



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones**

**Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control**

**Tema:**

Diseño e implementación de estrategias de control avanzado embebidas en un controlador lógico programable y aplicadas a un entorno industrial de escala real

**Autores:**

Michelle Carolina Herrera Yela  
Stefano Gonzalo Hurtado Freire

**Director:**

Ing. Rodolfo Gordillo, Ph.D.

Sangolquí - 2022



# CONTENIDO

1

Motivación e importancia

2

Objetivos del proyecto de investigación

3

Metodología para desarrollar el proyecto

4

Identificación de la planta de temperatura

5

Diseño de las estrategias de control avanzado

6

Simulaciones y escenarios de prueba

7

Generación de código e implementación

8

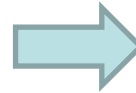
Análisis de resultados

9

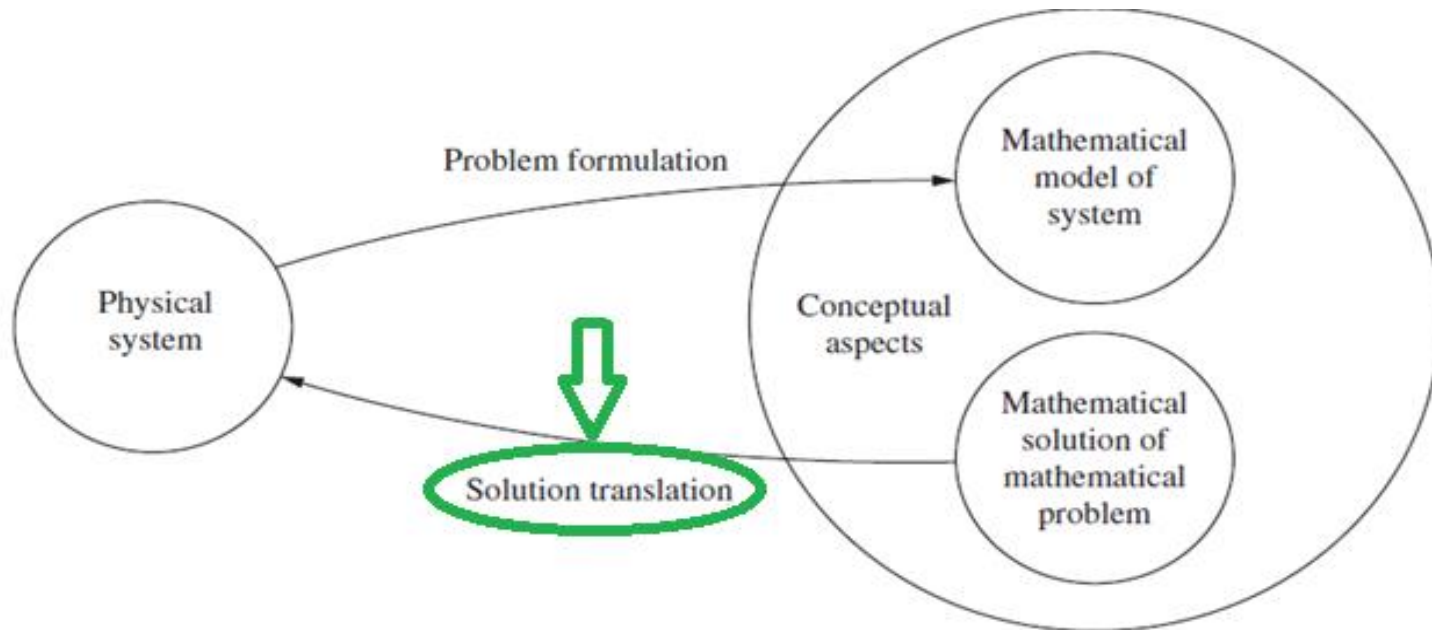
Conclusiones

# Motivación e importancia

A lo largo de los últimos años, la realización de estrategias de control avanzado a nivel industrial ha representado un proceso complejo y las herramientas de generación o conversión de código no han sido ampliamente difundidas.



La literatura al respecto resulta ser relativamente escasa y usualmente se pueden requerir de recursos adicionales para embeber el código generado directamente en los controladores lógicos programables



# Objetivos del proyecto

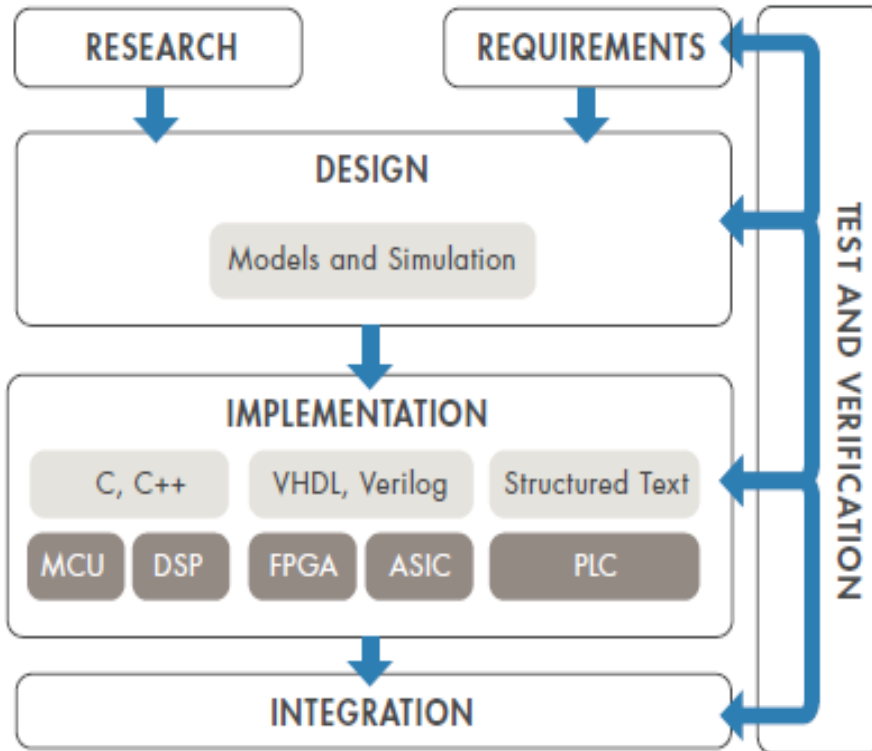
## *Objetivo general*

Diseñar e implementar estrategias de control avanzado embebidas en un controlador lógico programable y aplicadas a un entorno industrial de escala real.

## *Objetivos específicos*

- Realizar una correcta identificación de la planta de temperatura con el uso del PLC TURCK, para obtener un gemelo digital con mínimo error.
- Diseñar estrategias de control avanzado para la planta de temperatura identificada.
- Generar el código correspondiente a los controladores diseñados mediante la herramienta de Matlab y Simulink para la plataforma de software CODESYS.
- Análisis de desempeño de las estrategias de control avanzado tanto en simulación como en tiempo real.

# Metodología del proyecto



Identificación de la planta de temperatura: método gráfico de estimación por respuesta al escalón y función ARX.

Validación del modelo identificado mediante la función PROCEST P1D.

Simulación de las estrategias de control avanzado mediante la herramienta Matlab - Simulink.

