



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS - “ESPE”

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA, AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**DESARROLLO Y EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE SISTEMAS DE CONTROL  
INTELIGENTE BASADOS EN HERRAMIENTAS DE SIMULACIÓN “IN-THE-LOOP”**

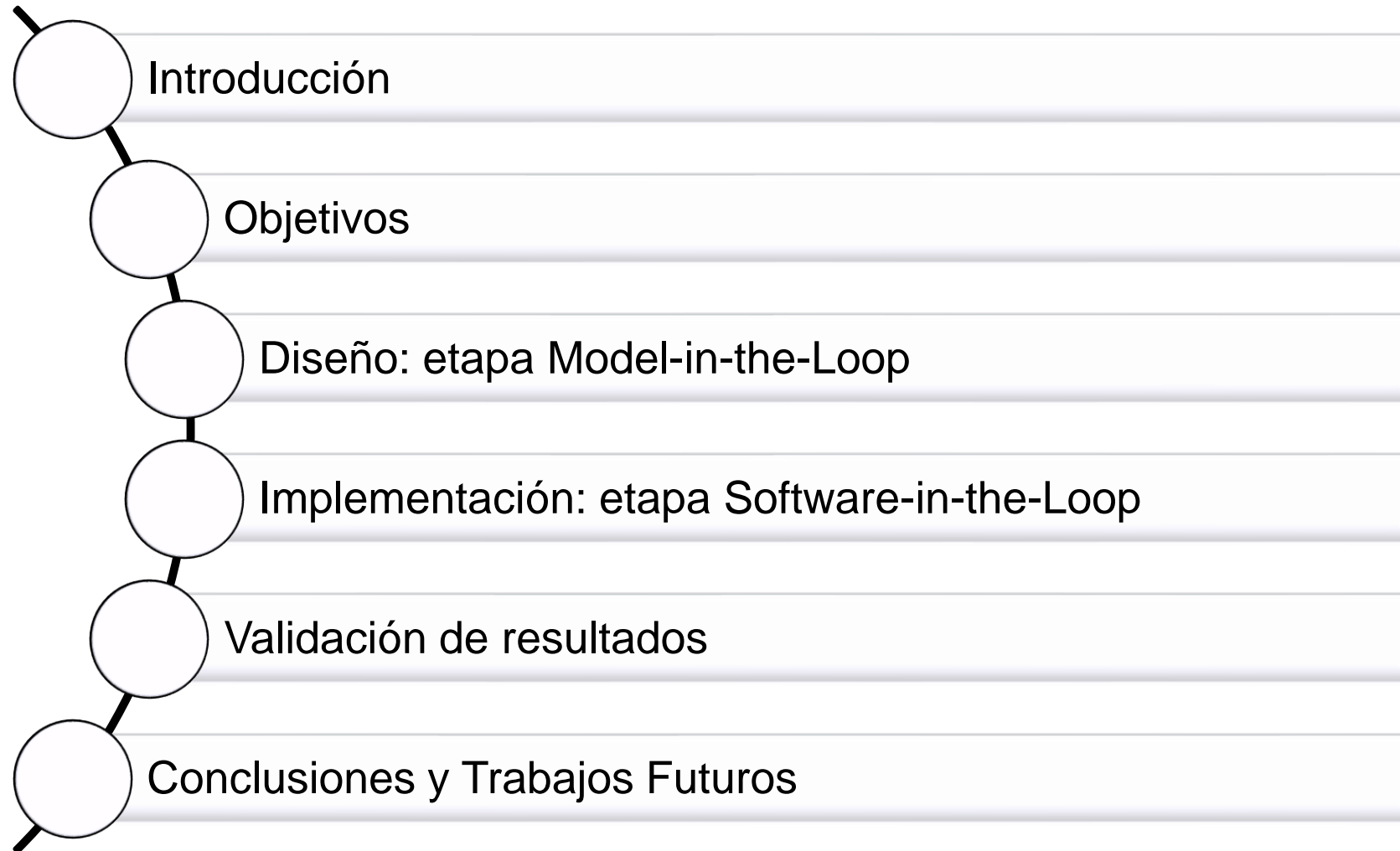
**AUTOR: JEAN CARLO JÁTIVA CERVANTES**

**DIRECTOR: ING. RODOLFO XAVIER GORDILLO ORQUERA, Ph. D.**

VERSIÓN: 1.1



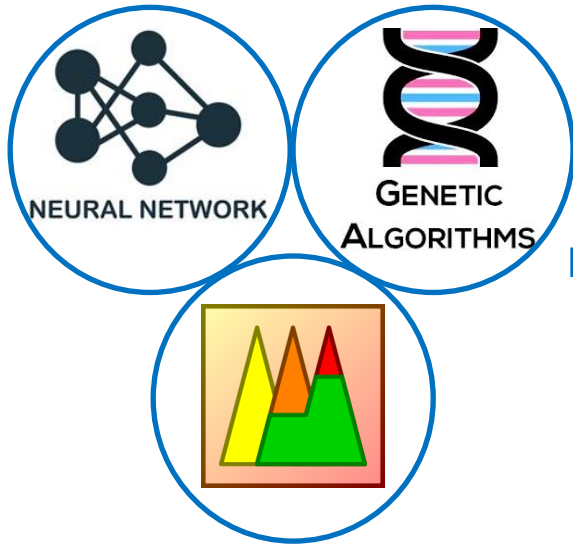
# Agenda



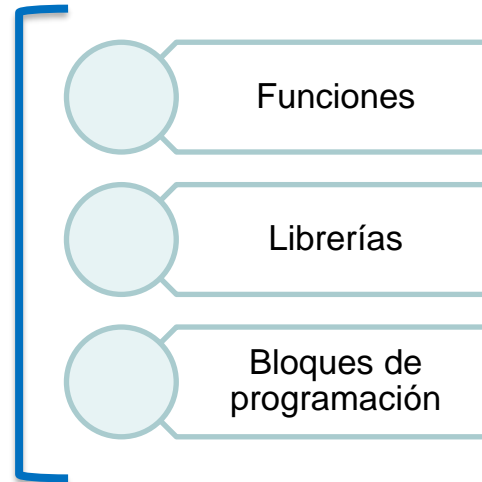
# Introducción

## Antecedentes

### Estrategias de control Inteligente



### Entornos Industriales

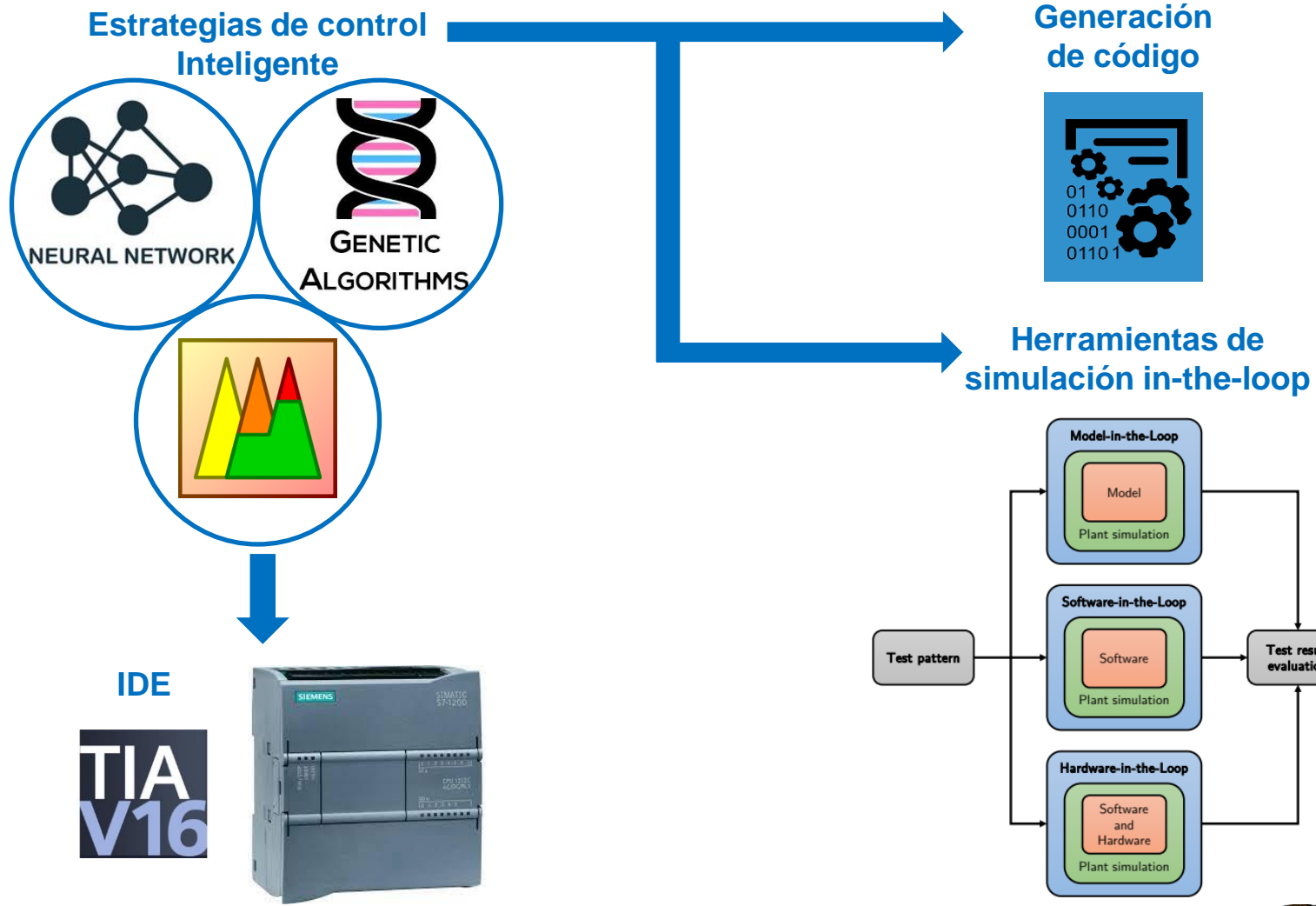


### Programación manual/no automatizada



# Introducción

## Motivación



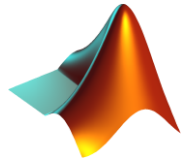
# Introducción

## Estado del arte

### Design and Implementation of a Fuzzy Controller for Frequency Control of a Motor in an S7-1200 PLC

Eli Samael Portillo, Ingeniero en Mecatrónica, Jose Luis Ordoñez Avila, Master en administración de proyectos<sup>2</sup>  
 Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, jlordonez@unitec.edu<sup>2</sup>

Diseño



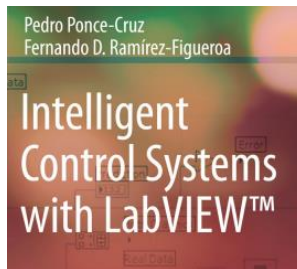
Implementación



SIEMENS

S7-1500 TM NPU

Neurales Netz



	<i>TIA Portal</i>	<i>LabVIEW</i>	<i>Matlab/Simulink</i>
<b>Controlador Difuso</b>	Bloque de funciones creadas por el usuario	PID and Fuzzy Logic Toolkit	Fuzzy Logic Designer Neuro-Fuzzy Designer
<b>Redes Neuronales</b>	Por medio del módulo S7-1500 TM NPU	Neural Network Toolkit Deep Learning Toolkit	Neural Net Time Series Neural Net Fitting Neural Net Clustering
<b>Tiempo de desarrollo del algoritmo</b>	Lento	Lento	Rápido

<b>Compañía</b>	<b>IDE</b>	<b>IEC 61131-3</b>	<b>C/C++</b>
<b>ABB</b>	Automation Studio™	✓	✓
<b>Omron</b>	Sysmac® Studio	✓	
<b>Rockwell Automation</b>	RSLogix™/Studio 5000	✓	
<b>Schneider Electric</b>	Unity Pro	✓	
<b>Siemens</b>	TIA Portal/STEP® 7	✓	✓



**ESPE**  
 UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
 INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# Introducción

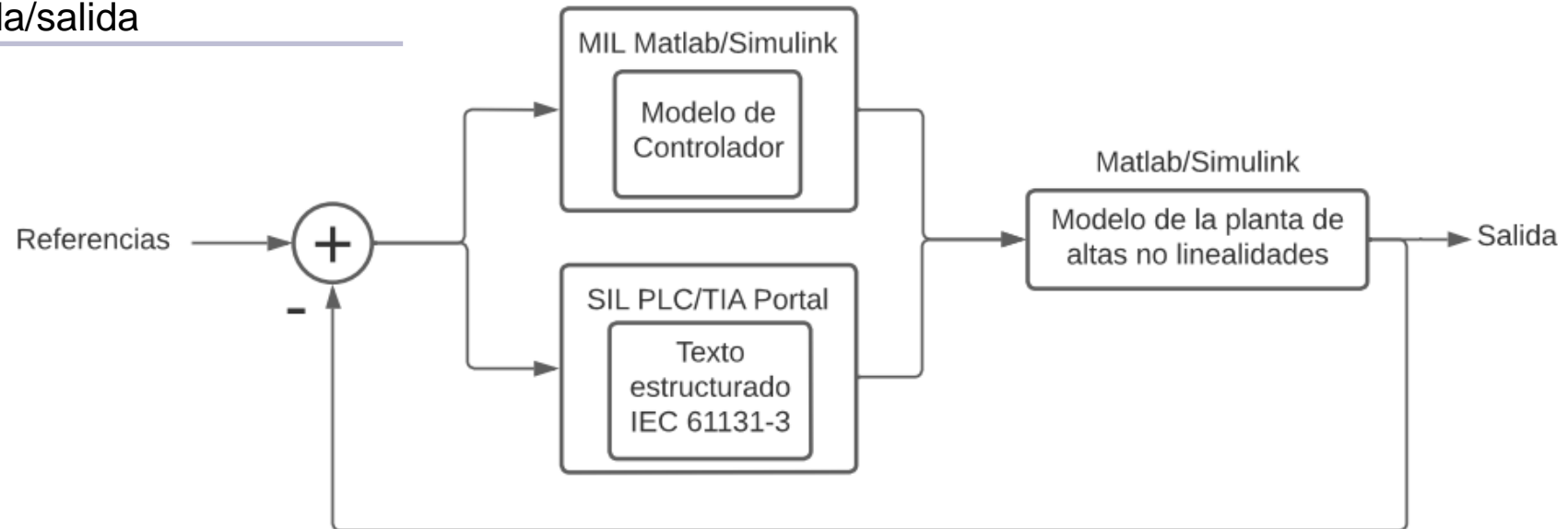
Alcance

Casos de estudio representativos

Sistema con actuador no lineal

Reactor de tanque agitado continuo

Modelo entrada/salida



# Objetivos

## Objetivo General

Diseñar y evaluar el desempeño de estrategias de control inteligente mediante el uso de herramientas de simulación in-the-loop para controlar sistemas no lineales complejos.

