



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en Electrónica e Instrumentación

IMPLEMENTACIÓN DE CONTROLADORES PID Y MPC PARA UN PROCESO CUÁDRUPLE DE TANQUES EN UN SISTEMA VIRTUAL 3D, UTILIZANDO LA TÉCNICA HARDWARE IN THE LOOP.

Autores:

Sánchez Quevedo, Milton Joel

Amaguaña Simbaña, Jonathan Fernando

Tutor. Ing. Pruna Panchi, Edwin Patricio

Co-Tutor. Ing. Escobar Anchaguano, Ivon Patricia





Sangolquí, June 30, 2022.

Aceptado para
publicación



Paper Id: CIT 2022 – 64

Title: Implementation of PID and MPC controllers for a quadruple tank process in a 3D virtual system, using the hardware in the loop technique.

Authors: J.F. Amaguaña, M.J. Sánchez , E.P. Pruna, I.P. Escobar.

Dear Authors,

We are glad to notify you that your paper "Implementation of PID and MPC controllers for a quadruple tank process in a 3D virtual system, using the hardware in the loop technique " has been accepted for oral presentation and publication the Latest Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy - Proceedings of CIT 2022 that will be published in Springer through their Lecture Notes in Electrical Engineering (LNEE) series, and submitted for indexing to ISI Proceedings, EI-Compendex, SCOPUS, Web of Science (WoS), SCImago Journal Ranking (SJR), Google Scholar and Springer link.

Sincerely,



firmado electrónicamente por:
**MIGUEL ANGEL
BOTTO TOBAR**

Miguel Botto-Tobar
CIT 2022 General Co-Chair



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**SESIÓN 2
ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

08:00 - 09:00	C. Magistral: Sustainable heating and cooling solution for residential, commercial and industrial applications. Dra. Emilia Motoasca
09:00 - 10:00	P. presencial: Passive Positioning of Autonomous Underwater Vehicles. E. Carrera and D. Guevara
10:00 - 10:15	P. virtual: Practical Framework for Optimal Planning of Microgrids for Production Processes. J. Llanos, D. Ortiz and M. Salto
10:15 - 10:30	P. virtual: Modeling of a Robotic Arm for the Application of Welding Processes. C. Olovache and J. Sánchez
10:30 - 10:45	P. virtual: Hybrid Storage System based on Rectenna and Photovoltaic Cells for Low Power IoT Wireless Devices. C. Gordon, M. Valle, M. Cumbajin and C. Peñafiel
10:45 - 11:00	P. virtual: Implementation of PID and MPC controllers for a quadruple tank process in a 3D virtual system, using the hardware in the loop technique. J. Amaguaña, M. Sánchez, E. Pruna and I. Escobar
11:00 - 11:15	P. virtual: Relationship between force signal and superficial electromyographic signals associated to hand movements. C. Sandoval, R. Mejía, B. Tarazona, A. Rincón and A. Rodríguez
11:15 - 11:30	P. virtual: Advanced Control Algorithms for a Horizontal Three-Phase Separator in a Hardware in the Loop Simulation Environment. L. Aimañana, O. Gahui, J. Llanos and D. Ortiz

Usted está viendo la pantalla de MILTON JOEL SANCHEZ QUEVEDO

ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

CIT2022- INTERNATIONAL CONGRESS ON SCIENCE AND TECHNOLOGY

IMPLEMENTATION OF PID AND MPC CONTROLLERS FOR A QUADRUPLE TANK PROCESS IN A 3D VIRTUAL SYSTEM, USING THE HARDWARE IN THE LOOP TECHNIQUE

AUTHORS

Milton J. Sánchez , Jonathan F. Amaguaña, Edwin P. Panchi and Ivon P. Escobar

FECHA ÚLTIMA REVISIÓN: 09/07/22 CODIGO: 102.0.360

Controlar silencio ahora Detener video (Alt+V) Seguridad Participantes Chat Compartir pantalla Grabar Transcripción en vivo Sección de Grupos Reacciones Aplicaciones Salir

Jonathan Amaguaña
MILTON JOEL SANCHEZ QUEVEDO
MARIO ENRIQUE ECHEVERRIA VAN...
Milton Valle M
Carenm Navarrete

Contenido

1

Introducción

2

Descripción del proyecto

3

Modelado y control

4

Entorno y simulación 3D

5

Resultados Obtenidos

6

Conclusiones



Contenido

- 1 Introducción
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Modelado y control
- 4 Entorno y simulación 3D
- 5 Resultados Obtenidos
- 6 Conclusiones



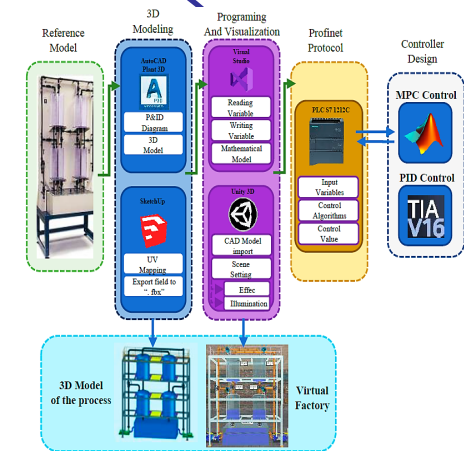
Proceso Cuádruple de Tanques



Industria 4.0



Hardware in the loop



Autómatas Programables



Planteamiento del Problema

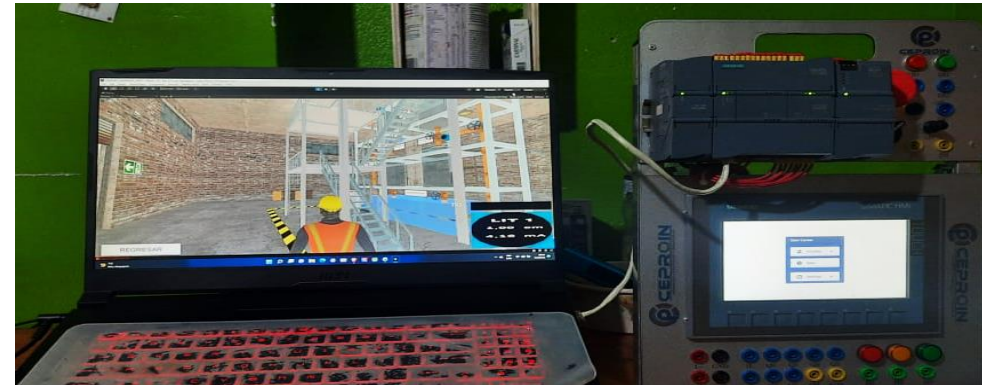


La implementación de algoritmos de control en tareas de formación tiene diferentes desventajas:

- Limitación al implementar algoritmos de control avanzados
- Elevado costo económico



La solución es utilizar la técnica HIL



Objetivo General

Implementar controladores PID y MPC para un Proceso Cuádruple de Tanques en un sistema virtual 3D, utilizando la Técnica Hardware in the Loop.



Objetivos Específicos

- Determinar el modelo matemático que represente el comportamiento del proceso cuádruple de tanques, con el propósito de implementar algoritmos de control.
- Diseñar e implementar los algoritmos de control MPC y PID para el control de un proceso cuádruple de tanques.
- Diseñar e Implementar un proceso cuádruple de tanques en un sistema virtual 3D creando un entorno inmersivo para emular un proceso real, basado en normas ISA 5.1 e ISA 5.3.
- Comunicar el controlador lógico programable (PLC) con el entorno virtual 3D (Planta simulada del proceso cuádruple de tanques), mediante un protocolo de comunicación industrial.
- Desarrollar pruebas en el sistema para validar el funcionamiento de los instrumentos y equipos virtuales, así como de los algoritmos de control MPC y PID.