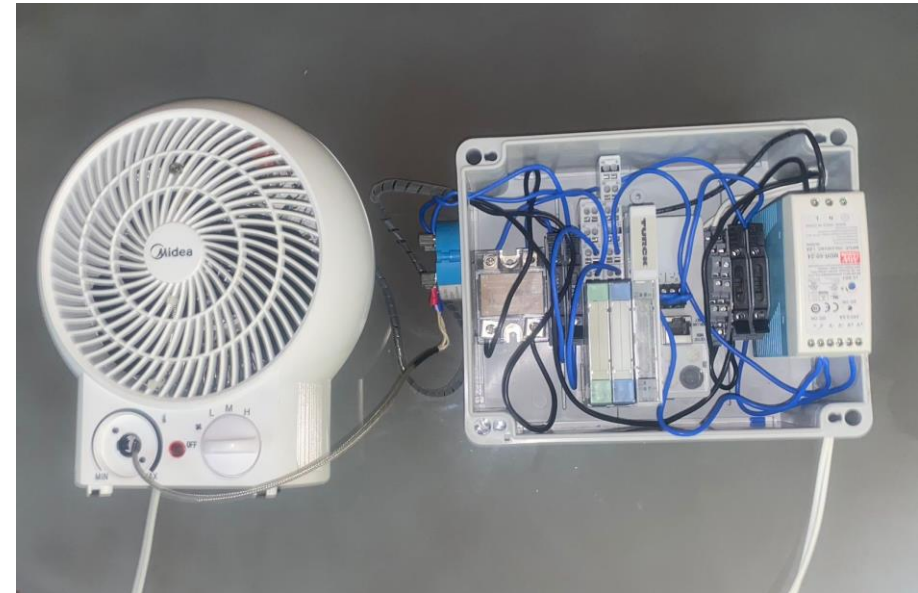
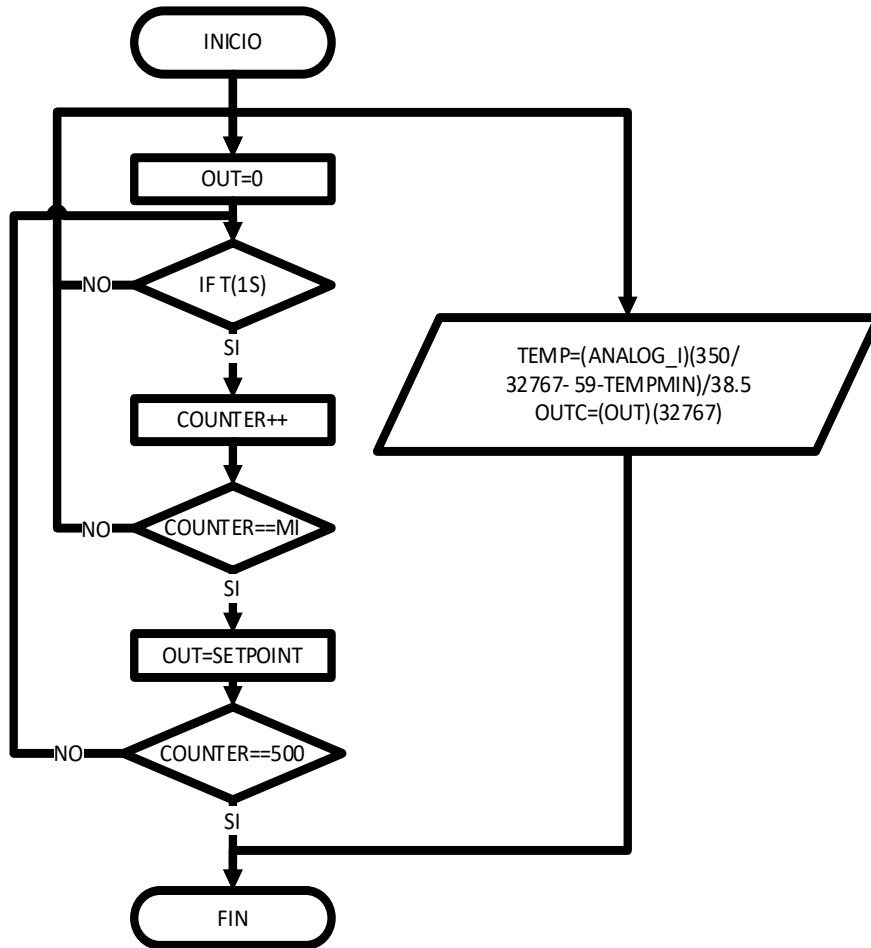
Generación de código mediante la herramienta Matlab - Simulink para la plataforma de software CODESYS.

Implementación de las estrategias de control avanzado en el controlador lógico programable (PLC) Turck.

Análisis de desempeño de las estrategias de control avanzado en simulación y tiempo real.

# Identificación de la planta

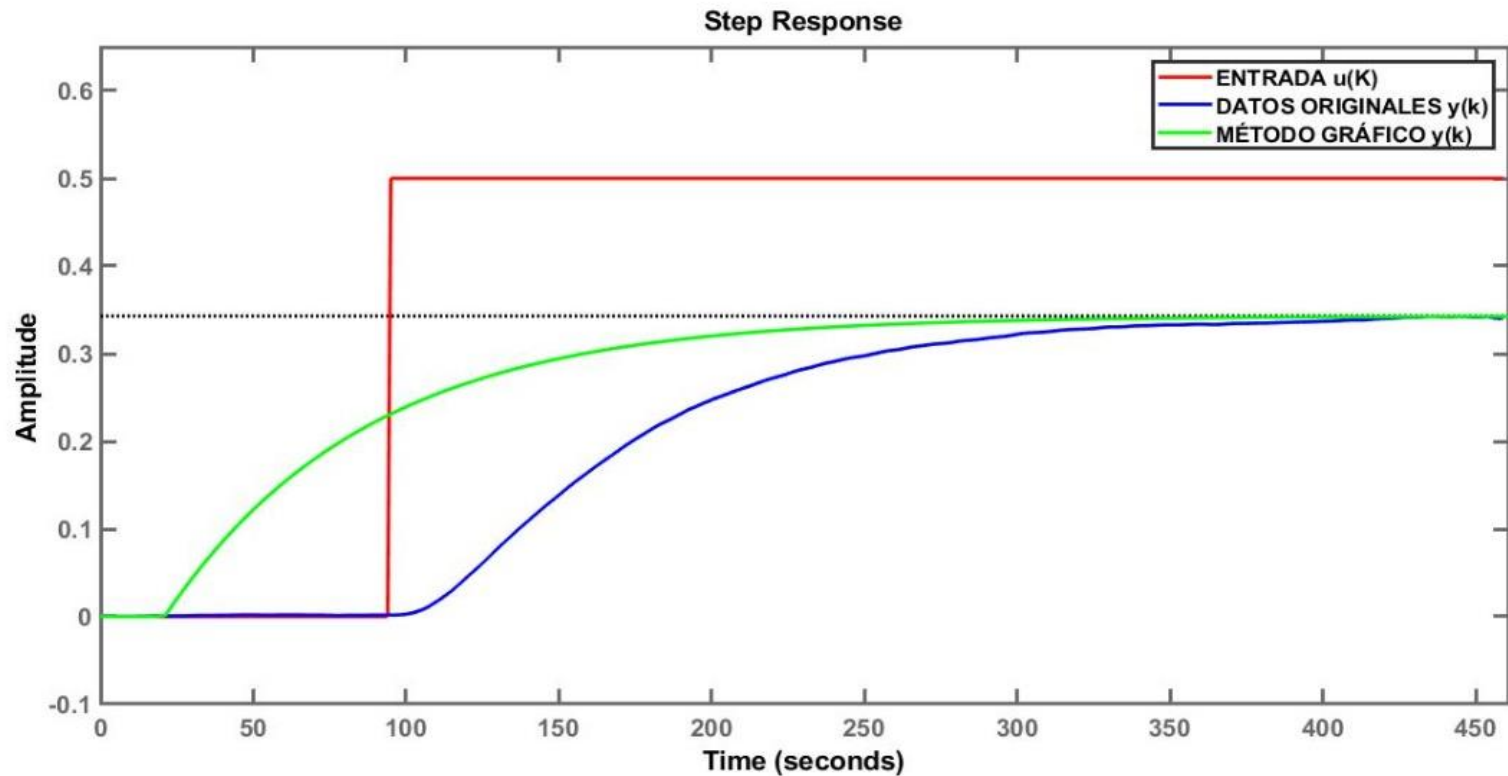
Diagrama de flujo para generar entrada escalón al sistema.



# Identificación de la planta

Respuesta al escalón del sistema, datos originales de la planta y por método de identificación gráfico.

