y acuotubulares. En las pirotubulares los gases calientes

procedentes de la combustión circulan por el interior de unos tubos estando bañados por el agua de la caldera. Sin embargo, en las acuotubulares el agua circula por interior de tubos formando un sistema cerrado y siendo calentado por los gases calientes. Son utilizadas generalmente cuando se requiere de grandes cantidades de vapor como, por ejemplo, en centrales termoeléctricas. Ésta última es el modelo de caldera que se estudiará en este trabajo. Los beneficios de este trabajo están dirigidos a especialistas en el área que pueden llevar a propuestas de implementación futuras. La investigación es básica y su codificación de acuerdo a la UNESCO es 04030501.

### **3.3 Importancia y Justificación de la Investigación**

Este proyecto surge con motivo de demostrar que en procesos acoplados es mucho más adecuado y eficiente el uso de controladores avanzados. En este caso, el proceso elegido es una caldera industrial que consta de tres salidas o variables a controlar y que presenta acoplamientos entre ellas, principal dificultad del presente proyecto. En definitiva, se aborda el control de un proceso Multivariable 3x3 no lineal y caracterizada por una gran interacción y fuertes restricciones en la magnitud y variación de las señales de control.

En principio, se considera un modelo desacoplado del proceso, para el cual se ha diseñado tres controladores PID independientes para cada variable de salida. Cada una de las salidas independientes sigue a trayectorias o referencias también independientes. Posteriormente se diseña el Control Predictivo Multivariable, con mejores resultados en el control de la presión de vapor, exceso de oxígeno y nivel de agua, comparados al PID Multivariable Desacoplado.

### **3.4 Formulación de la Hipótesis**

En función del planteamiento del problema, de las interrogantes planteadas del problema, de los antecedentes técnicos, así como de los objetivos generales y específicos que se persigue, es que se plantea la siguiente hipótesis:

“El diseño de un Controlador Avanzado como es el Control Predictivo, permitirá un mejor desempeño que un Controlador Clásico como el PID, en el control de

la presión de vapor, exceso de oxígeno y nivel de agua de una caldera industrial”.

En este sentido, las variables que se operan son las siguientes:

**Variables dependientes:**

- Presión de vapor
- Exceso de oxígeno, y
- Nivel de agua.

**Variables independientes:**

- Caudal de combustible
- Caudal de aire, y
- Caudal de agua



## IV. MARCO TEÓRICO

### 4.1 Introducción sobre la Caldera Industrial

Una caldera puede describirse como un generador de vapor o como “la combinación de equipos para producir o recuperar calor, junto con aparatos para transferir el calor disponible a un fluido” (según el código ASME). En otras palabras, Las Calderas o Generadores de vapor son instalaciones industriales que, aplicando el calor de un combustible sólido, líquido o gaseoso, vaporizan el agua para aplicaciones en la industria [6].

Las calderas son ampliamente empleadas en plantas de proceso como medio de calentamiento de fluidos o de aire, vaporización, trazado de vapor, de aireación del agua, generadores de vacío, generadores de potencia en turbinas, limpieza y mantenimiento de equipos de proceso, etc.

### 4.2 Clasificación de las Calderas

Las calderas en correspondencia con el **contenido de sus tubos** se clasifican en:

#### 1. Acuotubulares: el agua va por dentro de los tubos

Son aquellas calderas en las que el fluido de trabajo se desplaza por el interior de los tubos durante su calentamiento, y los gases de combustión circulan por el exterior de los mismos. Son de aplicación cuando se requiere una presión de trabajo por encima de los 22 bar [2].

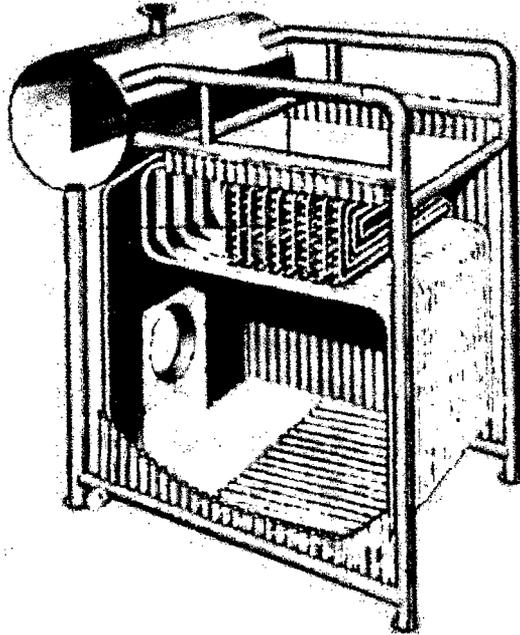
Por su diseño, tiene un bajo volumen de agua, y por lo tanto, pueden ser clasificadas como primera clase.

Las exigencias de la calidad del agua de alimentación a estas calderas suele ser superior al requerido para otro tipo de calderas.

Los generadores instantáneos también forma parte de la familia de calderas acuotubulares.

En la Figura 4.1 se muestra el detalle de una caldera acuotubular.

**Figura 4.1**  
**Detalle de una caldera acuotubular**



**Fuente:** Consejería de Economía y Hacienda, Comunidad de Madrid. Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes. 2012.

## **2. Pirotubulares: el fuego va por dentro de los tubos**

Son aquellas calderas en las que los gases de la combustión circulan por el interior de los tubos y el líquido se encuentra en un recipiente atravesado por dichos tubos. Son de aplicación principalmente cuando la presión de trabajo es inferior a los 22 bar [2].

Por su diseño, tienen un gran volumen de agua, por lo que suelen estar clasificadas en la segunda clase.

Dicho volumen de agua les permite adaptarse mejor a las variaciones de la instalación que las calderas acuotubulares.

Las calderas pirotubulares usadas hoy en día evolucionan de los primeros diseños de un recipiente de presión cilíndrica o esférico montado sobre el fuego con la llama y los gases calientes alrededor de la carcasa de la caldera (Dukelow

*Jus*

S.G., 1999). Este diseño ha sido mejorado mediante la instalación de tubos longitudinales en el recipiente de presión y haciendo pasar los gases de combustión a través de los tubos. Esto incrementa el área de transferencia de calor y mejora los coeficientes de transferencia de calor.

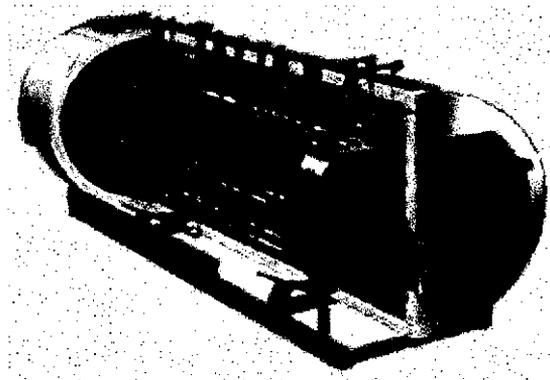
Las exigencias de la calidad del agua de alimentación son menores a las requeridas por las calderas acuotubulares.

Las calderas pirotubulares se clasifican en función de la disposición del haz tubular en:

- a) Calderas horizontales
- b) Calderas verticales
- c) Calderas de dos (2) pasos de gases
- d) Calderas de tres (3) pasos de gases

En la Figura 4.2 puede apreciarse el detalle de una caldera pirotubular horizontal.

**Figura 4.2**  
**Detalle de una caldera pirotubular horizontal**



**Fuente:** Consejería de Economía y Hacienda, Comunidad de Madrid. Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes. 2012.

**3. Caldera de fundición seccional:** la caldera se compone de secciones huecas dentro de las cuales circula el agua.

Podemos decir entonces que, Las calderas acuotubulares son utilizadas principalmente cuando se requiere de elevadas cantidades de vapor, por ejemplo en centrales termoeléctricas. Por el contrario, las calderas piro tubulares se utilizan en procesos que no necesitan un elevado consumo de vapor. Este trabajo centra su atención en las calderas piro tubulares debido a que estos equipos son los más difundidos en el ámbito industrial en diversas aplicaciones.

De acuerdo a la **tecnología**, las calderas pueden clasificarse en:

1. **Calderas de agua caliente:** son aquellas en las que el fluido caloportador es el agua y tienen una temperatura máxima de servicio inferior a 100 °C. Este tipo de calderas pueden ser acuotubulares o piro tubulares.
2. **Calderas de agua sobrecalentada:** son aquellas en las que el fluido caloportador es el agua y tienen una temperatura máxima de servicio superior a 110 °C. Este tipo de calderas pueden ser acuotubulares o piro tubulares.
3. **Calderas de fluido térmico:** son aquellas en las que el fluido caloportador es distinto al agua. Este tipo de calderas pueden ser únicamente acuotubulares.
4. **Calderas de vapor:** son aquellas en las que el fluido caloportador es vapor de agua. Este tipo de calderas pueden ser acuotubulares o piro tubulares.

Los parámetros principales que se han de tener en cuenta a la hora de seleccionar una caldera, son los siguientes:

- ✓ Potencia útil (para las calderas de agua caliente, agua sobrecalentada y fluido térmico) según el requerimiento térmico de la instalación a la cual van a alimentar.
- ✓ Producción de vapor (para las calderas de vapor) según el consumo de vapor necesario en el proceso.
- ✓ Presión de trabajo en continuo (para todos los tipos) de acuerdo con la presión necesaria en el consumidor más alejado del centro de producción.
- ✓ Temperatura de trabajo en continuo, según el requerimiento constante de la instalación.

Otro de los aspectos importantes que se deben considerar es el de la emisión de gases contaminantes.

Uno de estos gases contaminantes son los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), cuya emisión está regulada en Europa por muchas normativas y disposiciones legislativas, y considerada en la Ley General sobre Medio Ambiente y Recursos Naturales (UNESCO, 2000).

Las calderas como objeto de control automático presentan un comportamiento dinámico difícil, con múltiples entradas y salidas, múltiples interrelaciones entre estas variables, así como incertidumbres.



## V. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología empleada es la siguiente:

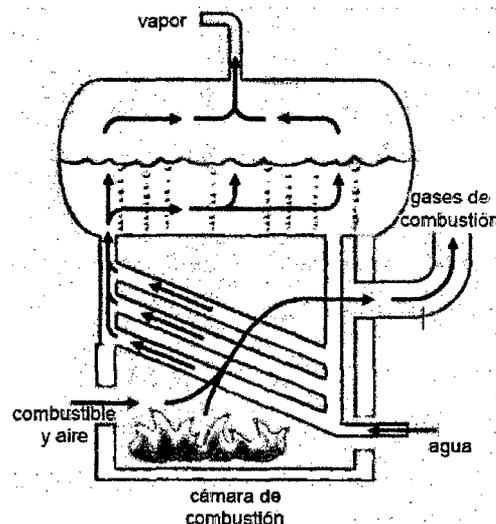
- a. Modelar matemáticamente el proceso (caldera industrial).
- b. Diseñar y simular la estrategia de Control PID Multivariable Desacoplado.
- c. Diseñar y simular la estrategia de Control Predictivo Multivariable Desacoplado.
- d. Diseñar y simular la estrategia de Control Predictivo Multivariable Acoplado.
- e. Efectuar las conclusiones en base a los resultados obtenidos y efectuar algunas recomendaciones para trabajos futuros.