## Objetivos Específicos

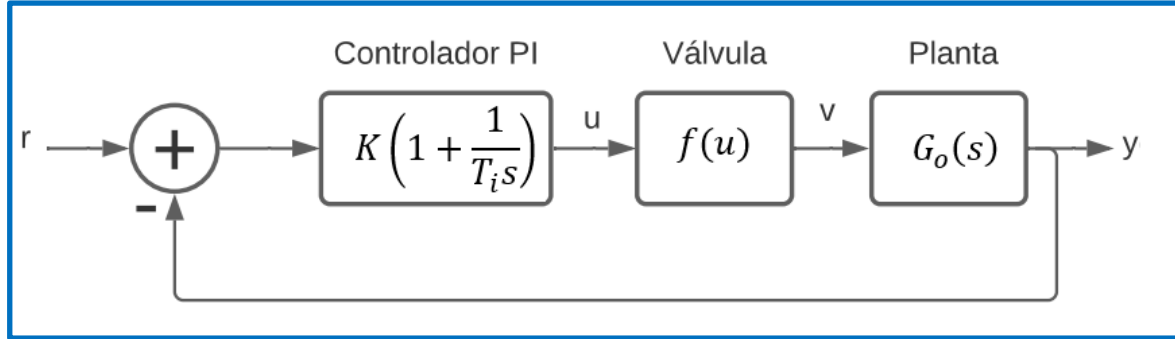
- Investigar la teoría acerca del proceso de simulación in-the-loop, de las herramientas para la generación de código para la implementación industrial de controladores.
- Diseñar las diferentes estrategias de control para los procesos de válvula no lineal, tanque agitado y modelo de entrada y salida de altas no linealidades.
- Evaluar las estrategias de control inteligente para la primera etapa de la simulación in-the-loop, Model-in-the-Loop, mediante el uso de Matlab/Simulink.
- Evaluar las estrategias de control inteligente para la segunda etapa de la simulación in-the-loop, Software-in-the-Loop, mediante el uso de Matlab/Simulink y de la plataforma de hardware seleccionada.
- Comparar el desempeño de ambas etapas del proceso de simulación in-the-loop a partir de los resultados individuales de cada etapa.





# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

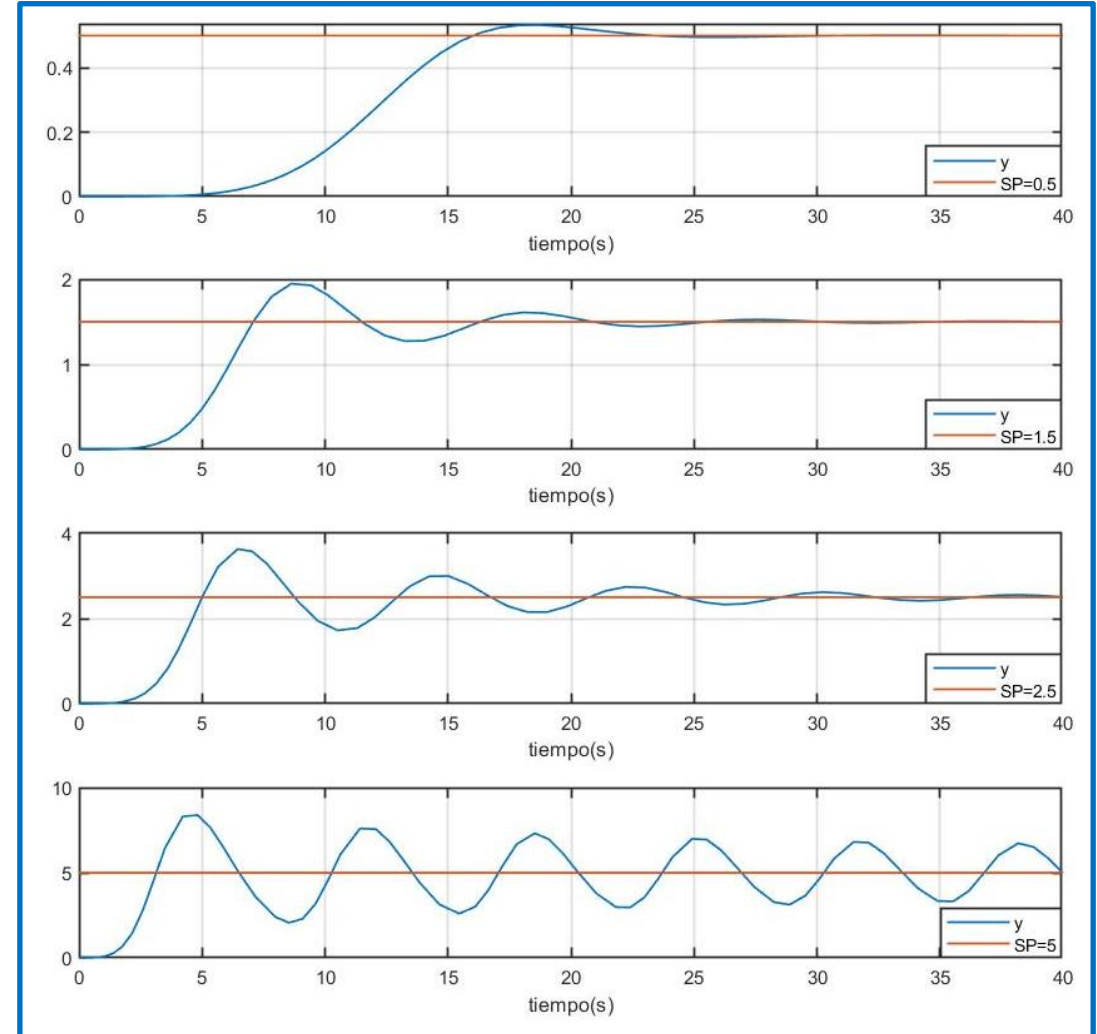
Caso de estudio actuador no lineal



**Función válvula**  $v = f(u) = u^4$  para  $u \geq 0$

**Controlador PI**  $K = 0.15, T_i = 1$

**Planta**  $G_o(s) = \frac{1}{(s + 1)^3}$

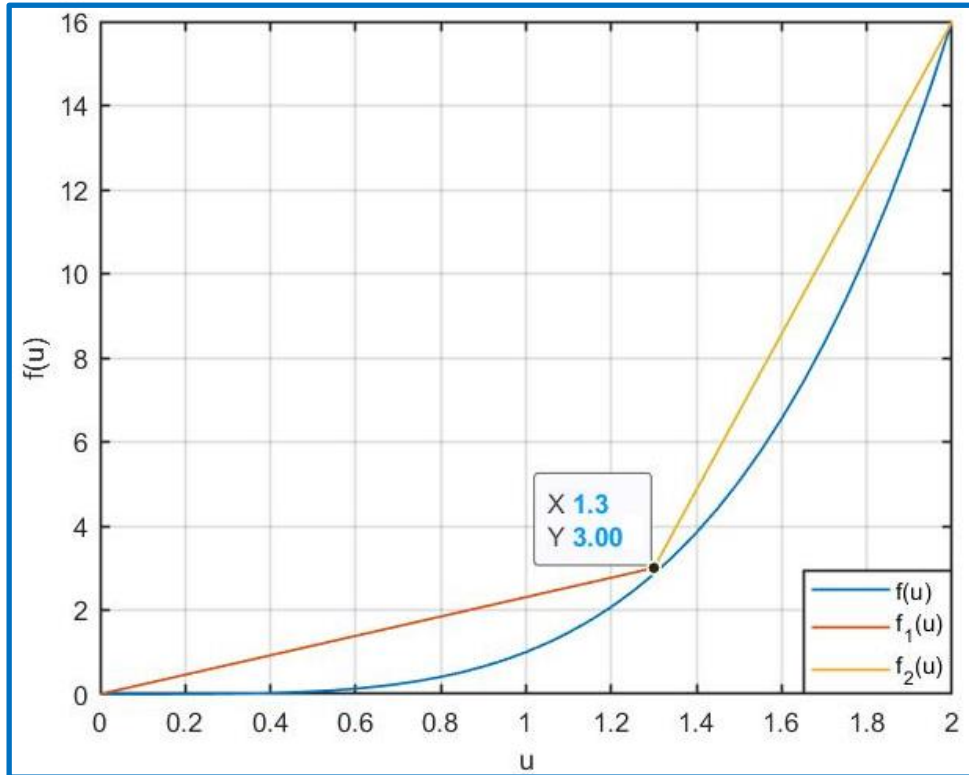




# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

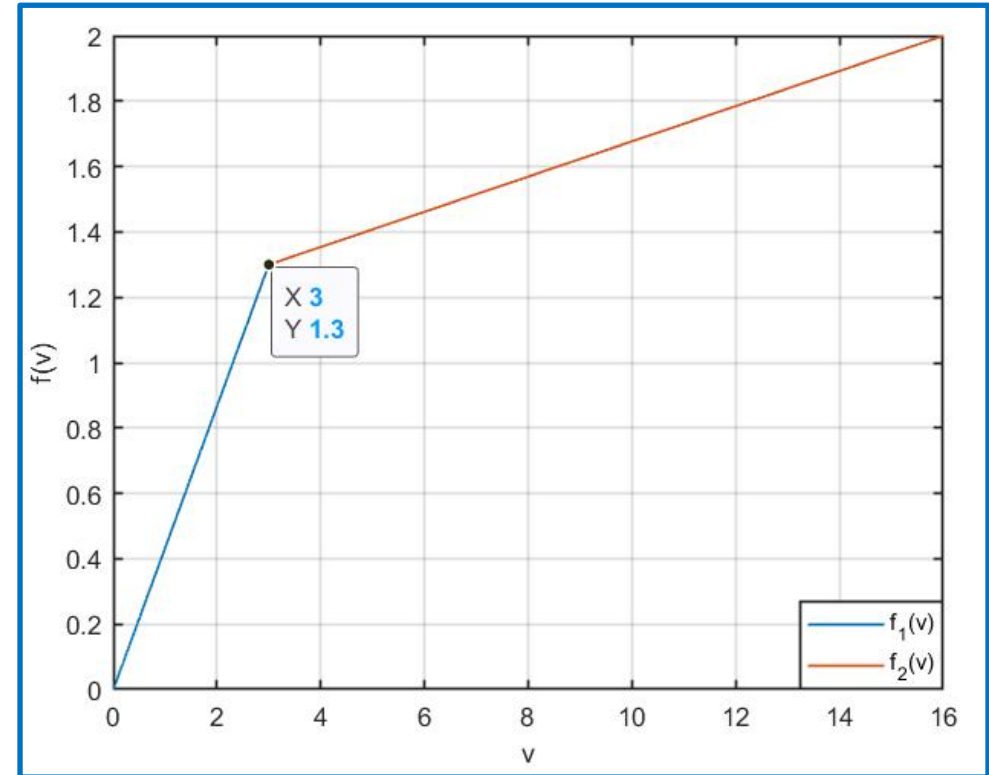
Caso de estudio actuador no lineal

Controlador Difuso Takagi-Sugeno



$$f_1(u) = 2.31u$$

$$f_2(u) = 18.57u - 21.14$$



$$f_1^{-1}(u) = \frac{1}{2.31}v$$

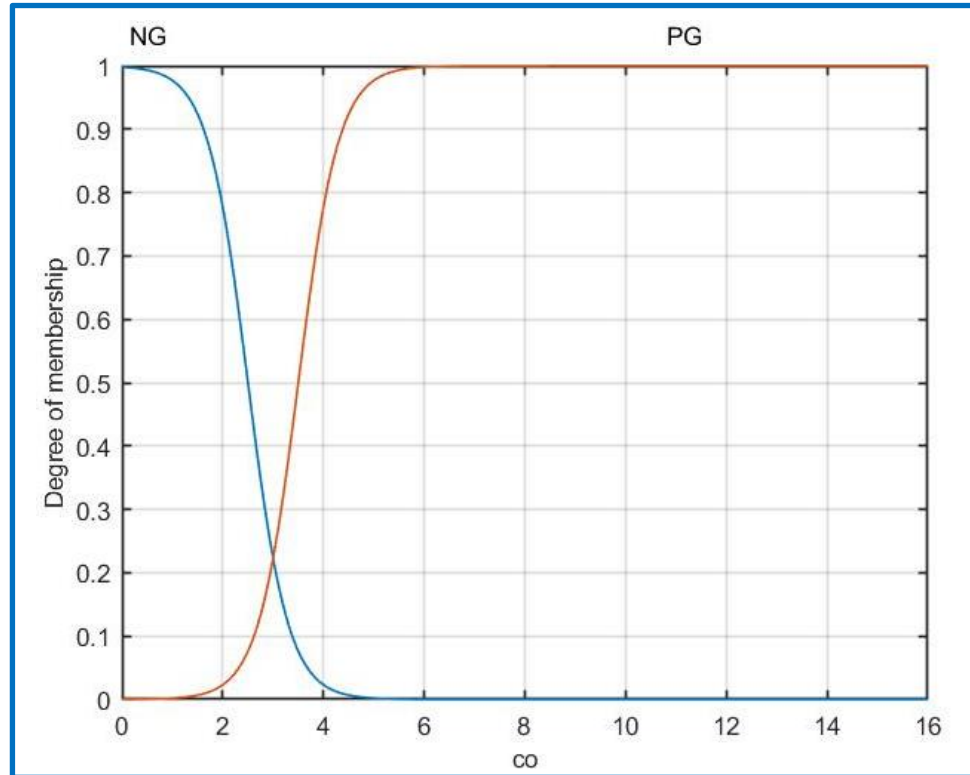
$$f_2^{-1}(u) = \frac{v+21.14}{18.57}$$



# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

Caso de estudio actuador no lineal

## Funciones de membresía de entrada



$$M(NG) = \text{sigmf}(co; -2.5, 2.5)$$

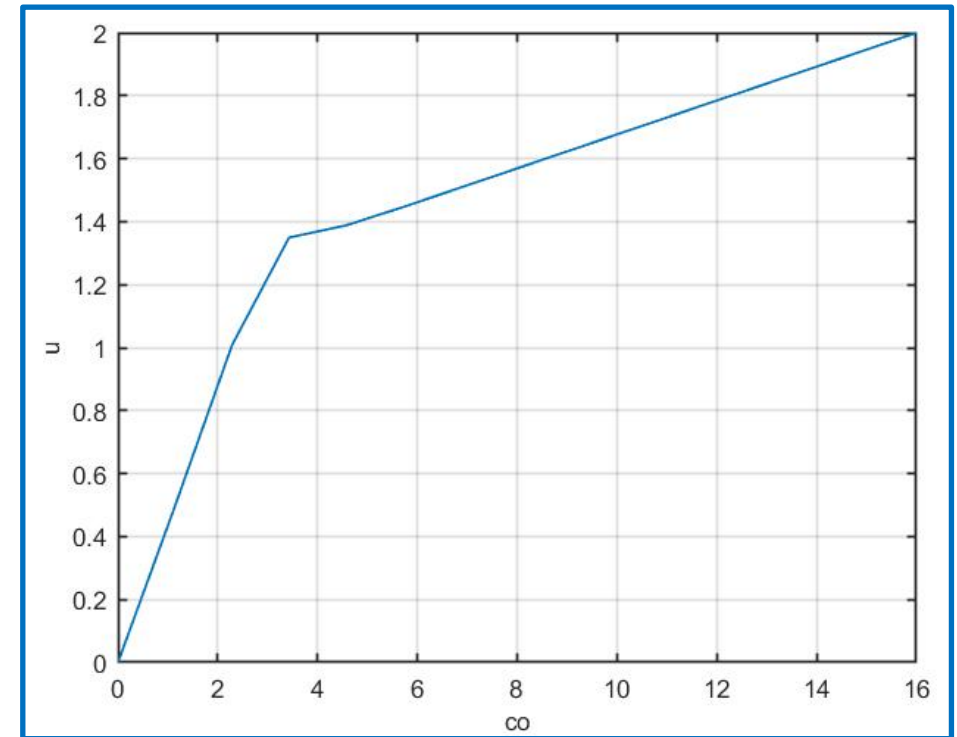
$$M(PG) = \text{sigmf}(co; 2.5, 3.5)$$

## Reglas de control

SI  $co$  es NG ENTONCES  $u$  es  $f_1^{-1}(co)$

SI  $co$  es PG ENTONCES  $u$  es  $f_2^{-1}(co)$

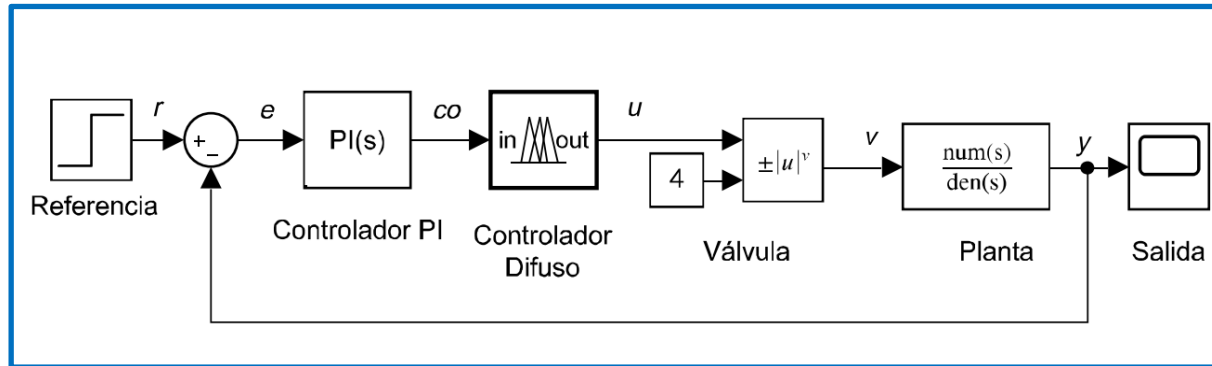
## Curva de control



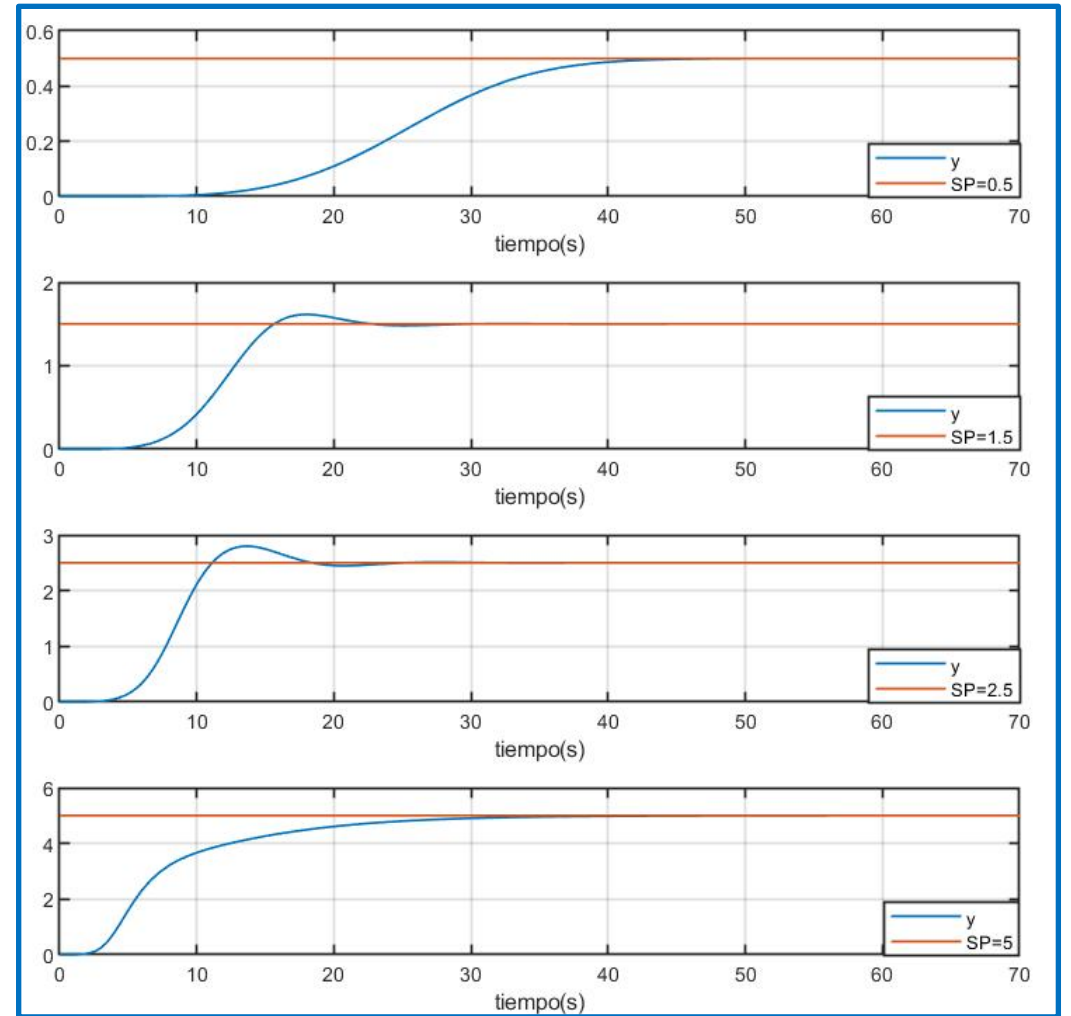
# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

Caso de estudio actuador no lineal

## Esquema de simulación



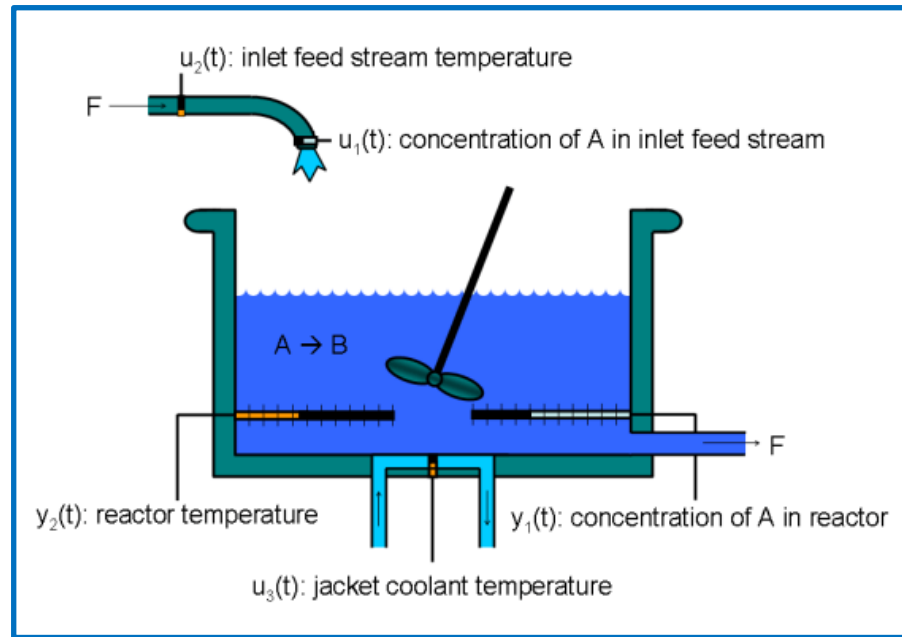
Aproximación inversa  $v = f(u) = f(\hat{f}^{-1}(co))$



# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

## Caso de estudio reactor de tanque agitado continuo (CSTR)

### Reacción exotérmica irreversible $A \rightarrow B$



### Entradas

$u_1 \rightarrow C_{Af}$  es la concentración del reactante  $A$  en el suministro de flujo [ $kmol/m^3$ ]

$u_2 \rightarrow T_f$  es la temperatura del suministro de flujo [ $^{\circ}K$ ]

$u_3 \rightarrow T_c$  es la temperatura del refrigerante [ $^{\circ}K$ ]

### Salidas

$y_1 \rightarrow C_A$  es la concentración del reactante  $A$  en el reactor [ $kmol/m^3$ ]

$y_2 \rightarrow T$  es la temperatura en el reactor [ $^{\circ}K$ ]