$$G(s) = \frac{0.3429}{1 + 66s} * e^{-21s}$$



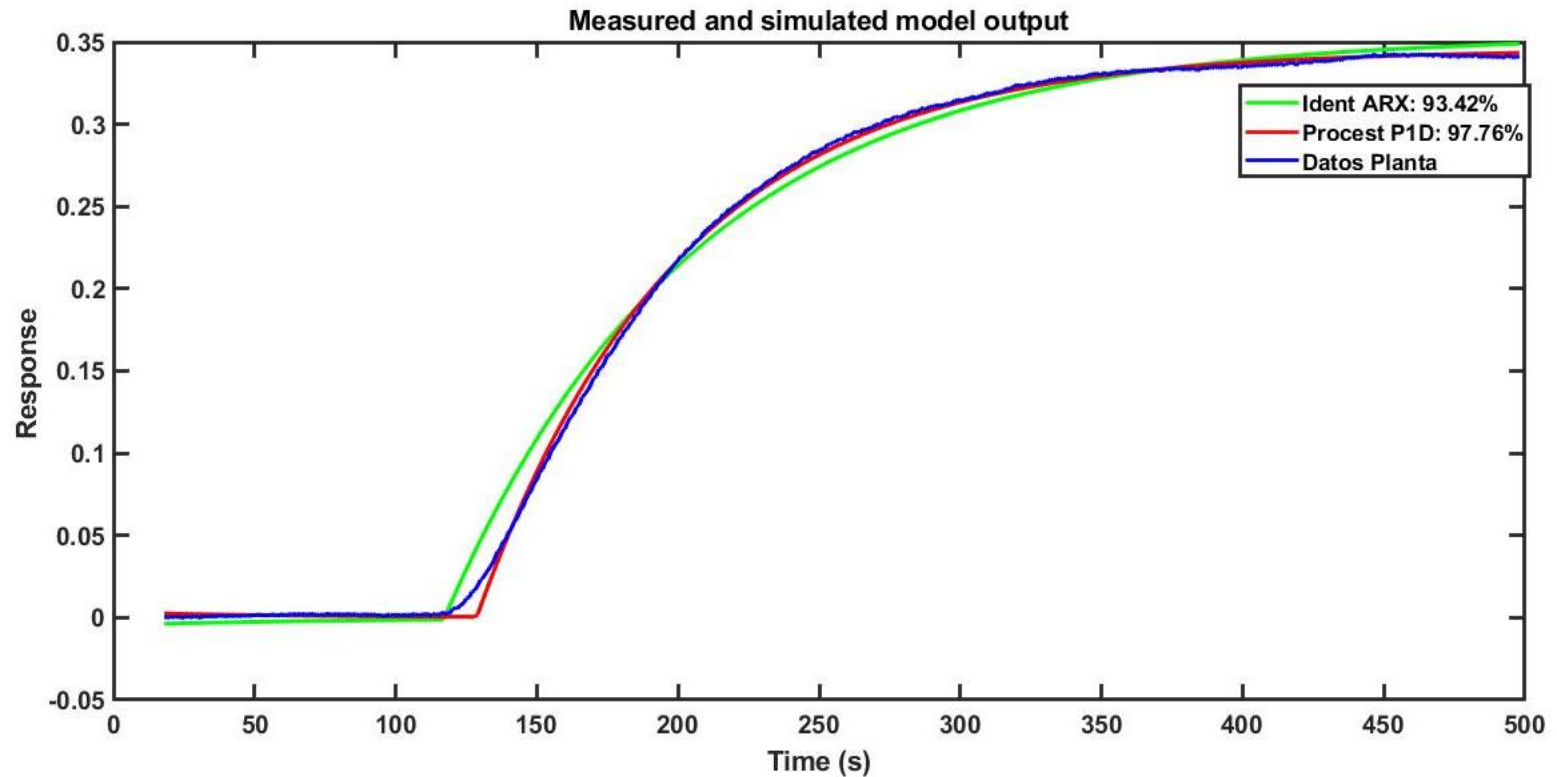
# Identificación de la planta

*Función ARX. IDENT (System Identification toolbox)-Matlab*

$$G(s) = \frac{0.7080}{1 + 89.126s} * e^{-4s}$$

*Función PROCEST P1D*

$$G(s) = \frac{0.69087}{1 + 71.982s} * e^{-15.727s}$$

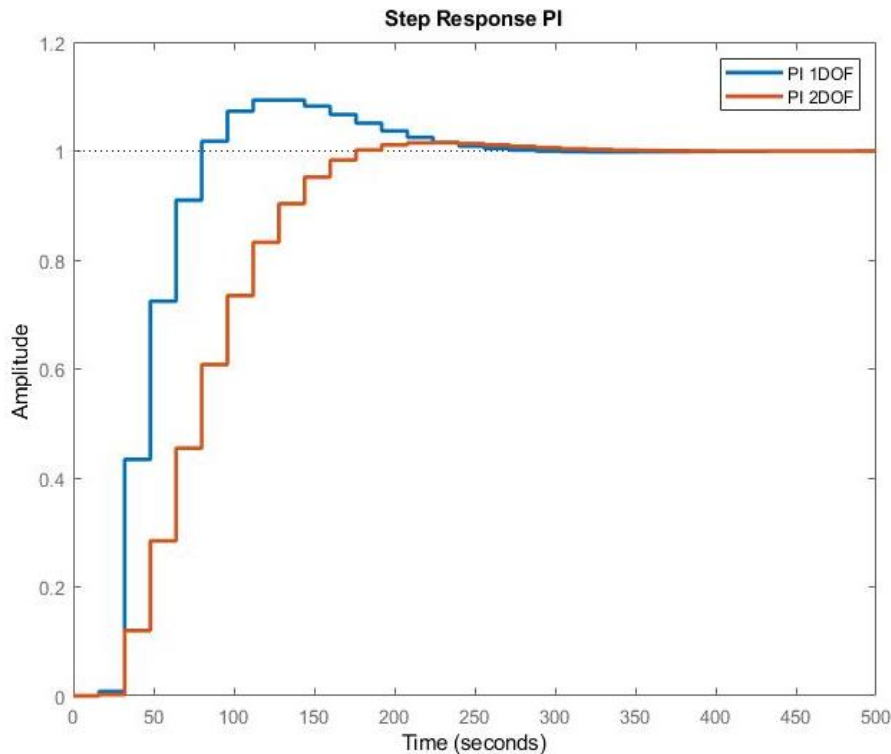




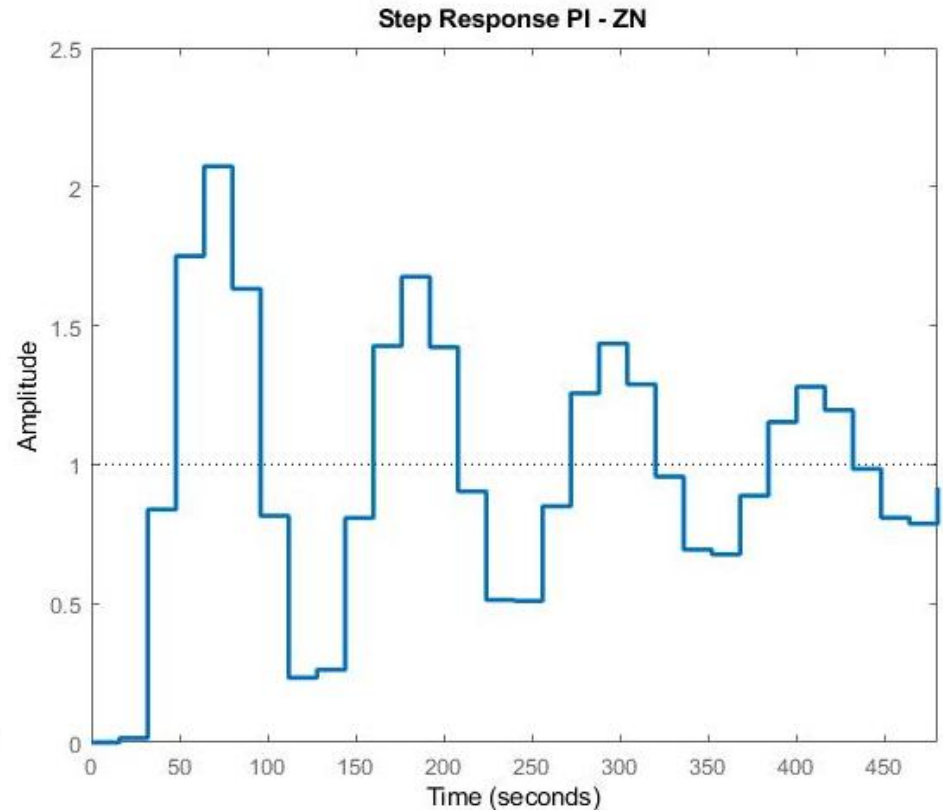
# Diseño de las estrategias de control avanzado

## Controlador PI 2DOF: *PI Forma digital directa - Sintonización de PI por Ziegler - Nichols*

Respuesta del sistema ante el controlador PI en forma digital directa:



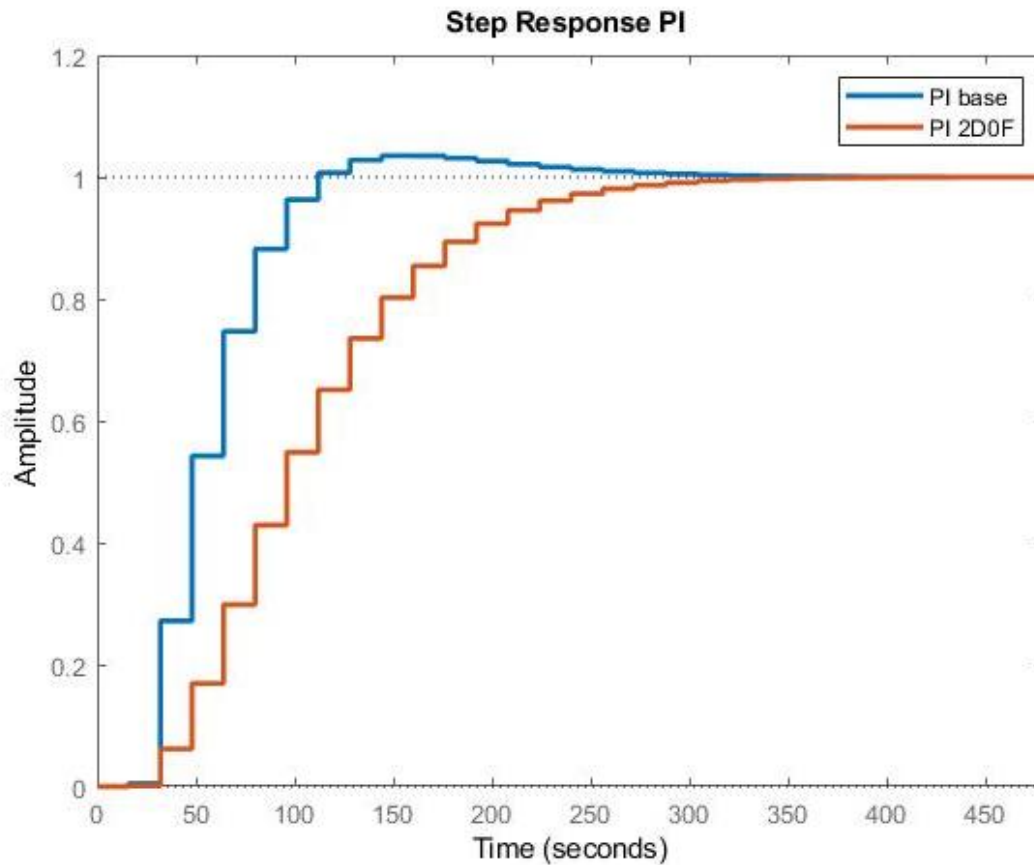
Respuesta del sistema ante el controlador PI diseñado por Ziegler-Nichols.



