



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO PARA UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO

Autores: Tania Orrala
Dennis Burgasi

Director: Ing. Jacqueline Llanos Dr.

Co-Director: Ing. Diego Ortiz Dr.

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
2021





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO PARA UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO

Fuzzy and PID controllers performance analysis for a combined-cycle thermal power plant

CIT 2020: XV International Multidisciplinary Congress on Science and Technology, Octubre 19 -23

Model Predictive Control Strategy for a Combined-Cycle Power-Plant Boiler

IEEE ICA/ACCA2021: 2021 IEEE International Conference on Automation/XXIV Congress of the Chilean Association of Automatic Control (ICA-ACCA), Marzo 22-26



1. Introducción
2. Descripción de la planta
3. Diseño de Controladores
 - A. Diseño de controlador PI
 - B. Diseño de control basado en lógica difusa
 - C. Diseño de control MPC
4. Resultados
5. Conclusiones
6. Trabajos Futuros



1. Introducción

Problemática

Los costos operacionales de una planta termoeléctrica pueden ser significativos porque dependen del consumo de combustible fósil para la generación de potencia. Además de que liberan CO₂ a la atmósfera, siendo este uno de los principales causantes del calentamiento global.

Tradicionalmente estas plantas son controladas por controladores PID. Pese a que estos controladores permiten mantener las variables en los valores deseados de la planta, no se asegura un bajo consumo de la materia prima utilizada para su operación, ni permiten un análisis detallado de la dinámica de las variables a controlar.



1. Introducción

Objetivo General:

Diseñar un controlador predictivo para una planta termoeléctrica de ciclo combinado, para optimizar su funcionamiento en términos operacionales y económicos.

Objetivos Específicos:

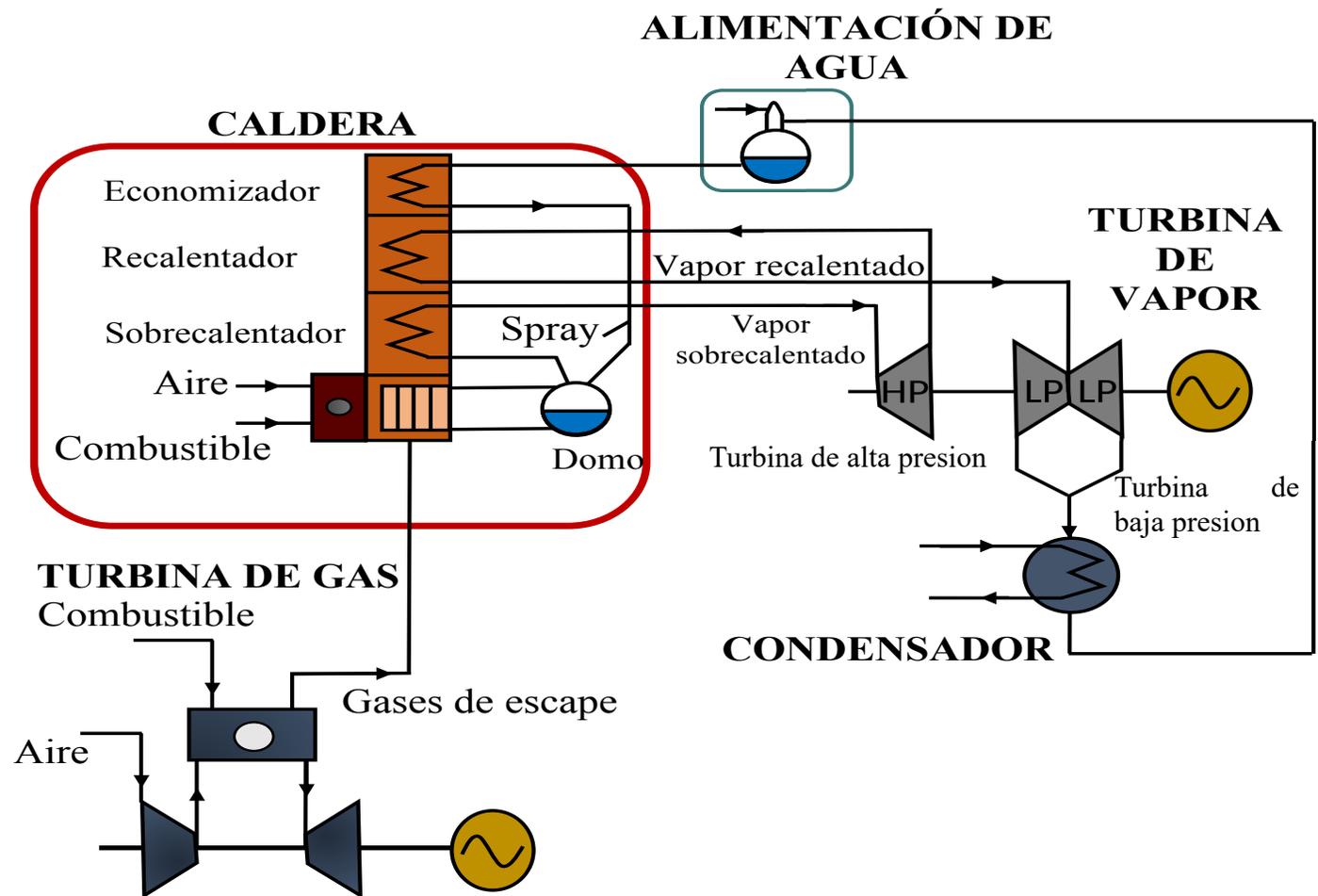
- Investigar el funcionamiento de una planta termoeléctrica de ciclo combinado.
- Modelar las componentes del sistema ciclo combinado integrado, para el diseño de estrategias de control.
- Desarrollar un simulador dinámico integrando todos los componentes de la planta ciclo combinado.
- Diseñar una estrategia de control predictivo para la planta ciclo combinado, que considere índices de optimización operacionales.
- Evaluar la estrategia de control utilizando el simulador desarrollado y comparar los resultados obtenidos con otra estrategia de control convencional.



2. Descripción de la planta

Planta termoeléctrica de ciclo combinado

Las plantas termoeléctricas de ciclo combinado se caracterizan por tener dos ciclos térmicos diferentes, los cuales aumentan la eficiencia de la planta en comparación con una central convencional y al aprovechar los gases de escape de la turbina de gas por medio de la turbina de vapor se logra reducir la contaminación ambiental.

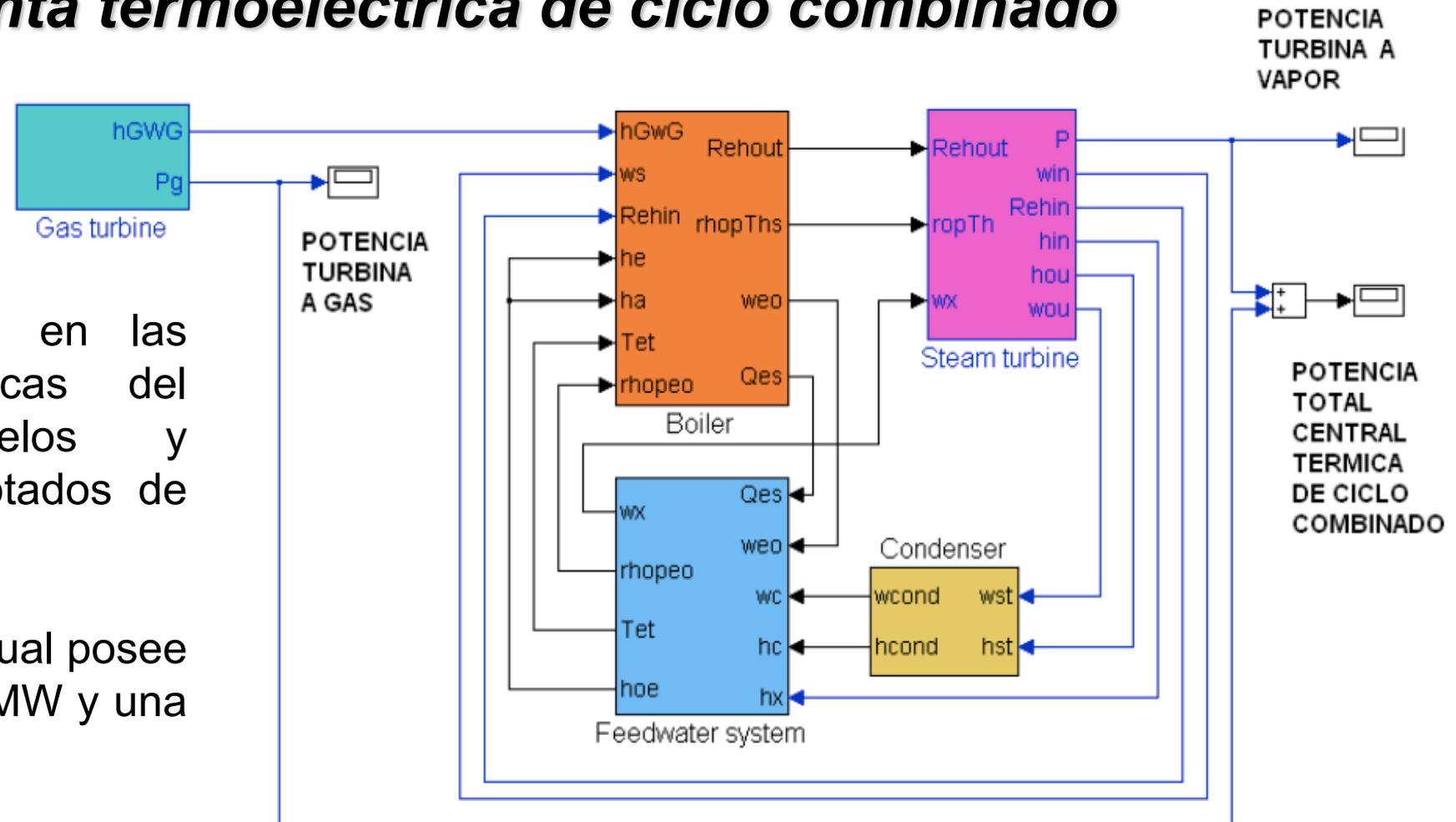


2. Descripción de la planta

Simulador de la planta termoeléctrica de ciclo combinado

Este simulador se basa en las ecuaciones fenomenológicas del proceso, cuyos modelos y parámetros han sido adaptados de (Ordys), (Sáez y Cipriano).

La planta es de 45 MW, la cual posee una turbina de vapor de 11MW y una turbina de gas de 34 MW.

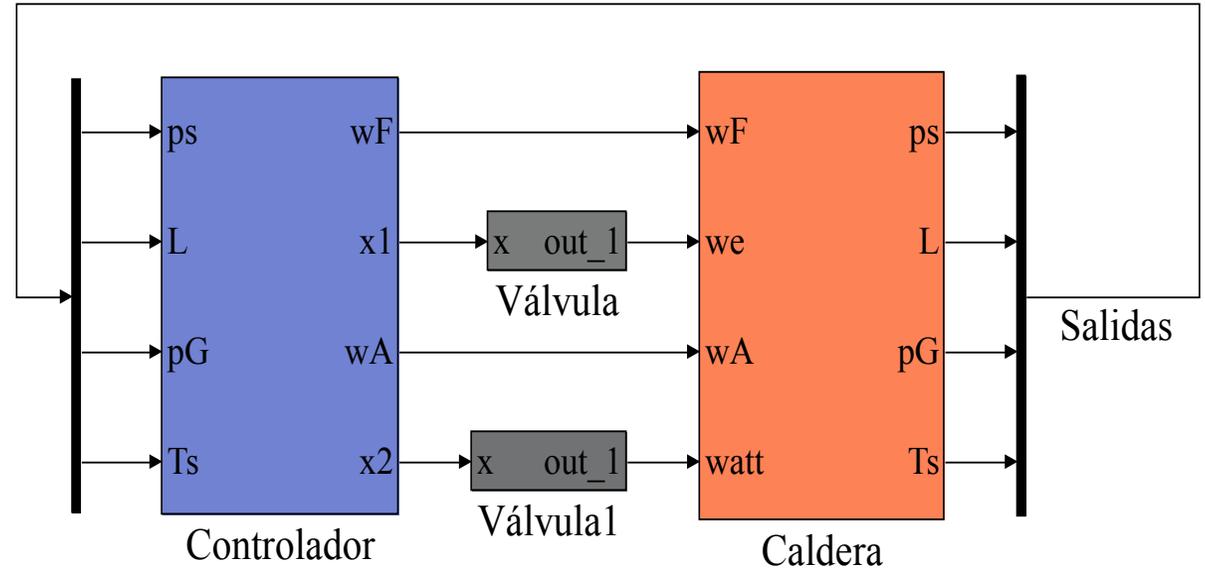


[1] Ordys, A. Pike, M. Johnson, R. Katebi and M. Grimble, Modelling and Simulation of Power Generation Plants, Scotland: Springer, 1994.