Contenido

1

Introducción

2

Descripción del proyecto

3

Modelado y control

4

Entorno y simulación 3D

5

Resultados Obtenidos

6

Conclusiones



Descripción del Proyecto

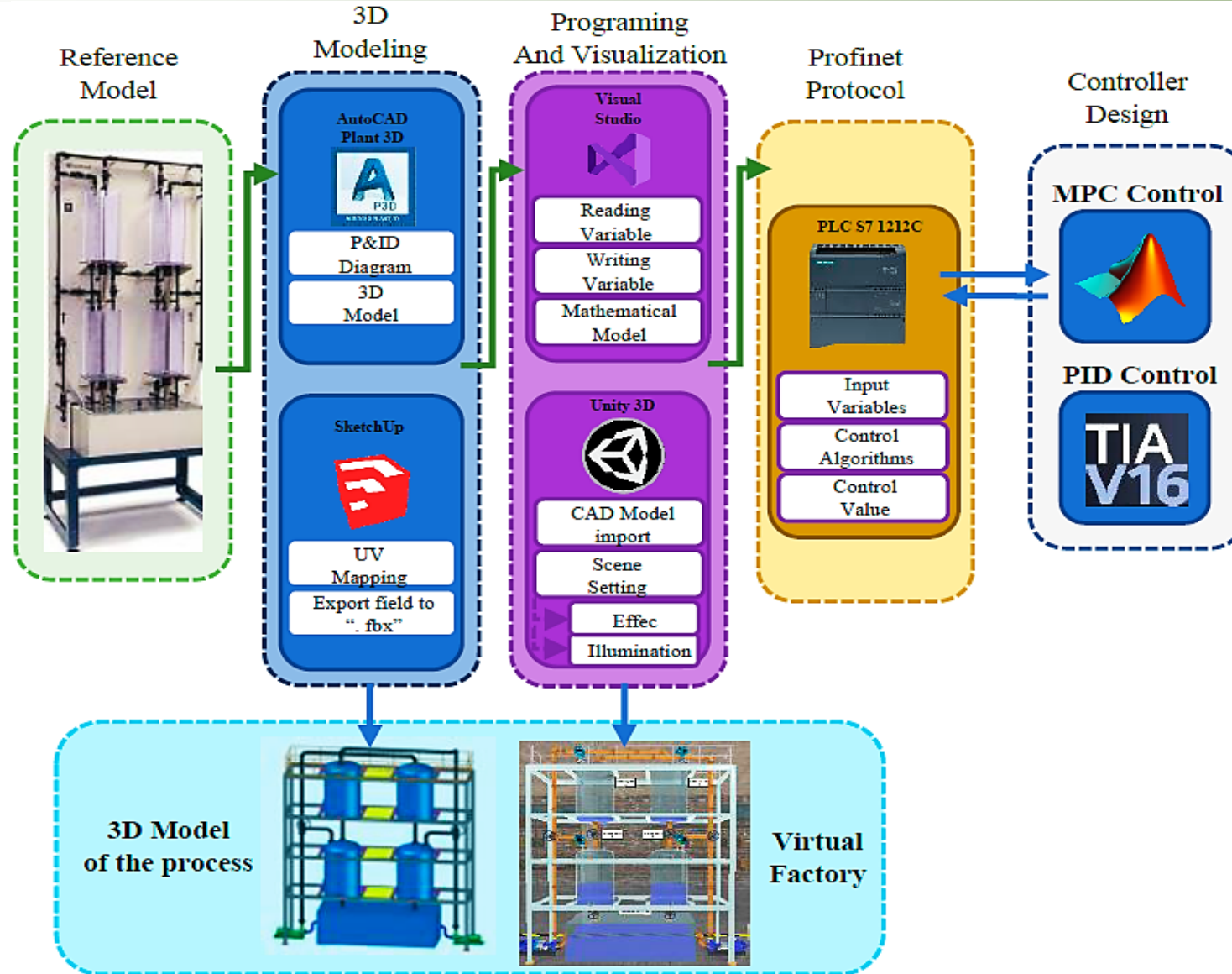
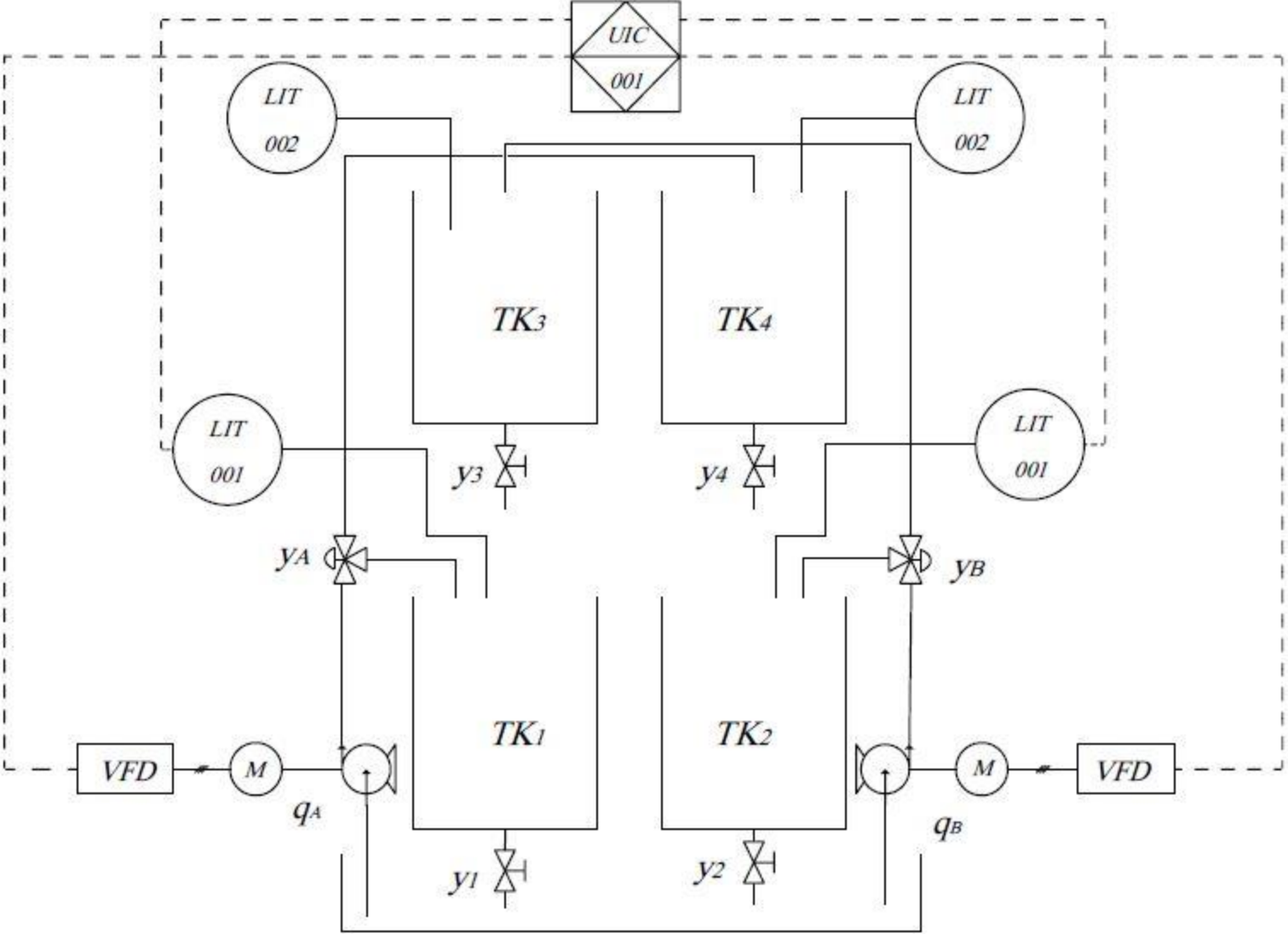


Diagrama PI&D

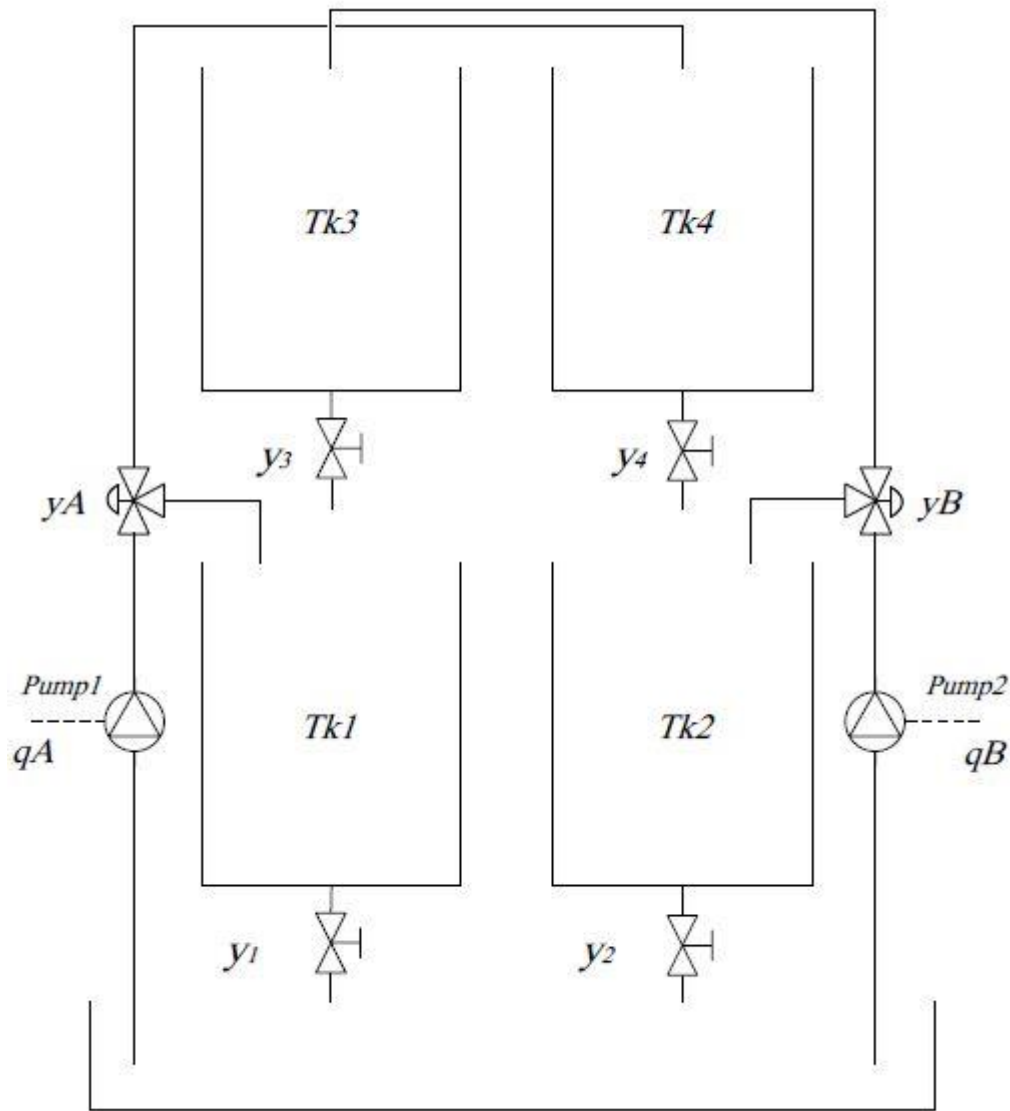


Content

- 1 Introducción
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Modelado y control
- 4 Entorno y simulación 3D
- 5 Resultados Obtenidos
- 6 Conclusiones



Modelo del proceso cuádruple de tanques.



$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = y_A k_A q_A + y_3 k_3 \sqrt{2gh_3} - y_1 k_1 \sqrt{2gh_1}$$

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = y_B k_B q_B + y_4 k_4 \sqrt{2gh_4} - y_2 k_2 \sqrt{2gh_2}$$

$$A_3 \frac{dh_3}{dt} = (1 - y_B) k_B q_B - y_3 k_3 \sqrt{2gh_3}$$

$$A_4 \frac{dh_4}{dt} = (1 - y_A) k_A q_A - y_4 k_4 \sqrt{2gh_4}$$

Where:

A_1, A_2, A_3, A_4 : Area of tanks

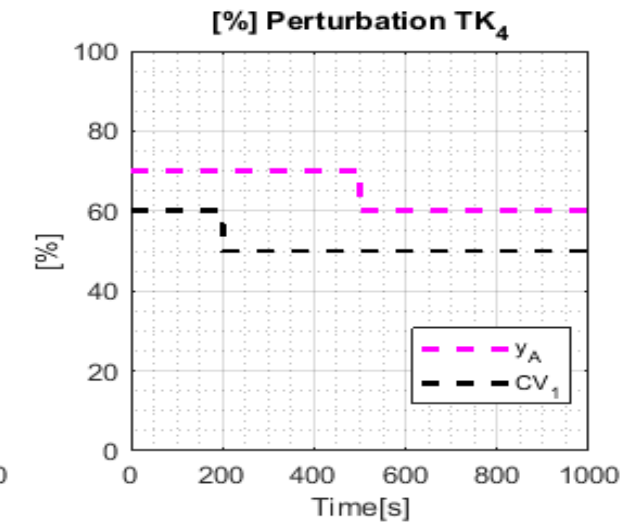
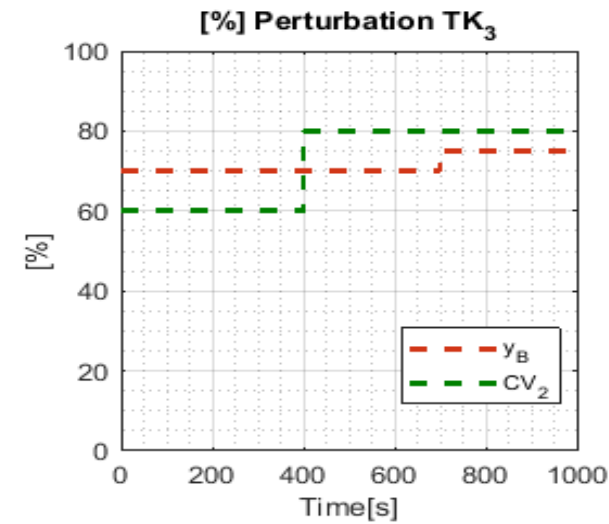
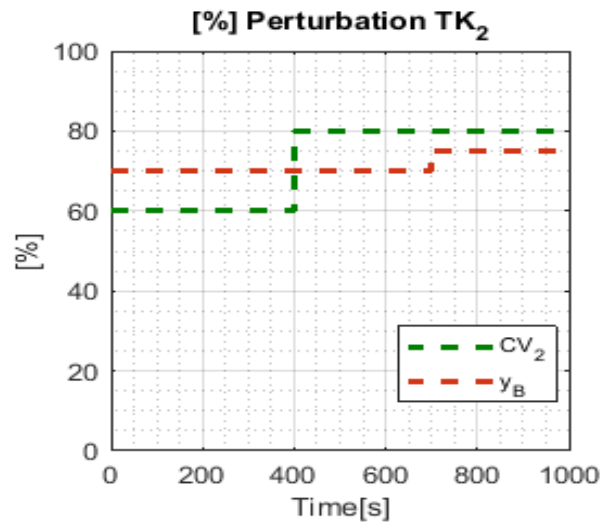
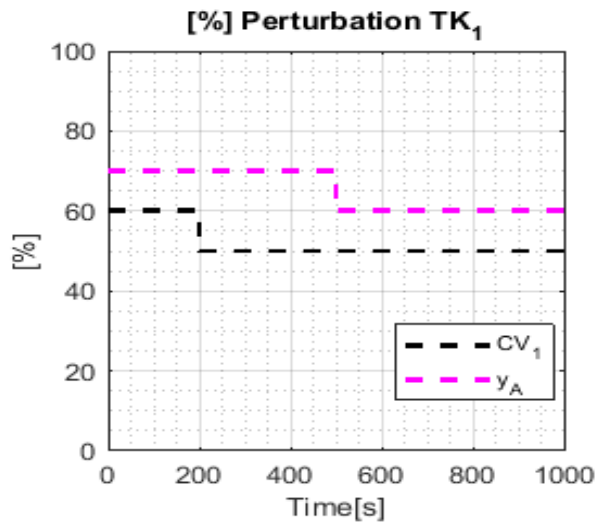
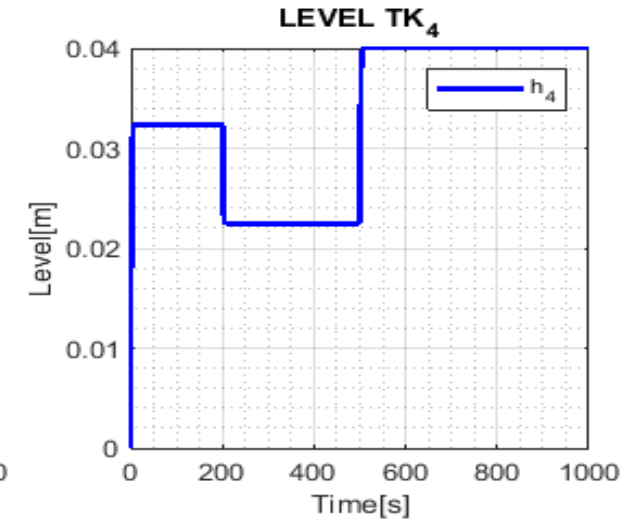
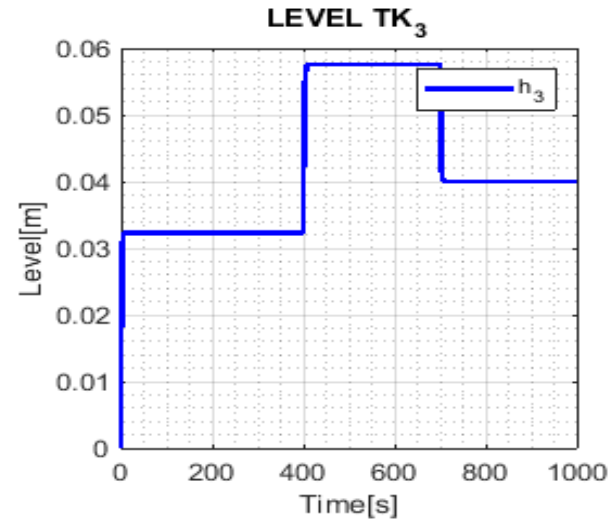
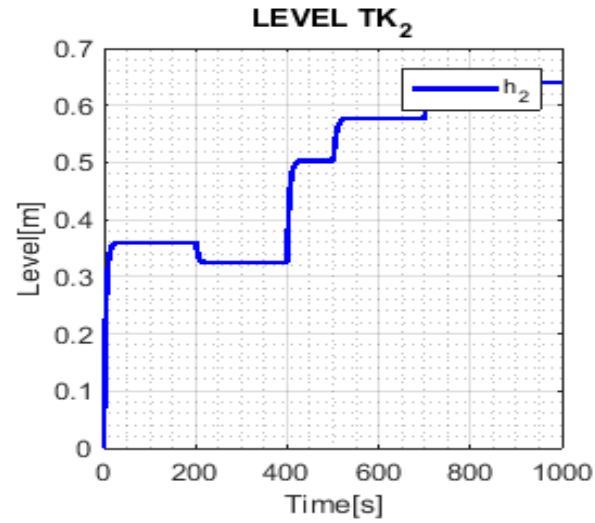
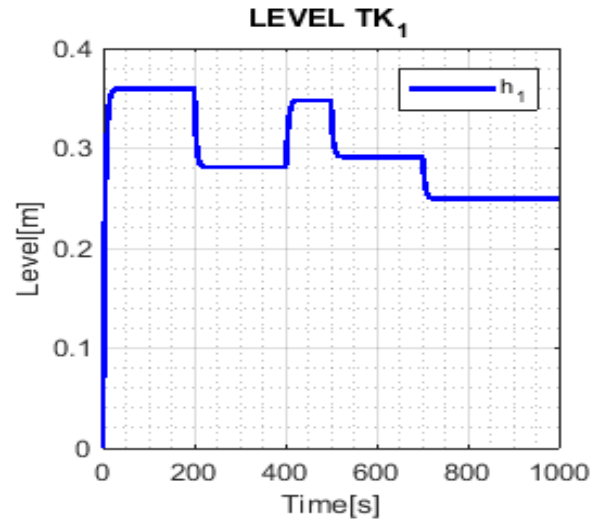
$k_A, k_B, k_1, k_2, k_3, k_4$: Valve constants

$y_A, y_B, y_1, y_2, y_3, y_4$: Valve opening

h_1, h_2, h_3, h_4 : Tanks height



Validación del modelo

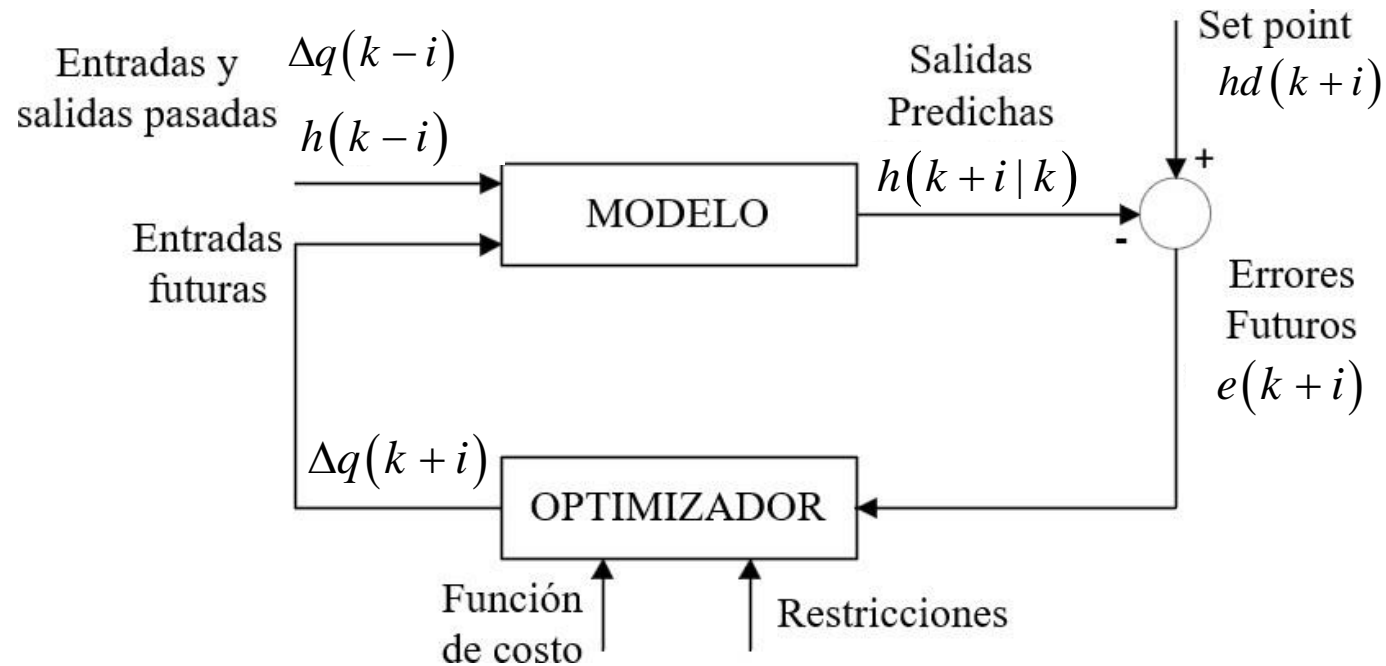


Condiciones Iniciales de la planta

Parameters	Value	Unit	Description
h_{\max}	1	m	Maximum level in all tanks
h_{\min}	0.01	m	Minimum level in all tanks
q_{\max}	3.1	V	Maximum voltage in q_A and q_B
q_{\min}	0	V	Minimum voltage in q_A and q_B
K_1, K_2, K_3, K_4	0.033	m^2/Vs	Discharge constant in all valves
K_A, K_B	0.0314	m^2/Vs	Discharge constant in 3-way valve
y_1, y_2, y_3, y_4	0.5	-	Parameter in all valves
y_A, y_B	0.7	-	Parameter of the 3-way valve



El control predictivo tiene internamente un mecanismo de optimización el cual trata de encontrar la acción de control más óptima siempre respetando las restricciones establecidas por el ingeniero de control, dentro de una ventana de predicción



El control MPC hacen uso explícito de un modelo del proceso para obtener la señal de control minimizando una función objetivo