# Diseño de las estrategias de control avanzado

## Controlador PI 2DOF: *Sintonización software PID Tunner*

Respuesta del sistema controlador PI 1DOF y PI 2DOF.



$$C_1(z) = \frac{1.937z - 1.504}{z - 1}$$

$$C_2(z) = \frac{(s_0 + s_1 + s_2)z^2}{z(z - 1)}$$

$$s_0 = kc + kiT + \frac{kd}{T}$$

$$s_1 = -kc - 2 * \frac{kd}{T}$$

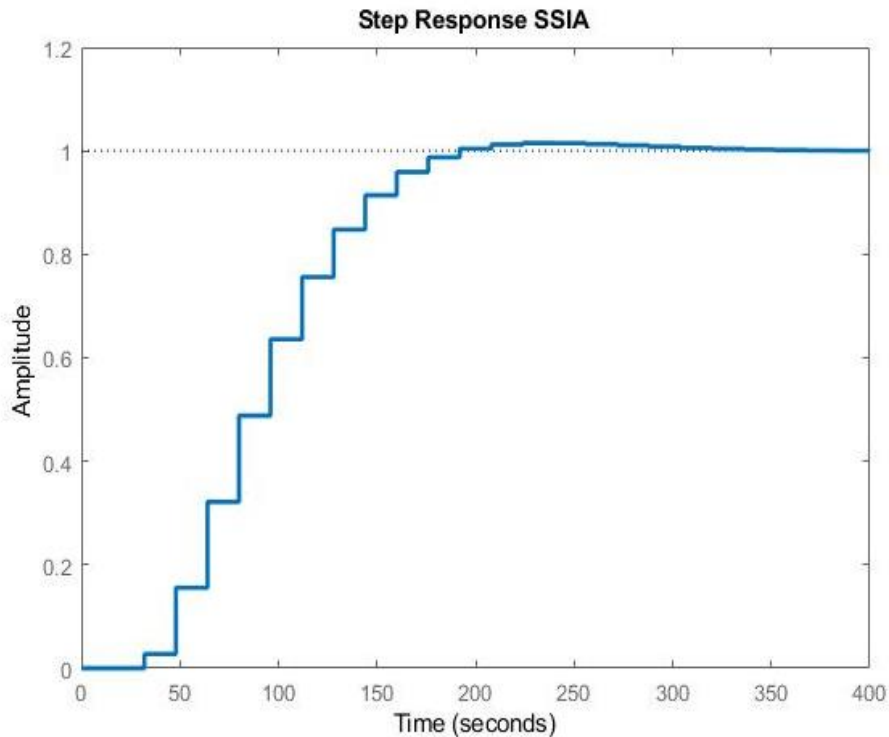
$$s_2 = \frac{kd}{T}$$

$$\therefore C_2(z) = \frac{0.4332z^2}{z^2 - z}$$

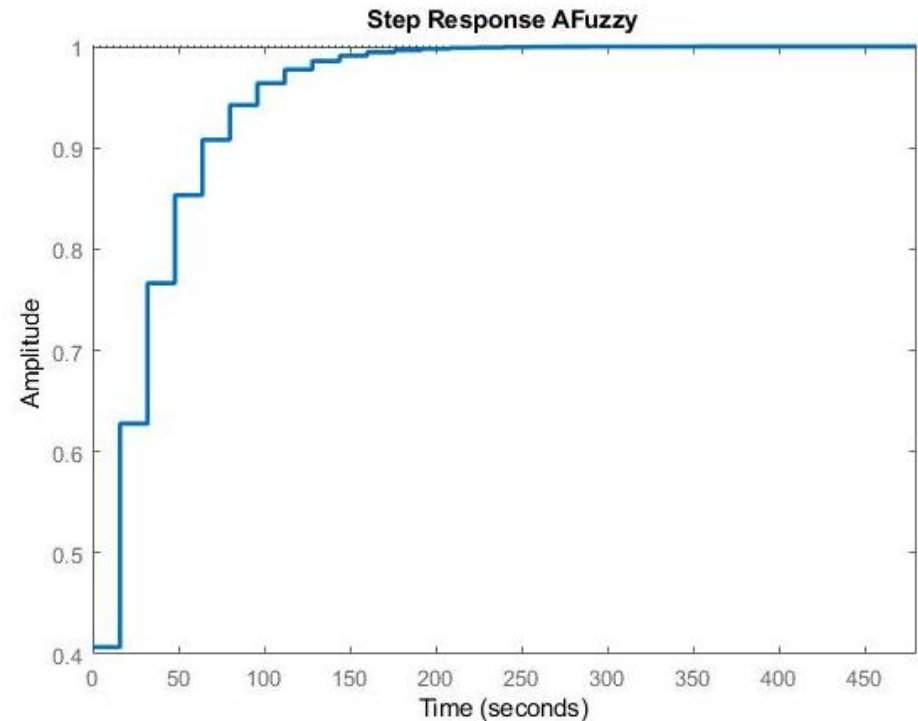
# Diseño de las estrategias de control avanzado

Controlador en espacio de estados con acción integral SSIA - Controlador difuso autoajustable AFuzzy

Respuesta del Sistema controlador SSIA



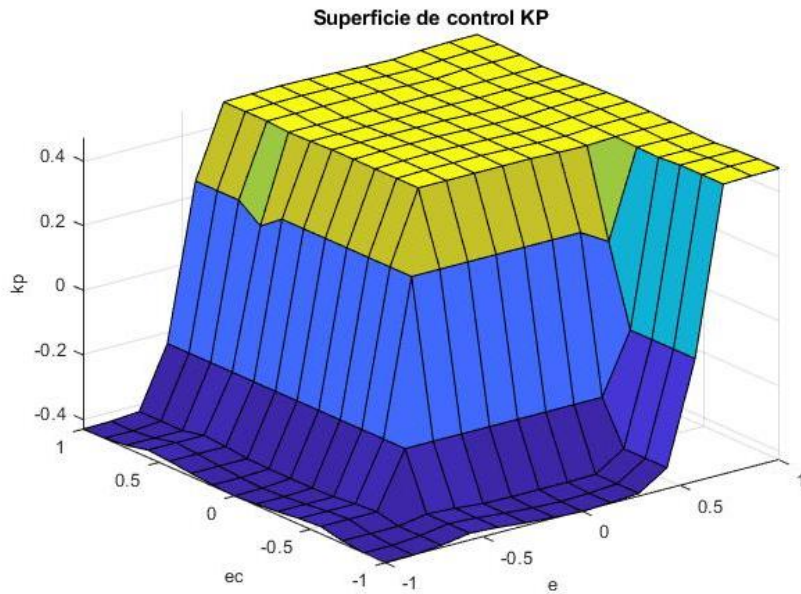
Respuesta del Sistema controlador AFuzzy



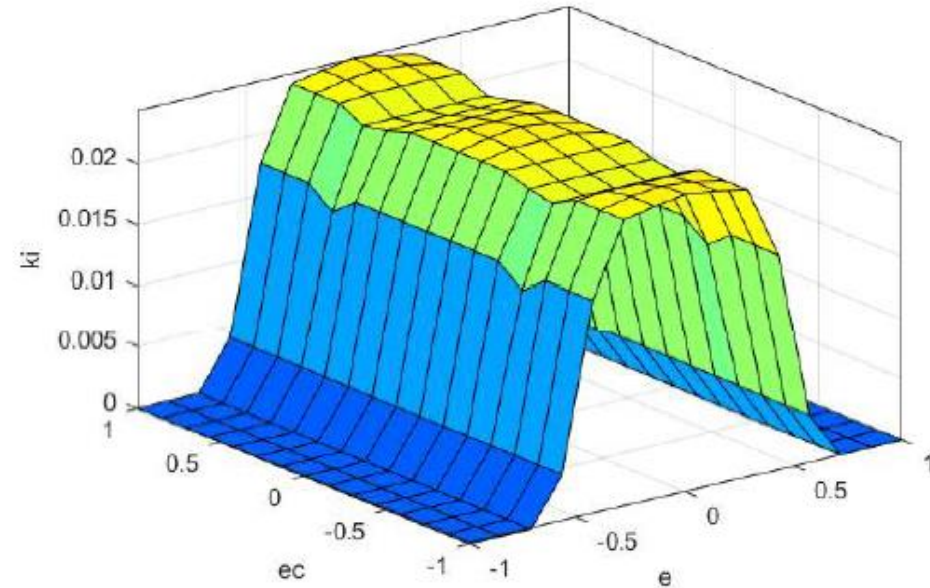
# Diseño de las estrategias de control avanzado

## Controlador difuso autoajustable AFuzzy

Superficie de control para el valor sintonizado de  $k_p$ .



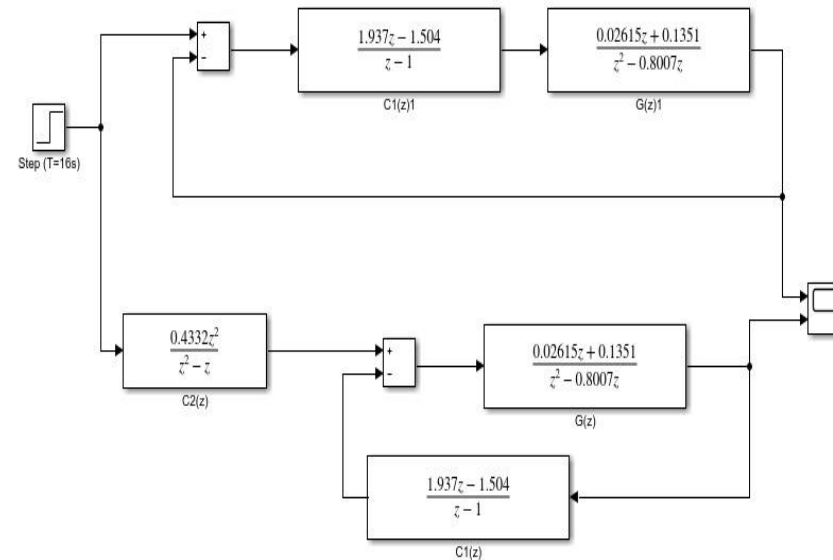
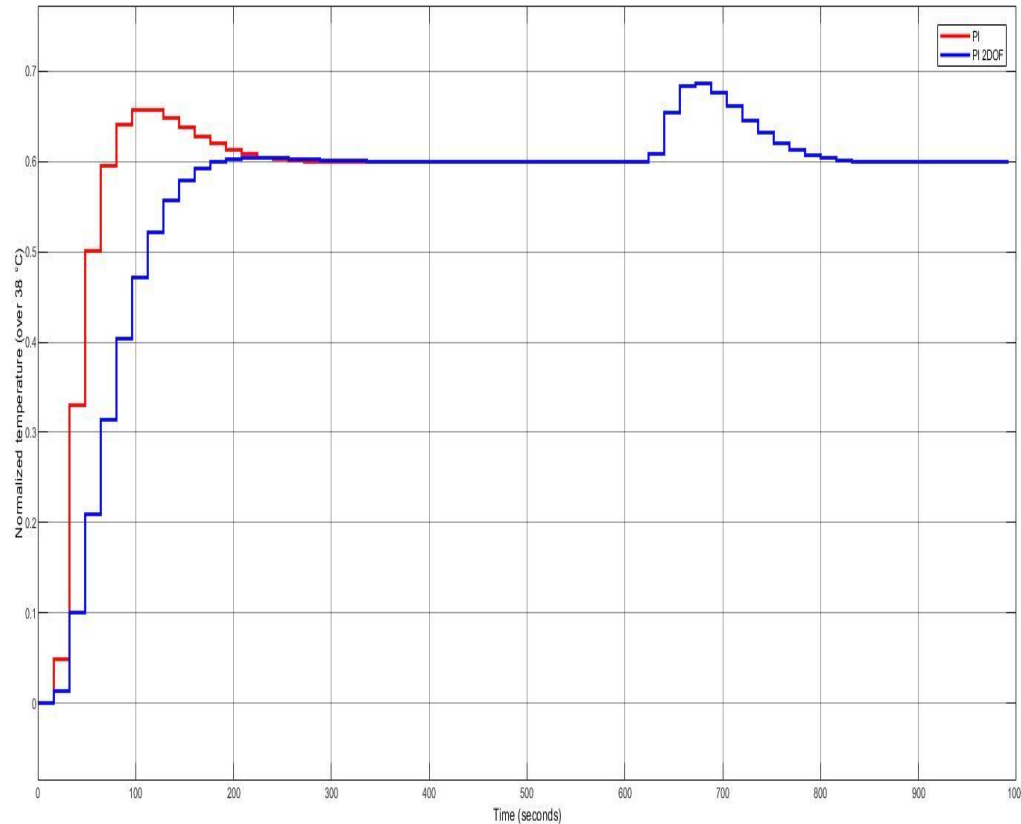
Superficie de control para el valor sintonizado de  $k_i$ .



# Simulaciones y escenarios de prueba

## Controlador PI 2DOF: *Sintonización software PID Tunner*

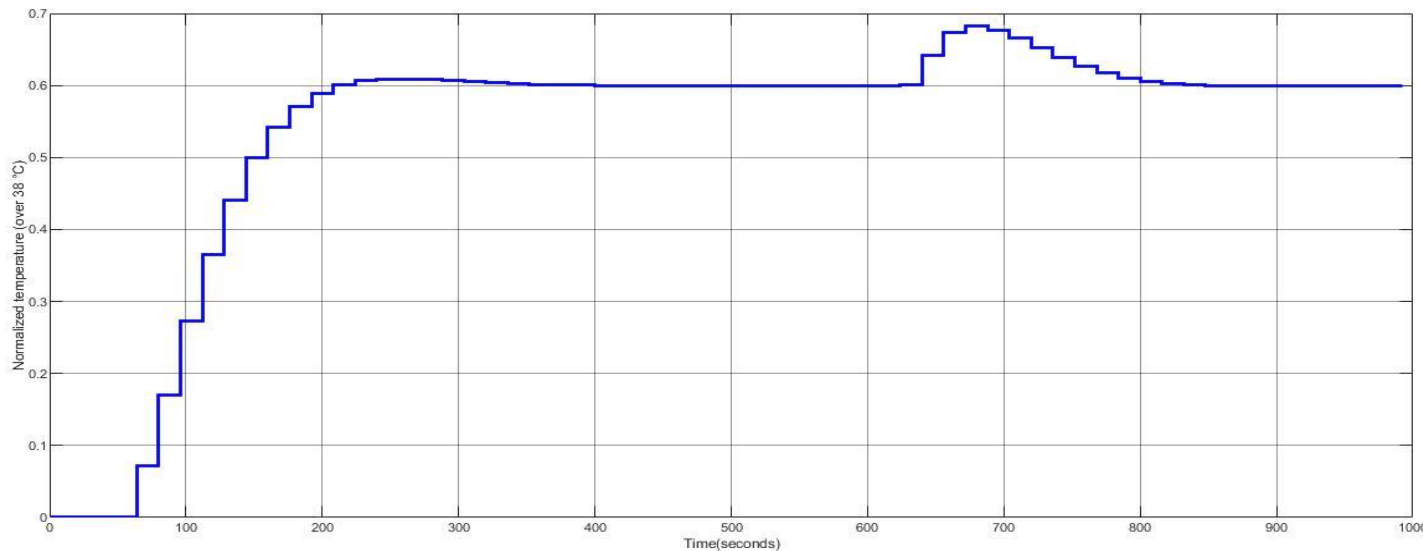
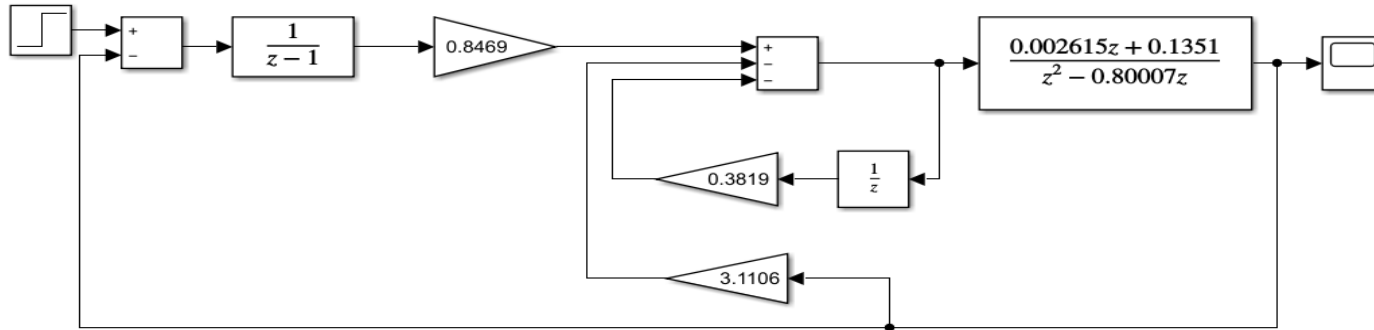
Respuesta del sistema controlador PI 1DOF y PI 2DOF con rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia en simulación



# Simulaciones y escenarios de prueba

## Controlador en espacio de estados con acción integral SSIA

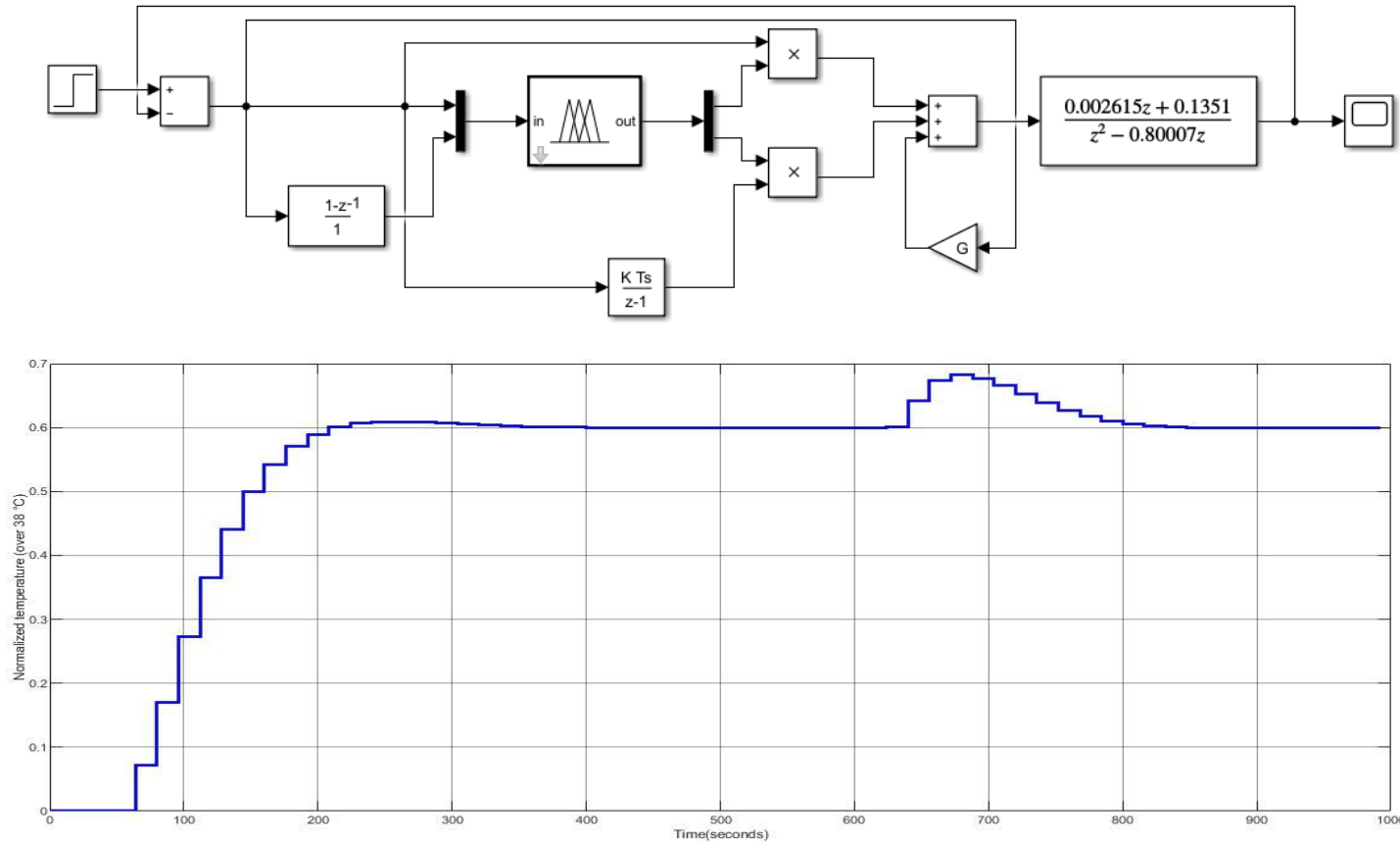
Respuesta del sistema controlador SSIA con rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia en simulación



# Simulaciones y escenarios de prueba

## Controlador difuso autoajustable AFuzzy

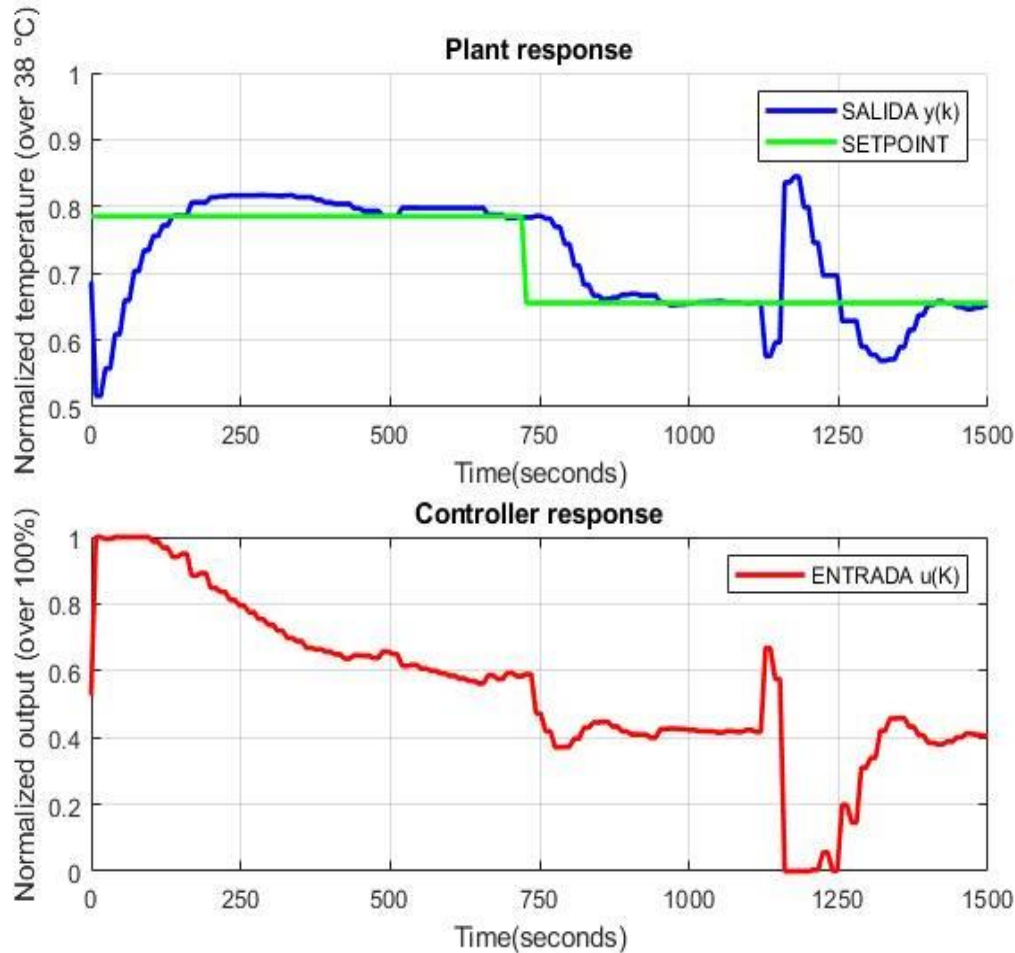
Respuesta del sistema controlador Afuzzy con rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia en simulación



# Generación de código e implementación

## Controlador PI 2DOF

Respuesta del sistema controlador PI 2DOF con rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia en tiempo real



CASE ssMethodType OF

SS\_INITIALIZE:

(Inicialización de variables)

DiscreteTransferFcn3\_states[0] := 0.0;

DiscreteTransferFcn3\_states[1] := 0.0;

DiscreteTransferFcn2\_states := 0.0;

SS\_STEP:

(Ley de Control)

DiscreteTransferFcn3\_tmp := In1 - (-DiscreteTransferFcn3\_states[0]);

DiscreteTransferFcn2\_tmp := In2 - (-DiscreteTransferFcn2\_states);

rtb\_DiscreteTransferFcn2 := (1.937 \* DiscreteTransferFcn2\_tmp) + (-1.504 \* DiscreteTransferFcn2\_states);

(Actualización de variables retrasadas)

DiscreteTransferFcn3\_states[1] := DiscreteTransferFcn3\_states[0];

DiscreteTransferFcn3\_states[0] := DiscreteTransferFcn3\_tmp;

DiscreteTransferFcn2\_states := DiscreteTransferFcn2\_tmp;

(Cálculo de la salida en función a los retardos)

Out1 := (0.4332 \* DiscreteTransferFcn3\_tmp) - rtb\_DiscreteTransferFcn2;

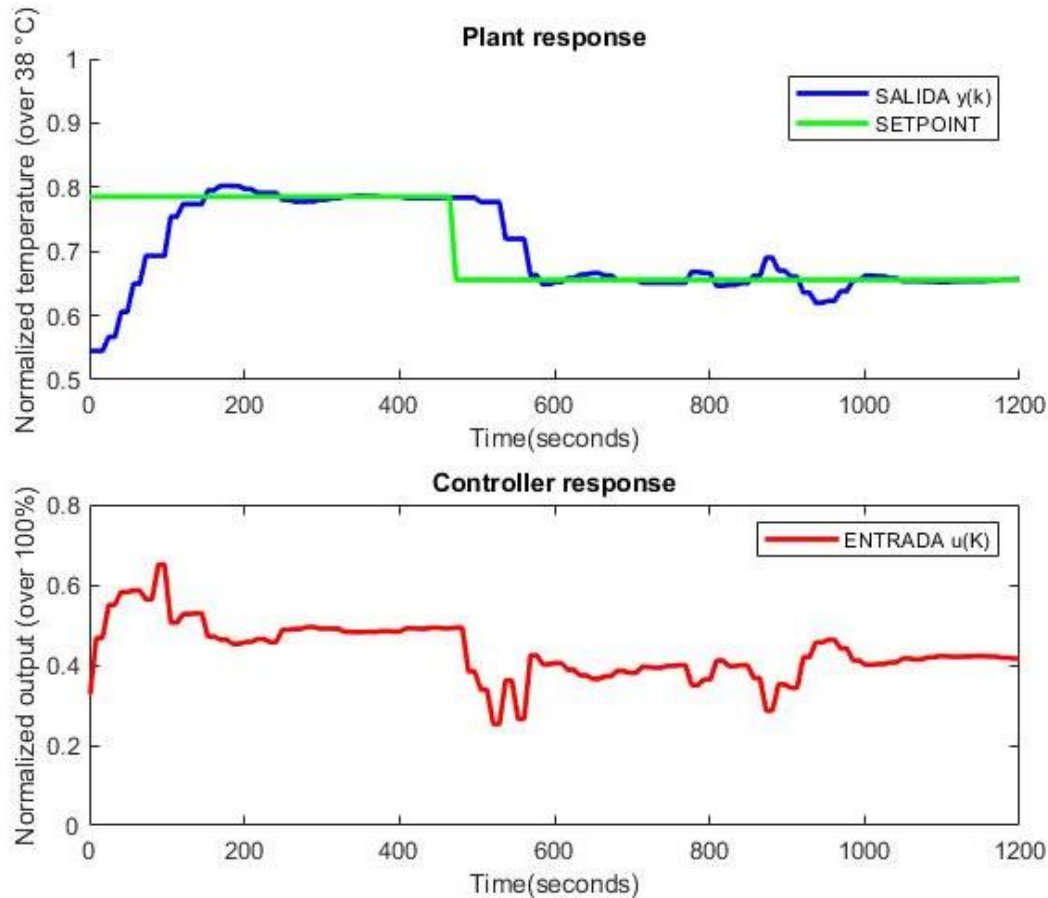
END\_CASE;



# Generación de código e implementación

## Controlador en espacio de estados con acción integral SSIA

Respuesta del sistema controlador SSIA con rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia en tiempo real



CASE ssMethodType OF

SS\_INITIALIZE:

(Inicialización de variables)

`DiscreteTransferFcn states := 0.0;`

`UnitDelay_DSTATE := 0.0;`

SS\_STEP:

(Ley de Control)

`uk := ((0.84694366121736908 * DiscreteTransferFcn states) - (3.1105878633490236 * yk)) - (0.38188569934547445 * UnitDelay_DSTATE);`

`DiscreteTransferFcn states := (Setpoint - yk) - (-DiscreteTransferFcn states);`

(Actualización de variables retrasadas)

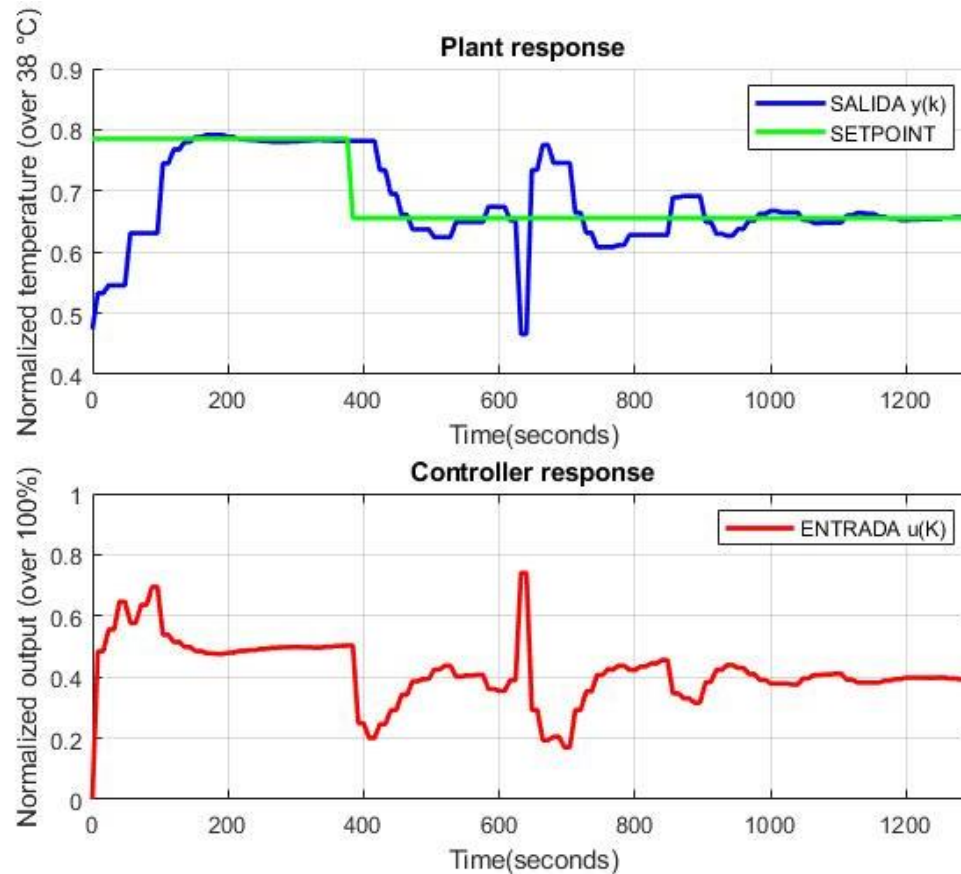
`UnitDelay_DSTATE := uk;`

END\_CASE;

# Generación de código e implementación

## Controlador difuso autoajutable AFuzzy

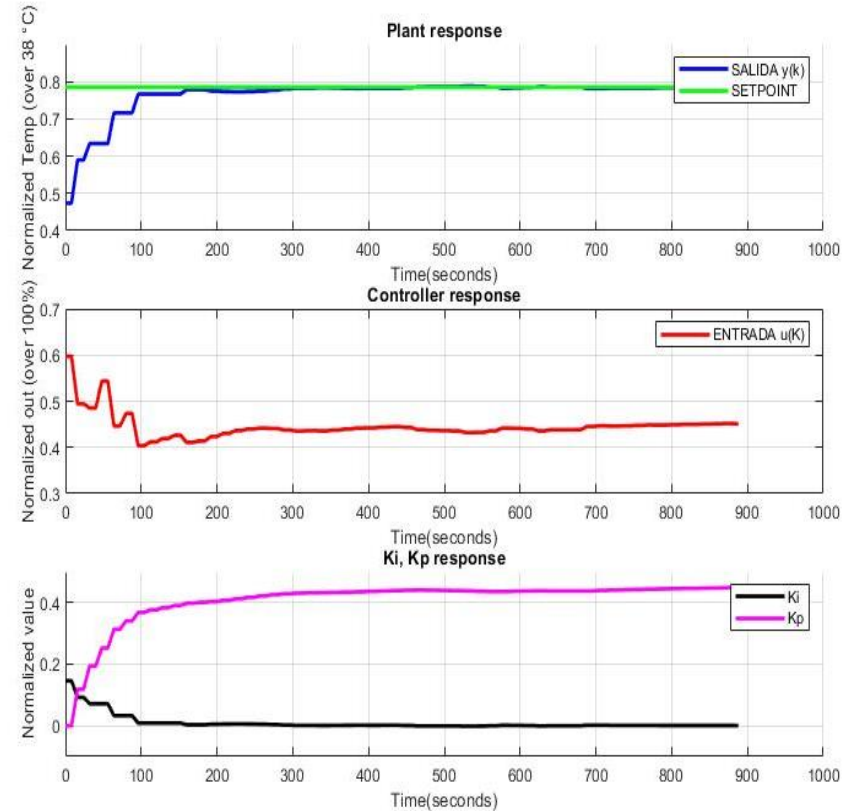
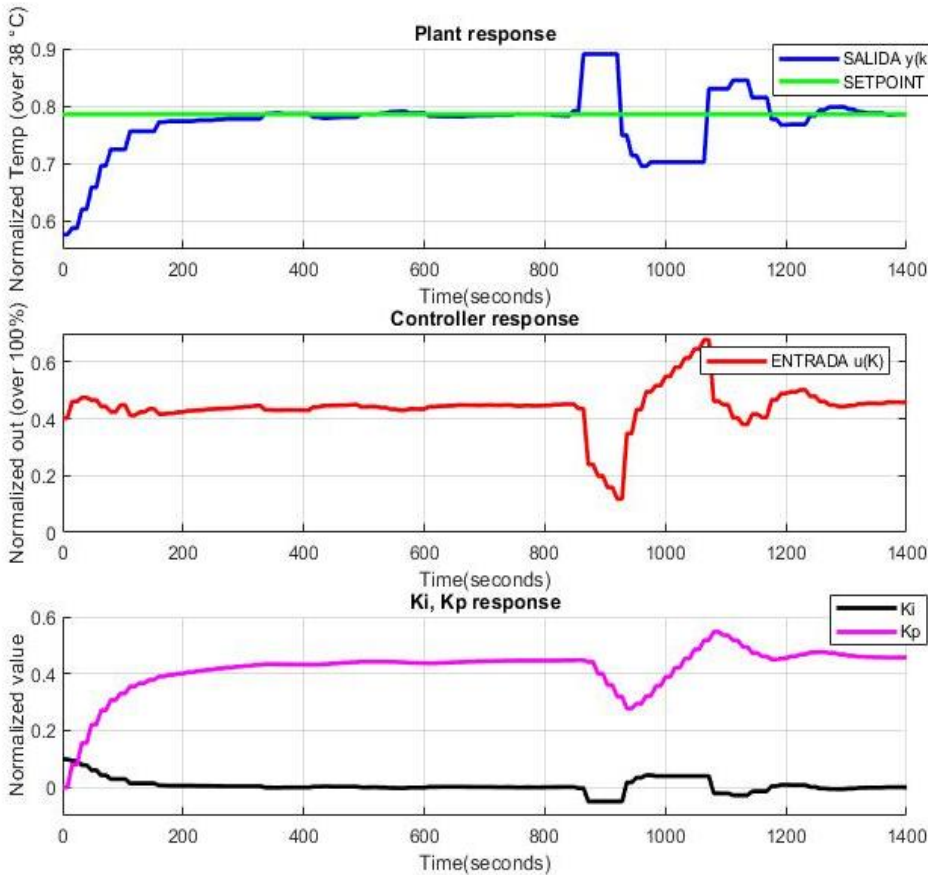
Respuesta del sistema controlador Afuzzy con rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia en tiempo real



# Generación de código e implementación

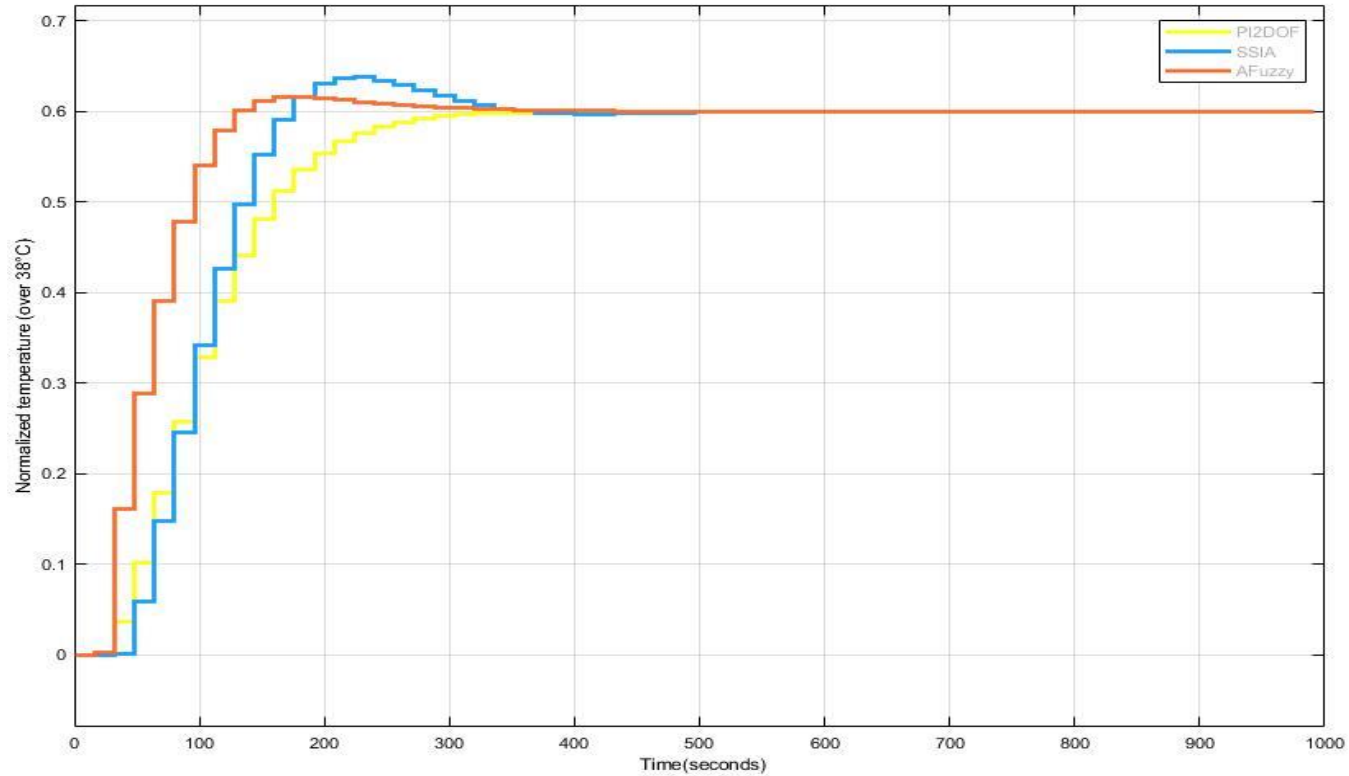
## Controlador difuso autoajustable Afuzzy – Valores autoajustables $k_p$ y $k_i$

Respuesta del sistema controlador Afuzzy con rechazo a perturbaciones y seguimiento a referencia en tiempo real



# Análisis de resultados

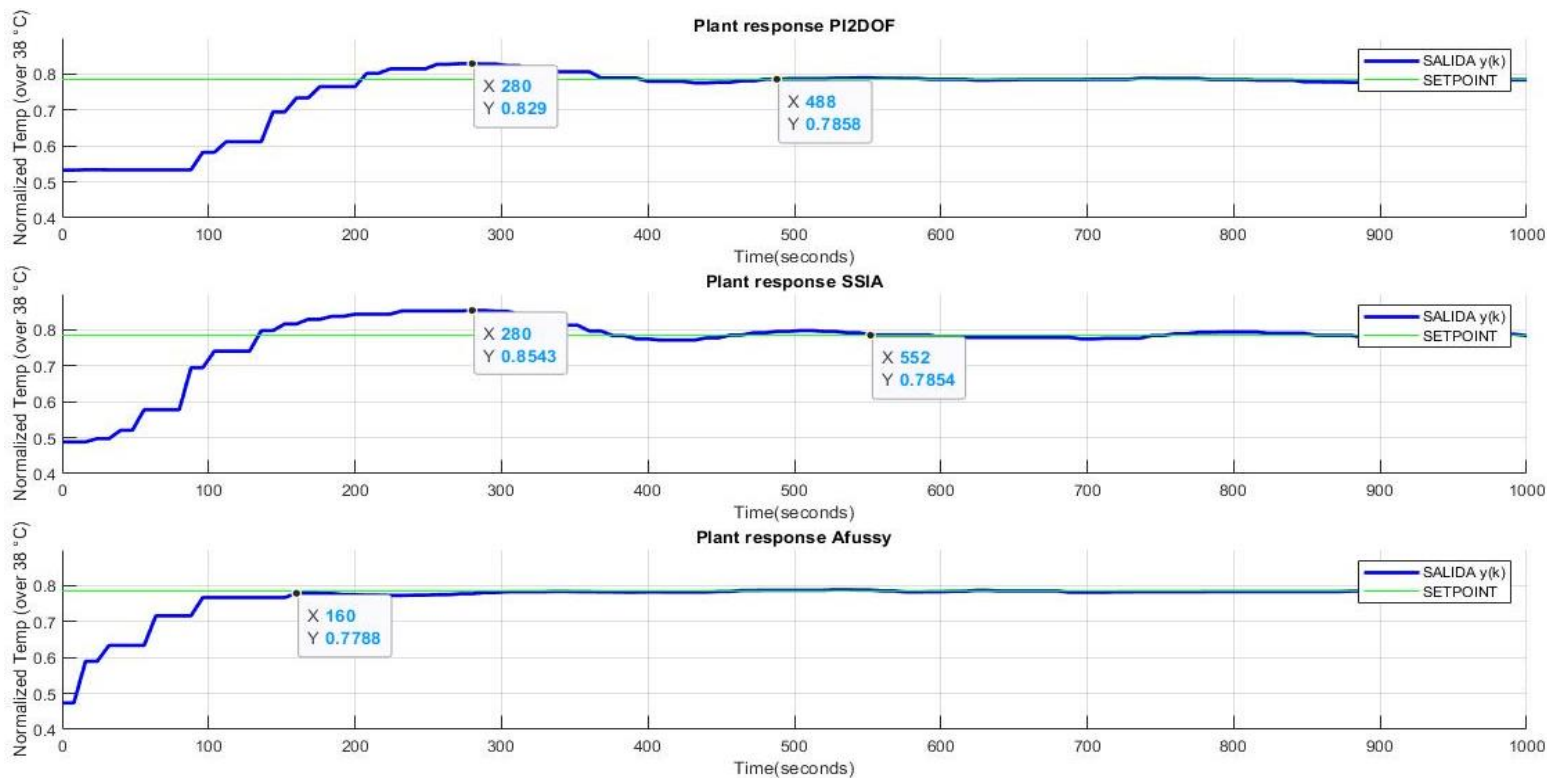
## Análisis de resultados controladores PI 2DOF, SSIA y Afuzzy en simulación



Controladores	Sobre impulso (%)	Tiempo de establecimiento(s)	Tiempo de subida(s)	Consumo de energía
PI2DOF	0.5	417.802	138.982	743.8
SSIA	5.85	528.696	92.62	779.2
AFuzzy	2.57	381.809	74.206	817.3

# Análisis de resultados

## Análisis de resultados controladores PI 2DOF, SSIA y Afuzzy en tiempo real



Controladores	Sobre impulso (%)	Tiempo de establecimiento(s)	Tiempo de subida(s)	Consumo de energía
PI2DOF	5,5	488	136	334.9
SSIA	0.7	552	80	342.2
AFuzzy	0	160	56	252.4



# Conclusiones

- El desarrollo metodológico propuesto en este proyecto resultó ser satisfactorio, se mostró la factibilidad de la realización de estrategias de control avanzado a través de la generación de código y su implementación en dispositivos industriales de escala real.
- La obtención del modelo matemático del sistema térmico fue eficiente, ya que en el proceso de validación se obtuvo un NRMSE del 97.76%.
- El controlador PI 2DOF fue ajustado utilizando varios métodos de los cuales la sintonización a través de la herramienta PID Tuner cumplió con los parámetros de diseño esperados, mostrando mejor desempeño respecto a los otros métodos de sintonización..
- De las estrategias de control avanzado desarrolladas, se observaron distorsiones entre simulación y tiempo en real en las dos primeras, sin embargo, el controlador AFuzzy mantuvo una correlación más directa entre simulación e implementación.

# Conclusiones

- La generación de código mediante la herramienta de Matlab/Simulink resultó ser efectiva para la traslación de código hacia la plataforma de software CODESYS.
- En el análisis de desempeño de las estrategias de control avanzado en tiempo real el controlador Afuzzy presentó el mejor desempeño vs las otras estrategias de control, tanto en seguimiento a referencia como en rechazo a las perturbaciones.
- Respecto al consumo de energía el controlador PI 2DOF presenta menor consumo en simulación, sin embargo, en el entorno de tiempo real el controlador AFuzzy presenta un consumo menor en comparación a las otras estrategias de control implementadas.