[2] D. Sáez and A. Cipriano, "Economic optimal control with environmental constraints for combined cycle power plants.," in *IECON '98. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 1998.

2. Descripción de la planta

Variables de la caldera



Variables manipuladas

w_F	Fuel flow	kg/s
w_e	Feedwater flow	kg/s
w_A	Air flow	kg/s
w_{att}	Attemperator water flow	kg/s

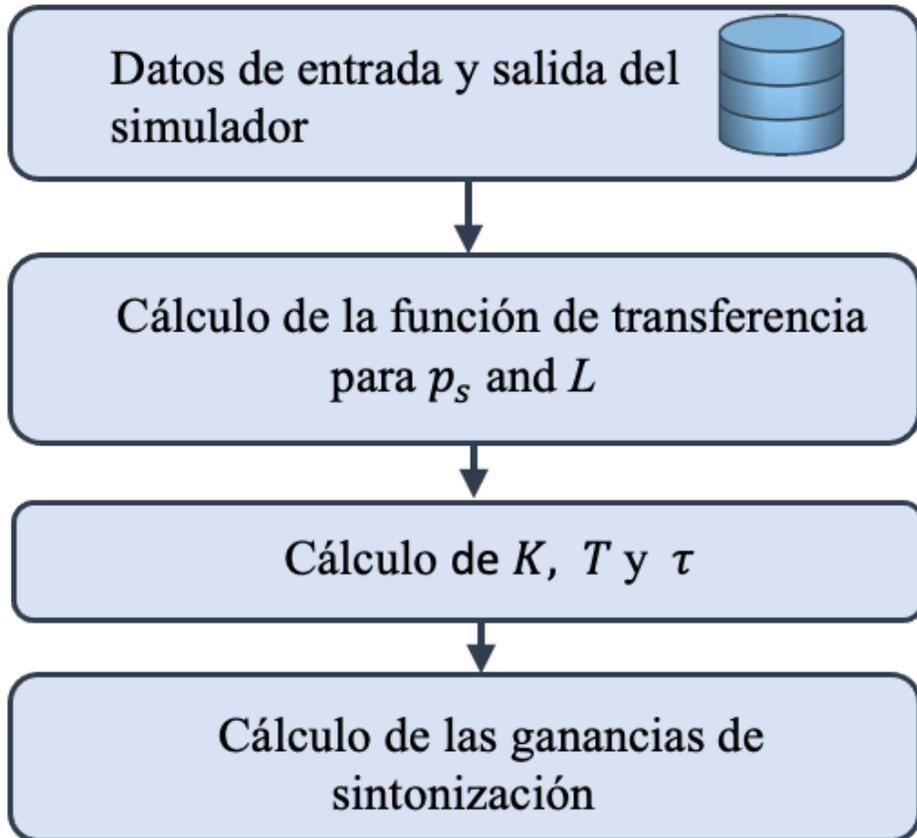
Variables controladas

p_s	Superheated steam pressure	Pa
L	Drum water level	m
p_G	Furnace gases pressure	Pa
T_s	Superheated steam temperature	$^{\circ}K$



3. Diseño de controladores

Diseño del controlador PI



$$G(s) = \frac{K}{1 + Ts} e^{-\tau s}$$

$$U(s) = K_p e(s) + K_i \frac{e(s)}{s}$$

$$K_p = \left(\frac{1}{K}\right) \left(\frac{\frac{\tau}{2} + \lambda}{\frac{\tau}{2} + \lambda}\right)$$

$$K_i = \frac{K_p}{T + \frac{\tau}{2}}$$

$$\lambda = 3T \rightarrow \text{Aumentando } \lambda \text{ disminuye velocidad de respuesta}$$

$$\lambda = T$$

Función de transferencia

K	Ganancia del proceso
T	Constante de Tiempo en Lazo abierto
τ	Retardo

Controlador PI

K_p	Ganancia proporcional
K_i	Ganancia integral

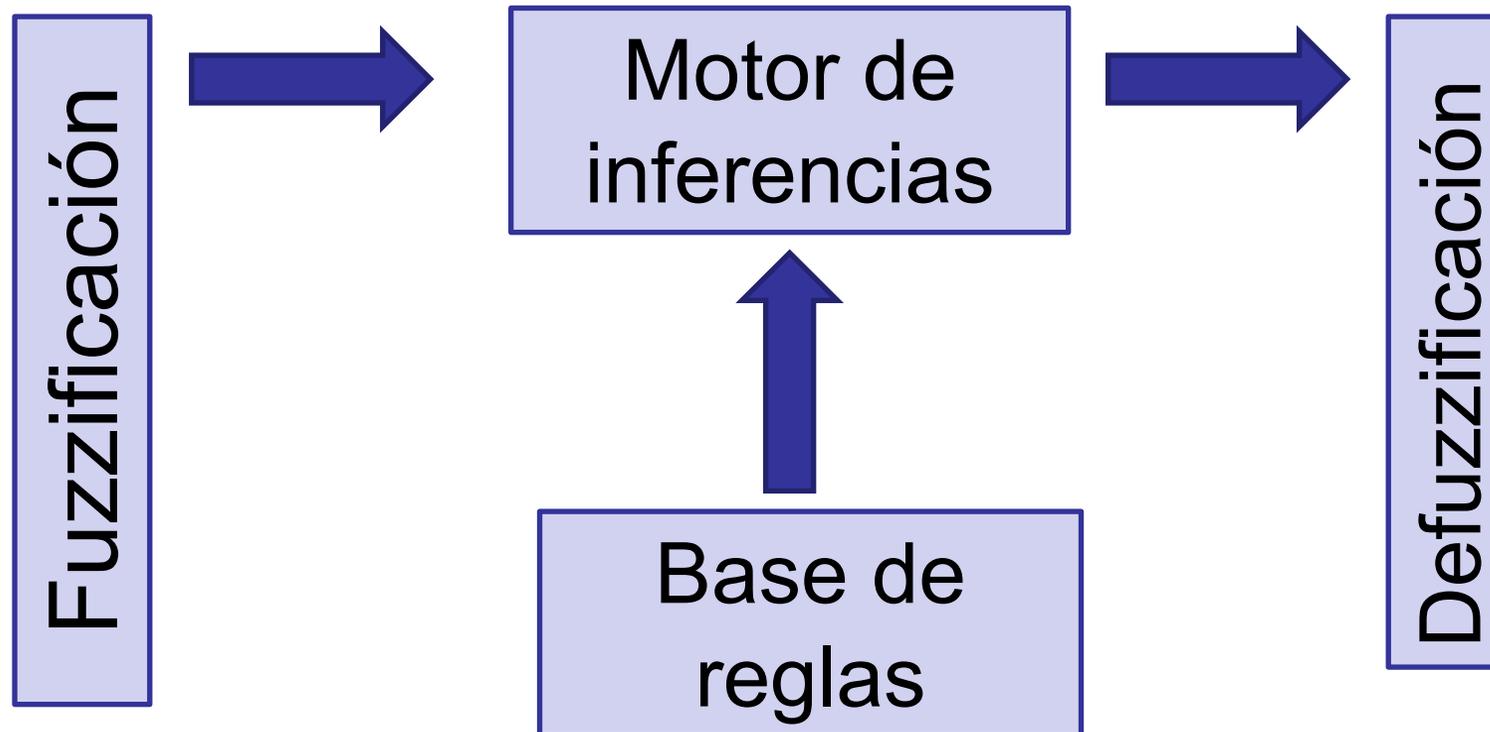
Técnica de sintonía

λ	Parámetro que regula la velocidad de respuesta del sistema
-----------	--



3. Diseño de controladores

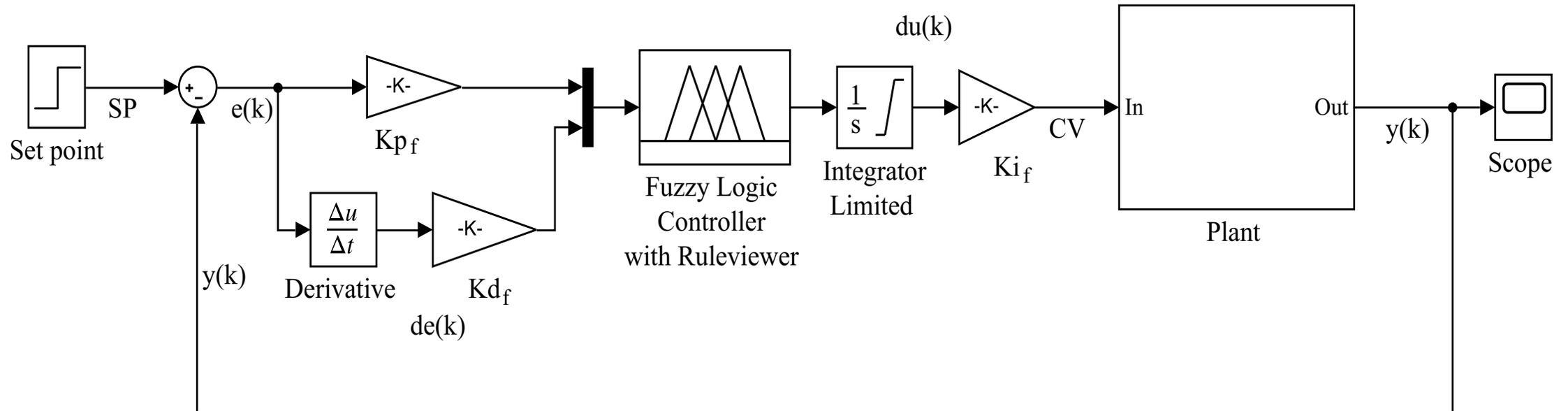
Controlador basado en lógica difusa



3. Diseño de controladores

Diseño de control difuso

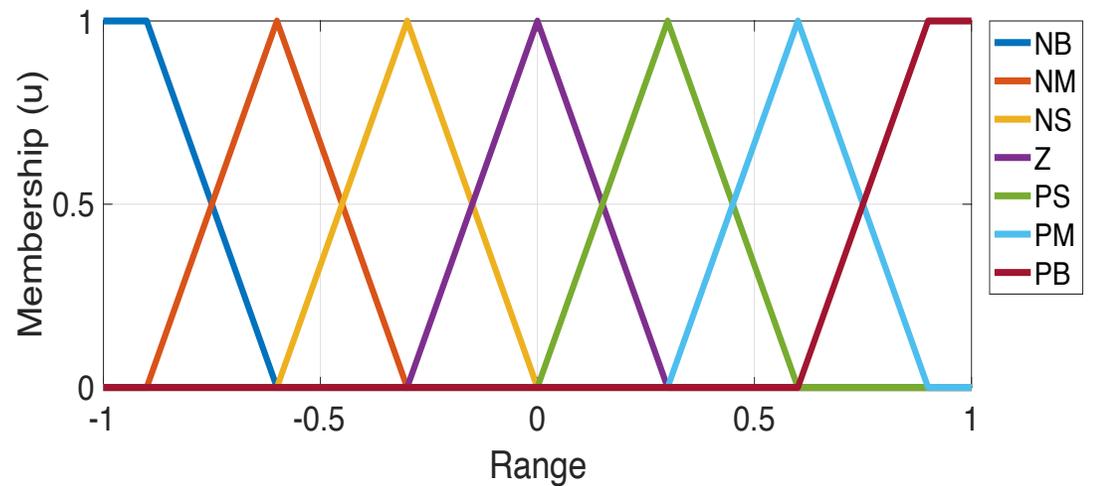
Esquema del controlador PD difuso con acción integral.