### Valores Iniciales

$$C_{Af} = 10 [kmol/m^3] \quad C_A = 8.56 [kmol/m^3]$$

$$T_f = 300 [^{\circ}K] \quad T = 311.26 [^{\circ}K]$$

$$T_c = 292 [^{\circ}K]$$



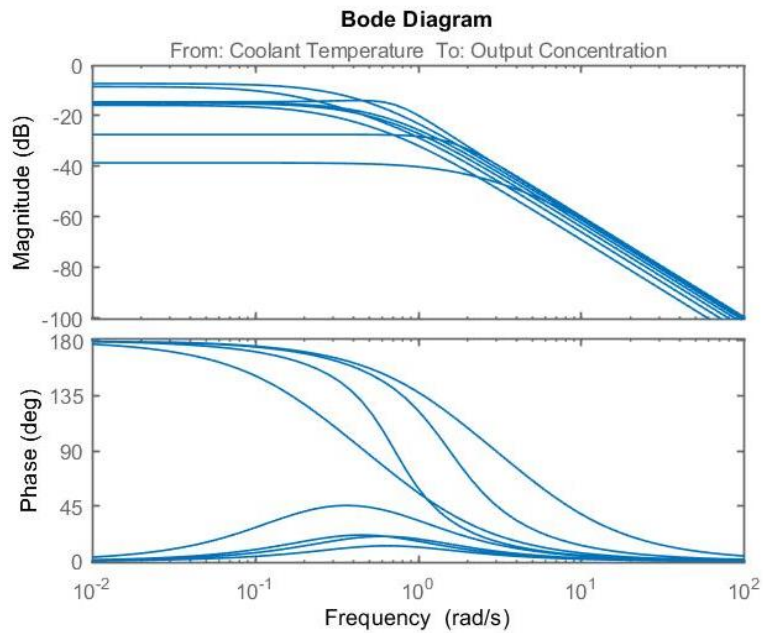
# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

Caso de estudio reactor de tanque agitado continuo (CSTR)

Controlador PID por ajuste de ganancias



Linealización en puntos de operación

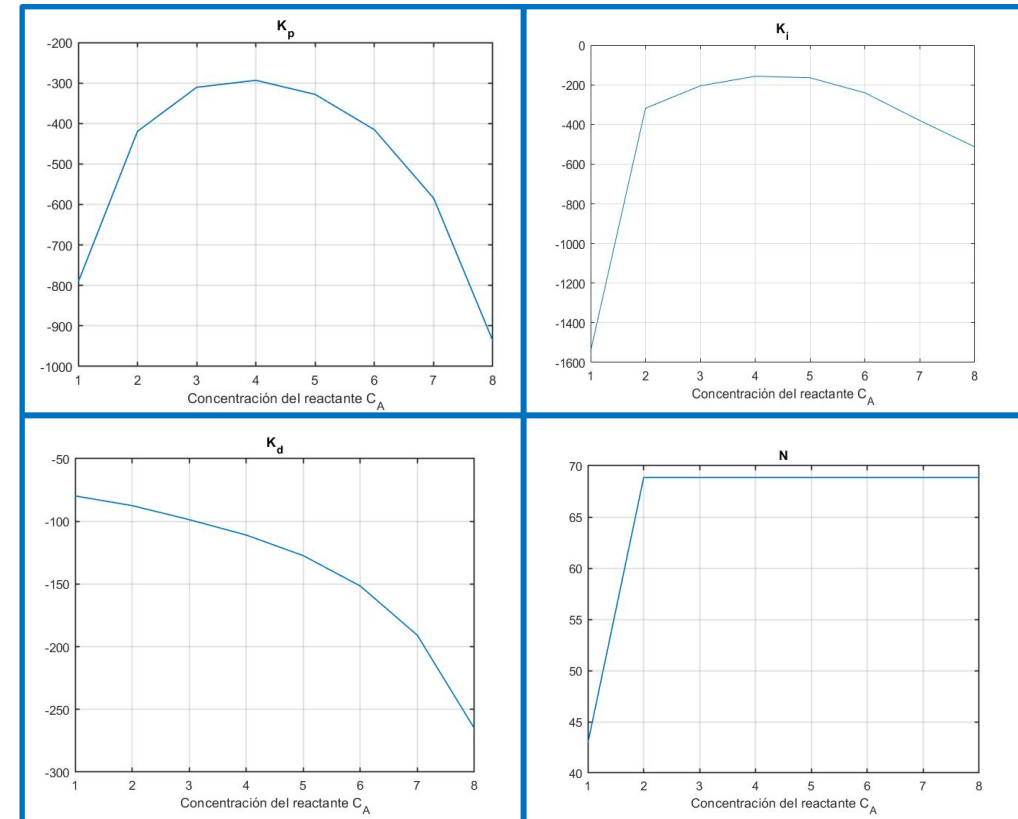


Parámetros de sintonización

$$C(z) = K_p + K_i \frac{T_s}{z-1} + K_d \frac{1}{\frac{1}{N} + \frac{T_s}{z-1}}$$

$$T_s = 0.01[s]$$

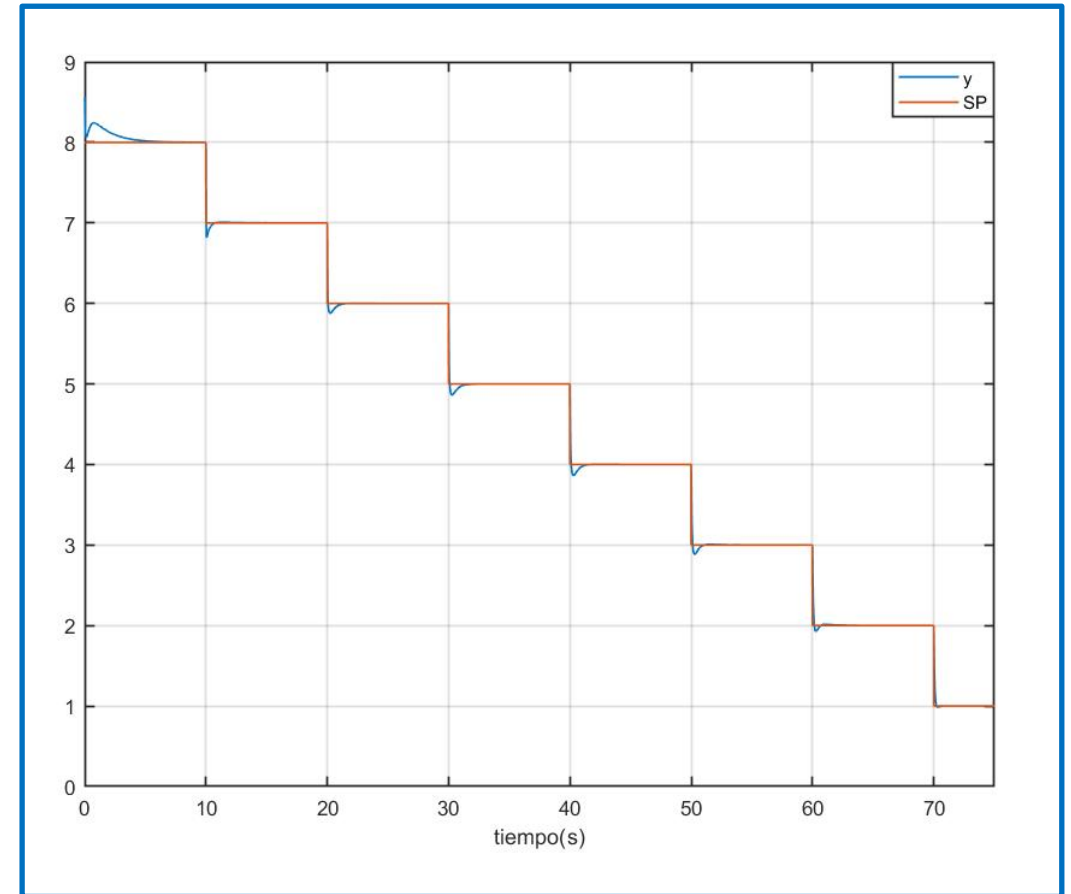
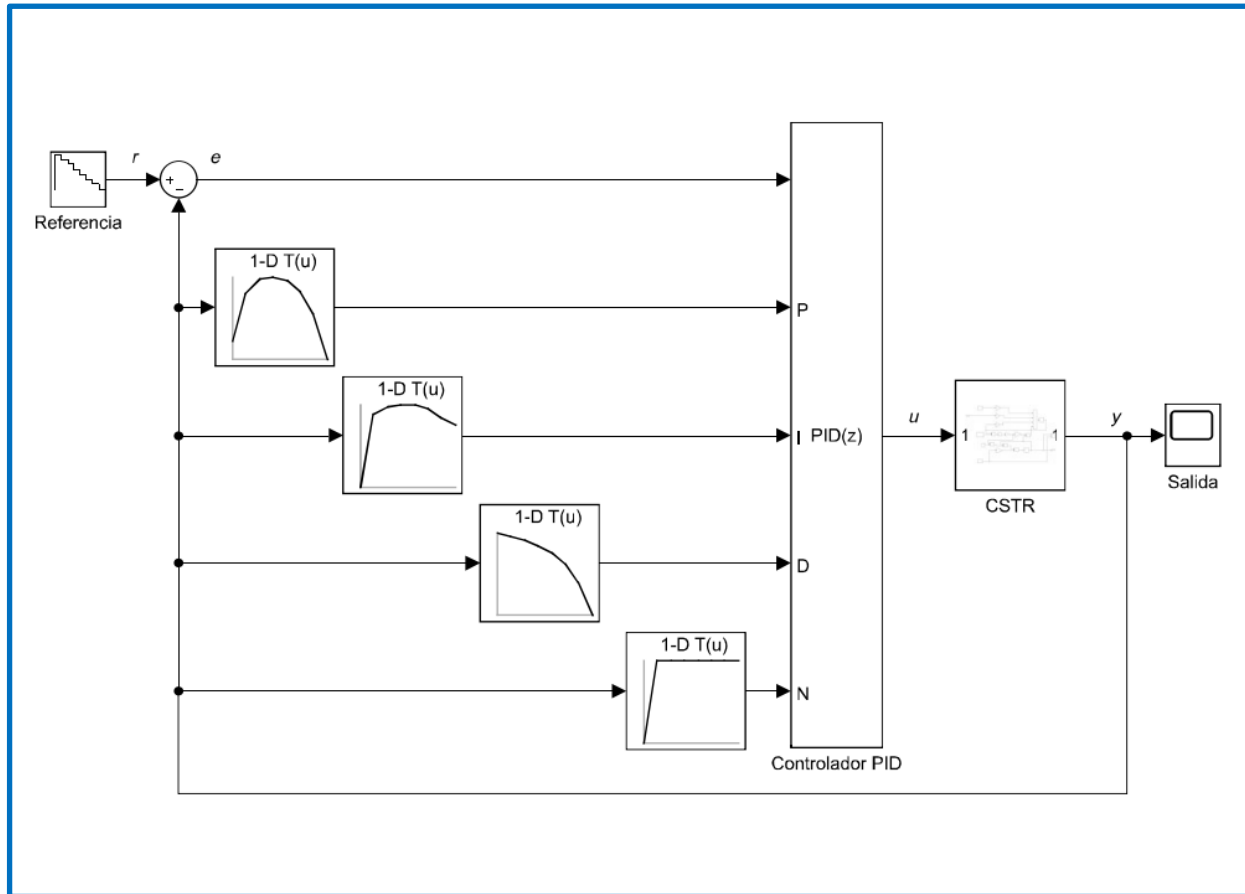
$$w_c = 10[\text{rad/s}]$$



# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

Caso de estudio reactor de tanque agitado continuo (CSTR)

## Esquema de simulación



# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

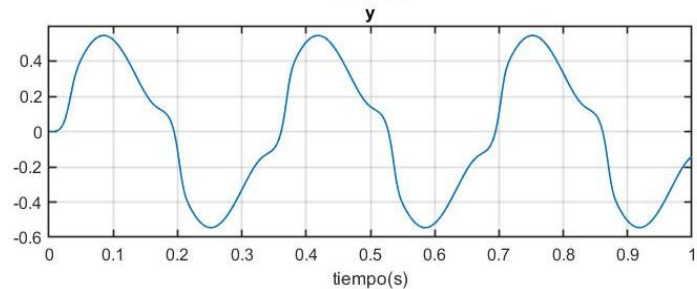
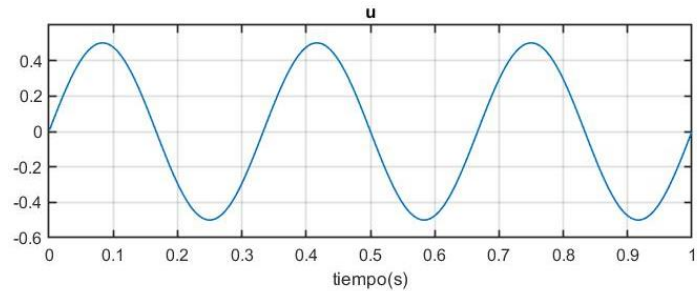
Caso de estudio modelo entrada/salida no lineal