Función Objetivo:

$$J(k) = \sum_{\substack{u_1, u_2 \\ i=N_w}}^{N_p} \delta_1(k) [h_1(k+i|k) - hd_1(k+i|k)]^2 + \delta_2(k) [h_2(k+i|k) - hd_2(k+i|k)]^2 \\ + \sum_{j=1}^{N_c-1} \lambda_1(k) [\Delta q_A(k+i-1)]^2 + \lambda_2(k) [\Delta q_B(k+i-1)]$$

N_w Inicio del horizonte de predicción

N_p Numero de muestras del horizonte de predicción

N_c Horizonte de control

h Salida predicha de nivel

h_d Valor deseado de nivel

Δq Acciones de control

λ Pesos asociados con la acción de control

δ Pesos asociados con el error



Sujeto a restricciones :

$$h_{\min} \leq h_1 \leq h_{\max}$$

$$h_{\min} \leq h_2 \leq h_{\max}$$

$$h_{\min} = 0 [m]$$

$$h_{\max} = 1 [m]$$

$$\Delta q_{\min} \leq \Delta q_A \leq \Delta q_{\max}$$

$$\Delta q_{\min} \leq \Delta q_B \leq \Delta q_{\max}$$

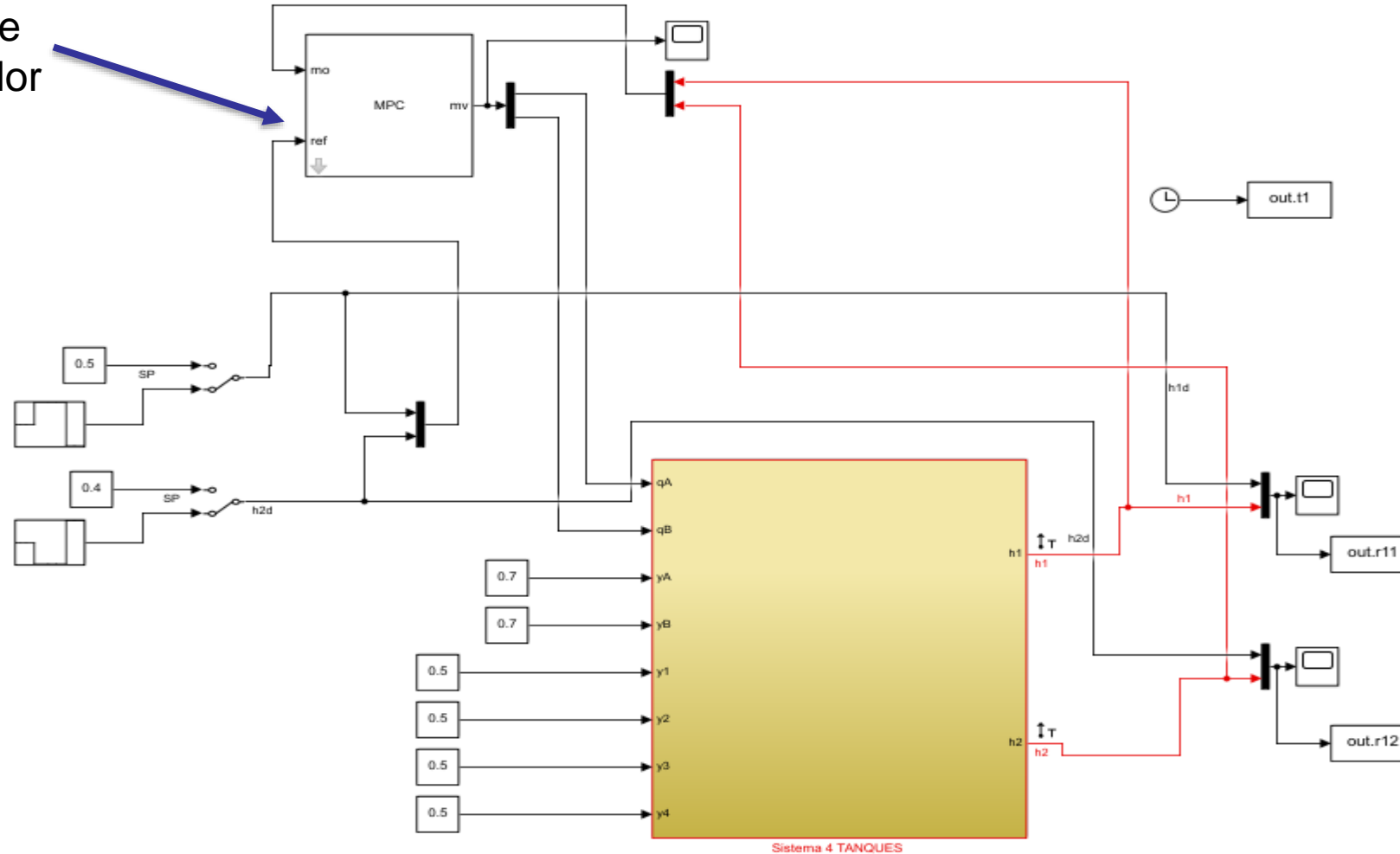
$$\Delta q_{\min} = 0 \%$$

$$\Delta q_{\max} = 100 \%$$



Diseño del Control MPC

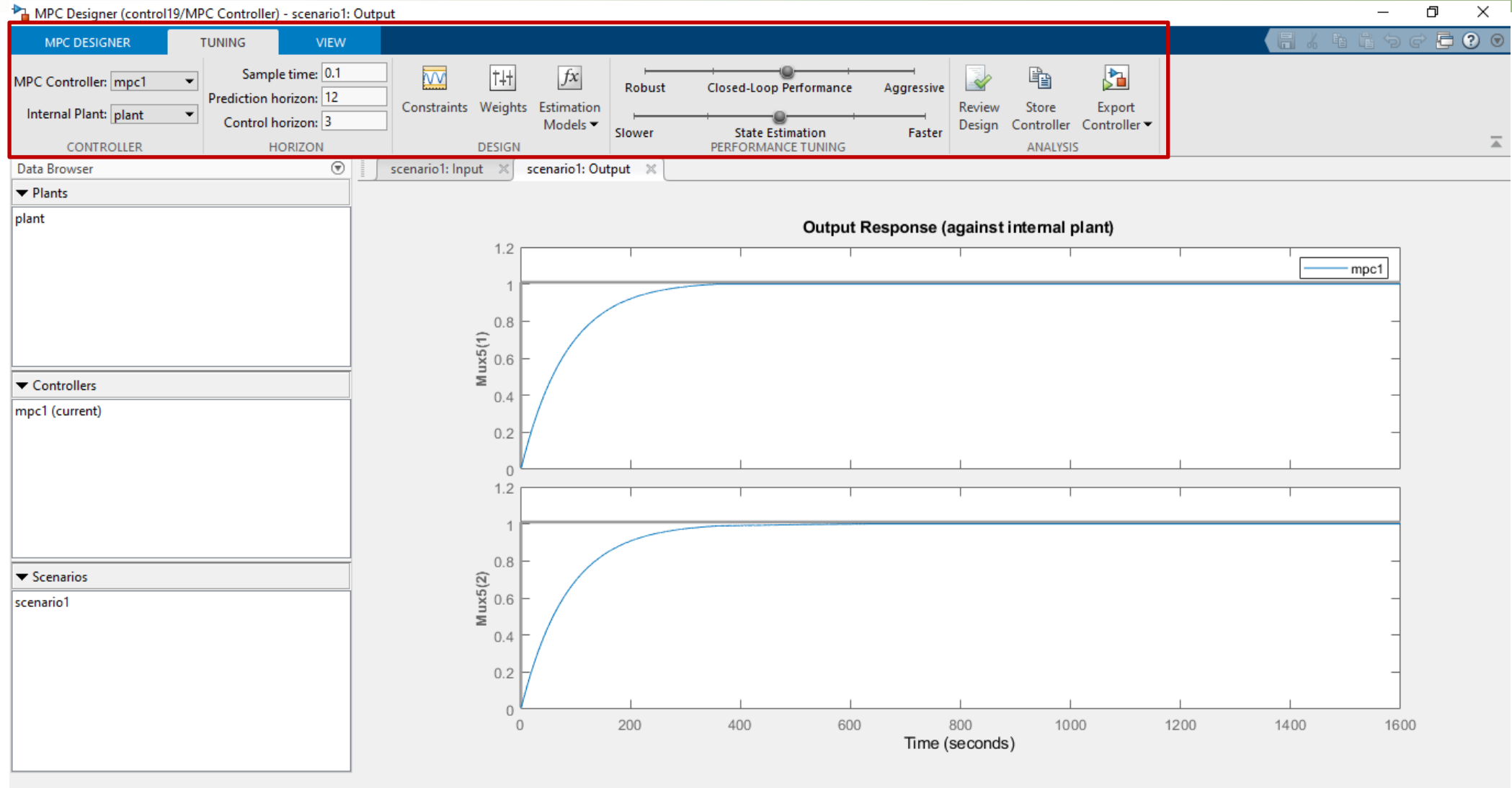
Bloque de controlador MPC



Bloque del modelo matemático



Diseño del Control MPC

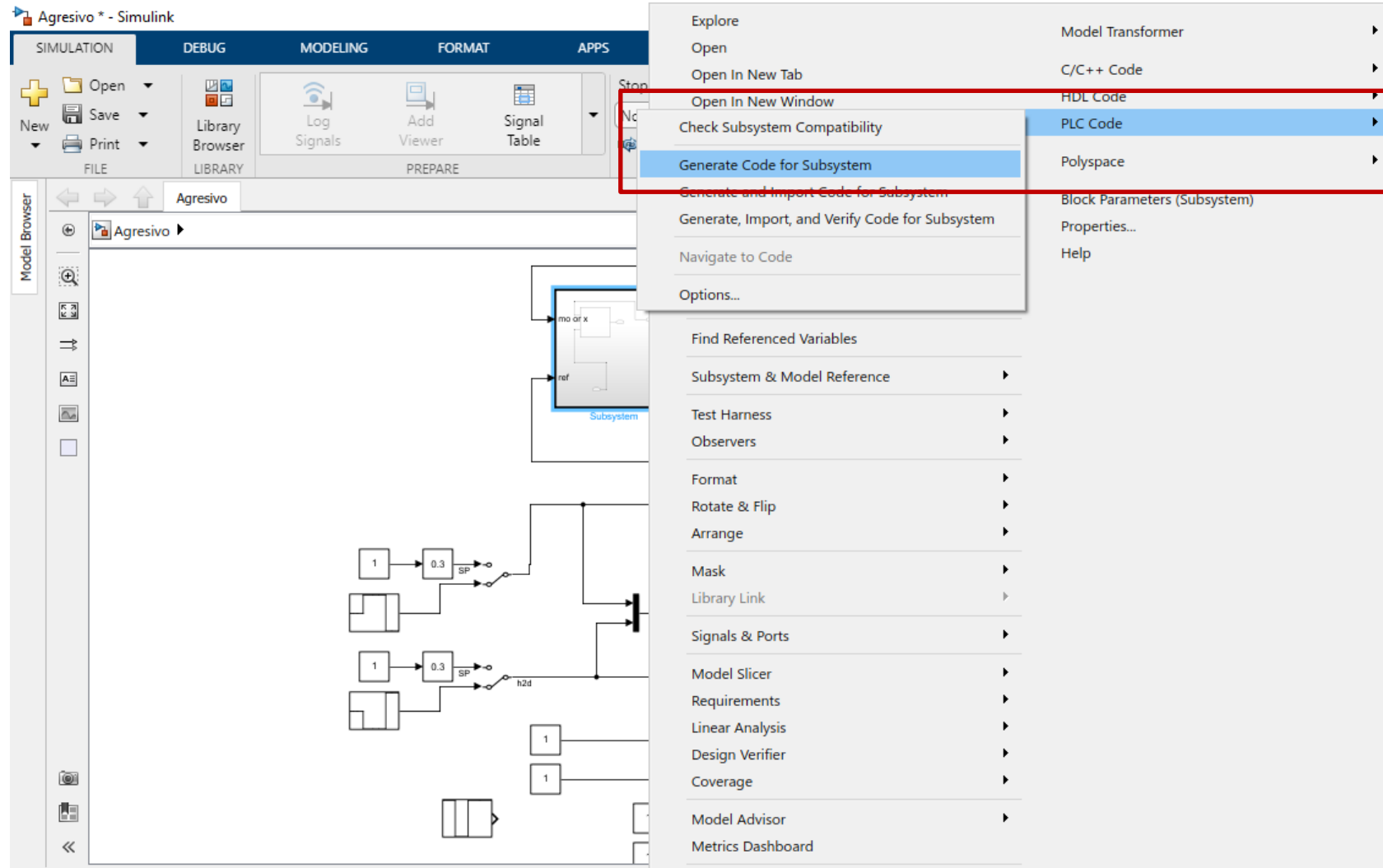


Constantes de sintonía del controlador MPC

Parameters	Tank 1	Tank 2
Prediction horizon (N_w)	12	12
horizon control (N_c)	3	3
Rate weight – input (δ_1, δ_2)	6.5	6.5
weight – input (λ)	0.001	0.001
weight –output (λ)	0.9	0.85



Diseño del Control MPC



Exportación del controlador MPC a Tia Portal



Bloques generados en Tía Portal

PLC_TANQUES ▶ HIL_PLC_UNITY_TANQUES_QTS [CPU 1212C AC/DC/Rly] ▶ Bloques de programa

Cyclic interrupt 1

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
1	Input		

CPU 1212C

Título del bloque:

Comentario

Segmento 1:

Comentario