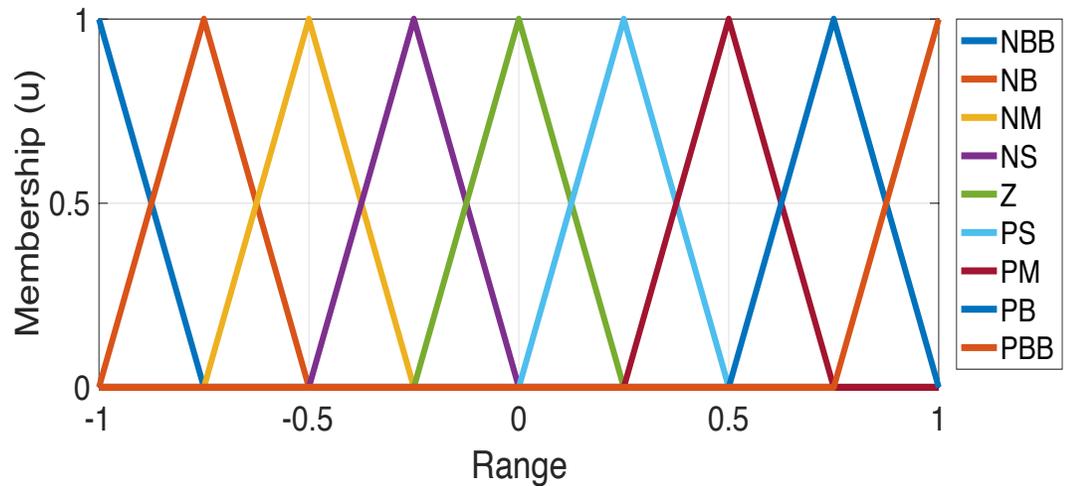
3. Diseño de Controladores

Diseño de controlador difuso

Función de membresía de las variables de entrada.



Función de membresía de la variable salida



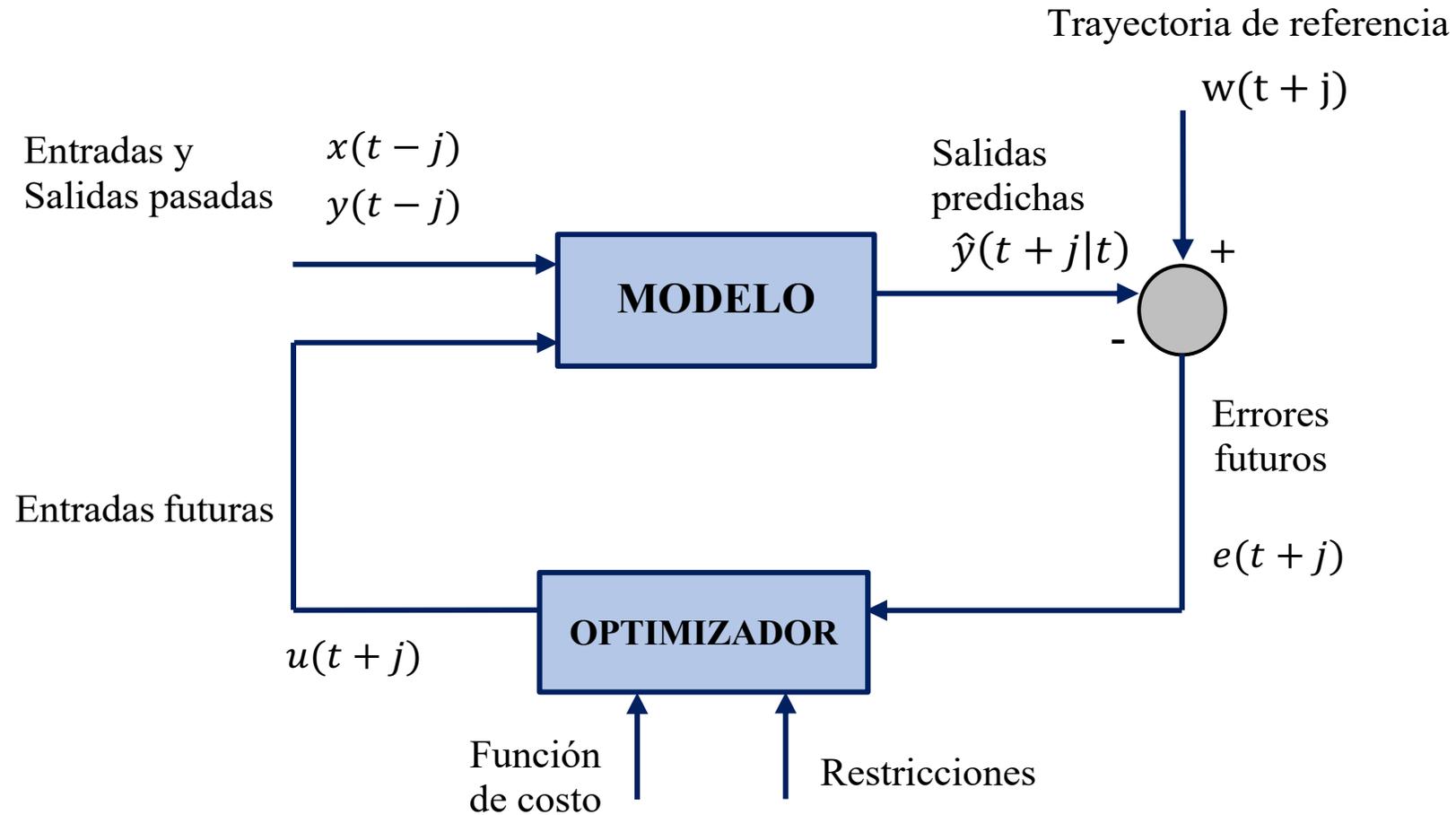
Reglas

e/de	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NBB	NBB	NBB	NB	NM	NS	Z
NM	NBB	NBB	NM	NM	NS	Z	PS
NS	NBB	NM	NS	NS	Z	PS	PM
Z	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
PS	NM	NS	Z	PS	PS	PM	PBB
PM	NS	Z	PS	PM	PM	PBB	PBB
PB	Z	PS	PM	PB	PBB	PBB	PBB

Basado en la matriz de control difuso propuesto por Macvicar-Whelan.

3. Diseño de controladores

Diseño de control predictivo basado en modelos (MPC)



3. Diseño de controladores

Modelo de predicción

- Describe el comportamiento esperado del sistema.
- MPC permite la incorporación de distintos tipos de modelos.
- El modelo de predicción en espacio de estados es definido por:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t + 1) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t + 1)\end{aligned}$$

- A: matriz de estados
- B: matriz de entrada
- C: matriz de salida



3. Diseño de controladores

Función de coste

- Indica el criterio a optimizar.
- Expresa el coste asociado a una determinada evolución del sistema a lo largo del horizonte de predicción.
- En esta función de costo intervienen predicciones hechas sobre el proceso.
- El objetivo es que la salida futura en el horizonte considerado siga una señal de referencia determinada y, al mismo tiempo, se penalice el esfuerzo de control necesario para ello.

$$\text{Min } J(u) = \sum_{j=1}^p \gamma_1 [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \gamma_2 [\Delta u(t+j-1)]^2$$



3. Diseño de controladores

Función de coste

$$\text{Min } J(u) = \sum_{j=1}^p \gamma_1 [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \gamma_2 [\Delta u(t+j-1)]^2$$

$(\hat{y}(t+j|t) - w(t+j))^2$: error de estado estacionario cuadrático

w : representa el vector de set points o referencia

\hat{y} : salida del modelo de predicción

$[\Delta u(t+j-1)]^2$: cambio mínimo en la acción de control el cual permita una operación adecuada del actuador

Δu : cambio de acción de control.

γ_1 y γ_2 : pesos asociados a los objetivos de control.

p : horizonte de predicción

m : horizonte de control



3. Diseño de controladores

Formulación del problema

El MPC busca minimizar el error de estado estacionario a la vez que minimiza la variación en la acción de control, considerando restricciones.

Restricciones: Indican los límites dentro de los cuales debe suceder la evolución del sistema. Se da por límites físicos o por motivos de seguridad.

Sujeta a las restricciones de desigualdad lineales de los límites:

$y_{min} \leq y \leq y_{max}$ Variable de salida o variable controlada

$u_{min} \leq u \leq u_{max}$ Acción de control



3. Diseño de controladores

Diseño del controlador predictivo basado en modelos

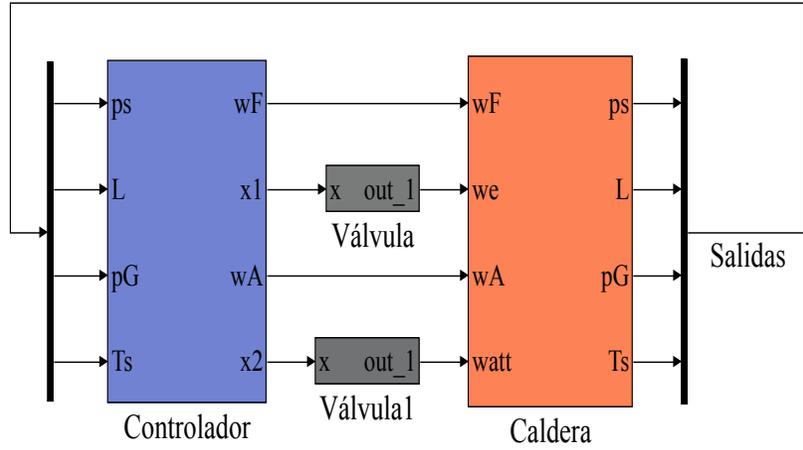
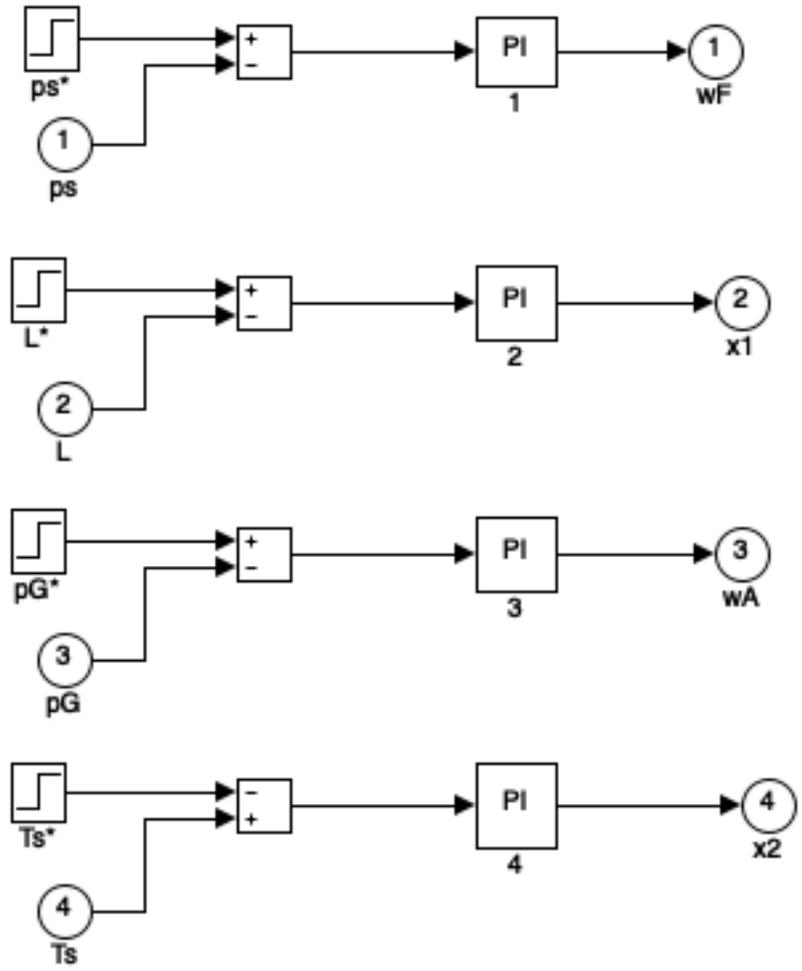
$$\text{Min } J(u) = \sum_{j=1}^p \gamma_1 [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \gamma_2 [\Delta u(t+j-1)]^2$$