## Ecuación en diferencias

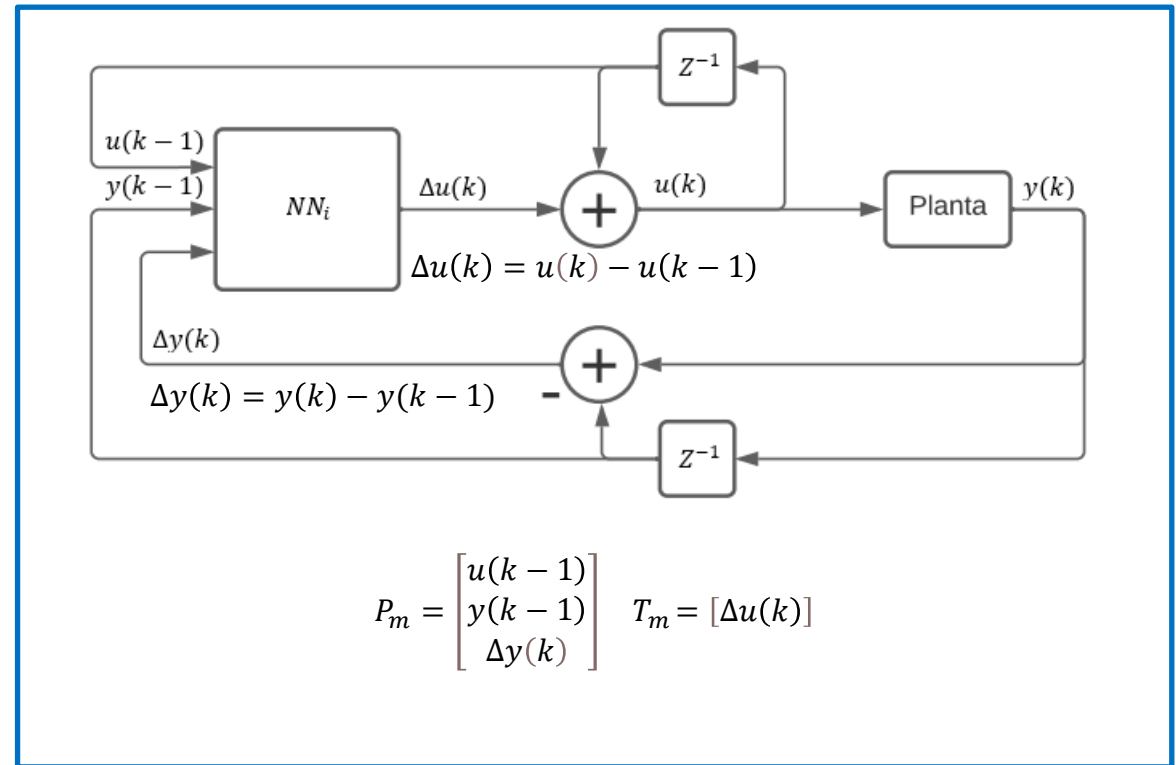
$$y_p(k+1) = \frac{y_p(k)}{1 + y_p^2(k)} + u^3(k)$$

## Adquisición de datos

$$u(k \cdot T_s) = 0.5 \sin(6\pi k \cdot T_s), T_s = 1[ms]$$



## Topología de la red neuronal

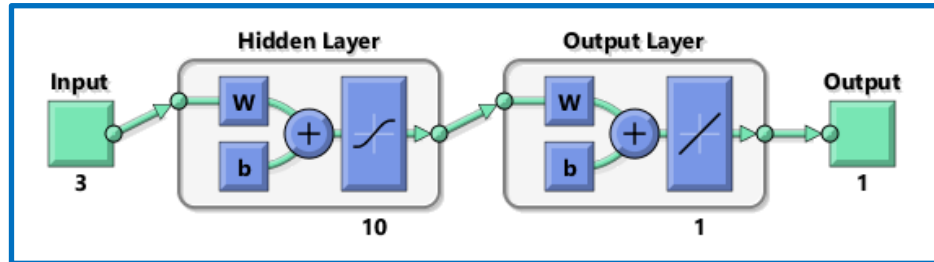




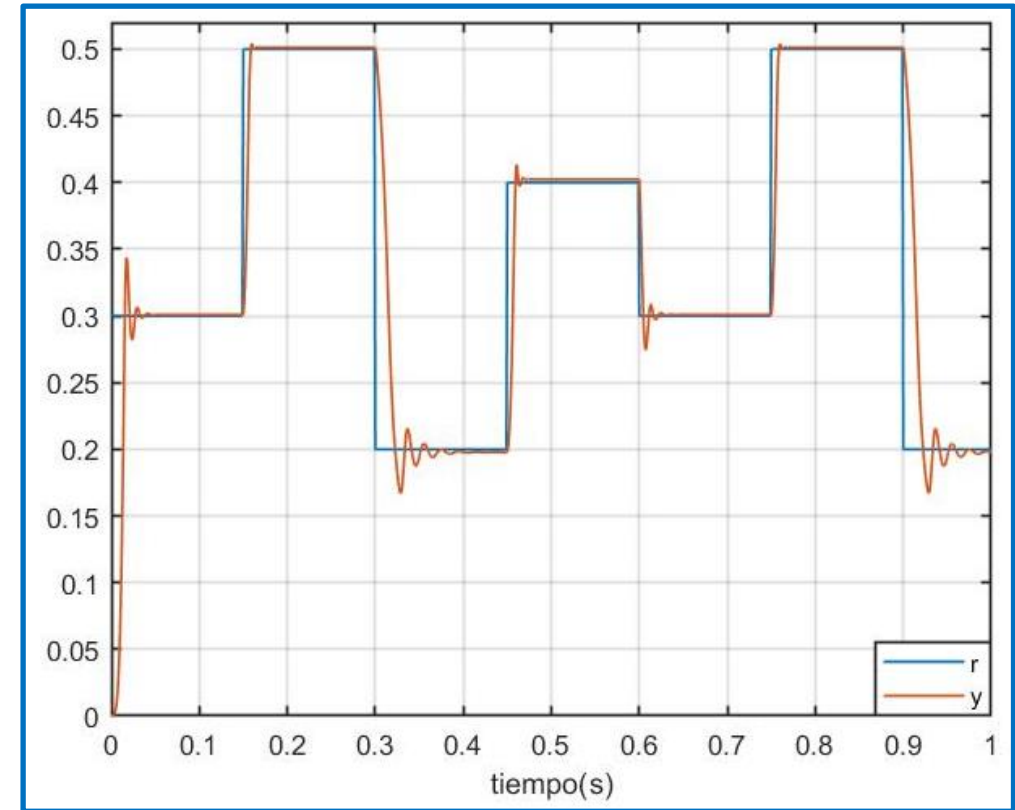
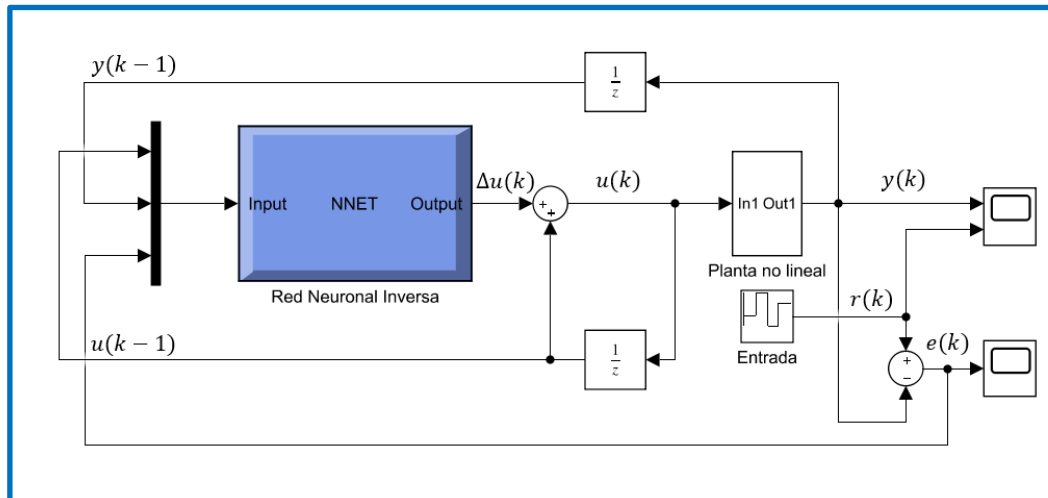
# Etapa MIL: Diseño de estrategias de control

Caso de estudio modelo entrada/salida no lineal

## Arquitectura de red

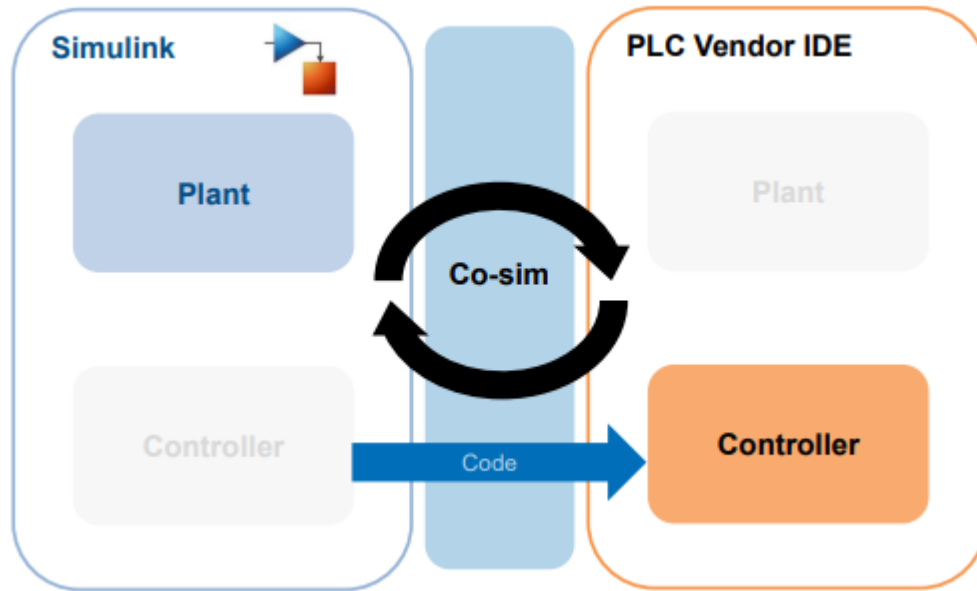


## Esquema de simulación



# Etapa SIL: puesta en marcha virtual

Virtual commissioning

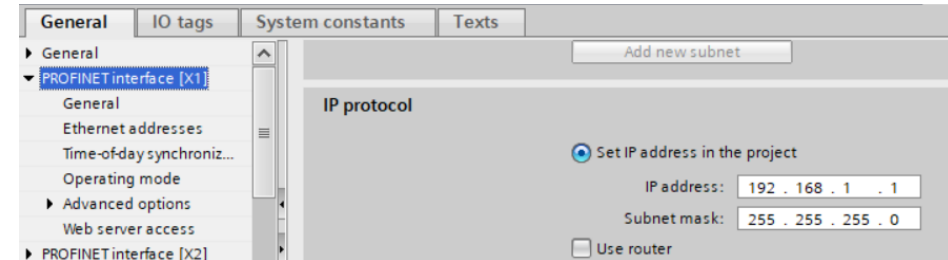


**Comunicación: Protocolo OPC UA**

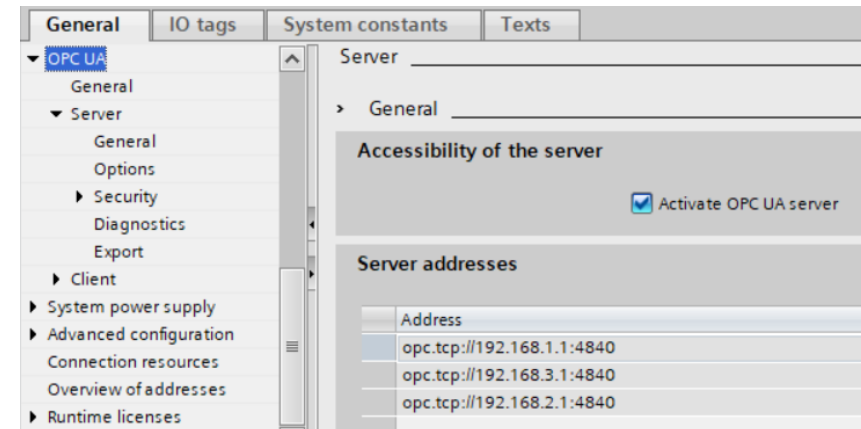
Servidor OPC UA: S7-1500 (198.168.1.1)

Cliente OPC UA: Matlab + Toolbox OPC (198.168.1.100)

## Configuración de dirección IP del controlador



## Habilitación del servidor OPC UA



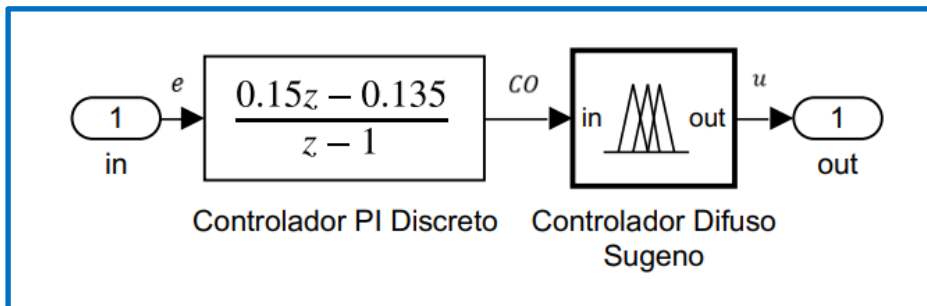
# Etapa SIL: puesta en marcha virtual

Caso de estudio actuador no lineal

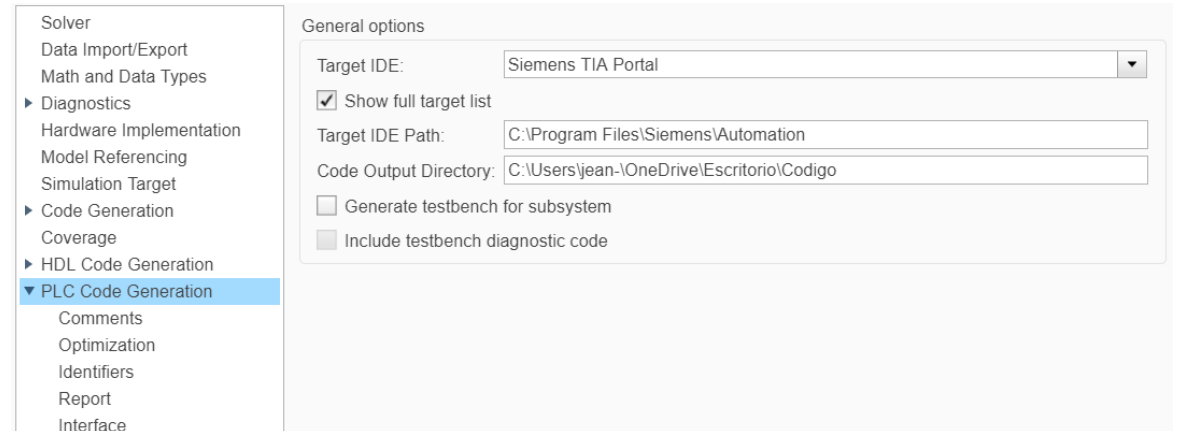
## Digitalización Controlador PI

$$G_c(s) = 0.15 \left( 1 + \frac{1}{s} \right)$$
$$T_s = 0.1 \text{ [s]} \quad \longrightarrow \quad G_c(z) = \frac{0.15 - 0.135z^{-1}}{1 - z^{-1}}$$