### 5.1 Modelado de la Caldera Industrial

#### 5.1.1 Funcionamiento de la Caldera Industrial

En principio, la caldera puede ser considerada 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 5.1.

**Figura 5.1**  
**Planta industrial de generación de vapor**



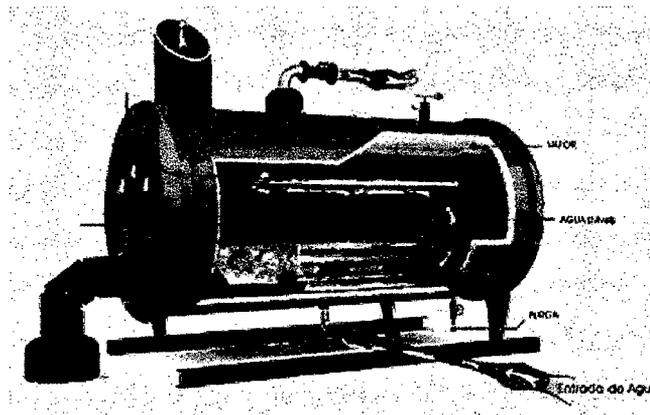
**Fuente:** I. Fernández y C. Rodríguez, "Control de una Caldera (versión: febrero 2010)". Universidad de Almería, junio de 2010.

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 [2], [6].

Los gases de combustión, como resultante de esta pérdida de calor, se enfrían y abandonan el hogar.

El vapor generado a través de la transferencia de calor a presión constante circula hacia el sistema de distribución, el cual se conforma por un conjunto de válvulas y tuberías aisladas, para finalmente distribuir el vapor a las unidades de trabajo. Los detalles de una caldera pirotubular se muestra en la Figura 5.2.

**Figura 5.2**  
**Detalle de una caldera pirotubular horizontal**



**Fuente:** I. Fernández y C. Rodríguez, "Control de una Caldera (versión: febrero 2010)". Universidad de Almería, junio de 2010.

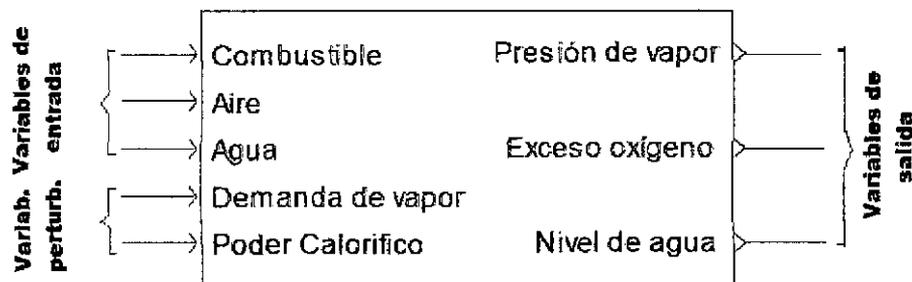
### 5.1.2 Características del Modelo de la Caldera Industrial

El modelo de la caldera es representado por un bloque de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO) tal como se puede observar en la Figura 5.3. El modelo presenta:

- a) 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.
- b) Tres variables de salida, que son las variables a ser controladas, las cuales son: 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.
- c) Dos entradas adicionales para simular los efectos de otras variables independientes que afectan al proceso y no son manipulables, es decir, son variables de perturbación: la Demanda de vapor y el Poder calorífico del combustible.

**Figura 5.3**

**Bloque MIMO representativo de la caldera**



**Fuente:** Autoría propia.

*Aut*

La Demanda de vapor, con valor en el rango de 0% al 100% permitirá solicitar que la caldera genere el vapor necesario para atender la demanda. Esta cuarta entrada tendrá 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.

El Poder calorífico del combustible representa la fracción porcentual del poder calorífico nominal del combustible, un valor de 100% representa el valor nominal. Esta quinta entrada tendrá también la categoría de perturbación medible para la estructura

de control que se desee incorporar en este proceso. Este tipo de perturbación es muy frecuente en la industria ya que los combustibles utilizados se ven afectados en su composición por las necesidades del proceso.

### 5.1.3 Modelo de Matriz de Transferencia

Debido a que modelar analíticamente el proceso es complicado, lo que se ha considerado es tomar como datos los resultados del proceso de identificación realizada en el trabajo de I. Fernández y C. Rodríguez [6], en el que se usaron entradas tipo escalón, manteniéndose las entradas entorno a su nivel de referencias y aplicándose escalones del 10% de su valor de referencia para cada una de las entradas, manteniendo las demás invariantes. Este proceso también se llevó a cabo con la perturbación manipulable del sistema.

Para hallar los modelos, los autores utilizaron el método de la curva de reacción y la herramienta "ident" de Matlab que, por medio del método de mínimos cuadrados, se utilizó para los sistemas más complejos que disponían de fase no mínima.

Los resultados de la identificación permitieron obtener el modelo de matriz de transferencia, las que se pasan a anotar:

$$\begin{aligned}
 G_{11}(s) &= \frac{Y_1(s)}{U_1(s)} = \frac{0.37361}{(1+48.0975s)} e^{-7s}; & G_{12} &= \frac{Y_1(s)}{U_2} = 0; \\
 G_{13}(s) &= \frac{Y_1(s)}{U_3(s)} = \frac{-0.1519981}{(1+212.1s)} e^{-5.4s}; & G_{21}(s) &= \frac{Y_2(s)}{U_1(s)} = \frac{-6.8}{(1+4.85s)} e^{-6.2s}; \\
 G_{22}(s) &= \frac{Y_2(s)}{U_2(s)} = \frac{6.2602}{(1+7.36s)} e^{-11.2s}; & G_{23} &= \frac{Y_2(s)}{U_3} = 0; \\
 G_{31}(s) &= \frac{Y_3(s)}{U_1(s)} = \frac{(0.8413s - 0.006205)}{(0.05417s^4 + 54.2s^3 + 30.9s^2 + s)}; & G_{32} &= \frac{Y_3(s)}{U_2} = 0; \\
 G_{33}(s) &= \frac{Y_3(s)}{U_3(s)} = \frac{0.0093007(1+5963.65s)}{s(1+5265.7s)} e^{-8.6s};
 \end{aligned} \tag{5.1}$$

Asimismo se obtuvieron las funciones de transferencia medibles respecto a la perturbación medible (Demanda de vapor):

$$\begin{aligned}
G_{11d}(s) &= \frac{Y_1(s)}{D_1(s)} = \frac{-0.7956}{(1+261.12s)} e^{-15s}; & G_{21d}(s) &= \frac{Y_2(s)}{D_1(s)} = 0; \\
G_{31d}(s) &= \frac{Y_3(s)}{D_1(s)} = \frac{0.01566s - 0.0001252}{(s^2 + 0.07554s)};
\end{aligned} \tag{5.2}$$

Las variables de entrada y de salida son:

$U_1$ : combustible;  $U_2$ : aire;  $U_3$ : agua;  $D_1$ : demanda de vapor

$Y_1$ : presión de vapor;  $Y_2$ : exceso de oxígeno;  $Y_3$ : nivel de agua

## 5.2 Diseño de la Estrategia de Control PID Multivariable Desacoplado

Considerando el informe anterior, el modelo de matriz de transferencia de la caldera se puede presentar de la siguiente manera:

$$\begin{pmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ Y_3(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & 0 & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & 0 \\ G_{31}(s) & 0 & G_{33}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ U_3(s) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G_{11d}(s) & 0 \\ 0 & 0 \\ G_{31}(s) & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} D_1(s) \\ D_2(s) \end{pmatrix} \tag{5.3}$$

De la ecuación (5.3) se puede observar que el modelo de la caldera depende solo de la perturbación medible  $D_1$ , que viene a ser la demanda de vapor, y es independiente del poder calorífico ( $D_2$ ); en consecuencia la ecuación (5.3) puede representarse mediante la ecuación (5.4), así:

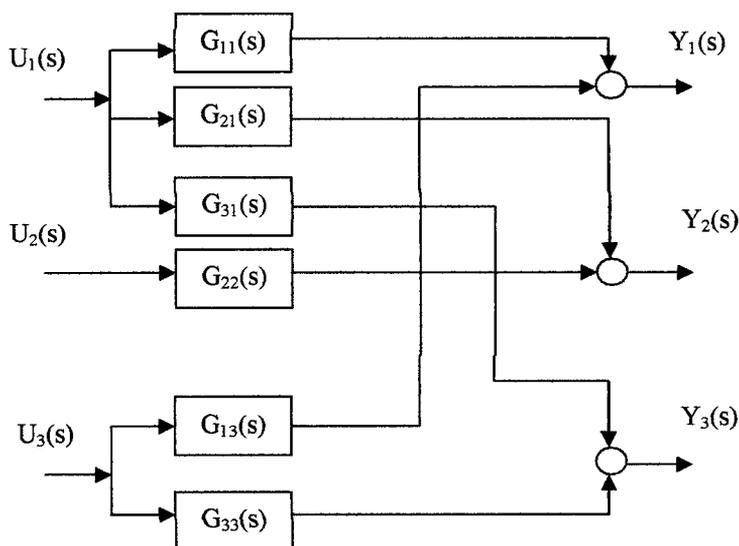
$$\begin{pmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \\ Y_3(s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} G_{11}(s) & 0 & G_{13}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) & 0 \\ G_{31}(s) & 0 & G_{33}(s) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \\ U_3(s) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} G_{11d}(s) \\ 0 \\ G_{31}(s) \end{pmatrix} D_1(s) \tag{5.4}$$

El diagrama de bloques correspondiente puede observarse en la Figura 5.4.

El diseño del controlador PID Multivariable desacoplado consiste en asumir un modelo simplificado de la caldera, en el que el efecto de los términos cruzados (acoplamientos) se consideran despreciables, esto es los términos  $G_{12}(s) = G_{13}(s) = G_{21}(s) = G_{23}(s) = G_{31}(s) = G_{32}(s) = 0$ . Esta simplificación permite el diseño de tres controladores PID independientes (Controlador PI Multivariable Desacoplado), es decir habrá un controlador para la presión, otro para el exceso de oxígeno y otro para el nivel

de agua. Asimismo, considerando que el sistema térmico (caldera) es un sistema por naturaleza de respuesta lenta, es conveniente considerar las componentes proporcional e integral del controlador PID [7], [9], lo que conlleva al diseño del Controlador PI Multivariable Desacoplado.

**Figura 5.4**  
**Diagrama de bloques del modelo de la caldera.**



**Fuente:** Autoría propia.

Antes de plantear de empezar con el diseño correspondiente, se considerarán las variables de entrada y salida en los puntos de operación, para lo cual se presenta la Tabla 5.1 [6].

El algoritmo de un controlador PI es el siguiente:

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \frac{(s + 1/T_i)}{s} \quad (5.5)$$

**Tabla 5.1**

**Puntos de operación de entrada y salida de la caldera.**

<b>ENTRADAS</b>	<b>SALIDAS</b>
Caudal de combustible (0) = 35.2%	Presión de vapor (0) = 60%
Caudal de aire (0) = 36.01%	Exceso de oxígeno (0) = 50%
Caudal de agua (0) = 57.57%	Nivel de agua (0) = 55%
Demanda de vapor (0) = 46.36%	

**Fuente:** I. Fernández y C. Rodríguez, "Control de una Caldera (versión: febrero 2010)". Universidad de Almería, junio de 2010.

En tal sentido, se tendrán tres controladores PI independientes:

$$G_{e1}(s) = \frac{U_1(s)}{E_1(s)}; \quad G_{e2}(s) = \frac{U_2(s)}{E_2(s)}; \quad G_{e3}(s) = \frac{U_3(s)}{E_3(s)} \quad (5.6)$$

Considerando que el sistema en lazo cerrado debe responder en 1900 segundos, teniendo como referencias o consignas el 60% para la presión de vapor ( $r_1$ ), 50% para el exceso de oxígeno ( $r_2$ ), y el 50% para el nivel de agua ( $r_3$ ), los valores de los parámetros de cada uno de los controladores PI se muestran en la Tabla 5.2.

**Tabla 5.2**  
**Valores de los parámetros de los controladores PI.**

	$K_p$	$T_i$
Controlador PI 1	2.5	29.2
Controlador PI 2	0.08	16.5
Controlador PI 3	8.25	78.5

**Fuente:** Autoría propia.

La simulación mediante Matlab genera los resultados mostrados en el Apéndice C.

## 5.3 Diseño de la estrategia de Control Predictivo Multivariable Desacoplado

### 5.3.1 Introducción

El control predictivo basado en modelos (MBPC) se impuso en la década de los 80 [1], [3], [4], ofreciendo un algoritmo de control que usa el modelo del proceso para calcular y optimizar las predicciones de las acciones de control y de la salida controlada. El modelo a usar es el modelo CARIMA y entre los parámetros de diseño tenemos el horizonte de predicción máximo ( $N_2$ ), el horizonte de predicción mínimo ( $N_1$ ), el horizonte de control, y parámetros de peso y filtraje entre otros.

El Control Predictivo basado en un modelo es una metodología de control desarrollada alrededor de ciertos principios comunes, entre los cuales podemos citar:

- a) Uso explícito de un modelo del proceso para pronosticar su salida a controlar en instantes de tiempo futuro.
- b) Cálculo de una acción de control óptima basada en la minimización de las funciones de costo, posiblemente incluyendo restricciones en las variables del proceso.

La notación usada es la siguiente:

- $t$ , denota el índice de tiempo discreto ( $t = 0, 1, 2, \dots$ )
- $y(t)$ , es la salida del proceso (variable controlada)
- $u(t)$ , denota la entrada al proceso (variable manipulada o variable de control)
- $w(t)$ , representa la trayectoria deseada ("set point")
- $r(t)$ , denota la trayectoria de referencia
- $u(t+k/t)$ , denota los valores futuros de la entrada (variable manipulada: MV) en el tiempo  $t+k$  postulados en el tiempo  $t$
- $y(t+k/t)$ , denota los valores futuros de la salida (variable controlada: CV) basado en las mediciones disponibles en el tiempo  $t$ :  
 $\{y(t), y(t-1), \dots, u(t-1), u(t-2), \dots\}$   
y en los valores futuros de la entrada postulados en el tiempo  $t$ :  
 $\{u(t/t), u(t+1/t), \dots\}$ .

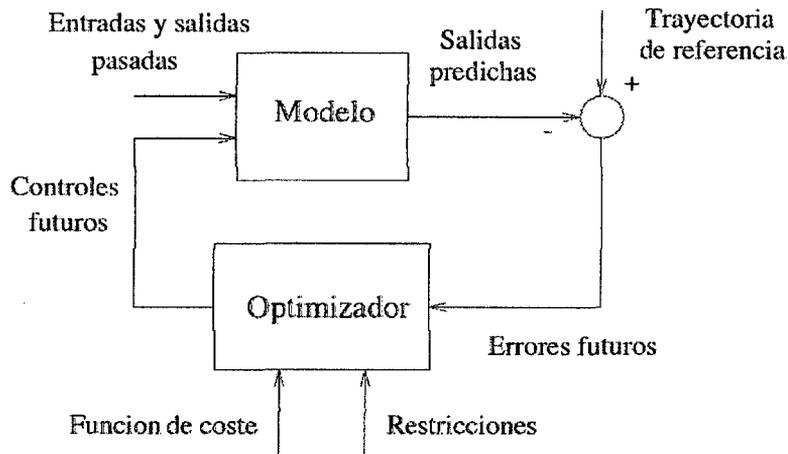
Sobre la estrategia de control MBPC [3], [10], se pueden mencionar algunos elementos importantes:

- ✓ Predicción bajo el modelo del proceso

- ✓ Especificación de una trayectoria
- ✓ Estructuración de la futura ley de control
- ✓ Definición de la función de costo (y restricciones)
- ✓ Cálculo de una acción de control óptima.

La estrategia MBPC puede ser visualizada en el diagrama de bloques de la Figura 5.5.

**Figura 5.5:** Estrategia del Control Predictivo.

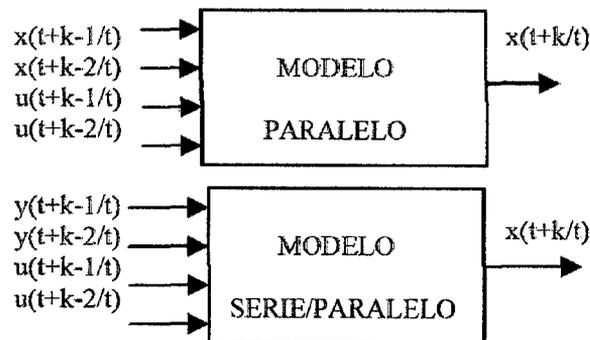


**Fuente:** E. Camacho y C. Bordons. **Control predictivo: pasado, presente y futuro.** 2001.

### 5.3.2 Modelo del Predictor

Existen dos posibles esquemas de implementación, los cuales se muestran en la Figura 5.6 para un modelo de segundo orden:

**Figura 5.6:** Esquemas representativos de los modelos paralelo y serie/paralelo



**Fuente:** E. Camacho y C. Bordons. **Model Predictive Control.** 2004.

✓ **El Modelo Paralelo**

El modelo paralelo sólo puede ser usado para procesos estables y es el que se implementa por defecto. En este caso la salida  $y(t)$  se realimenta a sí misma. Su expresión es:

$$\begin{aligned} y(t) &= \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(t) + \frac{1}{1-z^{-1}}e(t) \\ &= x(t) + n(t) \end{aligned} \quad (5.7)$$

con

$$\begin{aligned} C(z^{-1}) &= 1, \quad D(z^{-1}) = (1-z^{-1}) \\ n(t) &= \frac{1}{1-z^{-1}}e(t); \quad x(t) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}u(t) \end{aligned}$$

Por consiguiente, para cualquier  $t$ :

$$\begin{aligned} x(t) &= (1 - A(z^{-1}))x(t) + B(z^{-1})u(t) \\ &= -a_1x(t-1) - \dots - a_{n_a}x(t-n_a) \\ &\quad + b_1u(t-1) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b) \end{aligned} \quad (5.8)$$

Siendo su expresión genérica predictiva:

$$\begin{aligned} x(t+k/t) &= -a_1x(t+k-1/t) - \dots \\ &\quad - a_{n_a}x(t+k-n_a/t) + b_1u(t+k-1/t) + \dots \\ &\quad + b_{n_b}u(t+k-n_b/t) \end{aligned} \quad (5.9)$$

La expresión genérica predictiva para la perturbación es:

$$n(t+k/t) = n(t+k-1/t) + e(t+k/t) \quad (5.10)$$

✓ **El Modelo Serie/Paralelo**

El modelo serie-paralelo puede ser usado en procesos estables e inestables. En este caso, la perturbación  $n(t)$  se escoge diferente al del modelo paralelo como sigue:

$$A(z^{-1})y(t) = B(z^{-1})u(t) + \frac{A(z^{-1})}{1-z^{-1}}e(t) \quad (5.11)$$

siendo

$$C(z^{-1}) = A(z^{-1}), \quad D(z^{-1}) = (1-z^{-1})$$

La salida sin perturbación  $x(t)$  toma entonces la forma:

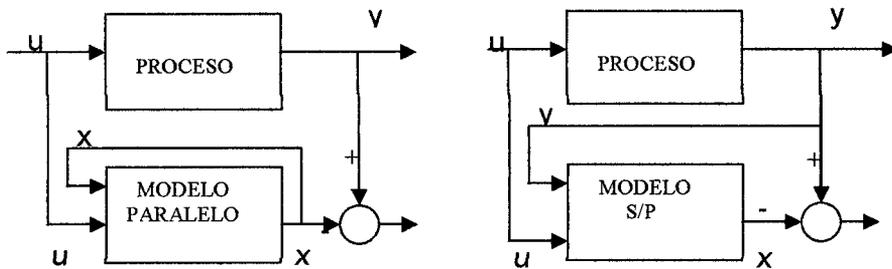
$$\begin{aligned}
 x(t) &= (1 - A(z^{-1}))y(t) + B(z^{-1})u(t) \\
 &= -a_1y(t-1) - \dots - a_{n_a}y(t-n_a) \\
 &\quad + b_1u(t-1) + \dots + b_{n_b}u(t-n_b)
 \end{aligned}
 \tag{5.12}$$

Por consiguiente su expresión genérica predictiva del modelo serie/paralelo es:

$$\begin{aligned}
 x(t+k/t) &= -a_1y(t+k-1/t) - \dots - a_{n_a}y(t+k-n_a/t) + b_1u(t+k-1/t) + \dots \\
 &\quad + b_{n_b}u(t+k-n_b/t)
 \end{aligned}
 \tag{5.13}$$

La diferencia entre los dos modelos puede deducirse de la Figura 5.7.

**Figura 5.7:** Implementación de los modelos Paralelo y Serie/Paralelo.



**Fuente:** E. Camacho y C. Bordons. **Control predictivo: pasado, presente y futuro.** 2001.

### 5.3.3 El Controlador Predictivo

El objetivo del controlador predictivo es determinar el vector de control  $u(t+k/t)$ , con  $k = 0, \dots, N_2-1$ , que minimice la siguiente función de costo:

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} [r(t+k/t) - y(t+k/t)]^2 + \lambda \sum_{k=0}^{N_u-1} [\Delta u(t+k/t)]^2
 \tag{5.14}$$

donde:

$$\Delta u(t+k/t) = u(t+k/t) - u(t+k-1/t)
 \tag{5.15}$$

con  $\Delta u(t+k/t) = 0$  para  $k \geq N_u$

La trayectoria de referencia está representada por la ecuación:

$$r(t+k/t) = \alpha r(t+k-1/t) + (1-\alpha)\omega(t+k/t) \quad (5.16)$$

Los parámetros de diseño son:

- N1: Horizonte de predicción mínimo
- N2: Horizonte de predicción máximo (por defecto  $N_2 = N_1 + 1 \dots N_1 + 10$ )
- Nu : Horizonte de control (por defecto  $N_u = 1$ )
- N1 ... N2 = Horizonte de coincidencia (por defecto  $N_1 =$  tiempo muerto)
- $\lambda$  : Parámetro de ponderación; por defecto considerar cero.
- $\alpha$  : Parámetro de filtraje (por defecto considerar cero).

Es importante observar que:

1. La trayectoria de referencia dada en (5.55) constituye un filtro de primer orden para  $w(t)$ . Este filtro se puede representar mediante la siguiente función de transferencia:

$$\frac{r(z)}{\omega(z)} = \frac{1-\alpha}{1-\alpha z^{-1}} \quad (5.17)$$

2. El filtro para  $w(t)$  se puede implementar fuera del lazo de control, no afectando de esta manera a la estabilidad, pero sí contribuyendo al rechazo al ruido.

### ✓ Respuesta Libre y Respuesta forzada

Conceptualmente, la respuesta futura  $y(t+k/t)$  puede ser considerada como el resultado acumulativo de dos efectos:

$$y(t+k/t) = y_{libre}(t+k/t) + y_{forzada}(t+k/t) \quad (5.18)$$

donde:

$y_{libre}(t+k/t)$  : es el efecto del control pasado

$y_{forzada}(t+k/t)$  : es el efecto de la acción de control futuro y a una secuencia de entradas escalón.

El efecto acumulativo de todos los escalones es:

$$y_{forz}(t+k/t) = g_k \Delta u(t/t) + g_{k-1} \Delta u(t+1/t) + \dots + g_{k-N_u+1} \Delta u(t+N_u-1/t) \quad (5.19)$$

donde los parámetros  $g_1, g_2, \dots, g_{N_2}$  son los coeficientes de la respuesta del sistema al escalón unitario.

De la ecuación (5.58) se puede obtener la siguiente expresión para la componente forzada:

$$Y_{forz} = GU \quad (5.20)$$

donde:

$$y_{forz} = \begin{bmatrix} y_{forz}(t+N_1/t) \\ y_{forz}(t+N_1+1/t) \\ \dots\dots\dots \\ \dots\dots\dots \\ y_{forz}(t+N_2/t) \end{bmatrix}; \quad G = \begin{bmatrix} g_{N_1} & g_{N_1-1} & g_{N_1-2} & \dots \\ g_{N_1+1} & g_{N_1} & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{N_2} & g_{N_2-1} & \dots & g_{N_2-N_u+1} \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{bmatrix} \Delta u(t/t) \\ \Delta u(t+1/t) \\ \dots \\ \Delta u(t+N_u-1/t) \end{bmatrix}$$

✓ **La Ley de Control**

Con la notación anterior, la función de costo resulta:

$$(R-Y)^T (R-Y) + \lambda U^T U = [(R-Y) - GU]^T [(R-Y) - GU] + \lambda U^T U \tag{5.21}$$

la cual es una forma cuadrática en U, cuya minimización por diferenciación resulta en la siguiente solución óptima:

$$U^* = (G^T G + \lambda I)^{-1} G^T (R-Y) \tag{5.22}$$

Es importante indicar que:

- Solamente el primer elemento de  $\Delta u(t/t)$  de  $U^*$  es necesario para computar la entrada de control actual  $u(t) = u(t-1) + \Delta u(t/t)$ . El mismo procedimiento se repite para la nueva medición  $y(t+1)$  en el próximo instante de tiempo  $t+1$ . Este procedimiento se denomina el principio del "horizonte retroactivo".
- La matriz  $[G^T G + \lambda I]$  a ser invertida tiene dimensión  $N_u \times N_u$ . Para el caso por defecto  $N_u = 1$ , se obtiene una ley de control escalar (con muy buenos resultados en muchos casos prácticos) de la forma:

$$\Delta u(t) = \frac{\sum_{k=N_1}^{N_2} g_k [r(t+k/t) - y_{libre}(t+k/t)]}{\left( \sum_{k=N_1}^{N_2} g_k^2 + \lambda \right)} \tag{5.23}$$

- Otra optimización para la estructuración del escenario de control consiste en el empleo de funciones base de la forma:

$$u(t+k/t) = \sum_i \mu_i B_i \quad (5.24)$$

La optimización de la señal de control  $u(t+k/t)$  es ahora con respecto a los parámetros  $\mu_i$ .

Para nuestro caso de estudio, se implementan tres Controladores Predictivos Monovariantes independientes, cuyos parámetros de muestran en la Tabla 5.3.

**Tabla 5.3:** Parámetros del Controlador Predictivo Multivariable

	Horizonte de Predicción Máximo (N2)	Tiempo de muestreo (T, Seg.)	Incremento del control ( $\Delta u$ , %)
Controlador Predictivo 1	20	0.05	0.1
Controlador Predictivo 2	25	1	0.5
Controlador Predictivo 3	20	4	2

**Fuente:** Autoría propia.

La simulación mediante Matlab genera los resultados mostrados en el Apéndice D.

#### 5.4 Diseño de la estrategia de Control Predictivo Multivariable Acoplado

En la sección anterior, se presentaron la respuesta de tres controladores predictivos independientes, es decir la respuesta de un sistema simplificado. En esta sección se procede al diseño de un Controlador Predictivo Multivariable Acoplado; es decir, un solo controlador para toda la caldera, que presenta acoplamientos entre variables.

La expresión general del modelo de la planta en Z que relaciona las entradas y las salidas está dada por la ecuación (5.25).

$$(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_{n-1} z^{-n+1} + a_n z^{-n})Y(z) = B_1(z)U_1(z) + B_2(z)U_2(z) + \dots + B_m(z)U_m(z) \quad (5.25)$$

En tal sentido, la expresión de la salida de la planta Multivariable acoplada, puede estar dada por la ecuación (5.26), así:

$$Y_n = \frac{B_{n1}(z)}{A_{n1}(z)}U_1(z) + \frac{B_{n2}(z)}{A_{n2}(z)}U_2(z) + \dots + \frac{B_{nm}(z)}{A_{nm}(z)}U_m(z) \quad (5.26)$$

Para el caso de la caldera, el número de entradas es  $m=3$  y el número de salidas es  $n=3$ .

Considerando valores de los puntos de operación para el combustible, aire, y agua de alimentación, así como los puntos de consigna iniciales y finales (según el programa calderainit.m), tal como se muestra a continuación:

```
% punto inicial de operacion
% 'Combustible','Aire','Agua de alimentación'
Uo=[35.2;36.0;57.57];
%puntos de consigna iniciales y finales
%Presion vapor, O2, Nivel calderín
Yo=[60;60;55];
Yf=[50;20;55];
```

La matriz de polinomios característica de la salida viene dada por:

$$\text{mat } A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -2.8131 & -1.8063 & -2.7052 \\ 2.6334 & 0.8230 & 2.4412 \\ -0.8202 & 0.0000 & -0.7360 \end{pmatrix}$$

Considerando la ecuación (5.26), para cada salida se obtendrá una matriz de polinomios característica de los mandos (señales de control), así:

$$M_m = (B_{m1} \quad B_{m2} \quad B_{m3})$$

La matriz que agrupa a todos los polinomios característicos de los mandos, viene dada por:

$$\text{mat } Bu = (M_1 \quad M_2 \quad M_3)$$

El programa en Matlab denominado coeficientes\_predictivo\_MIMO.m, arroja los siguientes resultados:

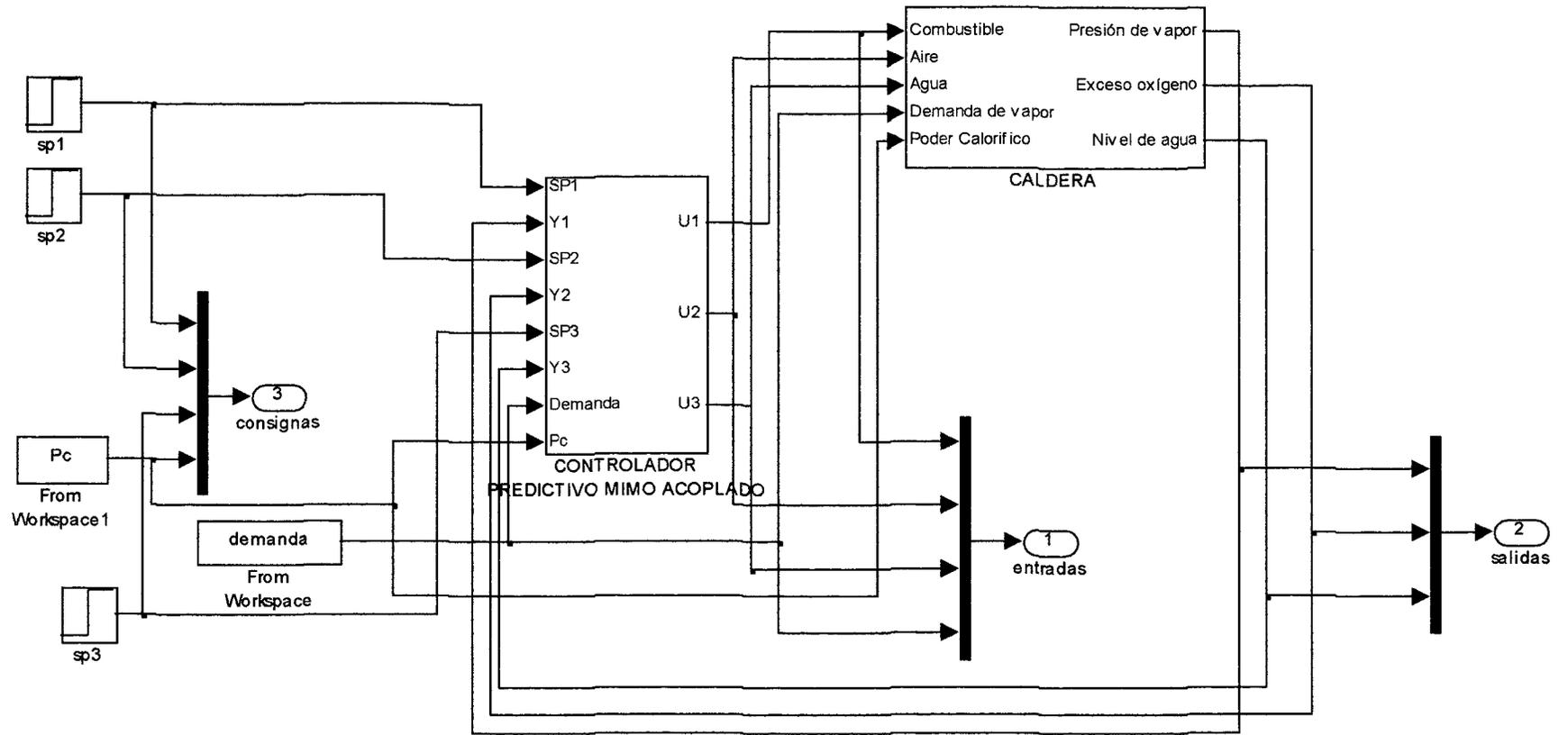
```
M1 =
-1.0527    0 -2.8131
-0.8760    0  2.6334
         0    0 -0.8202
```

$$\begin{array}{ccc}
 & 0 & 0 & 0 \\
 & 0 & 0 & 0 \\
 M2 = & & & \\
 & -3.3655 & -0.6258 & 0 \\
 & 3.6372 & -0.9420 & 0 \\
 & -1.2794 & 0.6419 & 0 \\
 & -0.0017 & 0 & 0 \\
 & 0 & 0 & 0 \\
 M3 = & & & \\
 & -0.1198 & 0 & -3.8866 \\
 & -7.3619 & 0 & 4.8823 \\
 & 12.3649 & 0 & -0.6943 \\
 & 0 & 0 & -3.3531 \\
 & 0 & 0 & 2.6927
 \end{array}$$

En la Figura 5.8 se aprecia el esquema en Simulink del sistema de Control Predictivo Multivariable Acoplado.