Parámetros de diseño MPC	Variable	
	p_s	L
p	150 s	300 s
m	17 s	20 s
γ_1	8	15
γ_2	1.8	10
u_{min}	$4.525 \times 10^{-6} \text{ Pa}$	4.138 m
u_{max}	$5.3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$	4.2 m
y_{min}	$4.525 \times 10^{-6} \text{ Pa}$	4.138 m
y_{max}	$5.3 \times 10^{-6} \text{ Pa}$	4.2 m



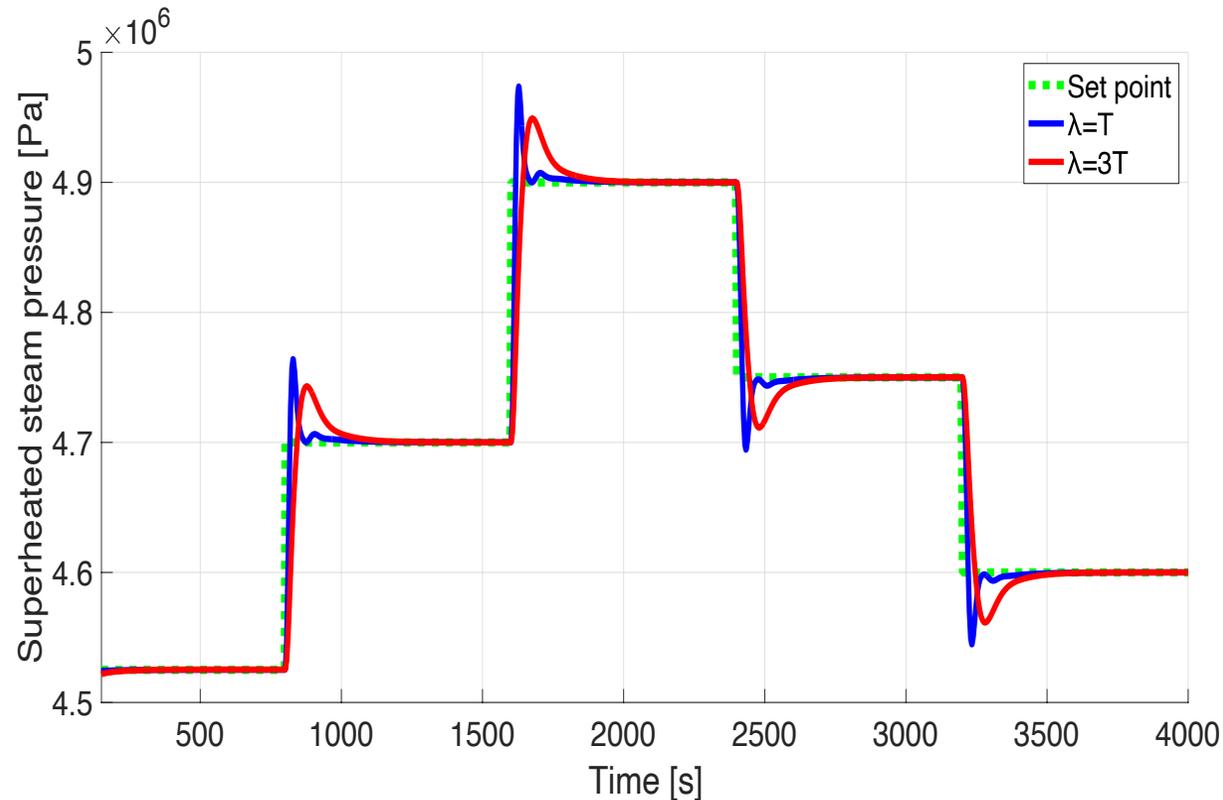
4. Resultados

Implementación de controladores PI en el boiler

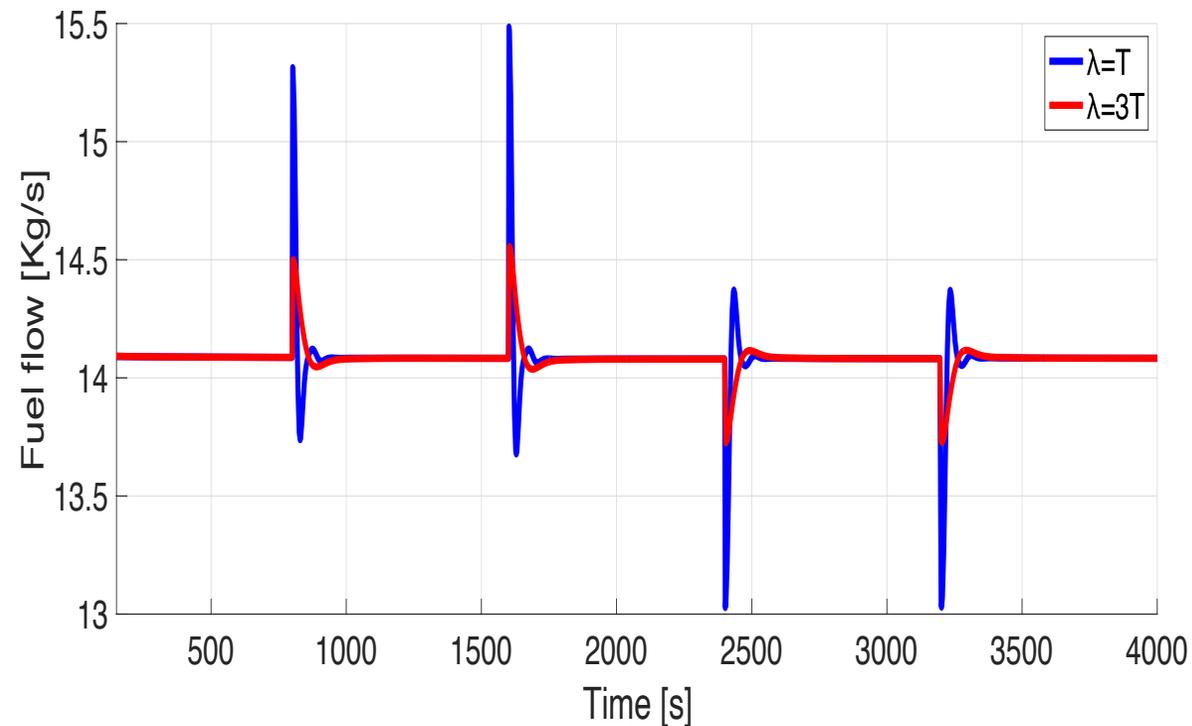


4. Resultados

Respuesta del sistema usando controladores PI con dos criterios de sintonía Lambda



Respuesta del sistema utilizando controladores PI considerando dos criterios de ajuste Lambda para p_s .



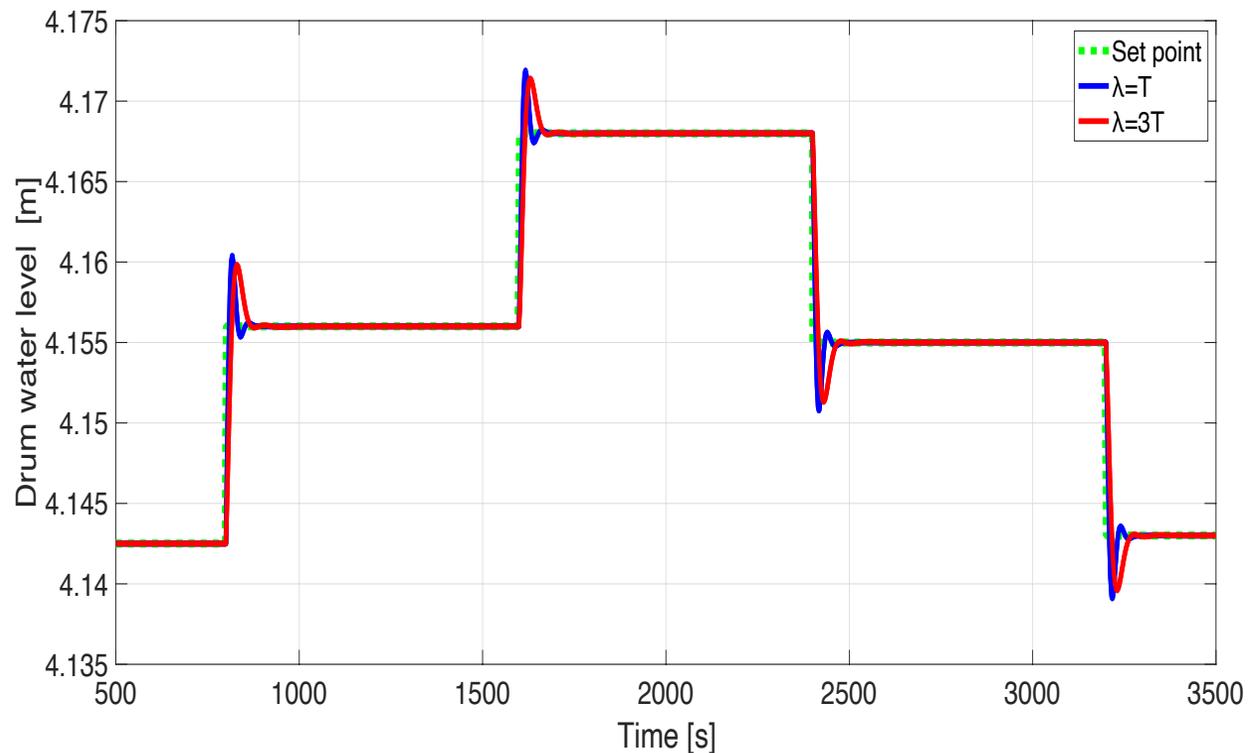
Flujo de combustibles fósiles implementando controladores PI para p_s