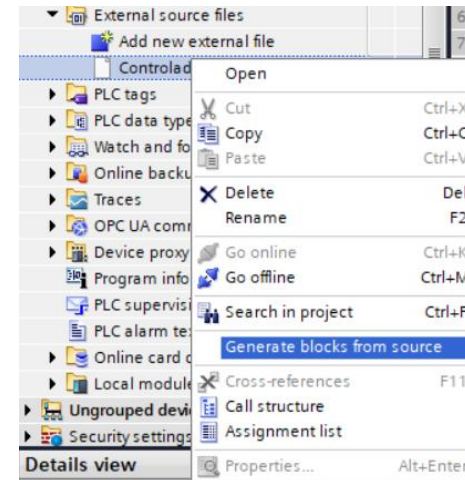
## Controlador como subsistema



## Configuración PLC Code



## Importación de código

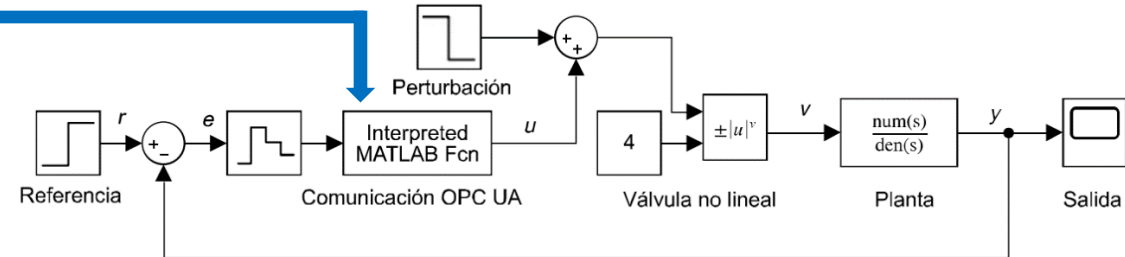


# Etapa SIL: puesta en marcha virtual

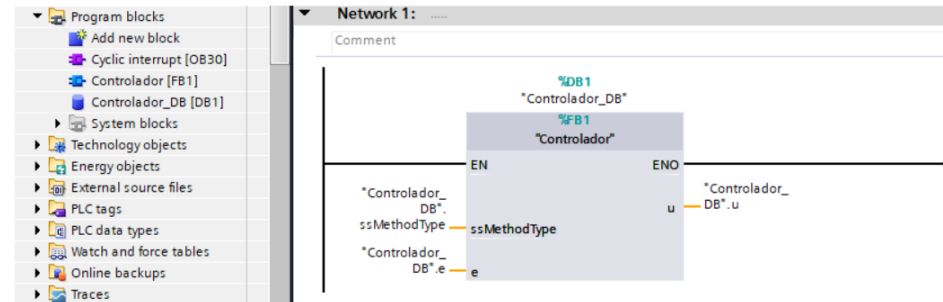
## Función Read\_OPC\_Func

```
function [x] = Read_OPC_Func(y)
% Variables
persistent init_Server;
persistent init_Nodes;
persistent uaClient;
persistent Var_Node_In;
persistent Var_Node_Out;
persistent testVal;
% Inicialización de variables
if (isempty(init_Server))
    testVal = 0;
    init_Server = 0;
    init_Nodes = 0;
end
% Dirección del servidor OPC UA (PLC)
% y conexión del cliente (Simulink) con el servidor
if init_Server == 0
    init_Server = 1;
    uaClient = opcua('192.168.1.1',4840);
    connect(uaClient);
end
% Definición de los nodos de variable del servidor
if uaClient.isConnected == 1 && init_Nodes == 0
    init_Nodes = 1;
    % Lectura de variables del servidor OPC UA
    Var_Node_Out = opcuanode(3, "Controlador_DB"."e", uaClient);
    Var_Node_In = opcuanode(3, "Controlador_DB"."u", uaClient);
end
% Lectura y escritura de las variables del servidor
if uaClient.isConnected == 1 && init_Nodes == 1
    % Lectura del valor de la salida del controlador Difuso
    % y almacenamiento en "val"
    [val, ~, ~] = readValue(uaClient, Var_Node_In);
    % Asignar a la entrada de la función y el valor del error
    % del lazo de control
    writeValue(uaClient, Var_Node_Out, y);
    % Asignar el valor de "val" a la variable "testVal"
    testVal = val;
end
% Asignar el valor de la salida del controlador difuso
% a la salida x de la función
x = double(testVal);
end
```

## Esquema de simulación



## Configuración del controlador



## Conjunto de datos entrada/salida del controlador PI digital – Difuso Sugeno

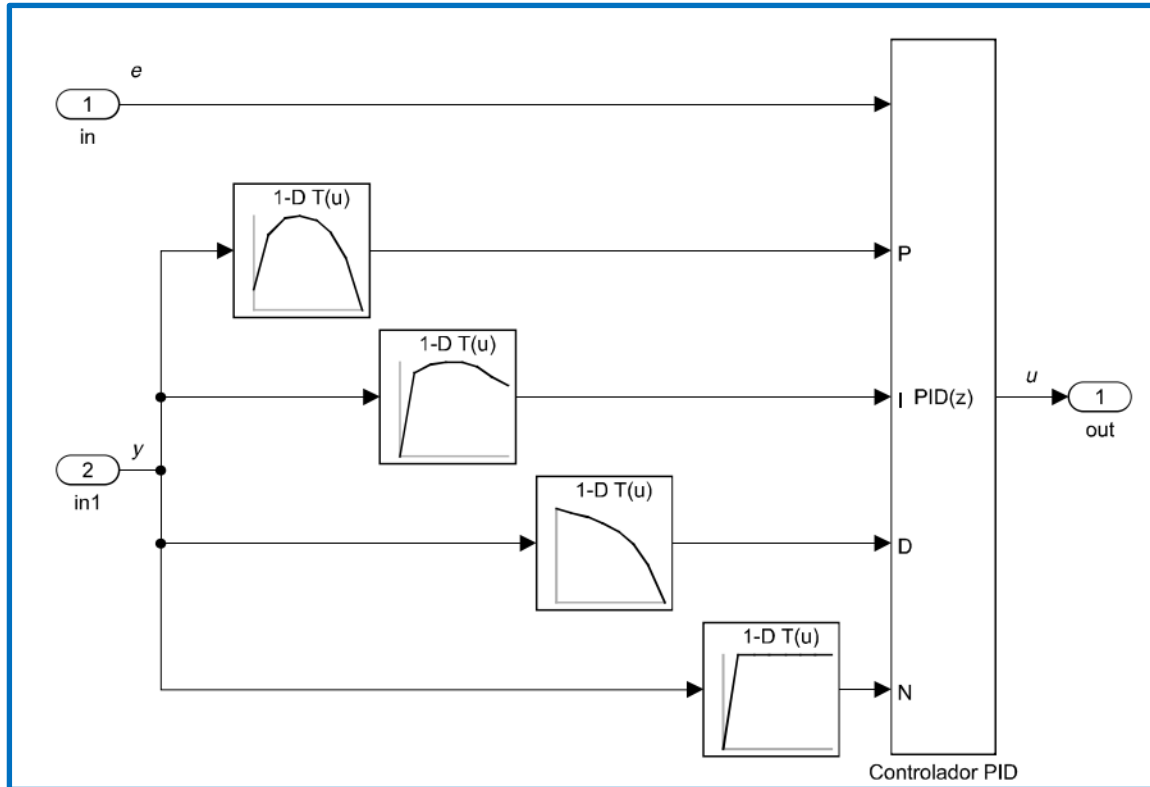
Tipo	Tag TIA Portal	Lazo de control
<b>Entrada</b>	Controlador_DB.e	Señal de error, e
<b>Salida</b>	Controlador_DB.u	Salida del controlador difuso Sugeno, u



# Etapa SIL: puesta en marcha virtual

Caso de estudio reactor de tanque agitado continuo (CSTR)

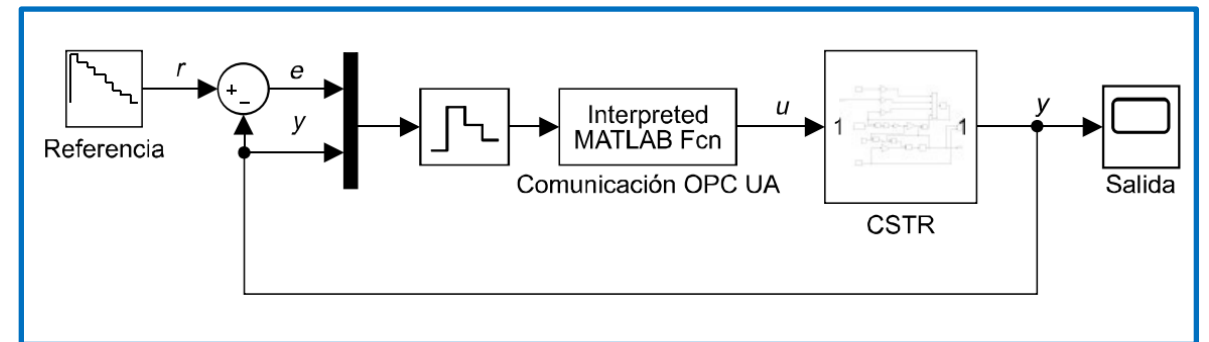
## Controlador como subsistema



## Conjunto de datos entrada/salida del controlador por ajuste de ganancias

Tipo	Tag TIA Portal	Lazo de control
Entrada	Controlador_DB.In	Señal de error, $e$
Entrada	Controlador_DB.In1	Señal de salida, $y$
Salida	Controlador_DB.out	Salida del controlador PID, $u$