Es necesario anotar que las pruebas realizadas del Control Predictivo Multivariable Acoplado no son las adecuadas comparadas al Control Predictivo Multivariable Desacoplado, debido a los tiempos de respuesta distintas en cada una de las variables, que ha dificultado considerar un único período de muestreo, asimismo debido a las interacciones entre las variables, en forma muy particular el efecto de la presión de vapor frente a las otras dos variables de salida. En tal sentido, se ha considerado innecesario mostrar sus resultados.

**Figura 5.8:** Diagrama de bloques del Sistema de Control Predictivo Multivariable Acoplado.



**Fuente:** Autoría propia.

*Deus*

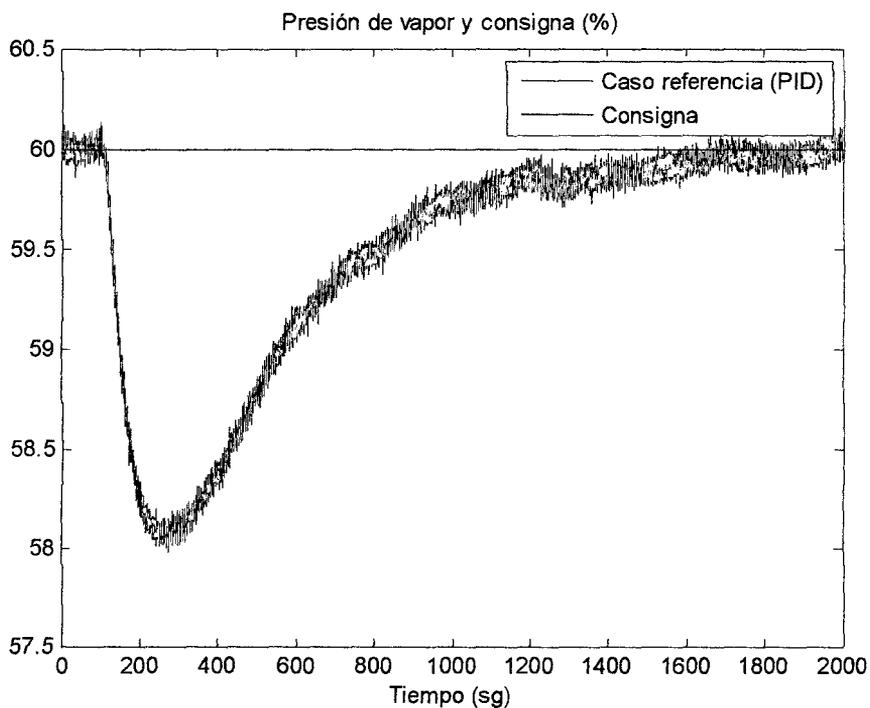
## VI RESULTADOS

### 6.1 Resultados de la estrategia de Control PID Multivariable Desacoplado

Mediante el programa en Matlab, denominado *Cont\_Caldera\_PID\_Desacoplado.m*, nos permite obtener los resultados que se muestran en las figuras 6.1, 6.2 y 6.3, que viene a ser las salidas controladas para presión, Oxígeno y nivel en el calderín.

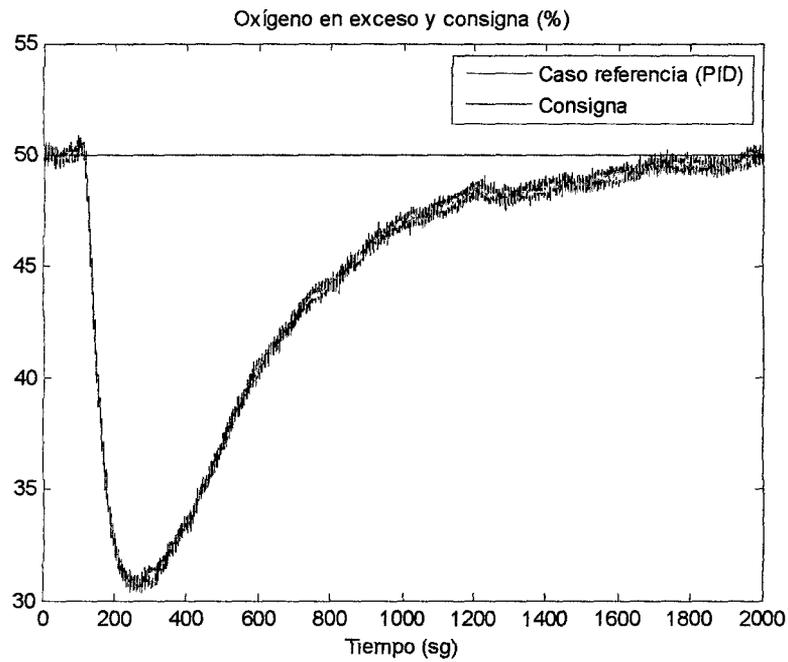
Similarmente, las señales de control generadas por los controladores PID se muestran en las figuras 6.4, 6.5, 6.6.

**Figura 6.1:** Salida controlada (Presión de vapor) vs Consigna

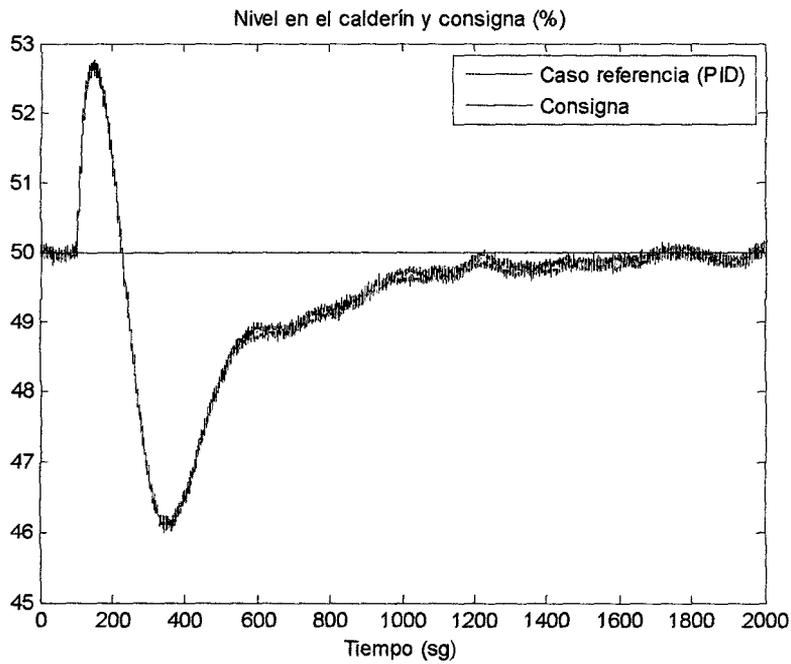


*[Firma manuscrita]*

**Figura 6.2:** Salida controlada (Oxígeno) vs Consigna

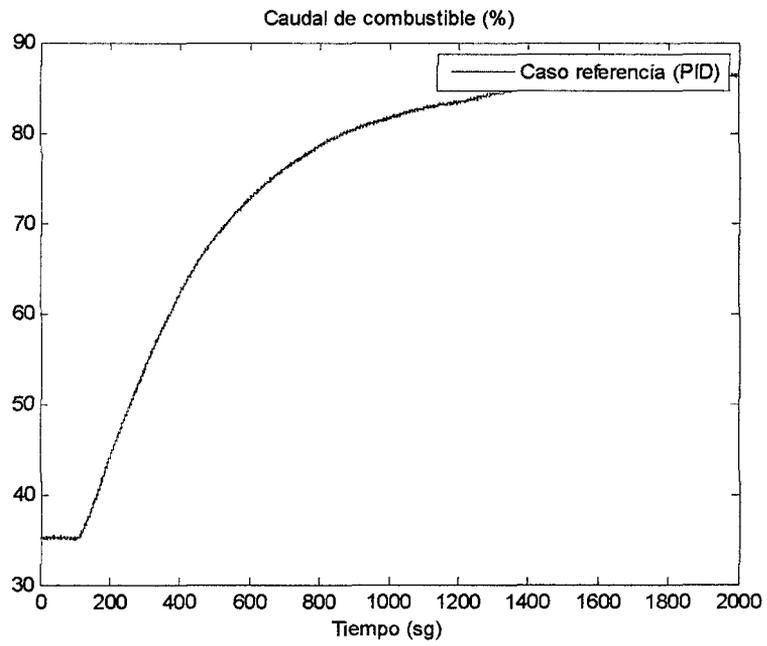


**Figura 6.3:** Salida controlada (Nivel en el calderín) vs Consigna

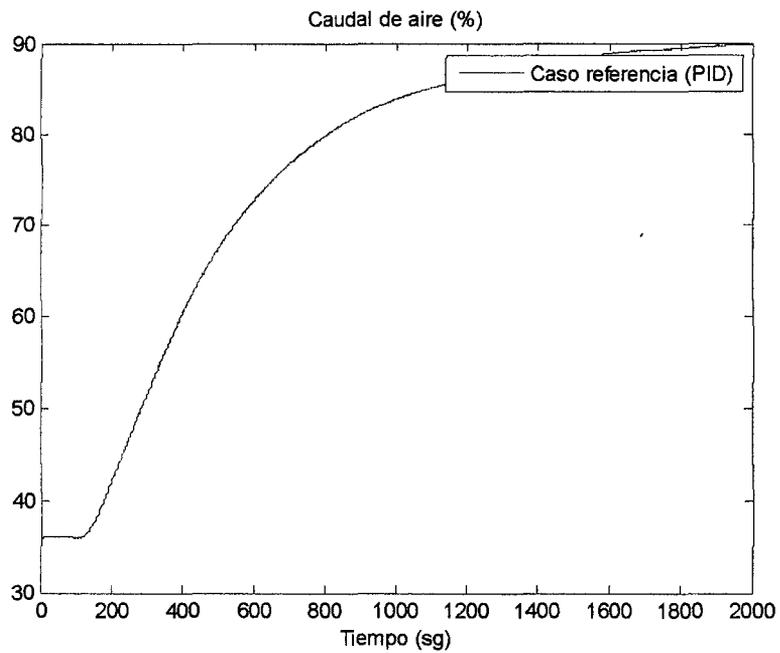


*Handwritten signature*

**Figura 6.4:** Caudal de combustible

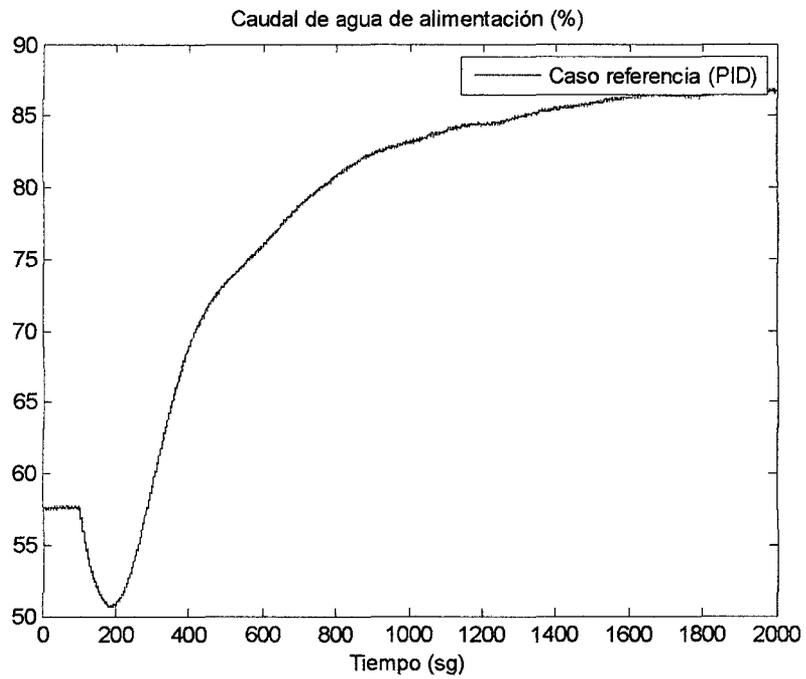


**Figura 6.5:** Caudal de aire



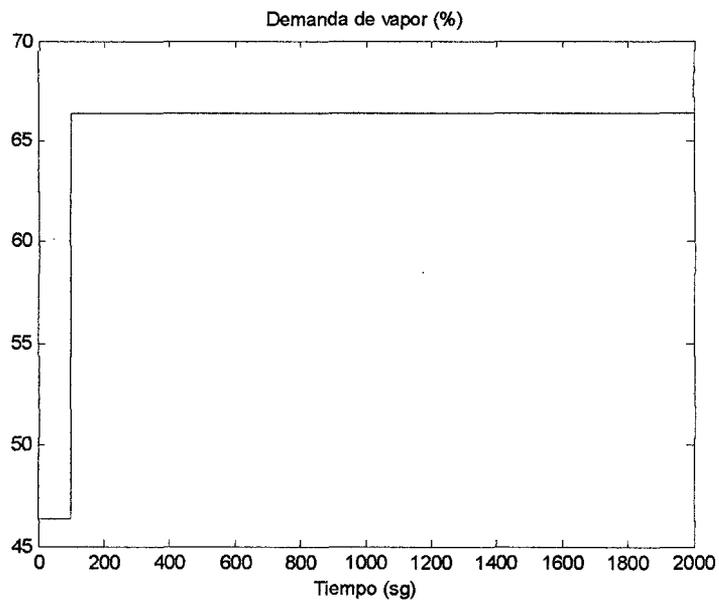
*Handwritten signature*

**Figura 6.6:** Caudal de agua de alimentación



Finalmente, en la Figura 6.7 se puede apreciar la señal de perturbación D1, que viene a ser la demanda de vapor.

**Figura 6.7:** Perturbación: Demanda de vapor



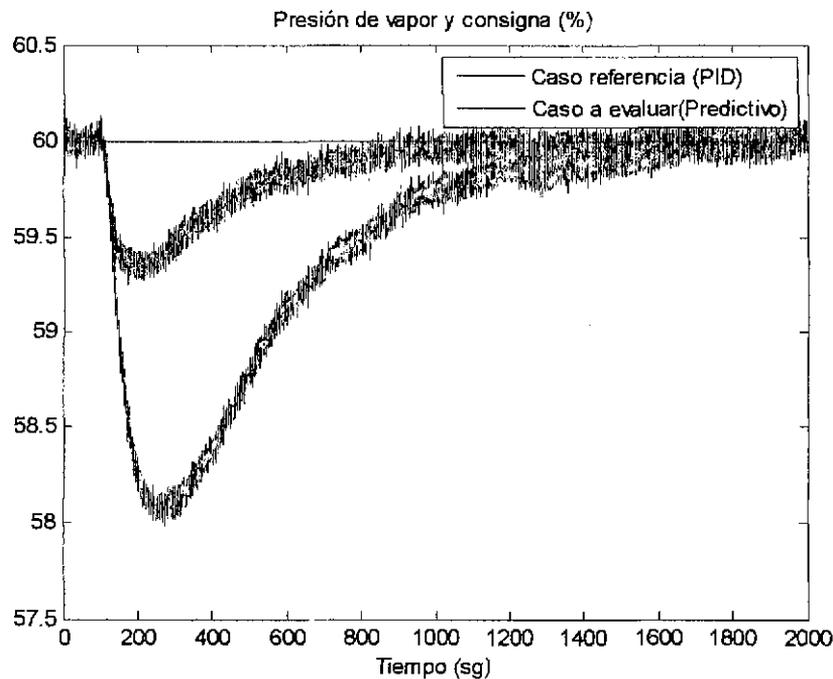
*Aut.*

De las figuras 6.1 a 6.3 se puede observar que el tiempo de asentamiento es aproximadamente de 1700 segundos (28.33 minutos), tanto para la presión de vapor, oxígeno y nivel en el calderín, ante cambios en el control mostradas en las figuras 6.4 a 6.6, correspondientes a caudal de combustible, caudal de aire y caudal de agua de alimentación respectivamente. El sobrepico en la presión de vapor es aproximadamente 3.33%; en el oxígeno de 40%; mientras que el sobrepico en el nivel del calderín es de 8%.

## 6.2 Resultados de la estrategia de Control Predictivo Multivariable Desacoplado

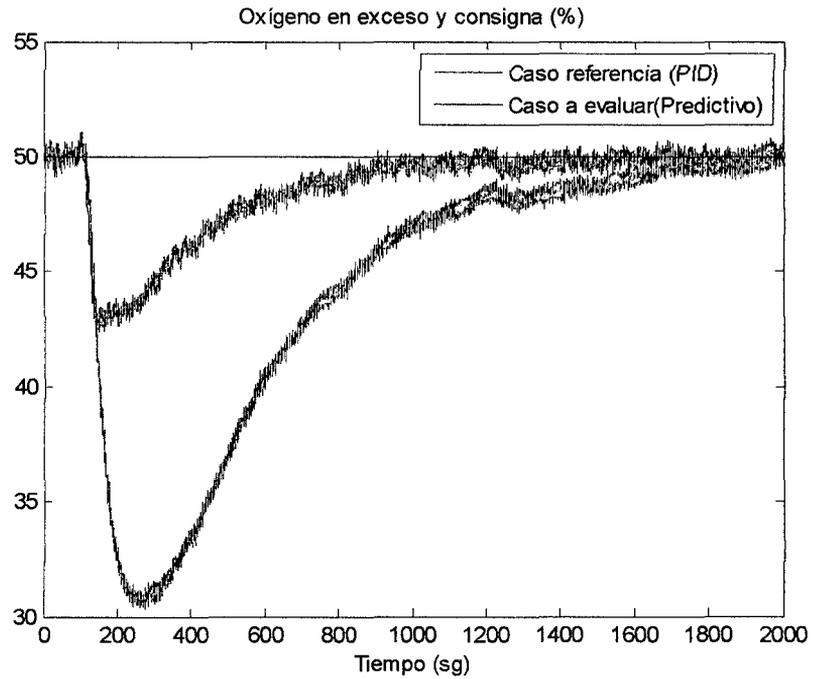
Mediante el programa en Matlab, denominado *Cont\_Caldera\_Pred\_Desacoplado.m*, nos permite obtener las respuestas mostradas en las Figuras 6.8 a 6.10, y las señales de control generadas se muestran en la Figuras 6.11 a 6.13.