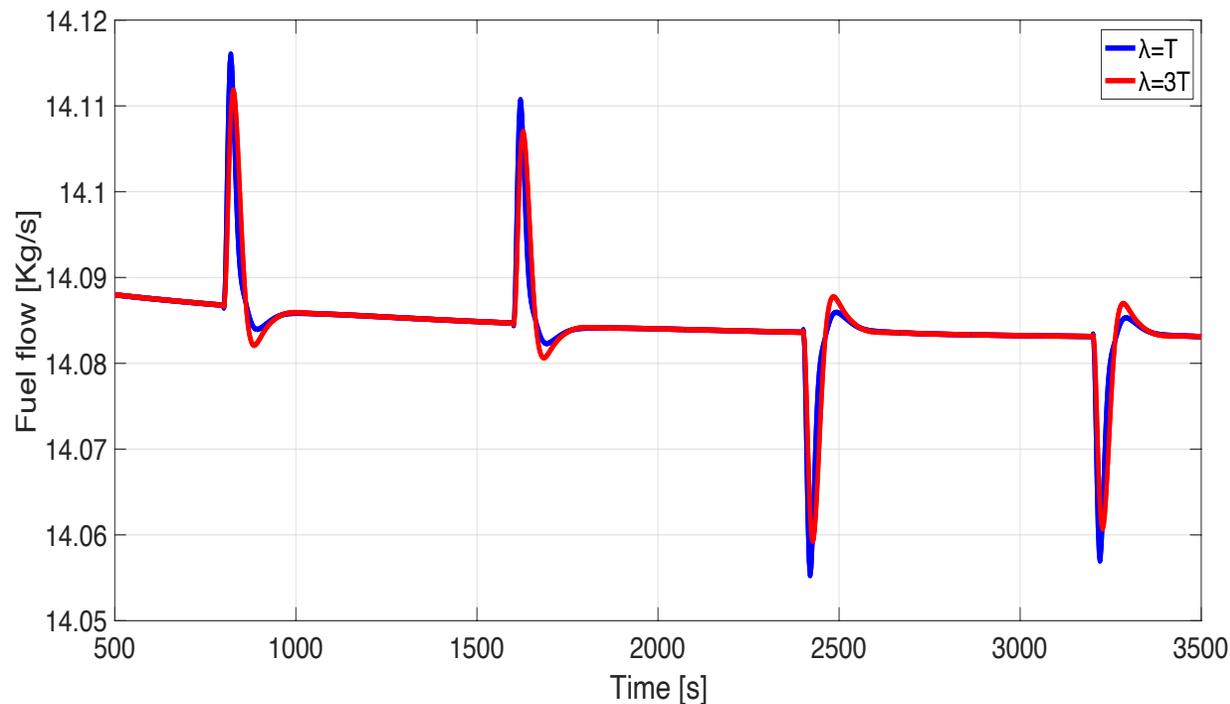
ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

4. Resultados

Respuesta del sistema usando controladores PI con dos criterios de sintonía Lambda



Respuesta del sistema utilizando controladores PI considerando dos criterios de sintonía Lambda para L .



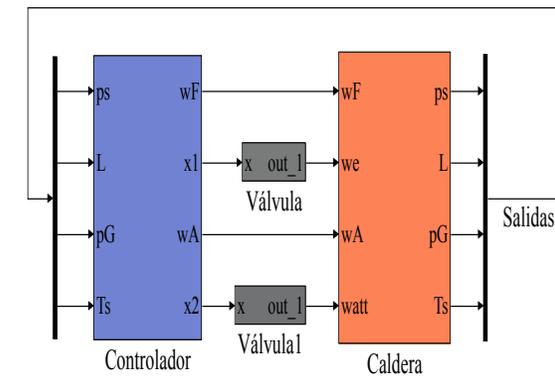
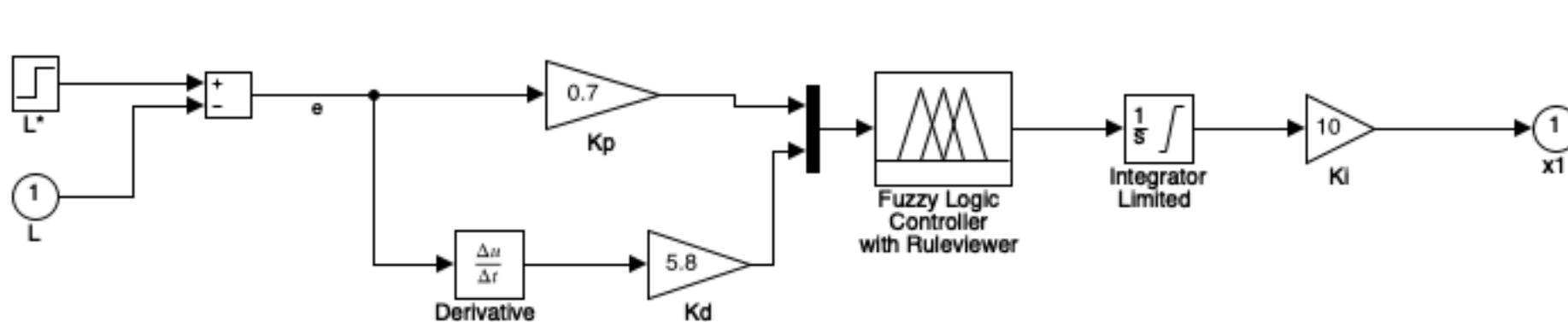
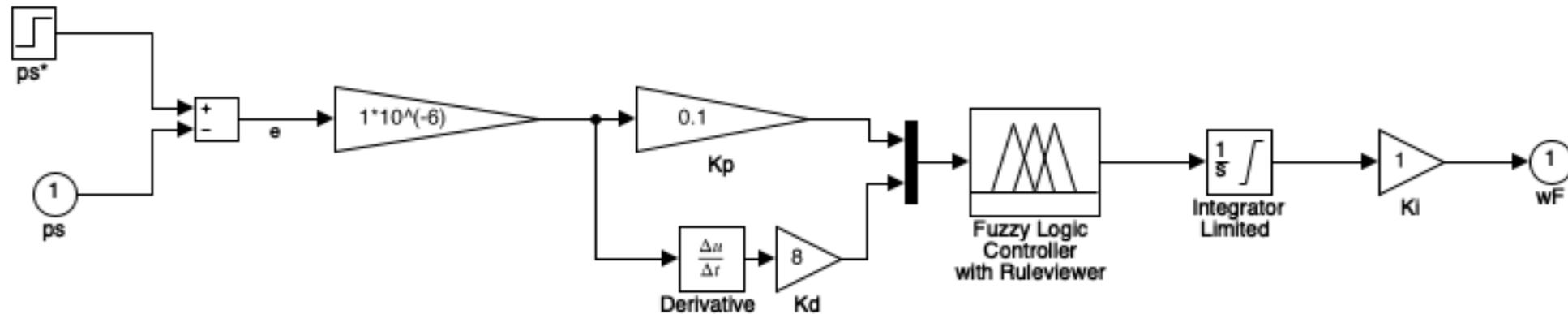
Flujo de combustibles fósiles implementando controladores PI para L