The screenshot shows a cyclic interrupt block in Siemens TIA Portal. The block is titled "Cyclic interrupt 1" and is associated with CPU 1212C. The block contains a sub-block labeled "MPC19v" which is highlighted with a red border. The MPC19v block is a function block (%FB4) that takes several inputs: "ssMethodType" (value 1), "moorx" (from P#DB1.DBX50.0), and "b_ref" (from P#DB1.DBX42.0). It has an output "mv" (to P#DB1.DBX82.0) and an output "ENO". The entire block is labeled as "Bloque de controlador MPC".

General options

Target IDE: Siemens TIA Portal

- Show full target list
- Target IDE Path:
- Code Output Directory:
- Generate testbench

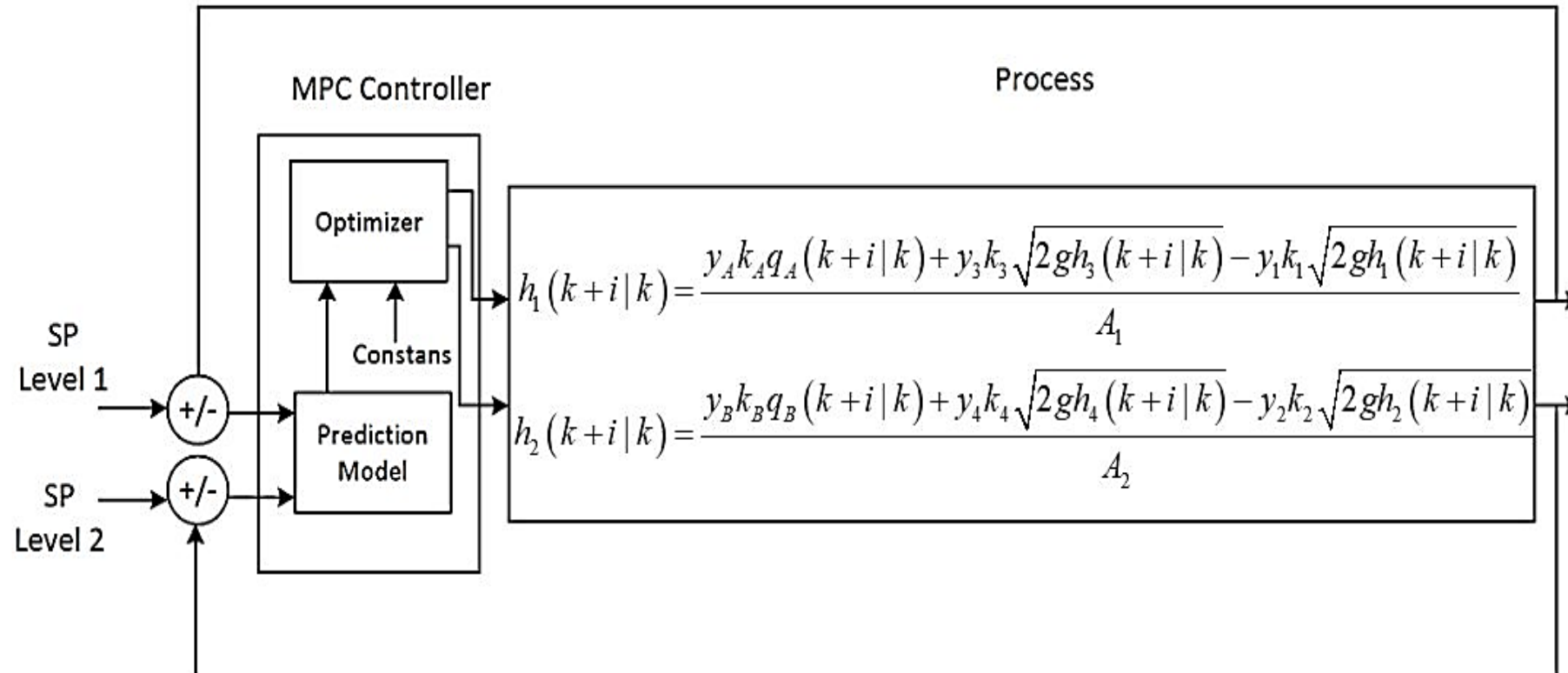
- 3S CoDeSys 2.3
- 3S CoDeSys 3.3
- 3S CoDeSys 3.5
- B&R Automation Studio 3.0
- B&R Automation Studio 4.0
- Beckhoff TwinCAT 2.11
- Beckhoff TwinCAT 3
- KW-Software MULTIPROG 5.0
- Phoenix Contact PC WORX 6.0
- Rockwell Studio 5000: AOI
- Rockwell Studio 5000: Routine
- Rockwell RSLogix 5000: AOI
- Rockwell RSLogix 5000: Routine
- Siemens SIMATIC Step 7
- Siemens TIA Portal**
- Siemens TIA Portal: Double Precision
- Generic
- PLCopen XML
- Rexroth IndraWorks
- OMRON Sysmac Studio

Bloque de controlador MPC



Diseño del Control MPC

Gráfico de lazo cerrado implementado en el controlador MPC



El control PID combina las 3 acciones

- Proporcional (P)
- Integral (I)
- Derivativa (D)

$$u(t) = \underbrace{k_p e(t)}_P + \underbrace{\frac{k_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt}_I + \underbrace{k_p T_d \frac{d e(t)}{dt}}_D$$

El controlador PID para el Proceso MIMO del proceso cuádruple de tanques se aplica la sintonía Lambda , utilizando el criterio $\lambda = T$

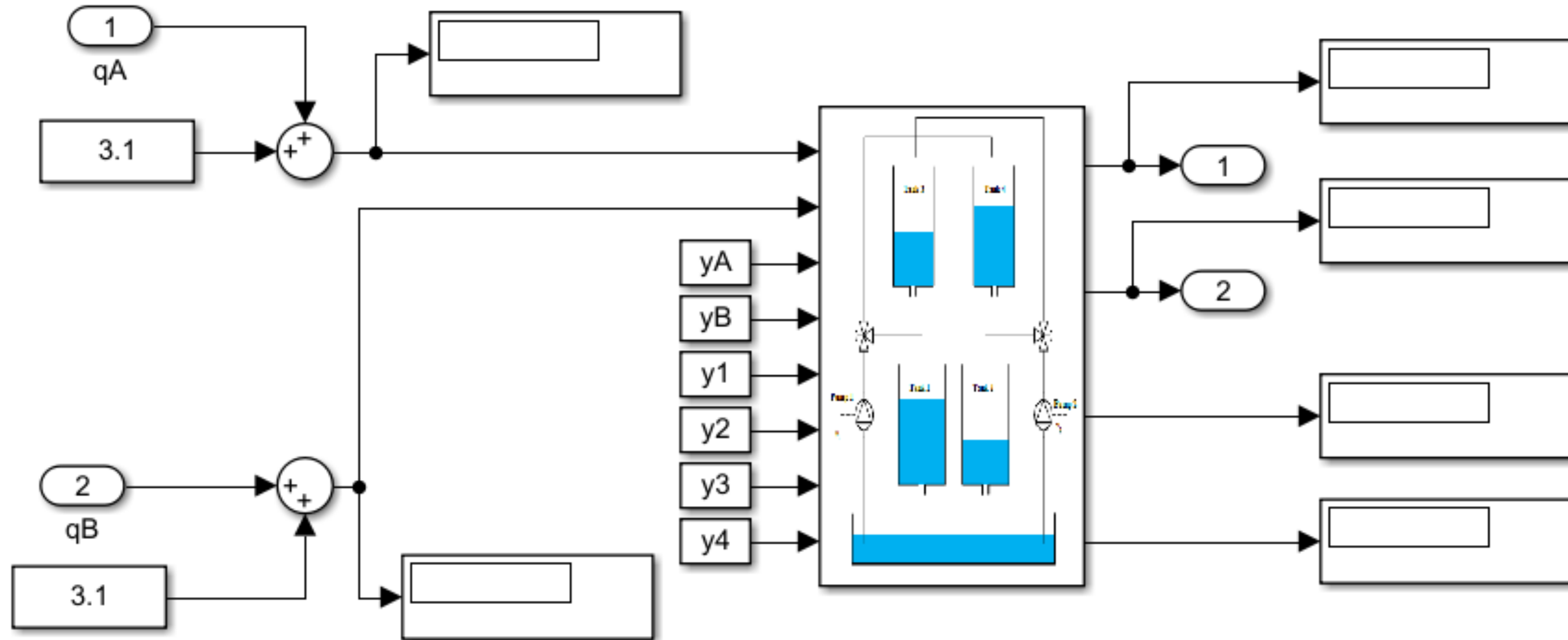
$$G(s) = \frac{k_p}{1 + sT} e^{-sL}$$

Para realizar la sintonía del controlador PID, se ocupan modelos aproximados de la variable de nivel desarrollado en Matlab-Simulink