**Figura 6.8:** Salida controlada (Presión de vapor) Predictivo vs PID

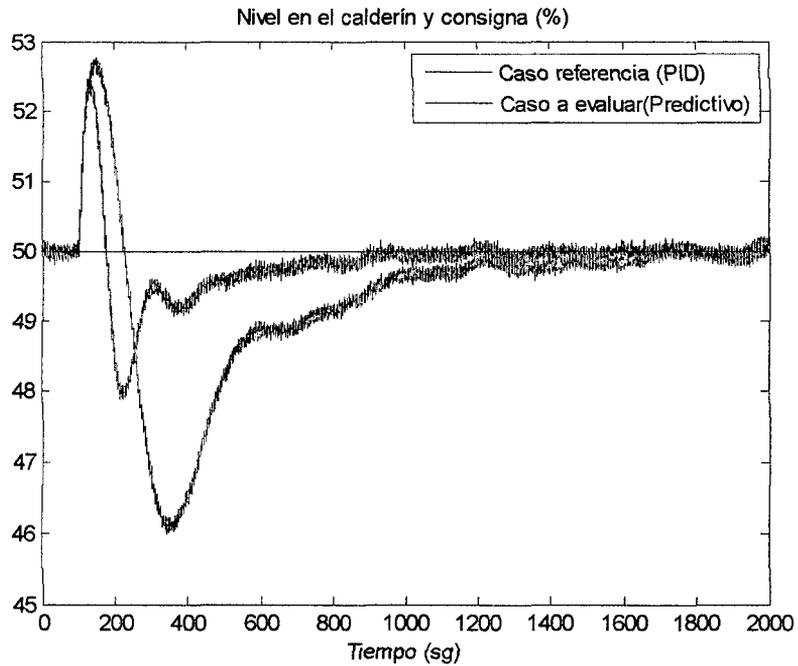


*Aut*

**Figura 6.9:** Salida controlada (Oxígeno en exceso) Predictivo vs PID

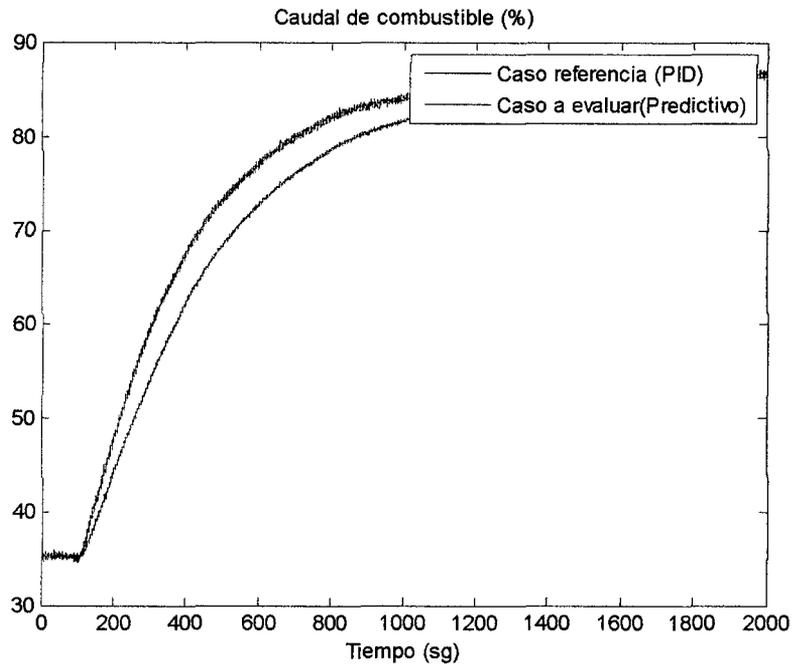


**Figura 6.10:** Salida controlada (Nivel en el calderín) Predictivo vs PID

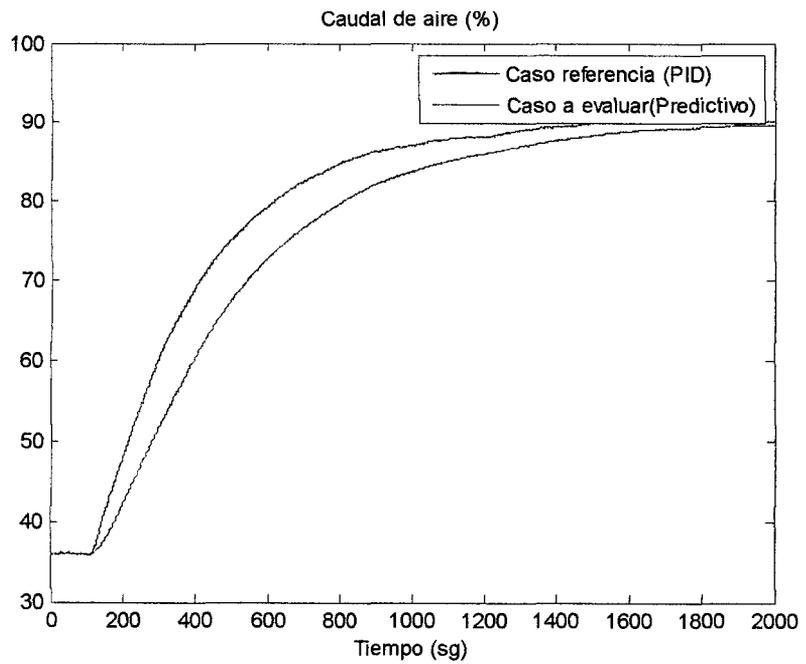


*Handwritten signature*

**Figura 6.11:** Señal de control (Caudal de combustible) Predictivo vs PID

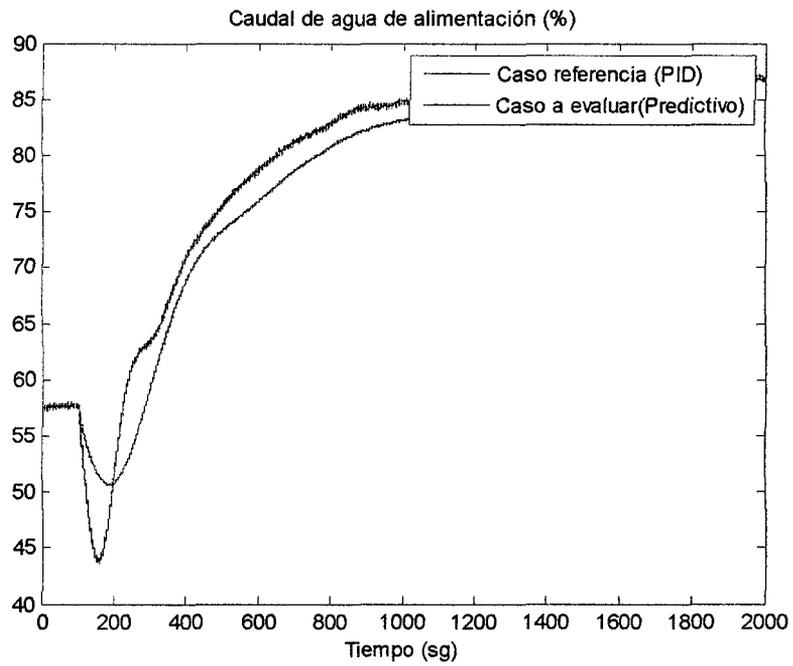


**Figura 6.12:** Señal de control (Caudal de aire) Predictivo vs PID



*Just*

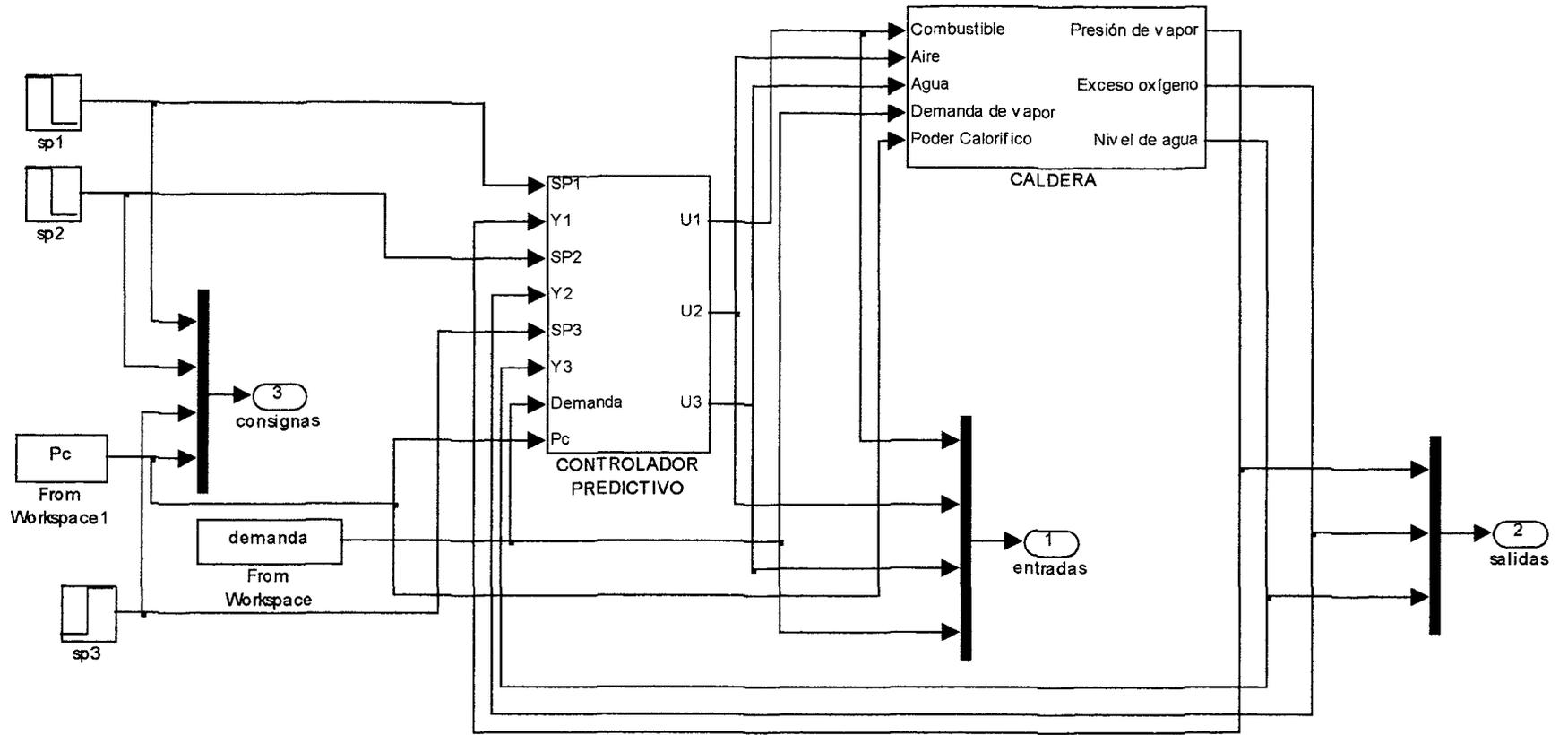
**Figura 6.13:** Señal de control (Caudal de agua) Predictivo vs PID



El diagrama de bloques del Sistema de Control Predictivo Multivariable Desacoplado, editado en Simulink, se muestra en la Figura 6.14.

*Jub*

Figura 6.14: Diagrama de bloques del Sistema de Control Predictivo Multivariable Desacoplado.



*Jus*

## VII. DISCUSION

### 7.1 Comparación de resultados

En la tabla 7.1 se presenta un resumen de los resultados aplicando las dos estrategias de control tratados.

**Tabla 7.1:** Resumen de resultados de las dos estrategias de control

<b>Estrategia</b>	<b><math>t_s</math> (Seg.)</b>	<b>Sobrepico (%) de las salidas controladas</b>	<b>Señales de Control en el transitorio</b>
<b>Control PID Multivariable Desacoplado</b>	1700	Presión de Vapor (3.33%)	Caudal de Combustible = 87%
	1700	Oxígeno en exceso (40%)	Caudal de Aire = 90%
	1700	Nivel en el Calderín (8%)	Caudal de agua de alimentación = 86%
<b>Control Predictivo Multivariable Desacoplado</b>	900	Presión de Vapor (1.17%)	Caudal de Combustible = 87%
	900	Oxígeno en exceso (15%)	Caudal de Aire = 90%
	900	Nivel en el Calderín (5%)	Caudal de agua de alimentación = 87%

**Fuente:** Autoría propia.

De los resultados mostrados en la sección VI y presentados en la Tabla 7.1, se puede observar que la técnica de Control Predictivo Multivariable Desacoplado es el más adecuado para esta aplicación, sea utilizando el caudal de combustible, caudal de aire, o el caudal de agua de alimentación; ya que con cualquiera de estas señales de control se logra un menor tiempo de asentamiento de las variables controladas (presión de vapor, Oxígeno en exceso, y nivel en el calderín) comparadas al Control PID Multivariable Desacoplado. Asimismo, los sobrepicos de la estrategia de Control Predictivo Multivariable Desacoplado es menor al del PID Multivariable Desacoplado.

Es necesario anotar que el resultado de la estrategia de Control Predictivo Multivariable Acoplado no fue satisfactorio; por lo que no se presentan los resultados, tal como se anota en la sección 5.4, página 27. En ese sentido, se puede decir que, de los resultados de las dos estrategias de control presentadas, se cumple la hipótesis planteada en el trabajo, la cual paso a anotar:

“El diseño de un Controlador Avanzado como es el Control Predictivo, permitirá un mejor desempeño que un Controlador Clásico como el PID, en el control de la presión de vapor, exceso de oxígeno y nivel de agua de una caldera industrial”.

## **7.2 Conclusiones y recomendaciones**

Podemos entonces concluir que sí es posible usar la estrategia de Control Predictivo Multivariable Desacoplado para obtener un mejor desempeño en el control de presión de vapor, Oxígeno en exceso, y nivel en el calderín, comparado al Control PID Multivariable Desacoplado (control clásico).

Finalmente podemos sugerir que para trabajos futuros se utilicen otros algoritmos alternativos como Control Fuzzy y Control Neuronal.



## VIII. REFERENCIALES

- [1] C.R. Cutler, B.C. Ramaker. "Dynamic matrix control. A computer control algorithm". Automatic Control Conference", San Francisco, 1980.
- [2] Consejería de Economía y Hacienda, Comunidad de Madrid. Guía Básica de Calderas Industriales Eficientes. Madrid, España. 2012.
- [3] E. Camacho y C. Bordons. **Control predictivo: pasado, presente y futuro**. Reporte técnico, Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla. 2001.
- [4] E. Camacho y C. Bordons. **Model predictive control**. Second edition. Springer-Verlag. 2004.
- [5] Eronini-Umez-Eronini, **Dinámica y Sistemas de Control**, Morgan State University, Thomson Learning, Mexico. Edición 2001.
- [6] I. Fernández y C. Rodríguez. "Control de una Caldera (versión: febrero 2010)". Grupo de Automática, Electrónica y Robótica. Universidad de Almería, junio de 2010.
- [7] K. J. Wstrom and K. Ecklund, "A simplified nonlinear model of a drum boiler-turbine unit," *Int. J. Contr.*, vol. 16, no. 1, pp. 145-169, 1972.
- [8] MathWorks, Inc., **Matlab Reference Guide**, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, primera edición. 1996.
- [9] Ogata Katushiko, **Sistemas de Control en Tiempo Discreto**. Segunda edición, Prentice Hall Hispanoamericana, S.A. México, Nueva York. 1996.
- [10] Rojas Moreno, Arturo Ph.D, **Control Avanzado. Diseño y aplicaciones en tiempo real**. Universidad Nacional de Ingeniería. Edición 2001.
- [11] Roland S. Burns. **Advanced Control Engineering**. Butterworth Heinemann, first published 2001.
- [12] Smith Carlos A. y Corripio Armando B. **Principles and Practice of Automatic Process Control**. Segunda Edición. Ediciones John Wiley&Sans, Inc 1997.

## IX. APÉNDICES

### APÉNDICE A

#### Programa en Matlab de Inicialización de variables (Autoría propia)

```
% Inicializacion de parametros para el control de la CALDERA

% Parametros de tiempo en la simulacion
tiempo=700;
% tm=1;
tm=0.5; %valor original
% Punto inicial de operacion
% 'Combustible', 'Aire', 'Agua de alimentación'
Uo=[35.2;36.0;57.57];
% Puntos de consigna iniciales y finales
% Presion vapor, O2, Nivel calderin
Yo=[60;60;55];
Yf=[50;20;55];
tcambio=[1200;2400;3600];
% Cambios en las variables de perturbacion
demanda=[0 46.36;3600 46.36;3601 70;4800 70; 4801 46;tiempo 46];
Pc=[0 100;100 100;200 105;400 95;600 105;800 95;900 100;1001 100;6000
100;6001 120;tiempo 120];

% Variables internas
uo=[0.406925033537826;0.498129488309501;0.575742026371801];
xo=[21.999999999999996 2.5 655.4319190979004 0.25];
```

### APENDICE B

#### Programa en Matlab de Prueba de Control (Autoría propia)

```
% Programa para probar el control de la CALDERA
clear
% Inicializa el modelo y las condiciones de simulación
calderainit

% Asigna los parámetros de control de la estructura descentralizada
estructura=[1 1]; % La misma estructura PID en los tres controladores
umin=0;           % El mismo rango 0-100% en las tres señales de control
umax=100;

lvcu1=0.1;lvcu2=0.1;lvcu3=0.1; % limite velocidad de cambio 10seg/1%

% Juegos de parámetros de control

% Parametros del controlador de referencia usados en el Proyecto 7
kp1=2.5;ti1=29.2;
kp2=0.08;ti2=16.5;
kp3=8.25;ti3=78.5;
```



## APENDICE C

### Programa en Matlab de la Estrategia de Control PID Multivariable Desacoplado (Autoría propia)

```
% Programa para evaluar los resultados del Control PID de la CALDERA

% Carga resultados de la simulación correspondiente al controlador que
% hace de referencia
load pruebaCaldera_CL1.mat
%load pruebaCaldera_CL1.mat % original
registrosr=registros;

% Carga resultados de la simulación correspondiente al controlador que
% se quiere evaluar
load pruebaCaldera_CL2.mat

% Presenta los resultados
figure(1)
plot(t,registrosr(:,5),t,registros(:,8))
%plot(t,registrosr(:,5),t,registros(:,5),t,registros(:,8))
title('Presión de vapor y consigna (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Consigna')

figure(2)
plot(t,registrosr(:,6),t,registros(:,9))
%plot(t,registrosr(:,6),t,registros(:,6),t,registros(:,9))
title('Oxígeno en exceso y consigna (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Consigna')

figure(3)
plot(t,registrosr(:,7),t,registros(:,10))
%plot(t,registrosr(:,7),t,registros(:,7),t,registros(:,10))
title('Nivel en el calderín y consigna (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Consigna')

figure(4)
plot(t,registros(:,4))
title('Demanda de vapor (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')

figure(5)
plot(t,registrosr(:,1))
%plot(t,registrosr(:,1),t,registros(:,1))
title('Caudal de combustible (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)')

figure(6)
plot(t,registrosr(:,2))
%plot(t,registrosr(:,2),t,registros(:,2))
title('Caudal de aire (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)')

figure(7)
```



```

plot(t,registrosr(:,3))
%plot(t,registrosr(:,3),t,registros(:,3))
title('Caudal de agua de alimentación (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)')

% Evualúa la efectividad relativa del cambio de controlador
w=0.25; % Es el valor del peso utilizado en el concurso
J=evaluaJCaldera(t,registrosr,registros,tcambio,Yo,Yf,w)

```

## APENDICE D

### Programa en Matlab de la Estrategia de Control Predictivo Multivariable Desacoplado (Autoría propia)

```

% Programa para evaluar el control Predictivo Multivariable Desacoplado
% de la CALDERA

```

```

% Carga resultados de la simulación correspondiente al controlador que
% hace de referencia
load pruebaCaldera_CL1.mat
registrosr=registros;

```

```

% Carga resultados de la simulación correspondiente al controlador que
% se quiere evaluar
load pruebaCaldera_CL2.mat

```

```

% Presenta los resultados
figure(1)
plot(t,registrosr(:,5),t,registros(:,5),t,registros(:,8))
title('Presión de vapor y consigna (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Caso a evaluar(Predictivo)')

```

```

figure(2)
plot(t,registrosr(:,6),t,registros(:,6),t,registros(:,9))
title('Oxígeno en exceso y consigna (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Caso a evaluar(Predictivo)')

```

```

figure(3)
plot(t,registrosr(:,7),t,registros(:,7),t,registros(:,10))
title('Nivel en el calderín y consigna (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Caso a evaluar(Predictivo)')

```

```

figure(4)
plot(t,registros(:,4))
title('Demanda de vapor (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')

```

```

figure(5)
plot(t,registrosr(:,1),t,registros(:,1))
title('Caudal de combustible (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Caso a evaluar(Predictivo)')

```

```

figure(6)

```

*Aut.*

```
plot(t,registrosr(:,2),t,registros(:,2))
title('Caudal de aire (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Caso a evaluar(Predictivo)')

figure(7)
plot(t,registrosr(:,3),t,registros(:,3))
title('Caudal de agua de alimentación (%)')
xlabel('Tiempo (sg)')
legend('Caso referencia (PID)', 'Caso a evaluar(Predictivo)')

% Evualúa la efectividad relativa del cambio de controlador
w=0.25; % Es el valor del peso utilizado en el concurso
J=evaluaJCaldera(t,registrosr,registros,tcambio,Yo,Yf,w)
```



## X. ANEXOS

### Matriz de Consistencia

#### Título: “DISEÑO Y SIMULACIÓN DE CONTROLADORES MULTIVARIABLES CLÁSICO Y AVANZADO PARA UNA CALDERA INDUSTRIAL”

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	MÉTODOS
<p><b>General</b></p> <p>Las calderas son sistemas complejos que presentan comportamientos no lineales, multivariantes (más de una entrada y salida) y con numerosas interferencias o acoplamientos. Para su control la industria viene adoptando distintas estrategias, generalmente clásicas como son los controladores PID a lazos simples, linealizando previamente el sistema entorno a un punto de trabajo, lo que supone una aproximación lineal. Estos</p>	<p><b>Objetivo general</b></p> <p>El objetivo general del presente trabajo es diseñar un Controlador Avanzado que permita optimizar el desempeño de un Controlador Clásico en una Caldera Industrial.</p> <p><b>Objetivos específicos</b></p> <p>El objetivo específico del presente trabajo es diseñar un controlador que mejore sustancialmente, tanto en respuesta temporal como en estabilidad, el modelo de referencia basado en PID</p>	<p>El diseño de un Controlador Avanzado como es el Control Predictivo, permitirá un mejor desempeño que un Controlador Clásico como el PID, en el control de la presión de vapor, exceso de oxígeno y nivel de agua de una caldera industrial</p>	<p><b>Variables dependientes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Presión de vapor</li> <li>➤ Exceso de oxígeno, y</li> <li>➤ Nivel de agua.</li> </ul> <p><b>Variables independientes:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Caudal de combustible</li> <li>➤ Caudal de aire, y</li> <li>➤ Caudal de agua de alimentación</li> </ul>	<p>La metodología empleada en el siguiente trabajo comprende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Modelado de la caldera industrial</li> <li>❖ Diseño y simulación del sistema de control usando Control PID Multivariable Desacoplado.</li> <li>❖ Diseño y simulación del sistema de control usando Control Predictivo Multivariable Desacoplado.</li> <li>❖ Diseño y simulación del sistema de control usando Control Predictivo Multivariable Acoplado.</li> </ul>

*Instit.*

<p>métodos vienen siendo el estándar de aplicación en la industria de los últimos años. Sin embargo, en muchos casos resultan ser ineficientes provocando grandes consumos de combustible y contaminación.</p>	<p>independientes. Para ello, se tratará de optimizar dichos controles y se hará uso de otras teorías de control más avanzadas como el Control Predictivo Multivariable, para controlar la presión de vapor, exceso de oxígeno y nivel de agua y comparar sus resultados con el PID Multivariable Desacoplado.</p>			<ul style="list-style-type: none"> <li>❖ Comparar los resultados de las técnicas de control indicadas.</li> <li>❖ Efectuar las conclusiones en base a los resultados obtenidos y efectuar algunas recomendaciones para trabajos futuros.</li> </ul>
--	--	--	--	---

*Just*