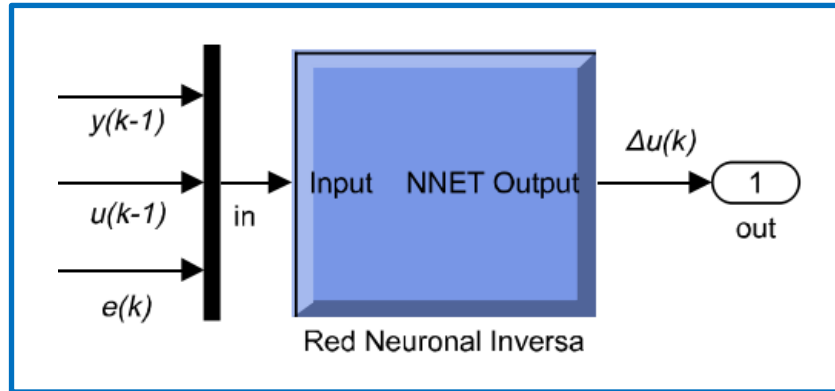
## Esquema de simulación



# Etapa SIL: puesta en marcha virtual

Caso de estudio modelo entrada/salida no lineal

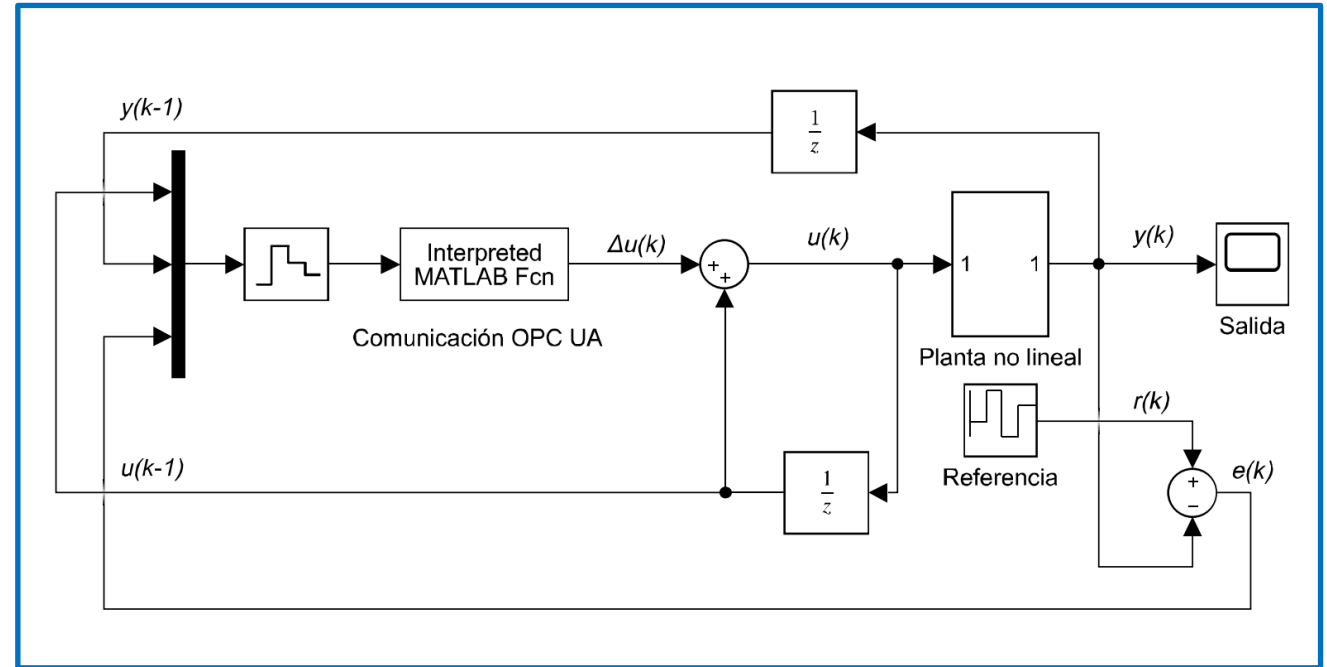
## Controlador como subsistema



## Conjunto de datos entrada/salida del controlador por red neuronal inversa

Tipo	Tag TIA Portal	Lazo de control
Entrada	Controlador_DB.In[0]	Señal de entrada retrasada, $u(k-1)$
	Controlador_DB.In[1]	Señal de salida retrasada, $y(k-1)$
	Controlador_DB.In[2]	Señal de error, $e(k)$
Salida	Controlador_DB.out	Variación de la señal de entrada, $\Delta u(k-1)$

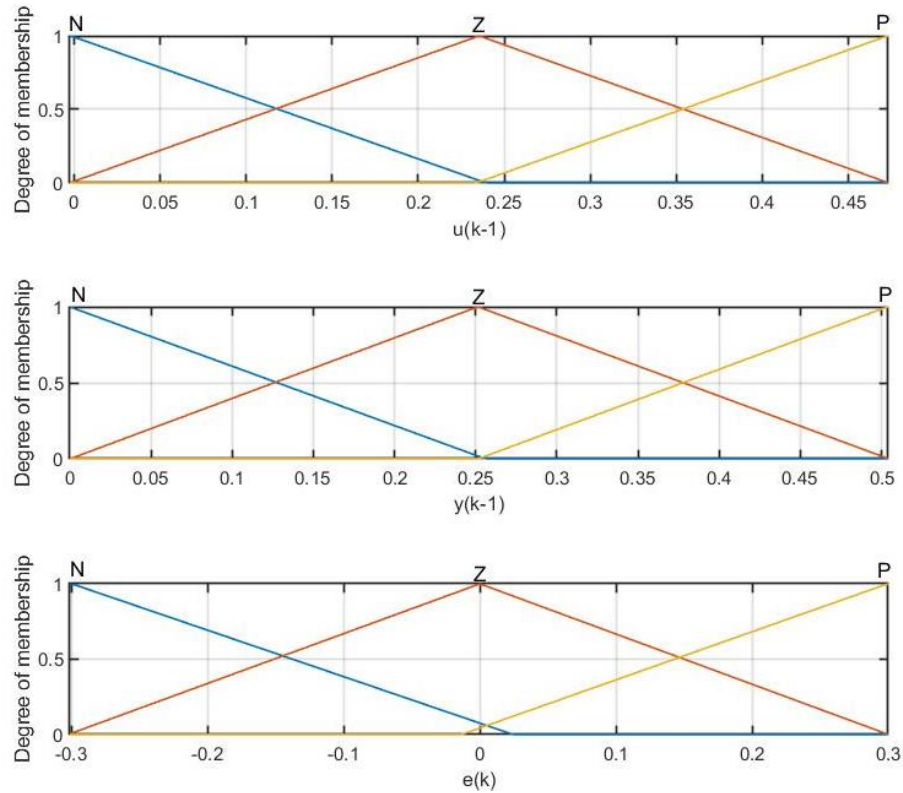
## Esquema de simulación



# Etapa SIL: puesta en marcha virtual

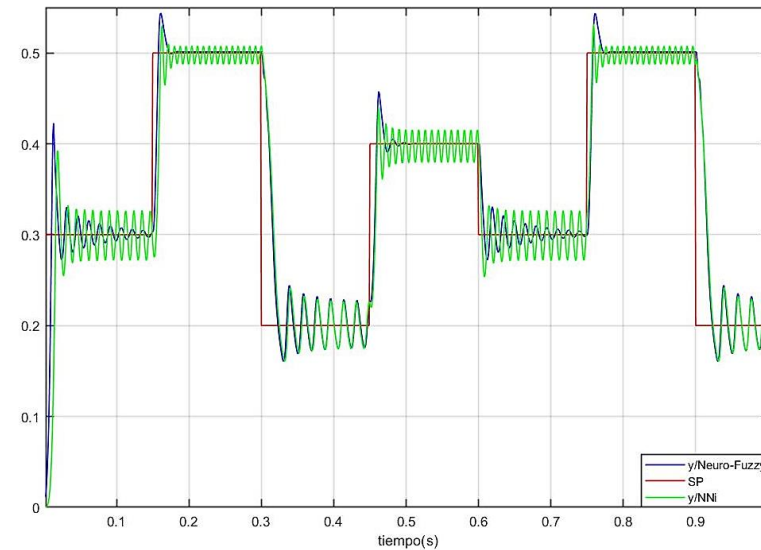
Caso de estudio modelo entrada/salida no lineal – Controlador Neuro-Fuzzy

## Funciones de membresía de entrada



## Reglas de control

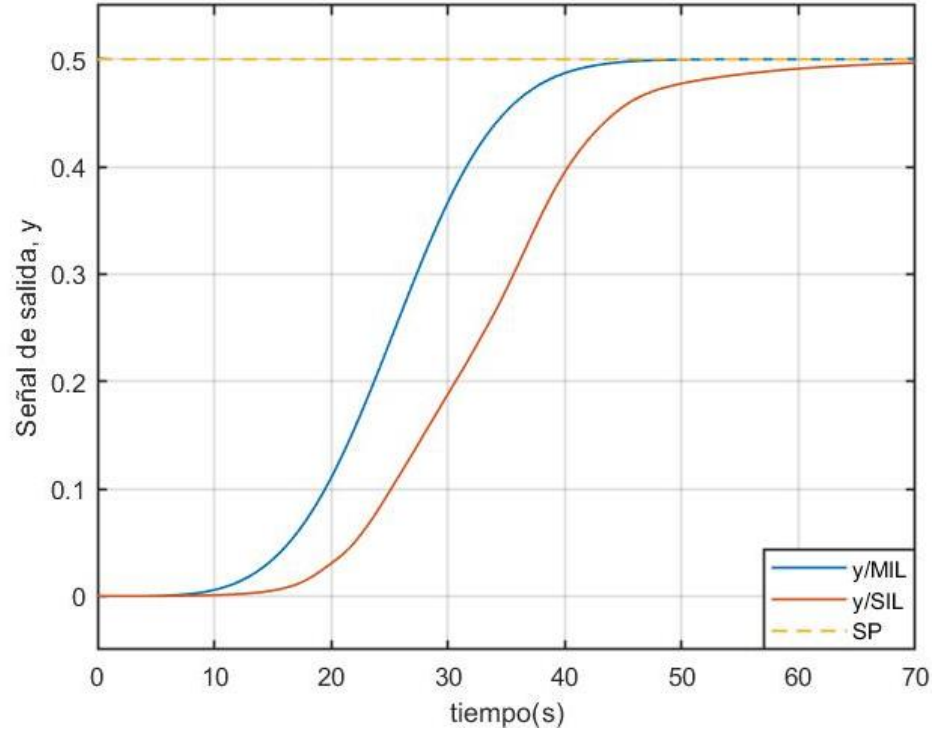
$u(k-1)$	$y(k-1)$	$e(k)$	<b>N</b>	<b>Z</b>	<b>P</b>
<b>N</b>	<b>N</b>		-1.223	0.274	0.028
<b>N</b>	<b>Z</b>		0.069	-0.050	0.020
<b>N</b>	<b>P</b>		0.877	-0.362	12.774
<b>Z</b>	<b>N</b>		-0.614	0.023	0.0234
<b>Z</b>	<b>Z</b>		-0.274	0.020	0.034
<b>Z</b>	<b>P</b>		0.241	-0.035	0.151
<b>P</b>	<b>N</b>		0.838	-0.040	0.119
<b>P</b>	<b>Z</b>		-0.318	0.032	$3.491 \times 10^{-5}$
<b>P</b>	<b>P</b>		-0.020	$-5.054 \times 10^{-4}$	0.059



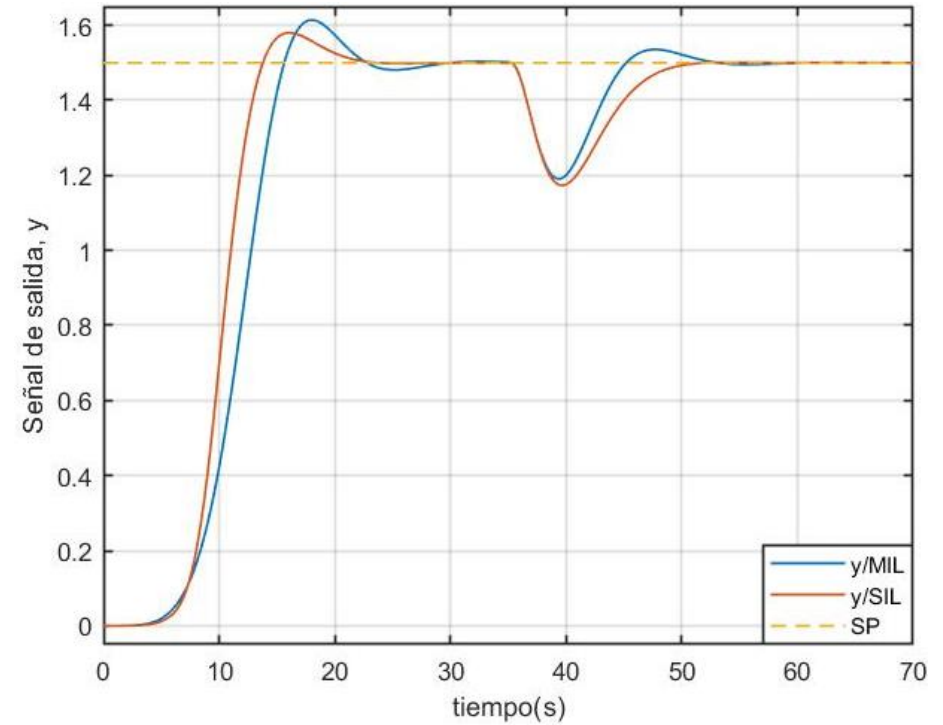


# Validación de resultados

## Caso de estudio actuador no lineal



<i>Etapa</i>	<i>Overshoot (%)</i>	<i>Tiempo de establecimiento (s)</i>	<i>Error en estado estacionario</i>
<b>MIL</b>	N/A	54	$7.31 \times 10^{-7}$
<b>SIL</b>	N/A	70	$3.4 \times 10^{-3}$

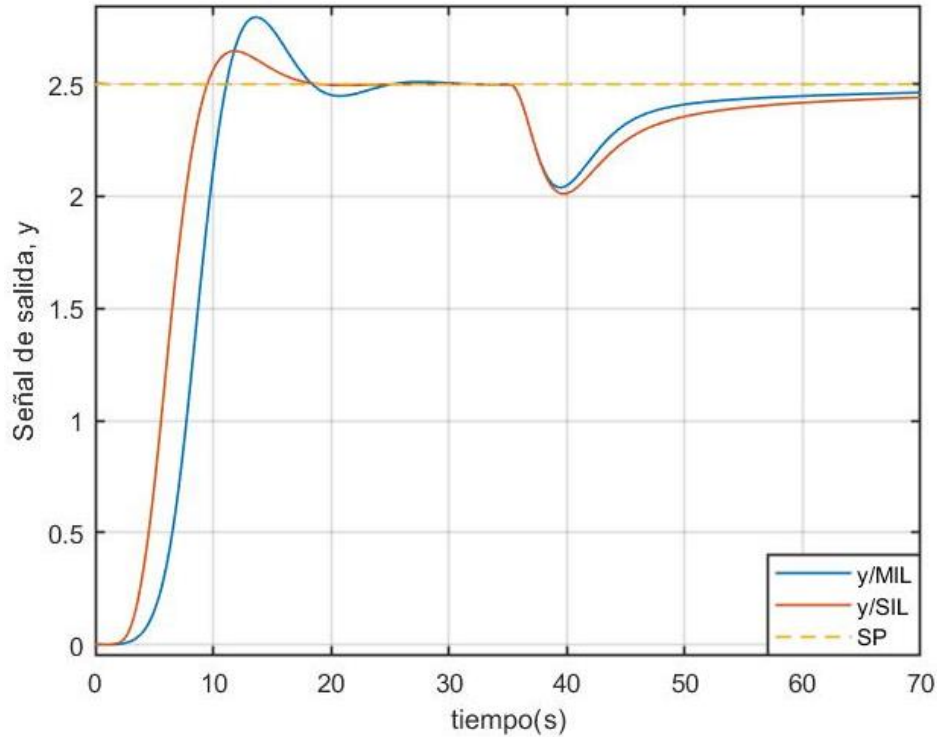


<i>Etapa</i>	<i>Overshoot (%)</i>	<i>Tiempo de establecimiento (s)</i>	<i>Error en estado estacionario</i>
<b>MIL</b>	7.57	35	$5.25 \times 10^{-5}$
<b>SIL</b>	5.33	33	$4.36 \times 10^{-6}$

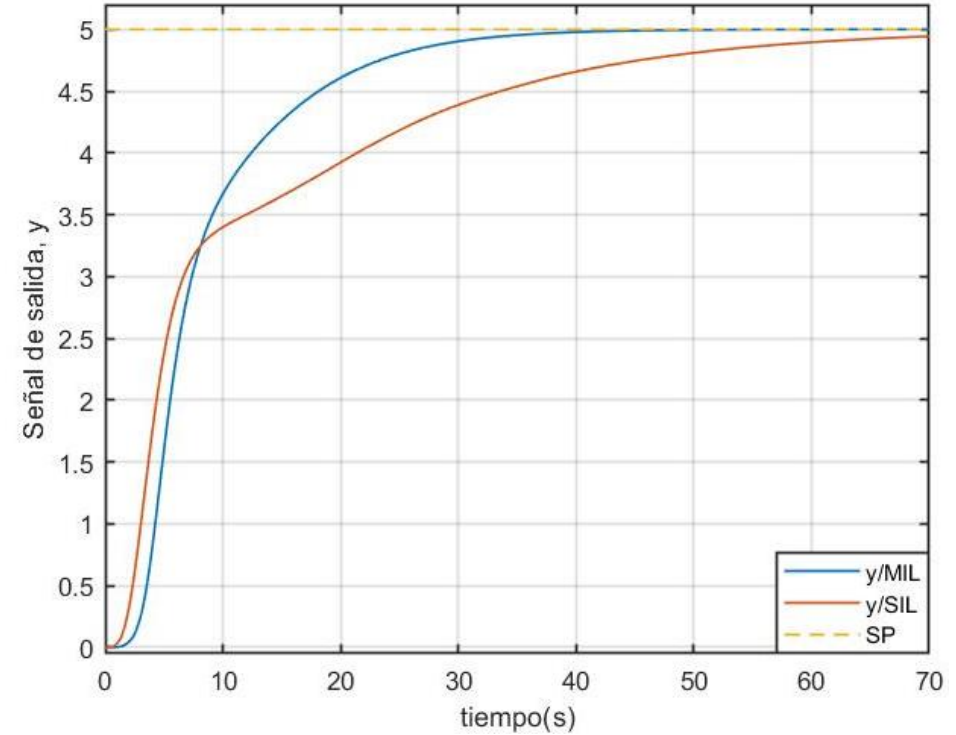


# Validación de resultados

## Caso de estudio actuador no lineal



<i>Etapa</i>	<i>Overshoot (%)</i>	<i>Tiempo de establecimiento (s)</i>	<i>Error en estado estacionario</i>
<b>MIL</b>	11.95	32	$1.59 \times 10^{-5}$
<b>SIL</b>	5.90	27	$4.72 \times 10^{-5}$

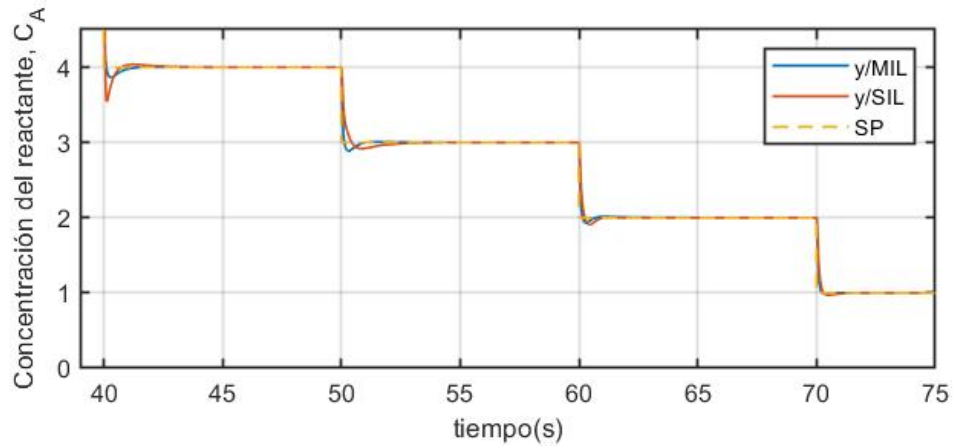
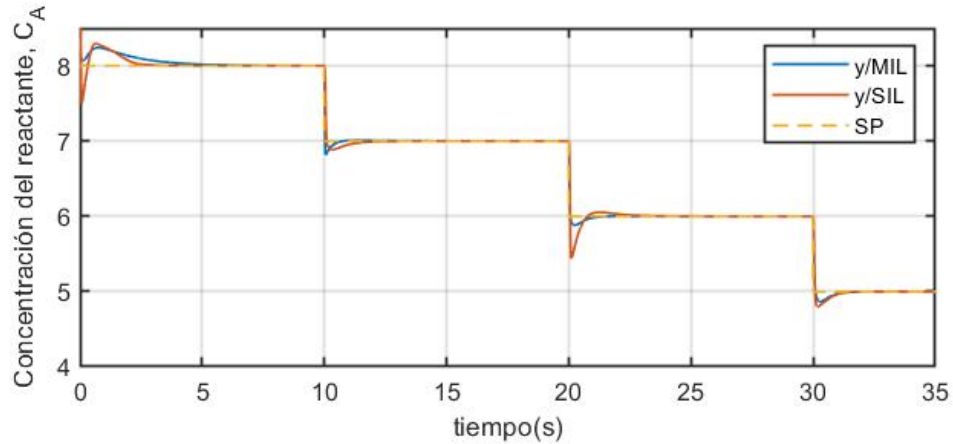


<i>Etapa</i>	<i>Overshoot (%)</i>	<i>Tiempo de establecimiento (s)</i>	<i>Error en estado estacionario</i>
<b>MIL</b>	N/A	50	$2.60 \times 10^{-4}$
<b>SIL</b>	N/A	70	$566 \times 10^{-3}$



# Validación de resultados

Caso de estudio reactor de tanque agitado continuo (CSTR)

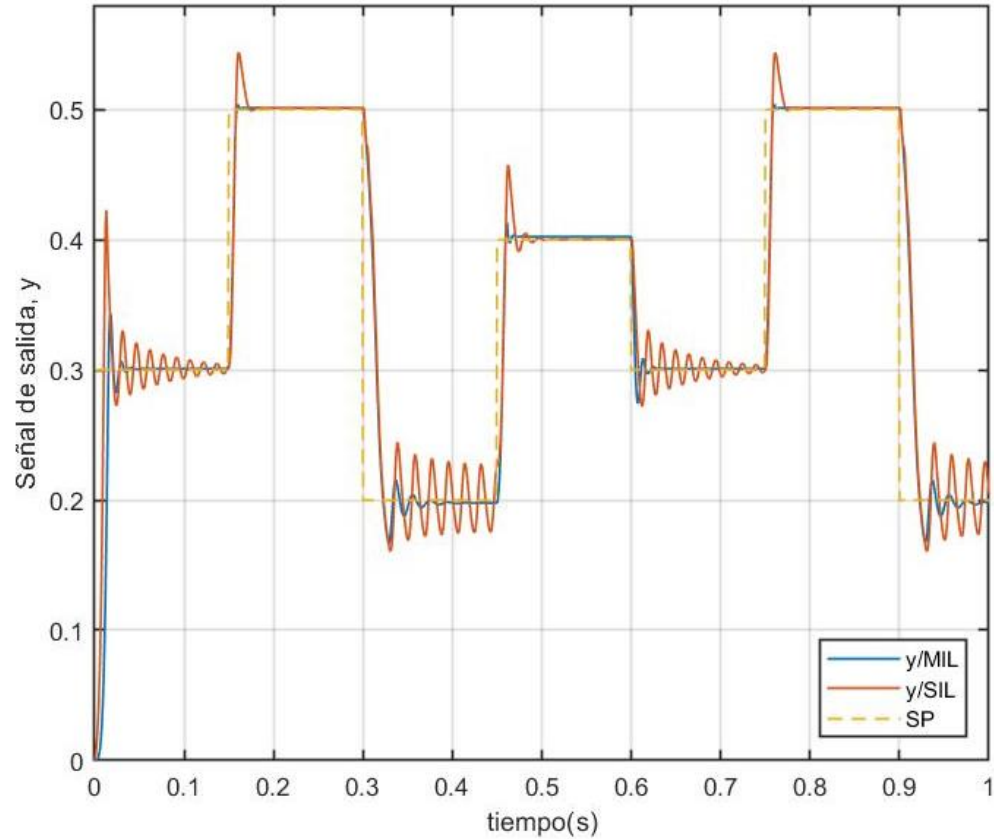


$C_A$ [ $\text{kmol}/\text{m}^3$ ]	Etapa	Overshoot (%)	Tiempo de establecimiento (s)
8	MIL	3	6
	SIL	3.62	4
7	MIL	2.71	2.5
	SIL	1.71	3
6	MIL	2	3
	SIL	9.5	3.5
5	MIL	2.8	2.5
	SIL	4.2	2.5
4	MIL	3.5	2
	SIL	11.5	3
3	MIL	4	2
	SIL	3	3.5
2	MIL	4	2
	SIL	5	2
1	MIL	2	1
	SIL	3	2



# Validación de resultados

Caso de estudio modelo/entrada salida no lineal



Setpoint	Etapa	Overshoot (%)	Tiempo de establecimiento (s)	Error en estado estacionario	¿Presenta Rizo?
0.5	MIL	0.8	0.03	$1.3 \times 10^{-3}$	No
	SIL	8	0.05	$1.2 \times 10^{-3}$	No
0.4	MIL	2.49	0.035	$2.4 \times 10^{-3}$	No
	SIL	12.49	0.062	$1.87 \times 10^{-4}$	No
0.3	MIL	8.66	0.05	$8.95 \times 10^{-4}$	No
	SIL	9.66	0.13	$2.80 \times 10^{-4}$	Sí
0.2	MIL	17	0.125	$2.4 \times 10^{-3}$	No
	SIL	20	—	—	Sí



# Conclusiones y Trabajos Futuros

## Conclusiones

La metodología propuesta para el desarrollo de estrategias de control inteligente por medio de las herramientas de simulación in-the-loop, ratifica que estos algoritmos de control pueden ser implementados en entornos industriales actuales.

La generación de código de los tres controladores consiguió resultados positivos, puesto que el desempeño de la puesta en marcha virtual, SIL, reproduce las características obtenidas durante la simulación de modelos, MIL. Sin embargo, existieron algunas diferencias en el transitorio de las respuestas que no ocasionaron ninguna inestabilidad en los sistemas de control.

El controlador difuso que actúa sobre el sistema del actuador no lineal muestra el mejor desempeño de los controladores, debido a que los resultados de la etapa SIL superan en rendimiento a los de la etapa MIL.

El controlador por ajuste de ganancias que controla el modelo CSTR presenta el rendimiento más similar en ambas etapas de simulación, ya que las métricas de desempeño son la que menor variación tienen de los tres controladores.

La estrategia de redes neuronales que controla el modelo entrada salida no lineal presenta un resultado adverso como el efecto ringing que se nota en ambas etapas de simulación, el cual es producido debido a la cancelación no exacta de los polos.



# Conclusiones y Trabajos Futuros

## Trabajos Futuros

Otras estrategias de control como, por ejemplo, control por modelo de referencia o control adaptativo son propuestas que pueden ser implementadas en el modelo CSTR. Para el sistema del actuador no lineal es posible reproducir de mejor manera la función inversa de la válvula a partir de un mayor número de funciones lineales.

En este proyecto se ha establecido una metodología para la implementación de estrategias de control inteligente mediante las dos primeras etapas del proceso de simulación in-the-loop, sin embargo, si se busca completar el proceso de simulación se debe integrar la etapa HIL donde el controlador es ejecutado en una plataforma de hardware física. Cumpliendo con esta etapa se tendrá una noción clara de cómo está operando el software embebido en la plataforma de hardware, tomando en consideración que los tiempos de respuesta se den en intervalos determinados consiguiendo así comportamiento en tiempo real.

Las simulaciones realizadas en las etapas MIL y SIL dan una noción de cuánto tiempo debería tomar la obtención de respuestas en la etapa HIL. El desafío en la siguiente etapa de simulación será solventar los problemas que puedan ocurrir sobre el hardware real como módulos de entradas/salidas, o interfaces que se usen para la comunicación entre el controlador físico y la planta que aún reside en Simulink.