$$G(s) = \frac{0.06015}{1 + 0.821s} e^{-0.01s}$$



Diseño del Control PID

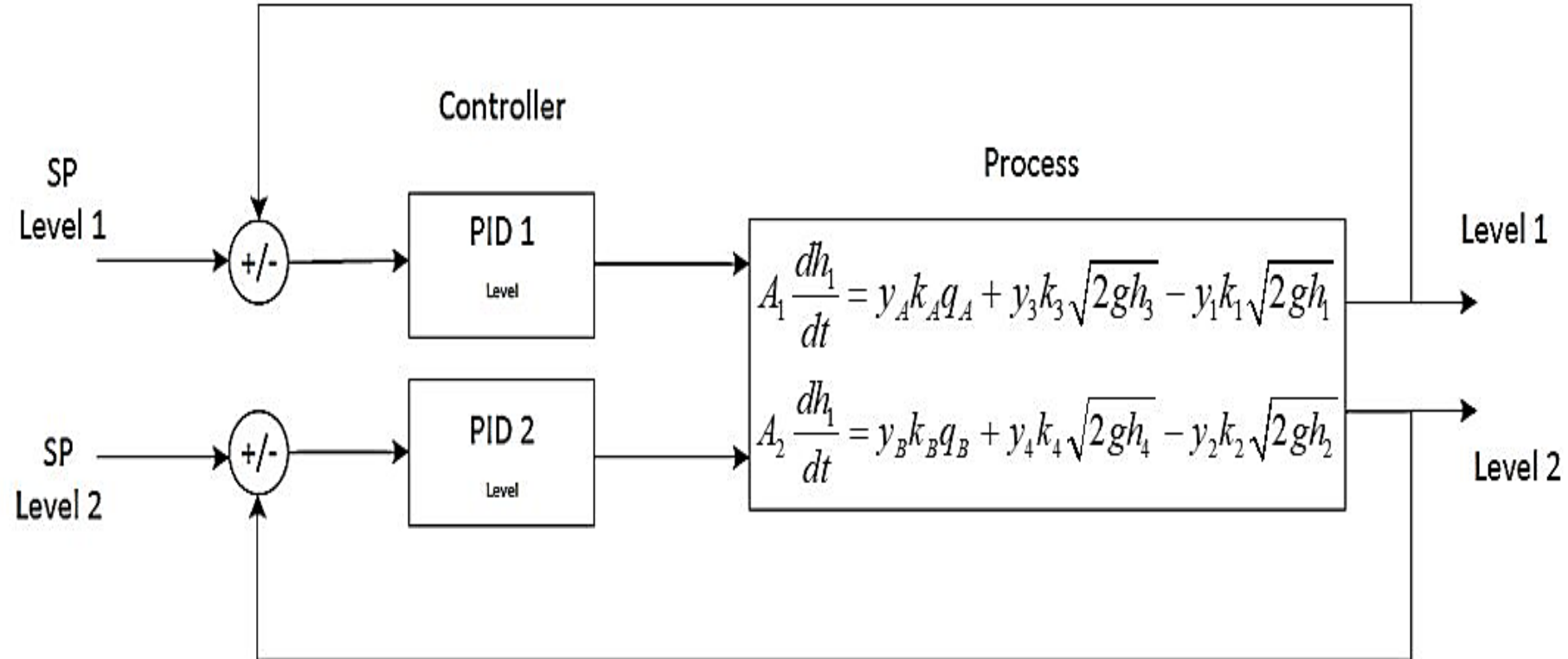


Constantes de sintonía del controlador PID

Constants	Tank 1	Tank 2
k_p	16.62	16.62
T_i	0.78 <i>seg</i>	0.78 <i>seg</i>
T_d	0 <i>seg</i>	0 <i>seg</i>



Gráfico de lazo cerrado implementado en el controlador PID



Selección del Autómata programable

Familia	Siemens	Siemens
Modelo	S7-1500	S7-1200
CPU	1511PN	1212C
Memoria	150 KB	75 KB
Protocolo Comunicación	PROFINET IRT CON 2 PORT SWITCH	Interfaz Ethernet / PROFINET integrado.
Software	STEP 7 (TIA Portal)	STEP 7 (TIA Portal)
Precio	1.686,00	350,00

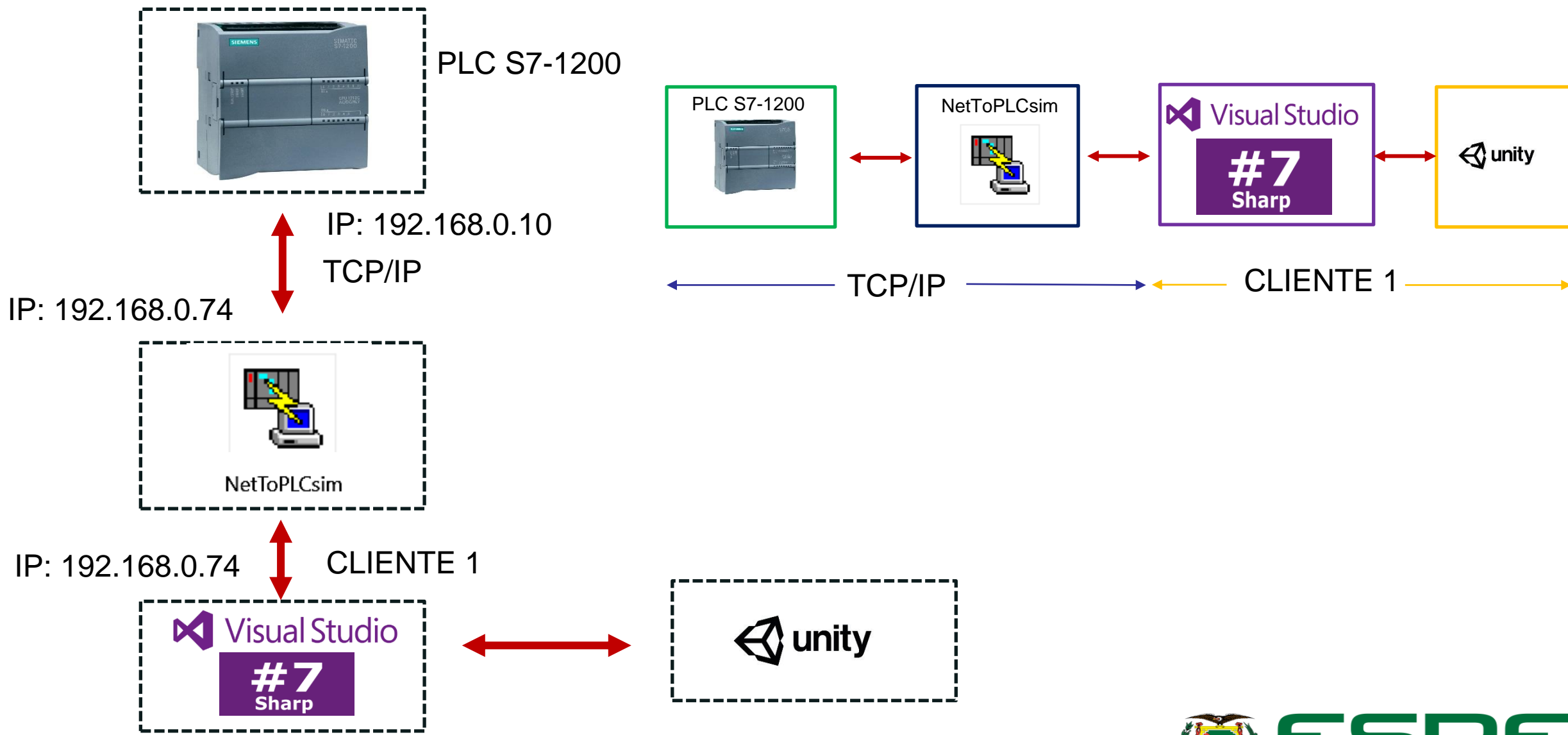


Contenido





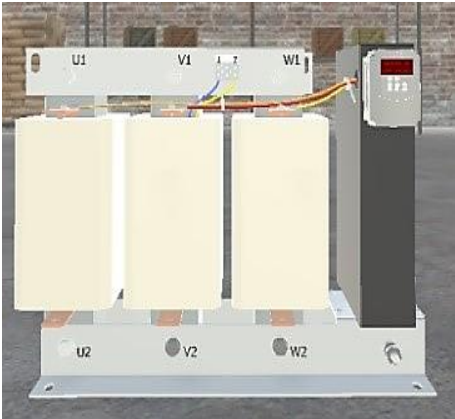

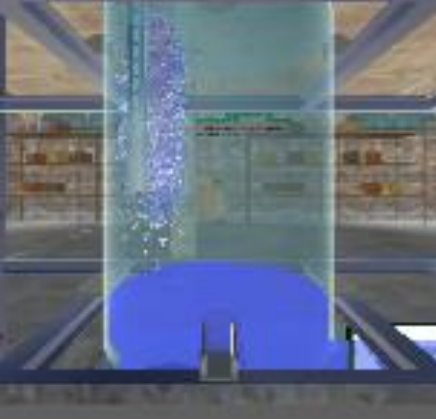

- 1 Introducción
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Modelado y control
- 4 Entorno y simulación 3D
- 5 Resultados Obtenidos
- 6 Conclusiones