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

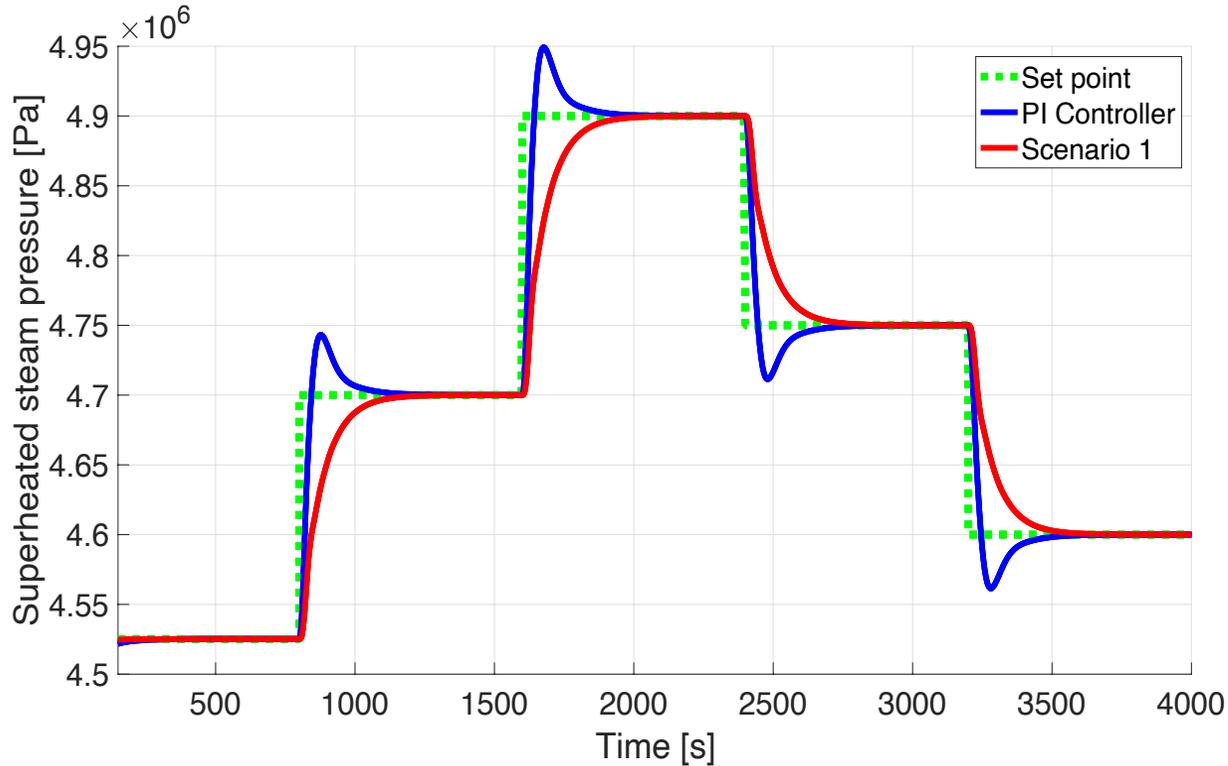
4. Resultados

Implementación de controladores difusos en las variables p_s y L

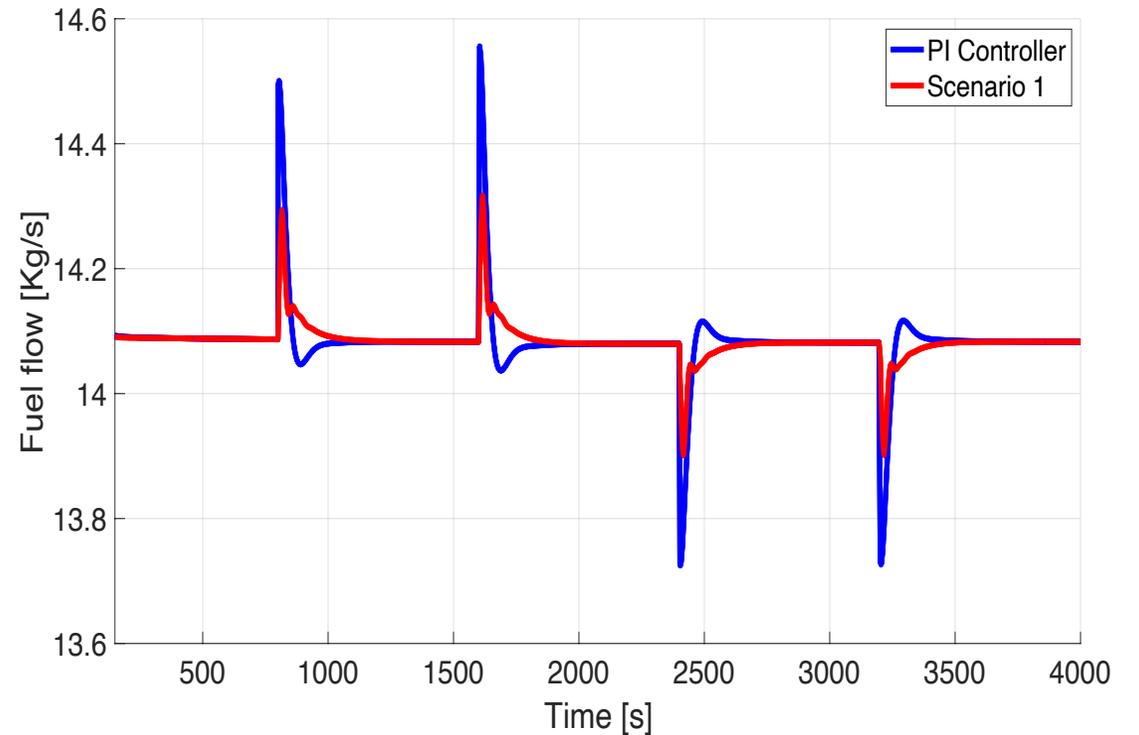


4. Resultados

Escenario 1: Controlador difuso en la variable p_s



Respuesta del sistema implementando controladores fuzzy y PI para p_s

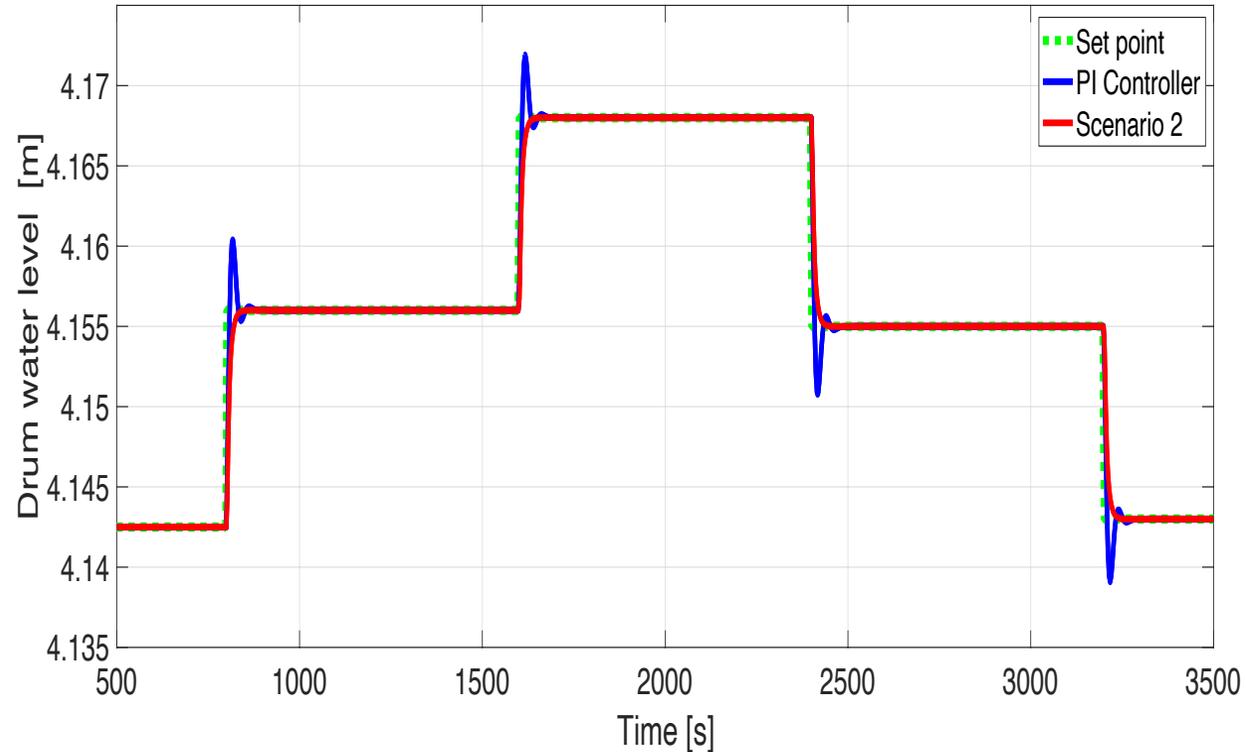


Flujo de combustibles fósiles implementando controladores difusos y PI en variable p_s .

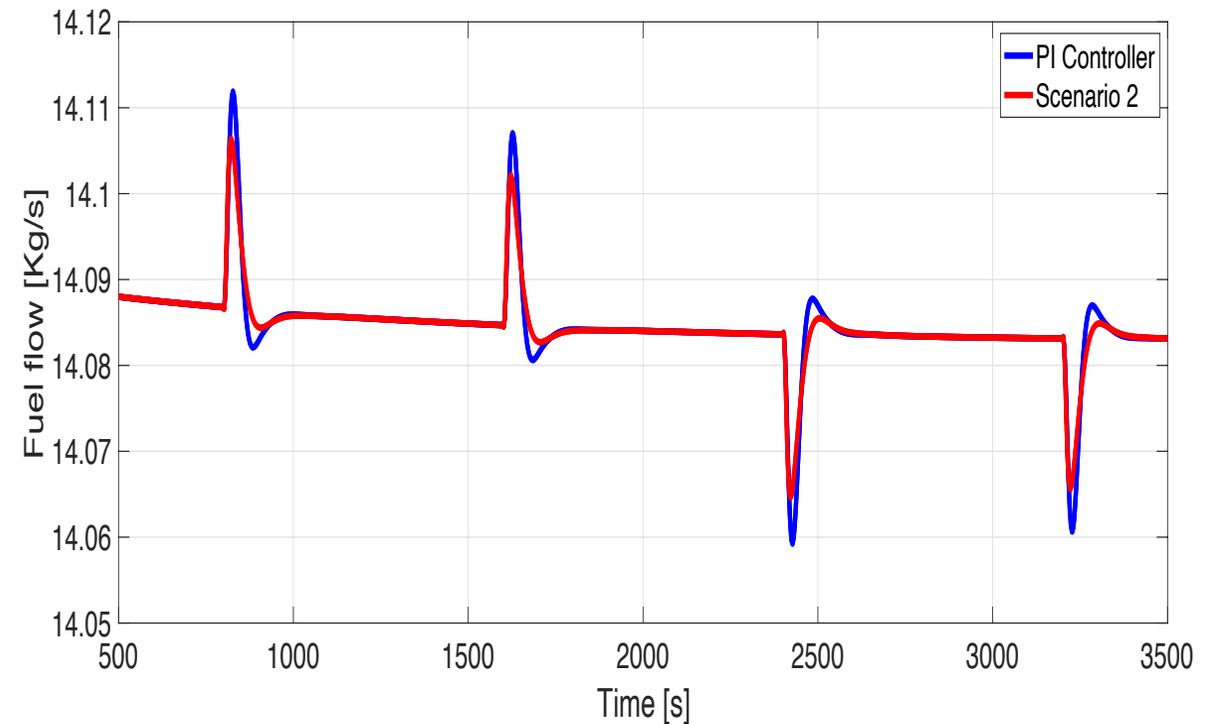


4. Resultados

Escenario 2: Controlador difuso en la variable L



Respuesta del sistema implementando controladores fuzzy y PI para L

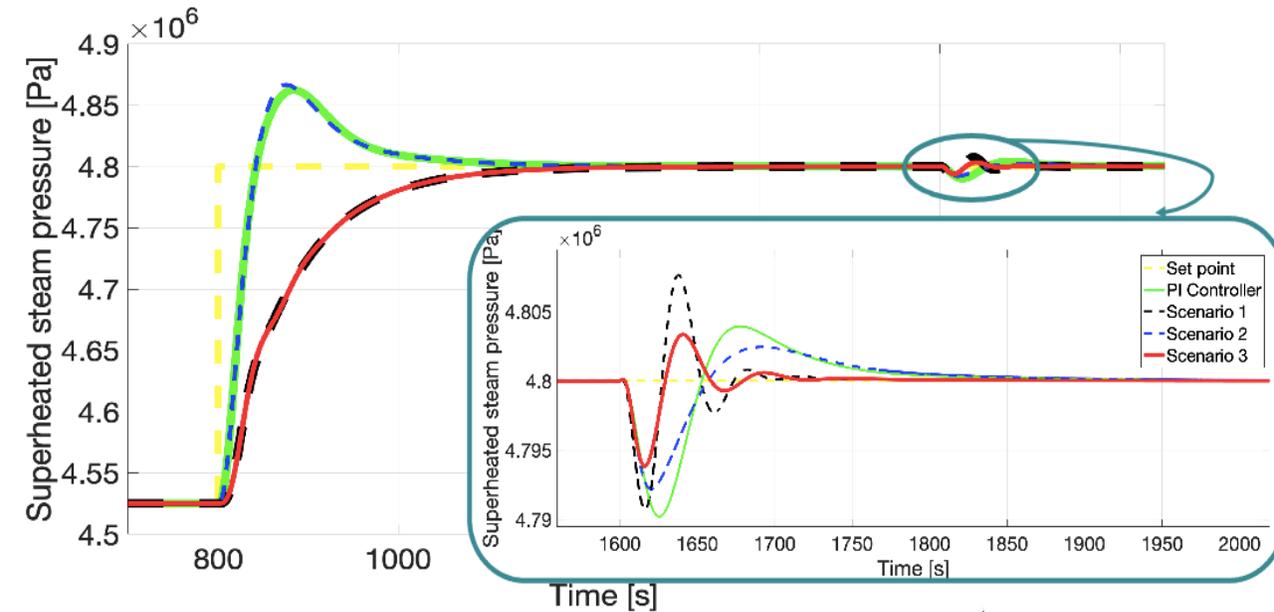


Flujo de combustibles fósiles implementando controladores difusos y PI en variable L .

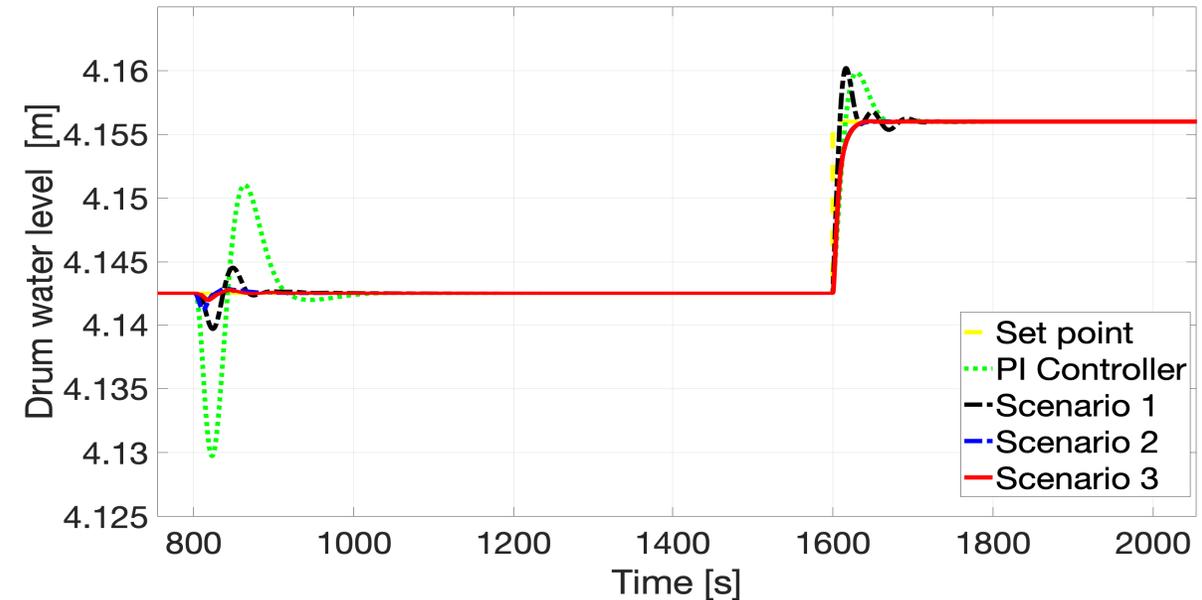


4. Resultados

Escenario 3: Controladores difusos en la variable L y p_s



Comparación entre los tres escenarios y controlador PI considerando variable p_s .

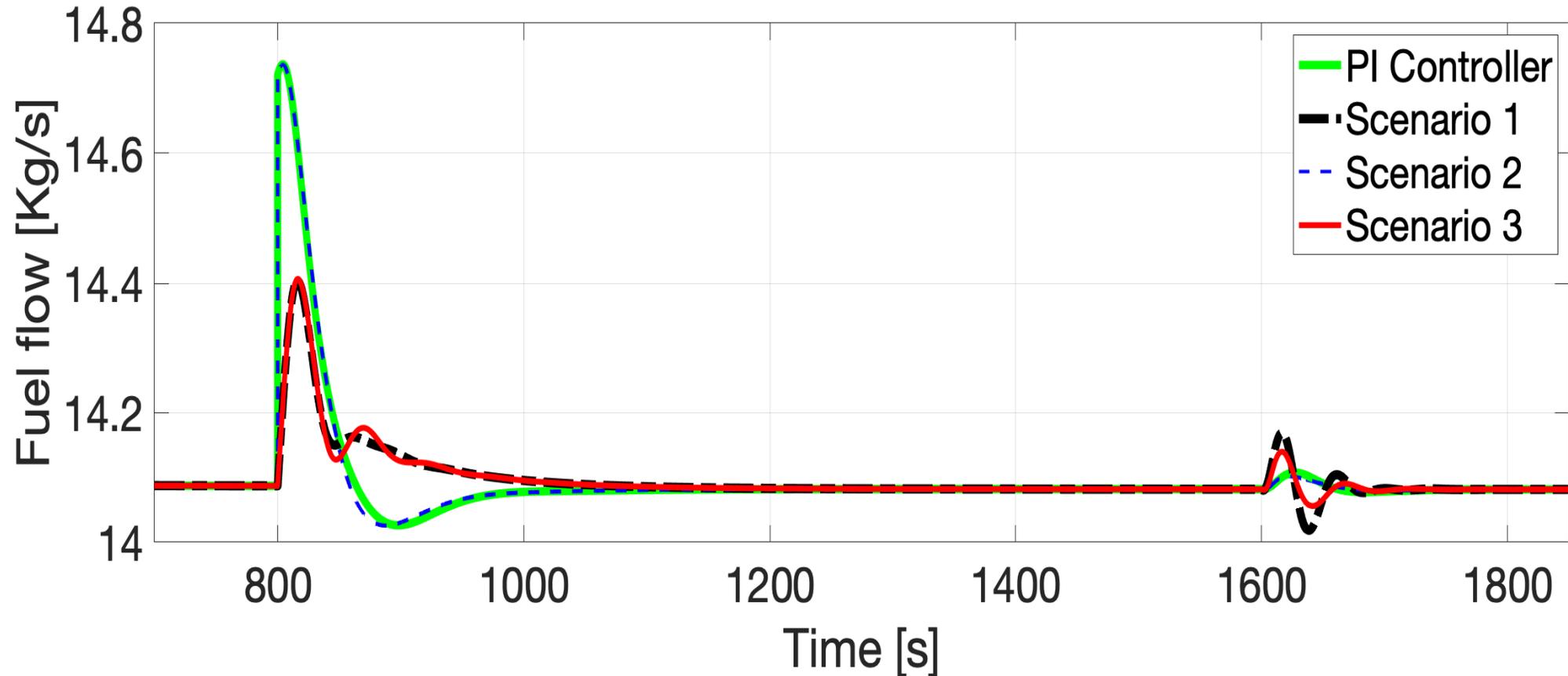


Comparación entre los tres escenarios y controlador PI considerando variable L .



4. Resultados

Consumo de combustible

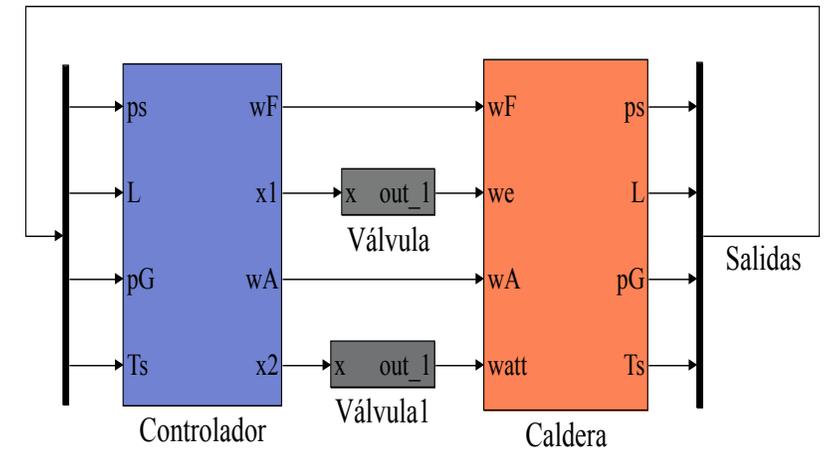
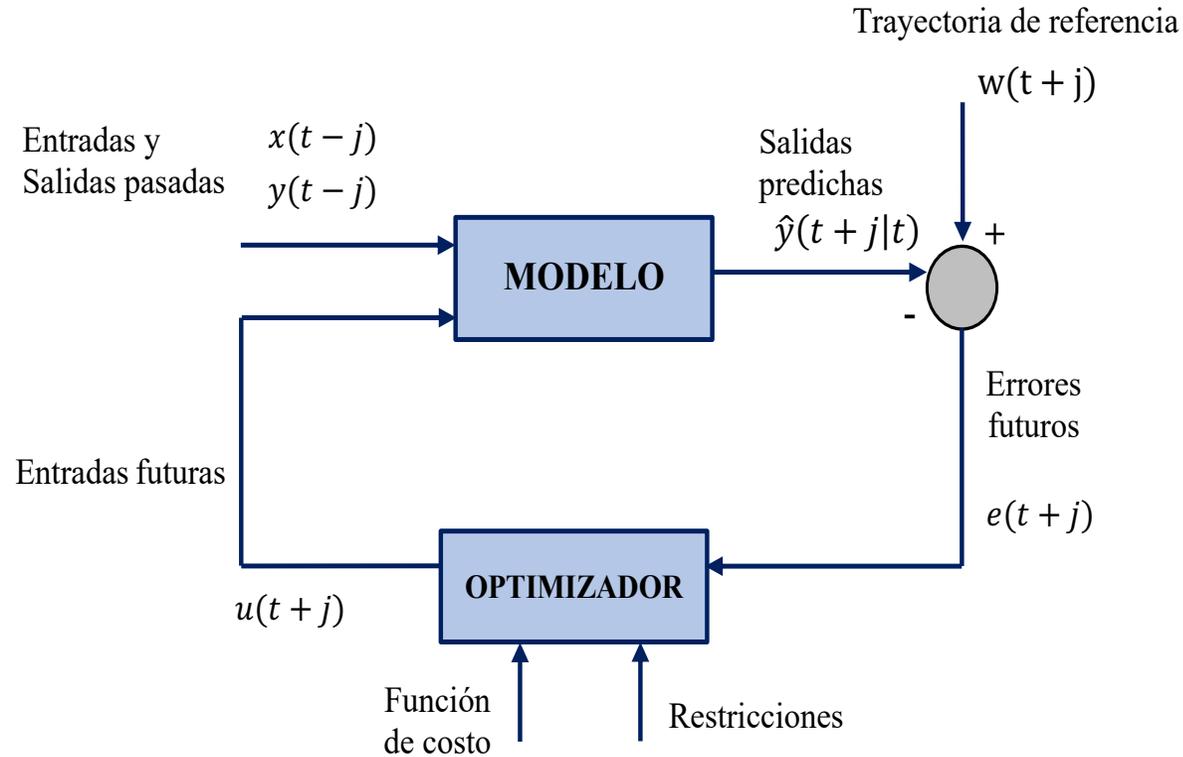


Comparación entre los tres escenarios y el controlador PI considerando el flujo de combustibles fósiles



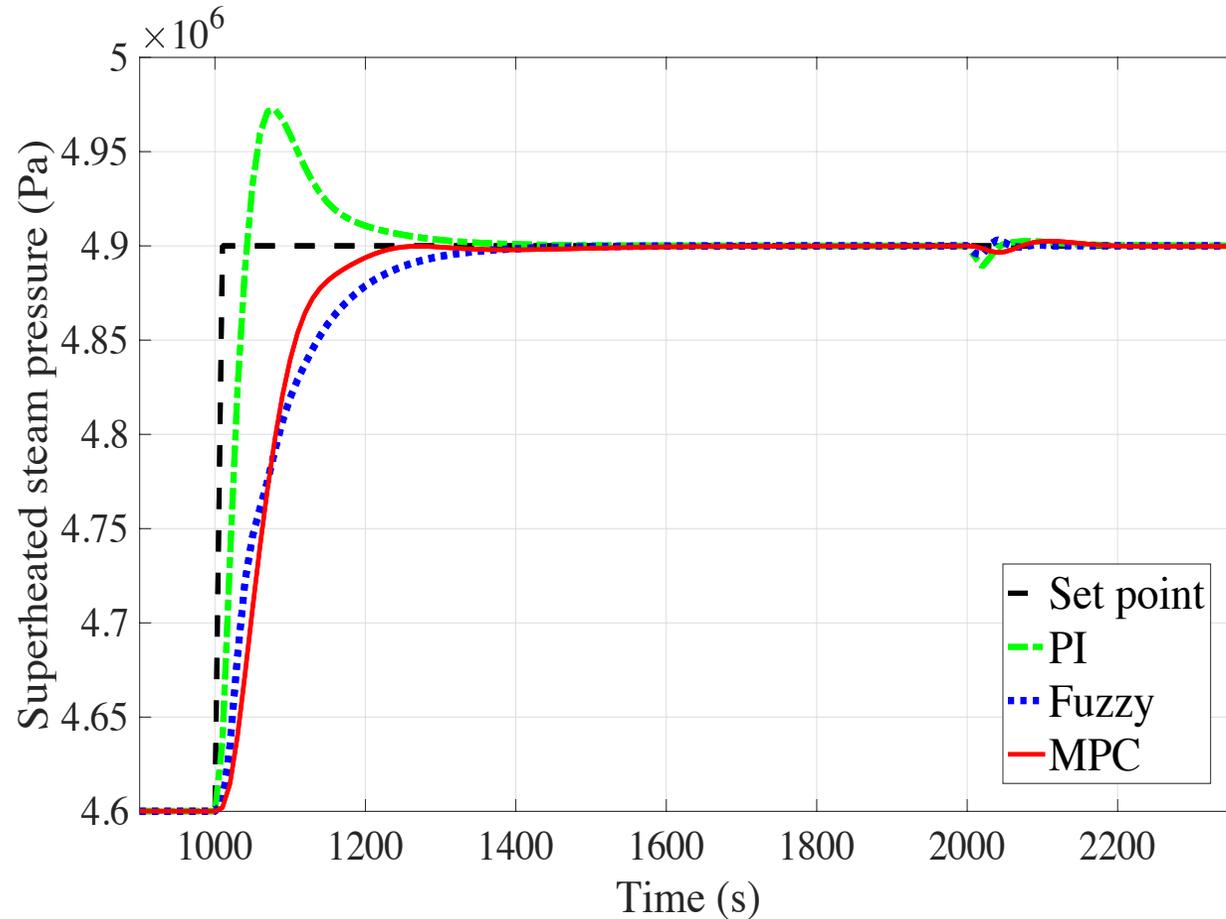
4. Diseño de controladores

Implementación de control predictivo basado en modelos (MPC)



4. Resultados

Controladores PI, Difuso y MPC para la variable p_s



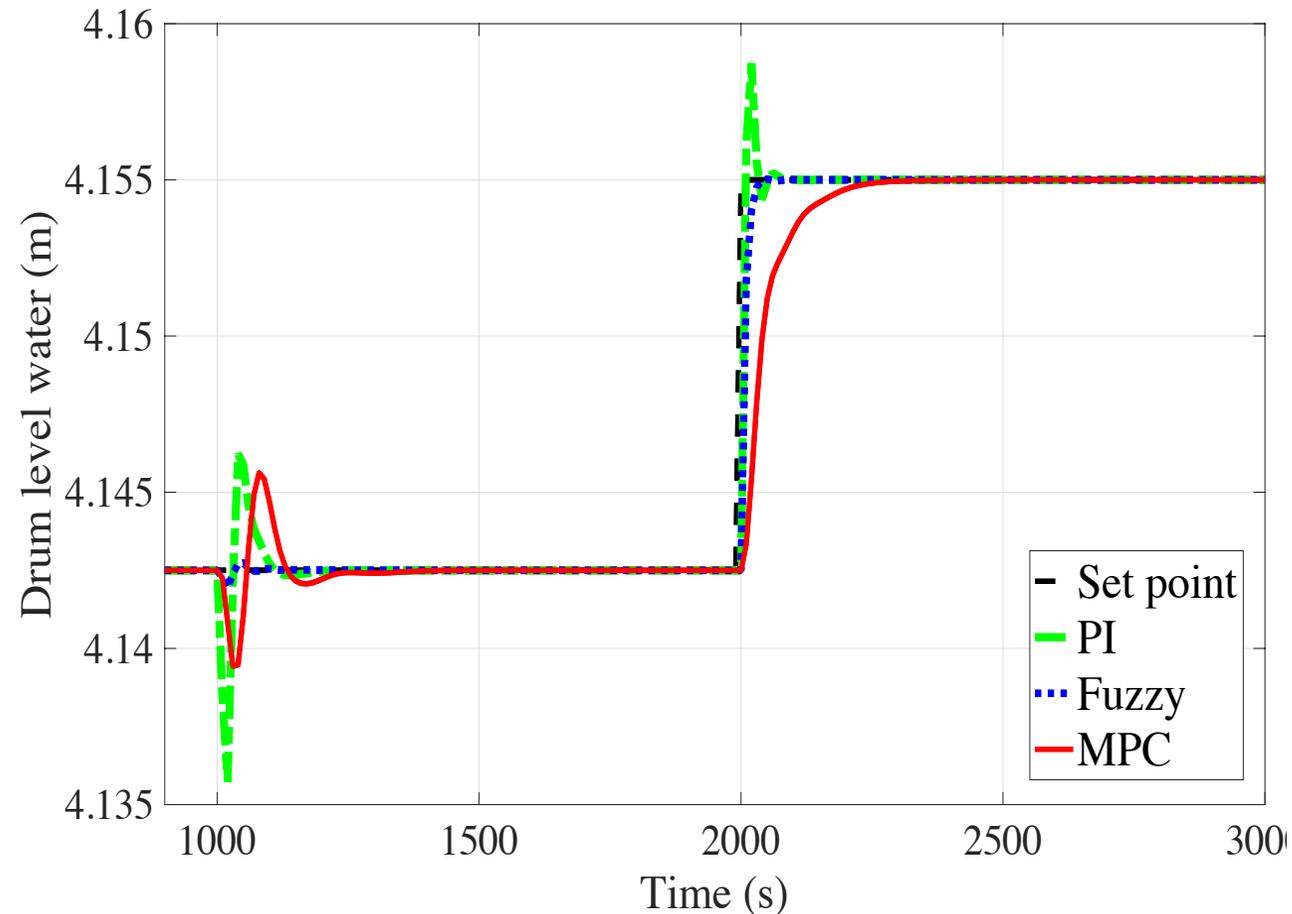
Respuesta del sistema en la variable p_s con controladores PI, difuso y MPC

Parámetros	PI	Fuzzy	MPC
Sobreimpulso	1.4741%	0 %	0%
Tiempo de establecimiento	368.255 s	314.145 s	211.238 s
Error en estado estacionario	17.8591 Pa	2.7210 Pa	1.79 Pa



4. Resultados

Controladores PI, Difuso y MPC para la variable L



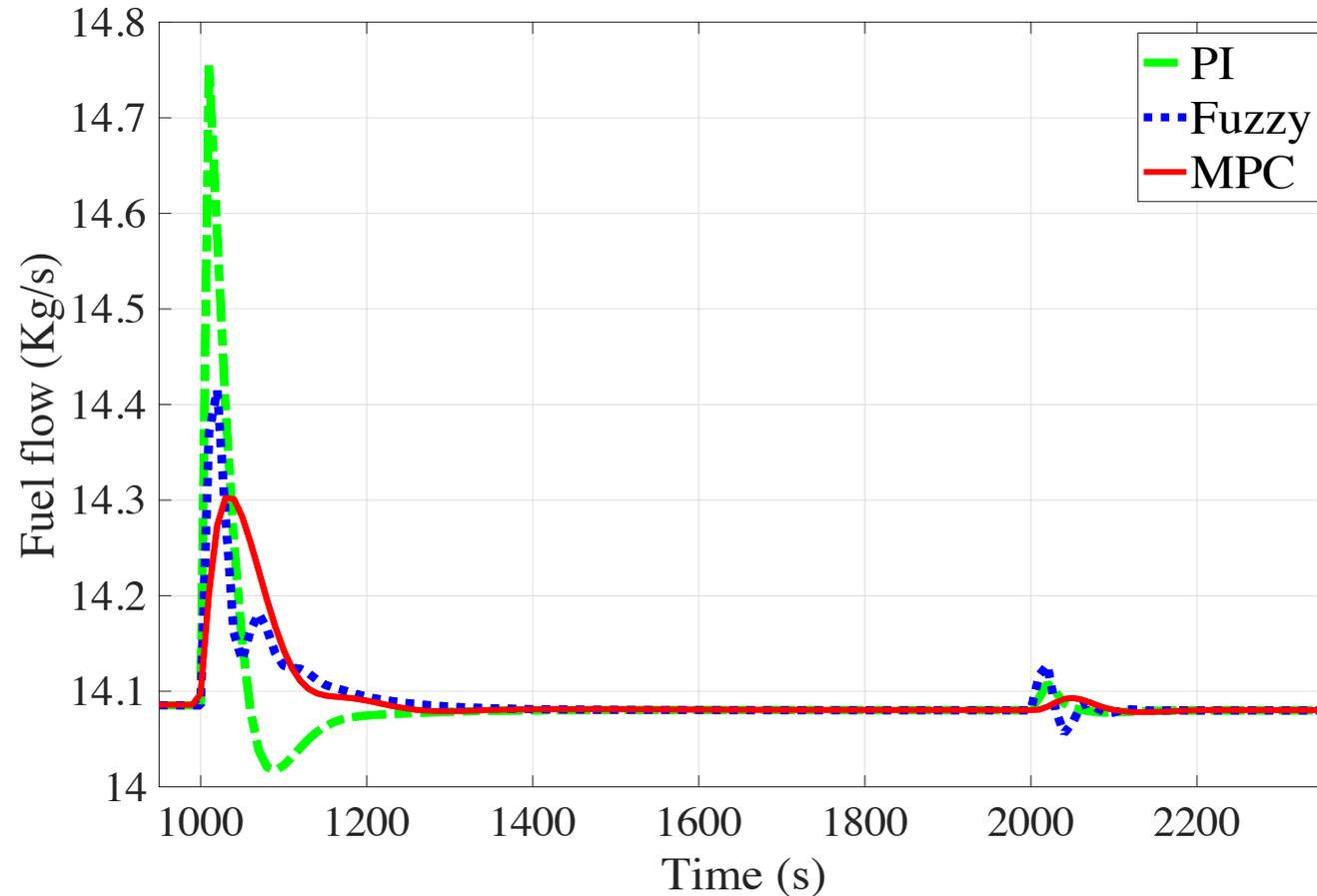
Parámetros	PI	Fuzzy	MPC
Sobreimpulso	0.0898%	0.000514%	0%
Tiempo de establecimiento	67.229 s	49.867 s	228.609 s
Error en estado estacionario	6.95 e -11m	1.0605e-12 m	8.84e-10 m

Respuesta del sistema en la variable L con controladores PI, difuso y MPC



4. Resultados

Consumo de combustible fósil.



Parámetros	PI	Fuzzy	MPC
Valor de pico máximo	14.7563 Kg/s	14.4151 Kg/s	14.3025 Kg/s
Ahorro	0%	2.3122%	3.0753%

Gráfica comparativa del consumo de combustible con estrategias de control PI, difuso y MPC



5. Conclusiones

- El desarrollo del simulador de la planta termoeléctrica de ciclo combinado se utilizó para validar las diferentes estrategias de control diseñadas.
- Al implementar el controlador PI convencional y los dos controladores avanzados, difuso y MPC, para las variables presión de vapor sobrecalentado y nivel de agua del domo de la caldera de la central CC, los resultados mostraron que el controlador MPC presenta un menor consumo de combustibles fósiles, con un ahorro del 3.08%, debido a su mejor desempeño en términos de máximo sobreimpulso y error de estado estacionario en comparación con los controladores difusos y PI.
- El nivel del agua del domo, con el controlador difuso, se estabiliza más rápido que el controlador MPC, sin embargo, el consumo de combustible fósil es mayor. Dado que el objetivo principal es reducir el consumo de combustibles fósiles, el MPC se establece como el mejor controlador para esta aplicación.

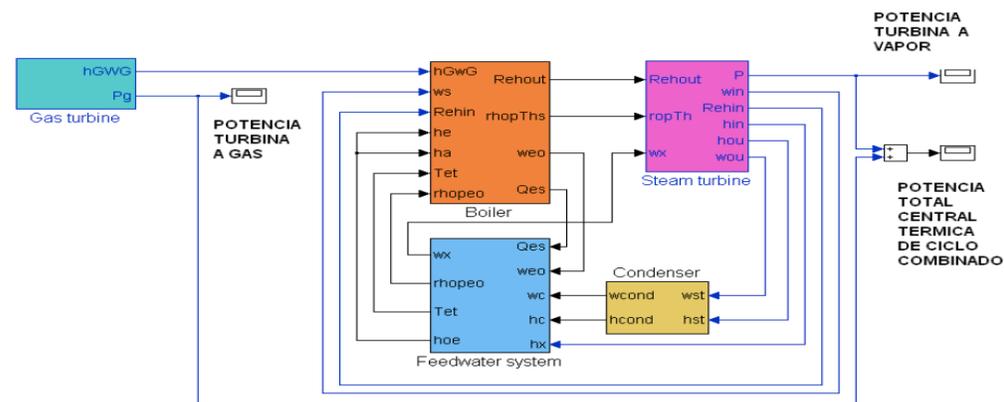


- El simulador es un aporte para las futuras generaciones, debido a que permite implementar diferentes algoritmos de control, como herramienta de aprendizaje, permitiendo familiarizarse con controles de procesos con aplicaciones reales, de tipo multivariable, que fueron en trabajos previos validados con una planta real, y con dinámicas complejas de controlar, en donde el uso de controles no tradicionales tienen alto impacto.
- Este trabajo aportó en el Proyecto CONTROL Y GESTIÓN ÓPTIMA DE MICROREDES AISLADAS.



6. Trabajos Futuros

- Se propone el diseño de un algoritmo de control predictivo centralizado para las dos variables, e incluir la minimización del consumo de combustibles fósiles como función objetivo de control en la formulación.
- Se propone el diseño de algoritmos de control predictivo distribuido, que incluyan como variable de consenso la minimización del consumo de combustibles fósiles.
- Agregar puntos eficientes de operación en los actuadores dentro de la formulación, para obtener una mayor eficiencia en la producción de energía.

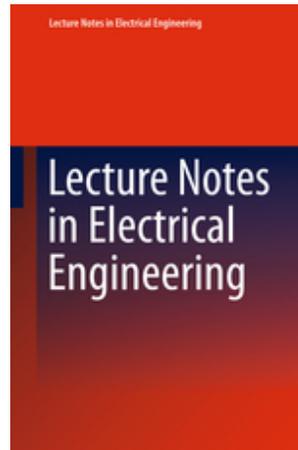
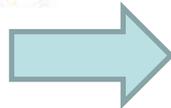




Scopus

IEEE IFAC ICA - ACCA 2020

IEEE IFAC International Conference on Automation,
XXIV Congreso de la Asociación Chilena de Control Automático ACCA, NMO IFAC



IEEE Xplore[®] Digital Library





ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DISEÑO DE UN CONTROLADOR PREDICTIVO PARA UNA PLANTA TERMOELÉCTRICA DE CICLO COMBINADO

Autores: Tania Orrala
Dennis Burgasí

Director: Ing. Jacqueline Llanos Dr.

Co-Director: Ing. Diego Ortiz Dr.

{tborrala, dfburgasi, jdllanos1, ddortiz5}@espe.edu.ec

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
2021