Comunicación entre el entorno virtual y el PLC

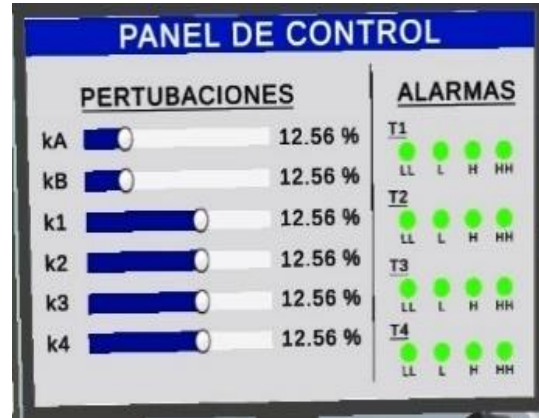


Entorno de simulación

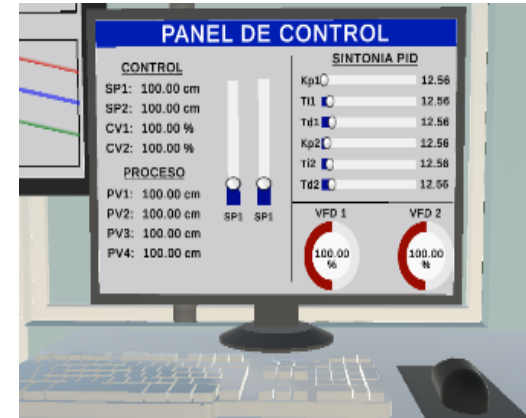
Bombas Centrífugas	Avatar	Válvulas Manuales	Fábrica
			
Variador de Frecuencia	Transmisores de Nivel (LIT)	Tanques (Tk)	Proceso Cuádruple de Tanques
			



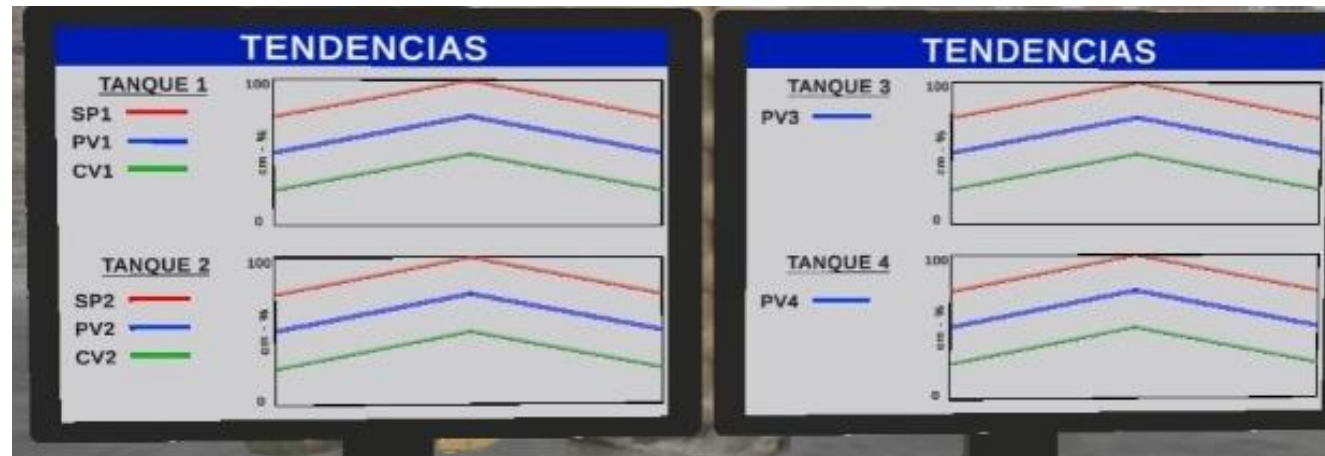
Control de Perturbaciones y Alarmas



Control Puntos de Consigna (Sp)

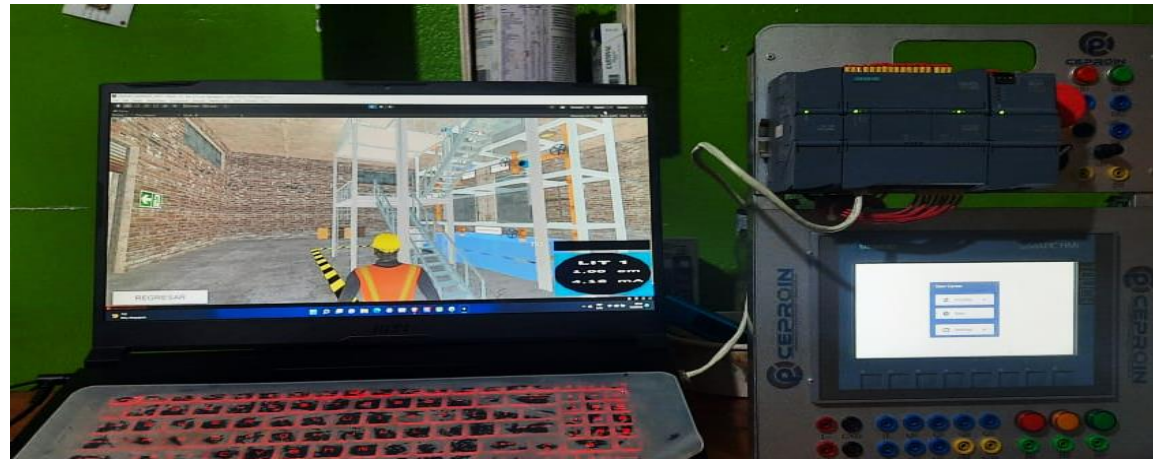


Pantalla de Tendencias de Nivel



Entorno de simulación (HIL)

Proceso cuádruple de Tanques con la Técnica Hardware in the loop



TIA PORTAL / UNITY 3D

Siemens - D:\TESIS_FINAL\Programa_PL_C_TIA_V10\PLC_TANQUES\PLC_TANQUES

Proyecto Edición Ver Insertar Online Opciones Herramientas Ventana Ayuda

Guardar proyecto Establecer conexión online Deshacer conexión online

PLC_TANQUES > HIL_PL_C_UNITY_TANQUES_QTS (CPU 1212C AC/DC/Rly) > Bloques de programa > Cyclic Interrupt 1 [OB30]

Cyclic Interrupt 1

Nombre	Tipo de datos	Valor predet.	Comentario
Input			

Título del bloque:
Comentario

Segmento 1:
Comentario

```
graph LR
    DB1[DB1.DBX0.0 "Data"] --> EN
    EN --> PID[MPC19V]
    PID --> ENO
    ENO --> DB2[DB1.DBX2.0 "Data"]
```

Segmento 2:
Comentario

REGRESAR PLC DESCONECTADO!

PANEL DE CONTROL

CONTROL		SINTONIA PID	
SP1	40.0 cm	Kp1	10.02
SP2	20.0 cm	Ti1	0.78
CV1	0.00 %	Td1	0
CV2	0.00 %	Kp2	16.62
		Ti2	0.78
		Td2	0

PROCESO

PV1	PV2	PV3	PV4
1.00 cm	1.00 cm	1.00 cm	1.00 cm

LIT 1
1.00 cm
4.16 mA



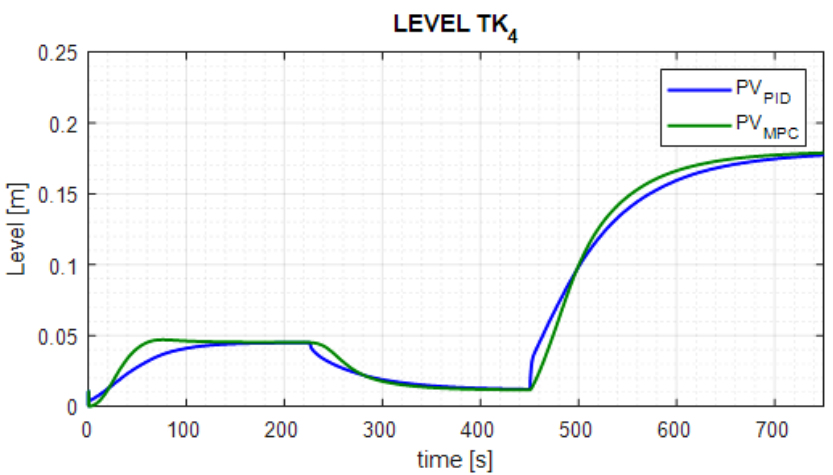
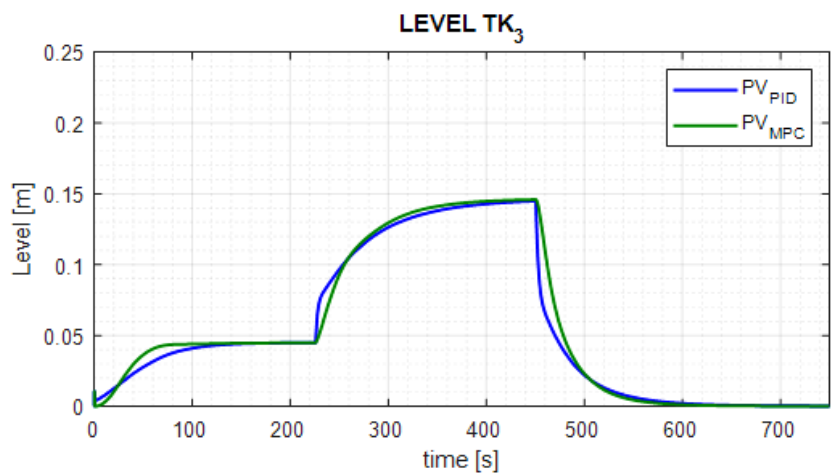
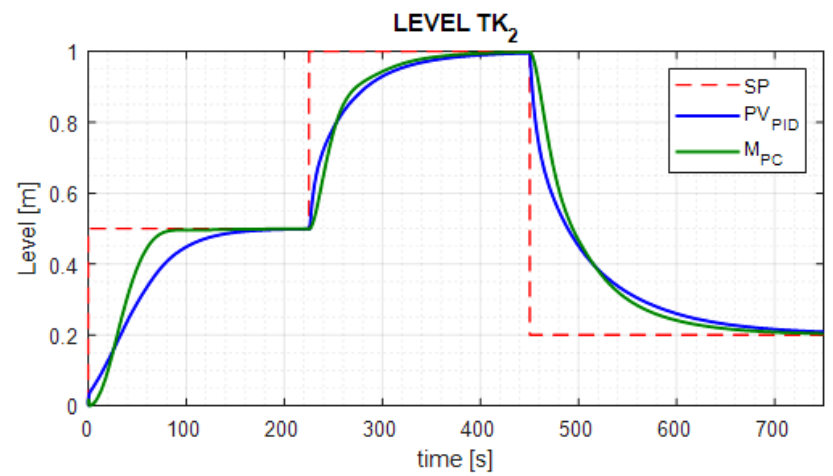
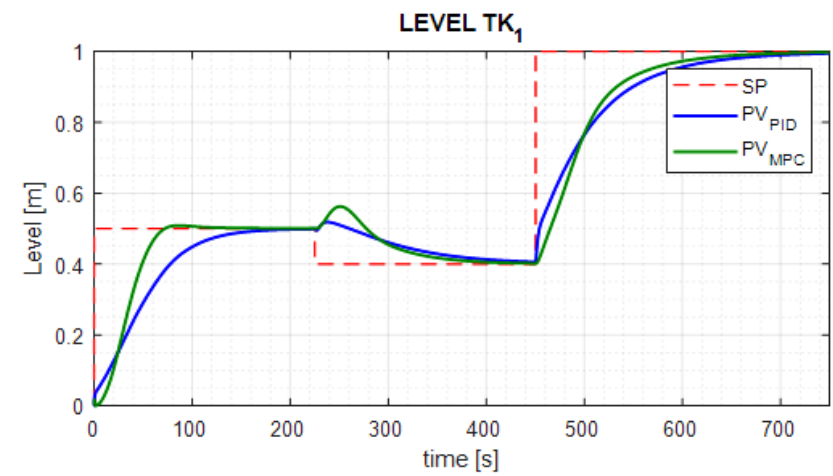
Content

- 1 Introducción
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Modelado y control
- 4 Entorno y simulación 3D
- 5 Resultados Obtenidos
- 6 Conclusiones



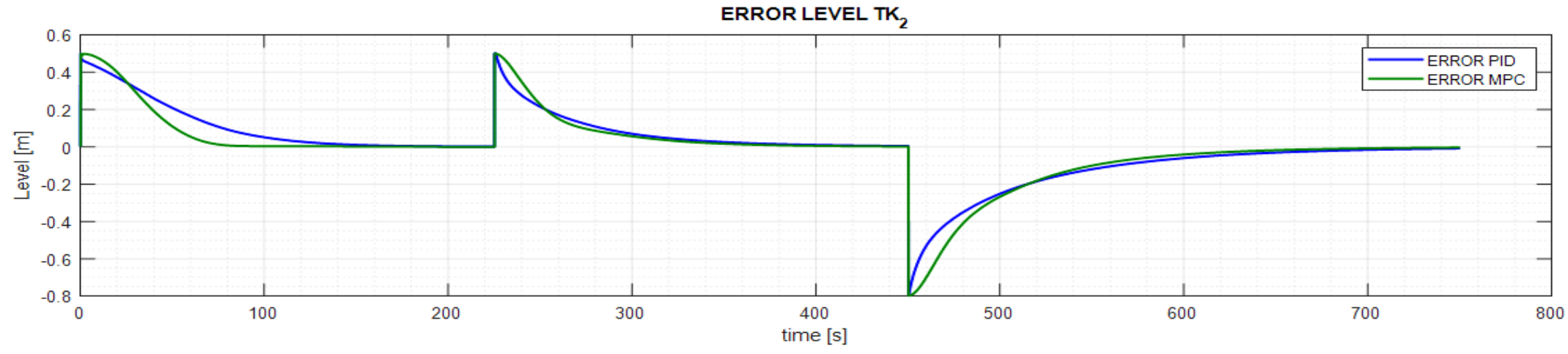
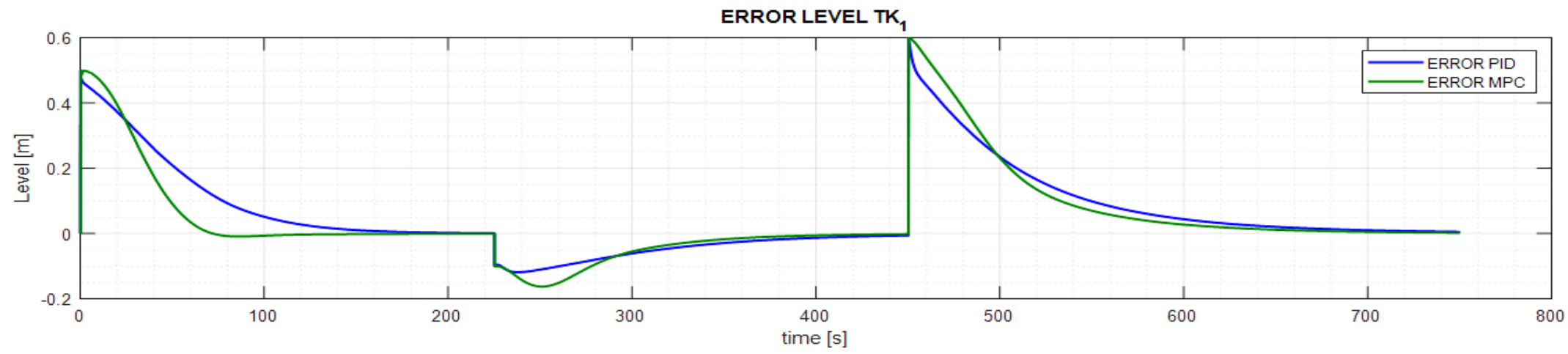
Resultados Obtenidos

Respuesta del sistema en lazo cerrado con los controladores MPC y PID



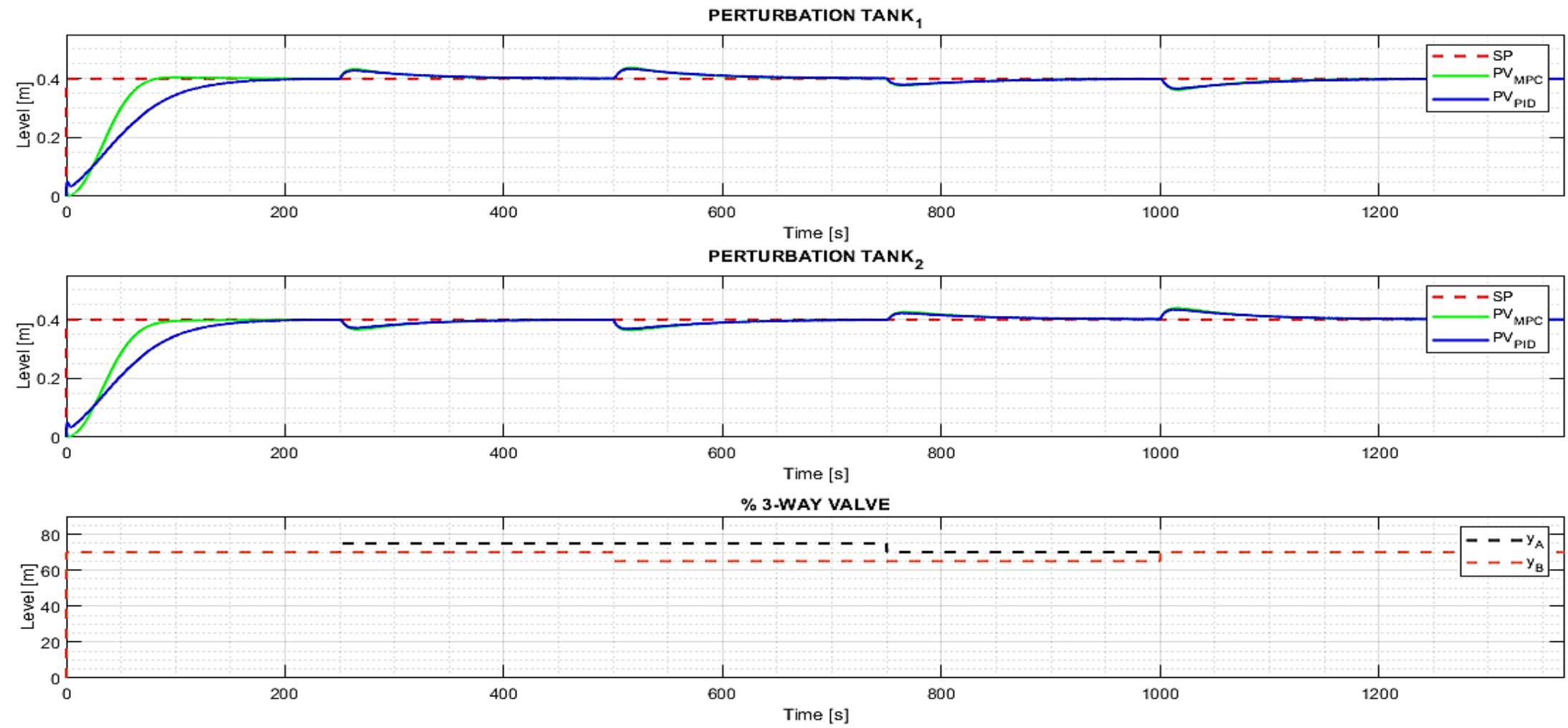
Resultados Obtenidos

Respuesta de error del sistema de lazo cerrado con los controladores MPC y PID



Resultados Obtenidos

Respuesta del sistema de lazo cerrado con los controladores MPC Y PID ante perturbaciones



Tiempos de establecimiento y %OS en los controladores MPC Y PID ante perturbaciones

	Controllers	Set Point 0.5m		Set Point 0.4m		Set Point 1.0m	
		OS (%)	T_S (s)	OS (%)	T_S (s)	OS (%)	T_S (s)
TK_1	MPC	0.9	120	0	140	0	210
	PID	0	200	0	195	0	250

	Controllers	Set Point 0.5m		Set Point 1m		Set Point 0.2m	
		OS (%)	T_S (s)	OS (%)	T_S (s)	OS (%)	T_S (s)
TK_2	MPC	0	100	0	145	0	230
	PID	0	255	0	175	0	285



Content

- 1 Introducción
- 2 Descripción del proyecto
- 3 Modelado y control
- 4 Entorno y simulación 3D
- 5 Resultados Obtenidos
- 6 Conclusiones



Conclusiones

- Se obtuvo un modelo matemático que representó el comportamiento del proceso cuádruple de tanques para la implementación de los algoritmos de control.
- Se crearon bloques de funciones para la implementación de controladores avanzados como el MPC en un PLC esto se logró con ayuda de la función PLC coder de MATLAB.
- El diseño de los controladores en Matlab brindaron una mayor facilidad de implementación en el PLC S7-1200 por su compatibilidad en su normativa IEC 61131
- El valor de las válvulas (y_A, y_B) no pueden ser menores al 50 %, el rango de variación entre las válvulas esta entre 60 % - 80 %. Con un valor mayor al 80% de las válvulas de 3 vías se reduce el factor de acoplamiento dando como resultado que el ingreso de líquido en los tanques 3 y 4 tiende a eliminarse.



Conclusiones

- Se creó un entorno inmersivo emulando un proceso real, basado en normas ISA 5.1 e ISA 5.3 con transmisores de nivel , cuartos de control, variadores de frecuencia, bombas centrífugas, tuberías y Alarmas.
- Se utilizó un PLC S7-1200 de gama media brindando una solución de bajo costo en el control automático de procesos
- El protocolo Profinet del PLC S7-1200 CPU 1212 AC/DC/RL permitió la comunicación entre el PLC y la planta virtualizada, logrando el envío y recepción de los datos para el correcto funcionamiento de los algoritmos de control que actúan en el proceso.
- Se desarrollaron varias pruebas de los controladores para evidenciar los beneficios de utilizar un control MPC versus un control clásico PID , y se observó que el tiempo de establecimiento al usar un control avanzado es mas óptimo.



Gracias



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA