



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



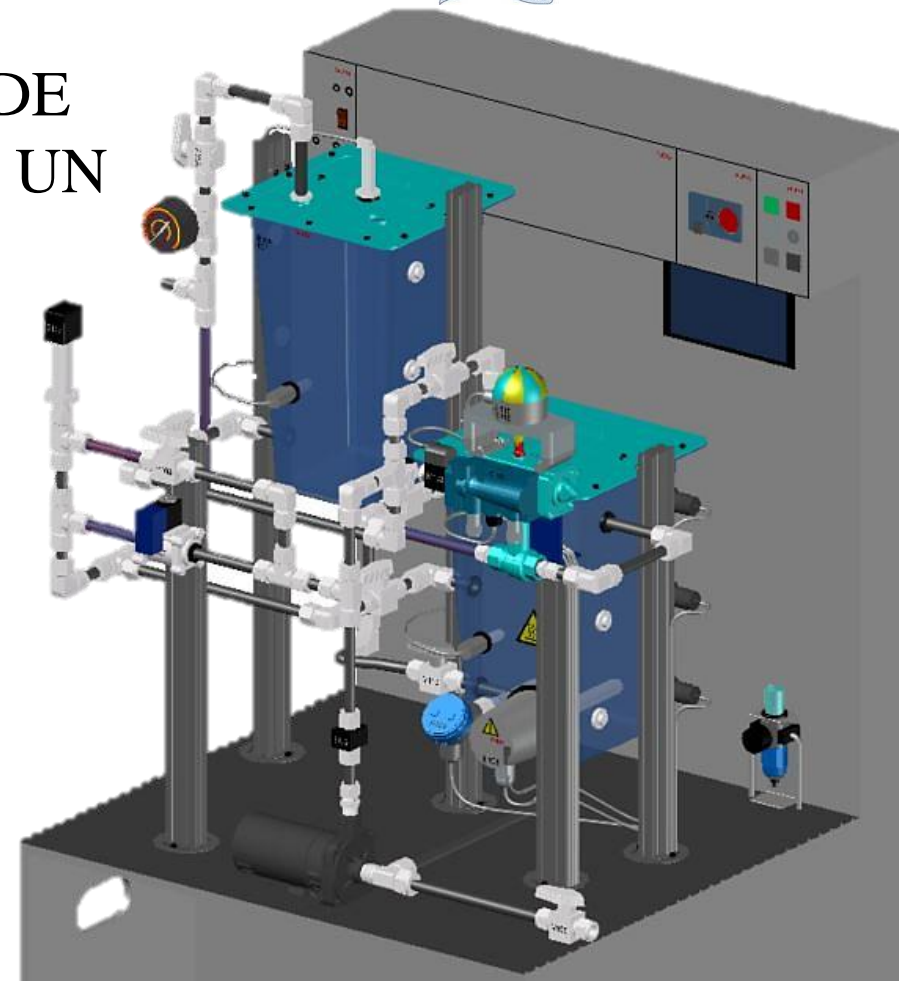
**arsit**

# DISEÑO Y VALIDACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL BAJO UN ENFOQUE VIRTUAL, DE UN PROCESO MULTIVARIABLE

**Autores:** Sr. Juan Feijoo  
Sr. Darío Chanchay

**Director:** Ing. Jacqueline Llanos Dr.  
**Co-Director:** Ing. Diego Ortiz Dr.

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE  
2021

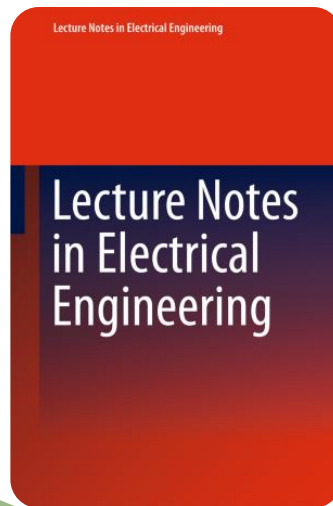




**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# DISEÑO Y VALIDACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL BAJO UN ENFOQUE VIRTUAL, DE UN PROCESO MULTIVARIABLE

Primer Artículo Científico:



## Virtual Festo MPS® PA workstation for level and temperature process control

Juan D. Feijoo, Dario J. Chanchay, Jacqueline Llanos, D. Ortiz-Villalba

Marzo 04, 2021





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

# DISEÑO Y VALIDACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL BAJO UN ENFOQUE VIRTUAL, DE UN PROCESO MULTIVARIABLE

Segundo Artículo Científico:



Scopus

**IEEE Xplore**<sup>®</sup>  
Digital Library

## IEEE IFAC ICA - ACCA 2020

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

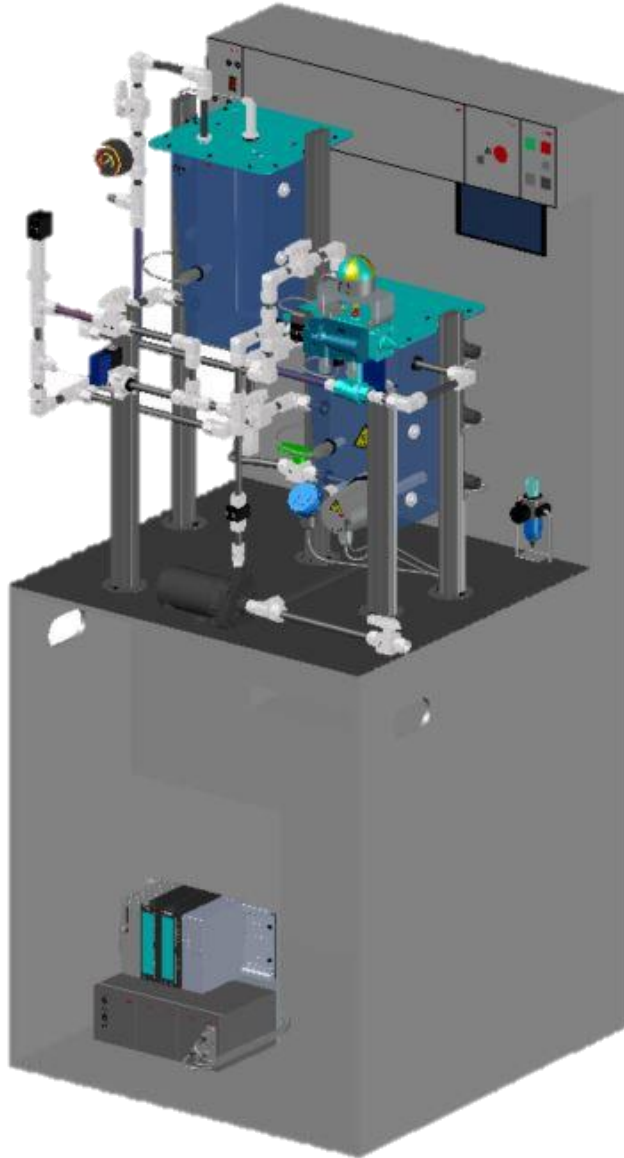
### Advanced Controllers for Level and Temperature Process Applied to Virtual Festo MPS<sup>®</sup> PA Workstation

Juan D. Feijoo, Dario J. Chanchay, Jacqueline Llanos, D. Ortiz-Villalba

Marzo 22-26, 2021



# AGENDA



1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA DE LA VIRTUALIZACIÓN

3. DISEÑO DE CONTROLADORES

4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

6. TRABAJOS FUTUROS



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

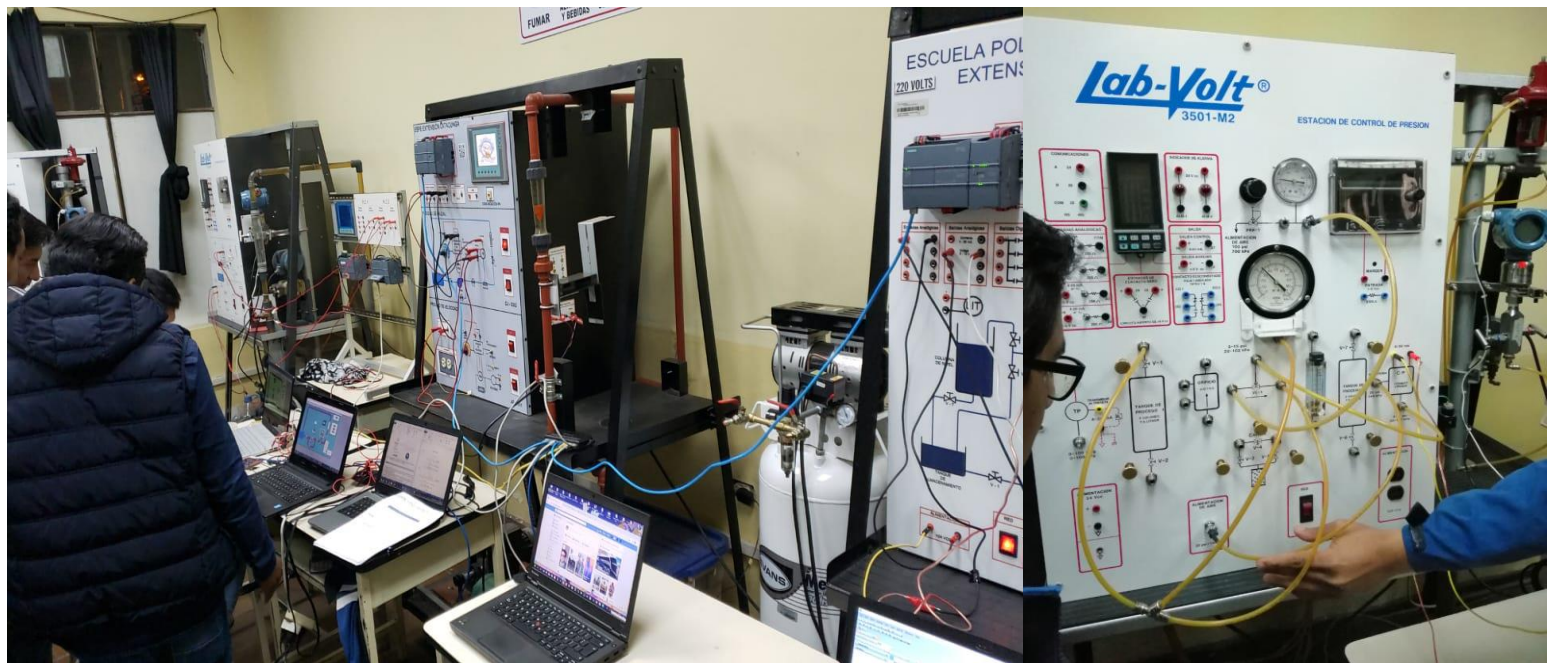
# INTRODUCCIÓN

## • Problemática

Actualmente la carrera de Electrónica no cuenta con plantas de procesos industriales multivariables.

La presencia de una sola planta multivariable en el laboratorio de Mecatrónica no es suficiente para el número de estudiantes.

La implementación de laboratorios virtuales facilitará la experiencia de aprendizaje aplicando técnicas remotas. El estudio de controladores es parte de la formación académica de los estudiantes de Ingeniería Electrónica.



### • **Objetivos**

#### **General**

- Desarrollar un entorno virtual de un proceso multivariable para la validación de estrategias de control, implementando una estrategia de control avanzado.

#### **Específicos**

- Desarrollar modelos que representen el sistema bajo estudio, permitiendo al usuario visualizar y controlar un proceso multivariable de manera intuitiva.
- Diseñar un entorno virtual de la planta multivariable, para facilitar la experiencia de aprendizaje en la temática de controles avanzados.
- Evaluar las distintas estrategias de control en el entorno virtual de la planta multivariable, con el propósito de obtener controladores eficientes que puedan ser implementados de forma segura.





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

# DISEÑO Y VALIDACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL BAJO UN ENFOQUE VIRTUAL, DE UN PROCESO MULTIVARIABLE

**Primer Artículo Científico:**



## Virtual Festo MPS® PA workstation for level and temperature process control

Juan D. Feijoo, Dario J. Chanchay, Jacqueline Llanos, D. Ortiz-Villalba

Marzo 04, 2021



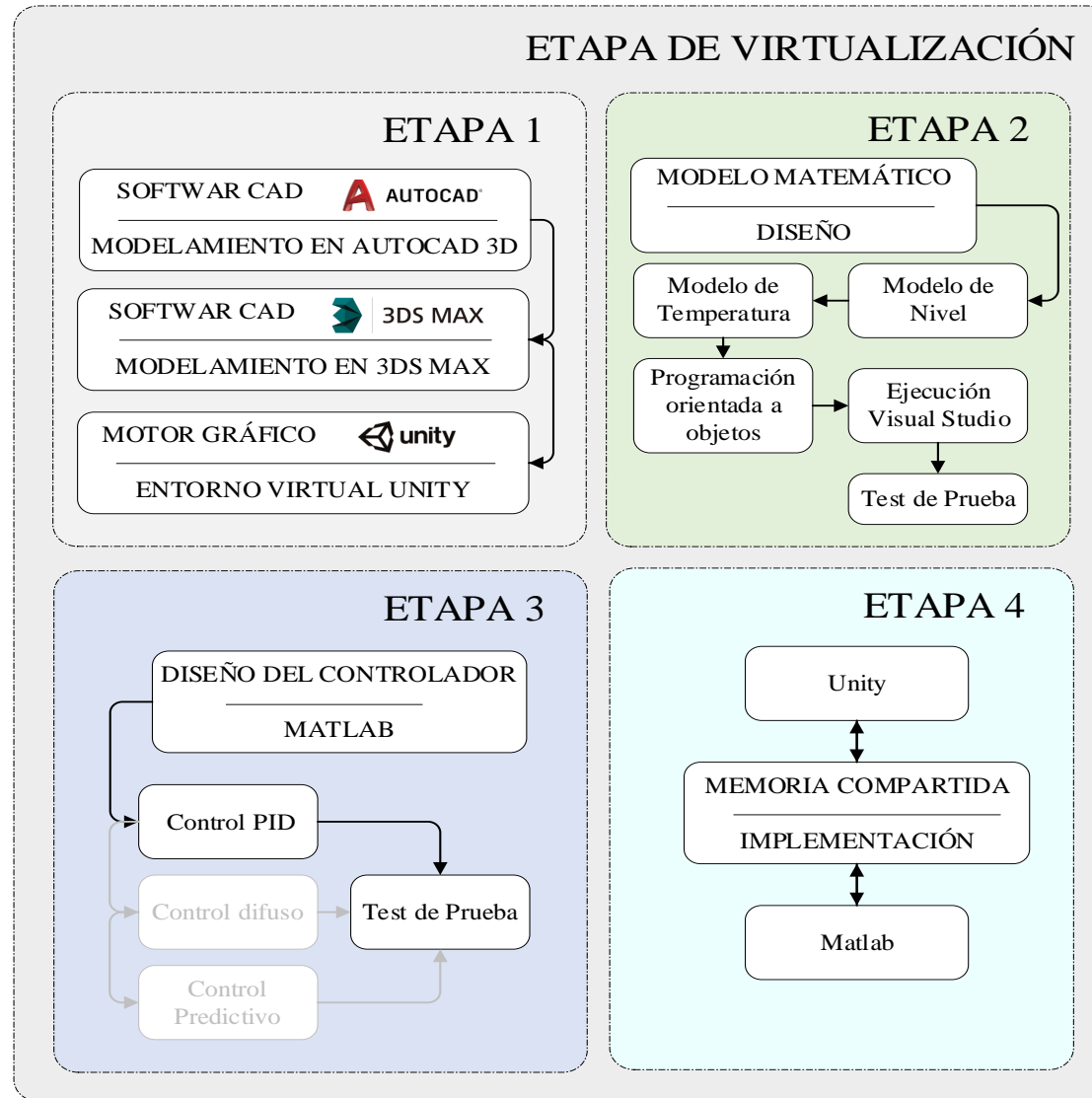
- Metodología de la Virtualización

FESTO

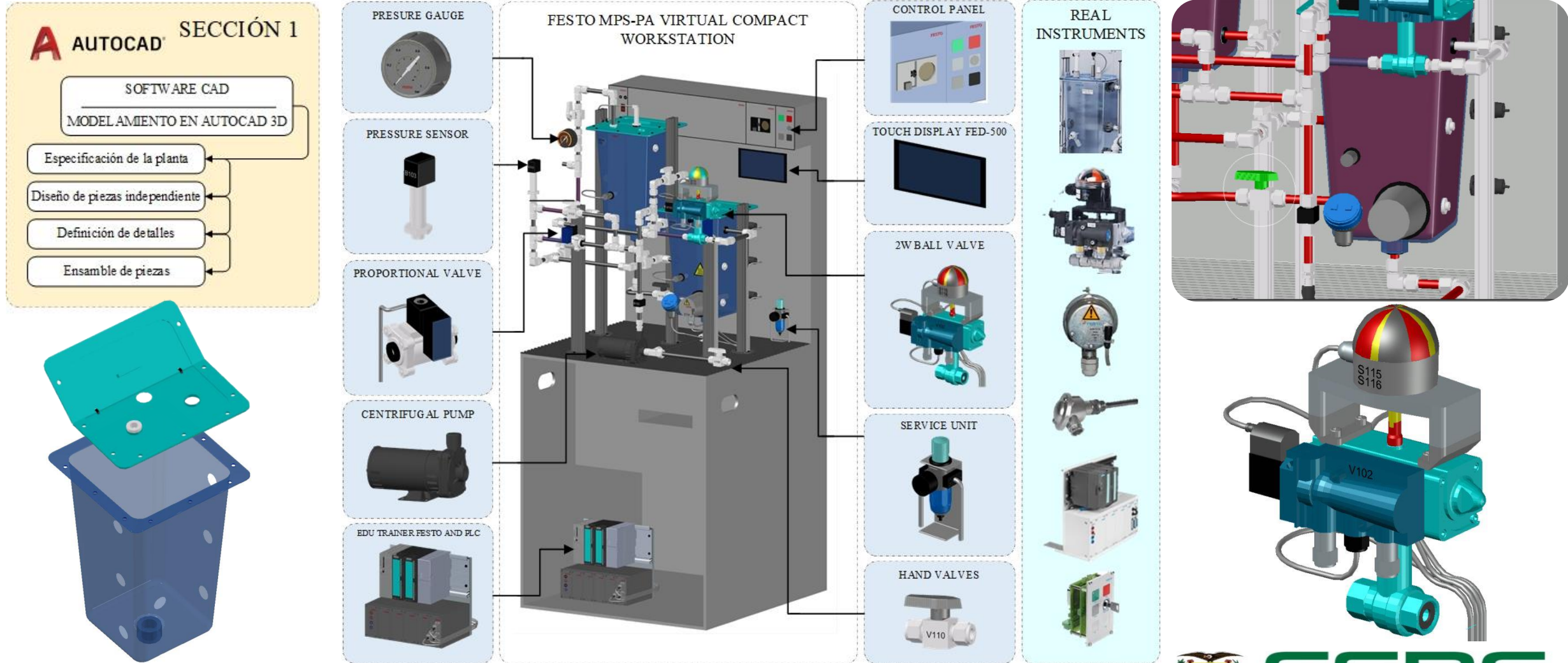




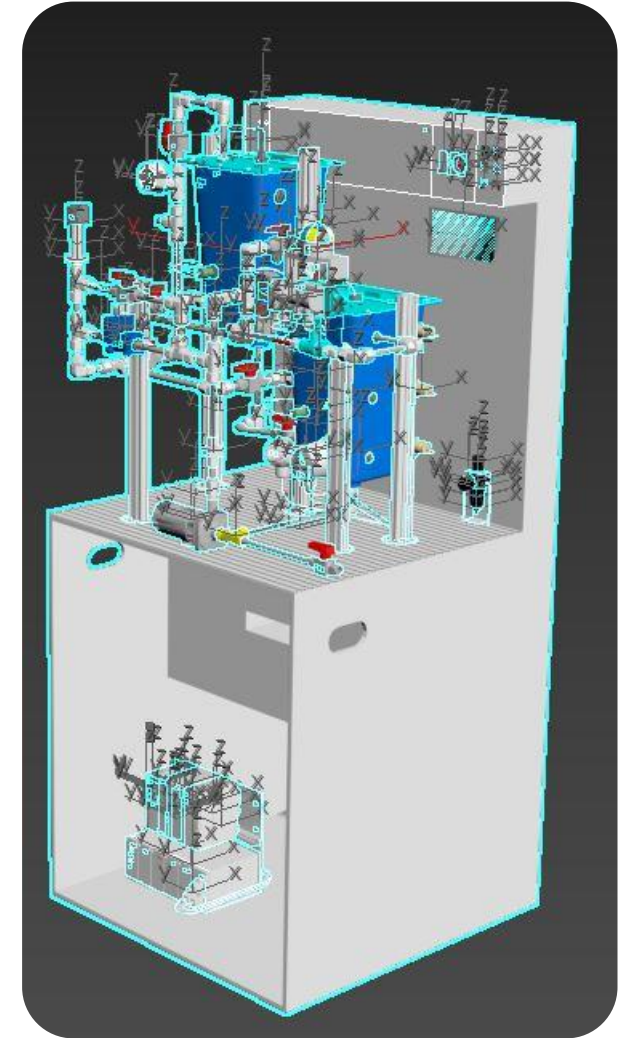
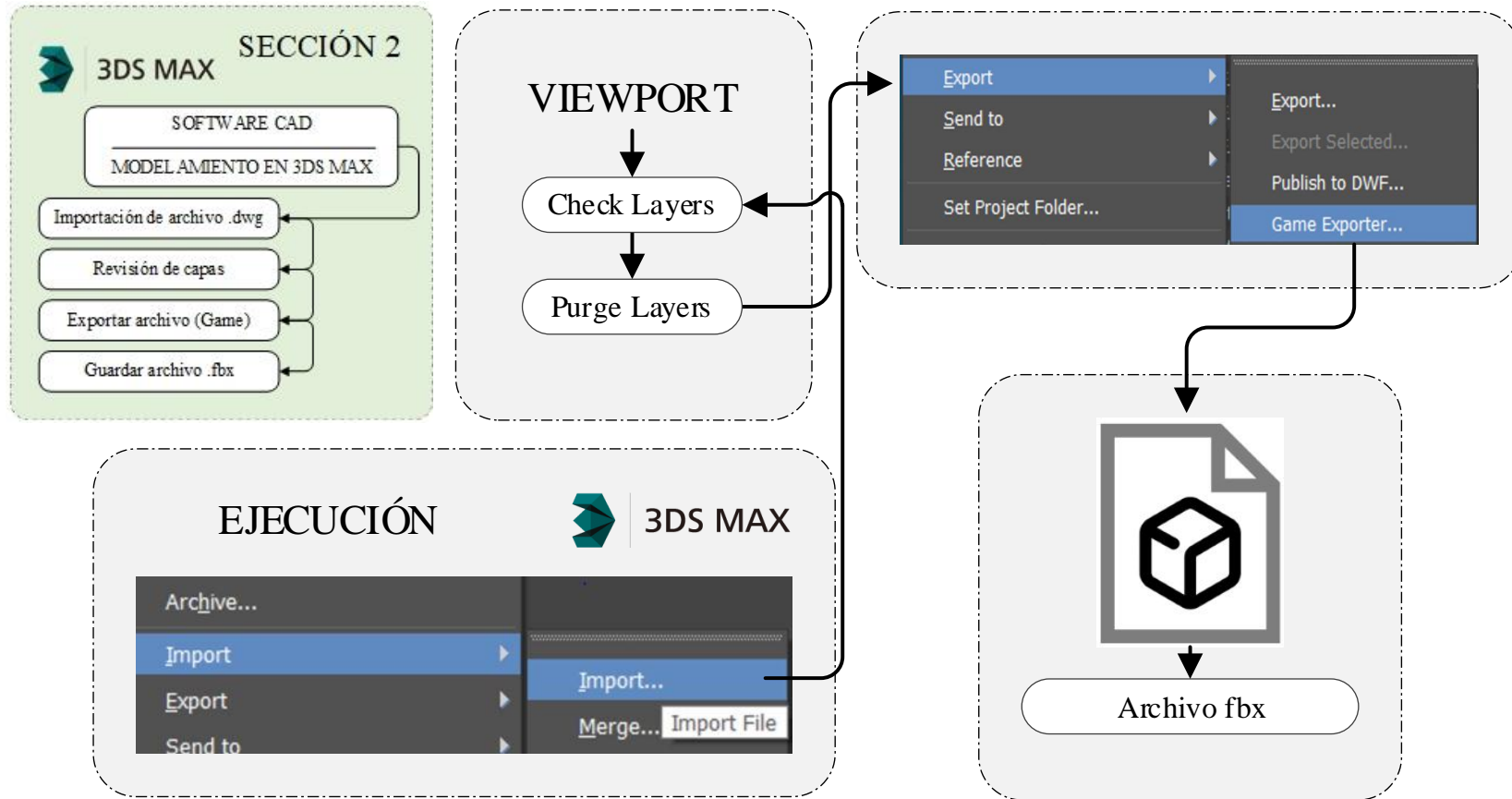
• **Propuesta**



# • Virtualización: Etapa 1



• **Virtualización: Etapa 1**



# • Virtualización: Etapa 1

 SECCIÓN 3

MOTOR GRÁFICO

ENTORNO VIRTUAL UNITY

Animación del modelo 3D

Animación de la escena

Implementación de modelo matemático

Test de Prueba

ANIMACIÓN DEL MODELO 3D

Importar Diseño CAD (.fbx)

Incluir texturas

Importar diseño de avatar (.fbx)

Importar sonidos y efectos

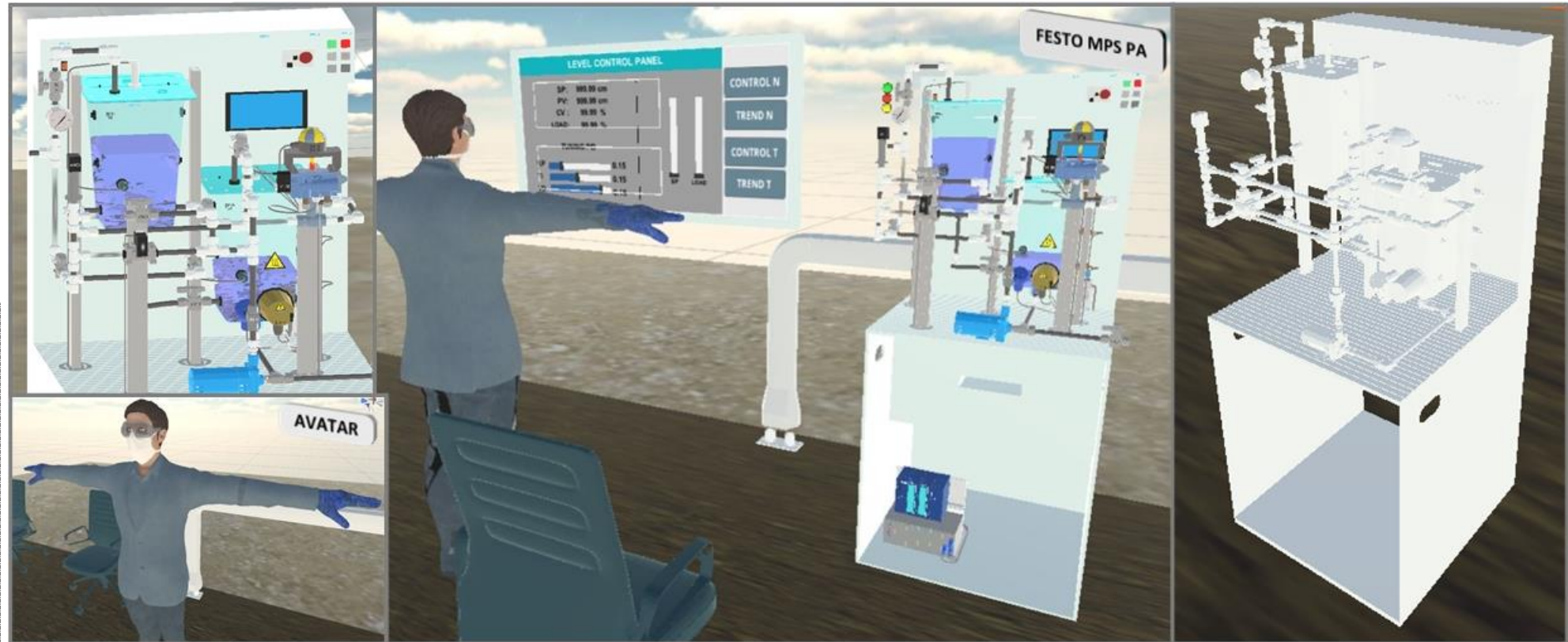
UI Canvas

ANIMACIÓN DE LA ESCENA

Incluir texturas y colores

Métodos de Interacción

Incluir camaras



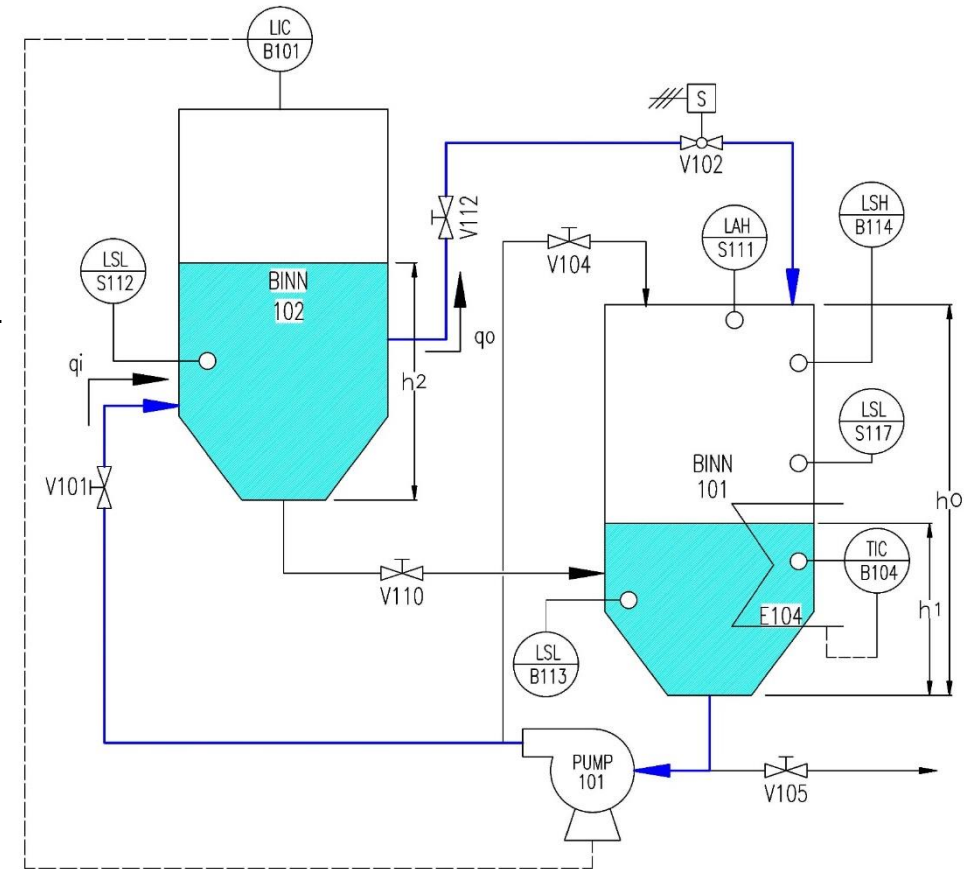
- **Modelo Matemático: Etapa 2**

- **NIVEL**

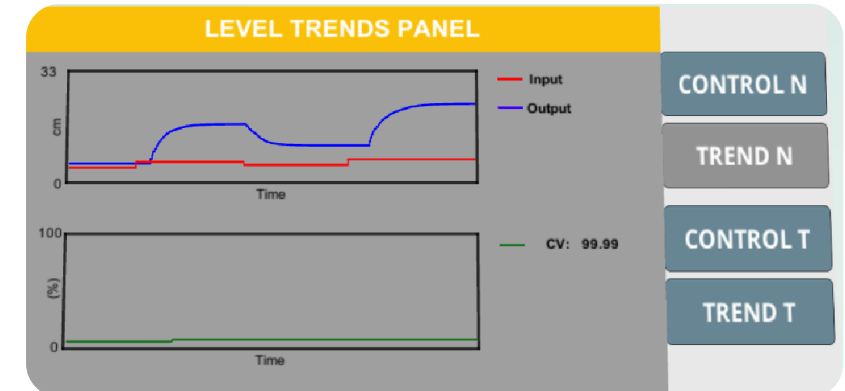
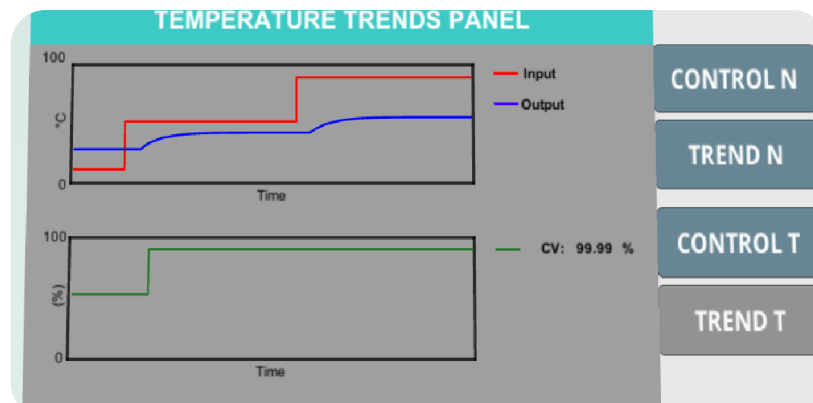
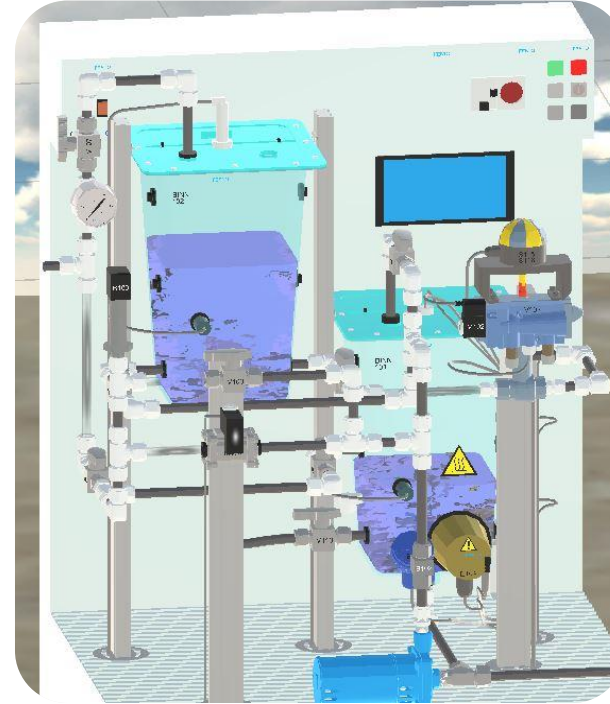
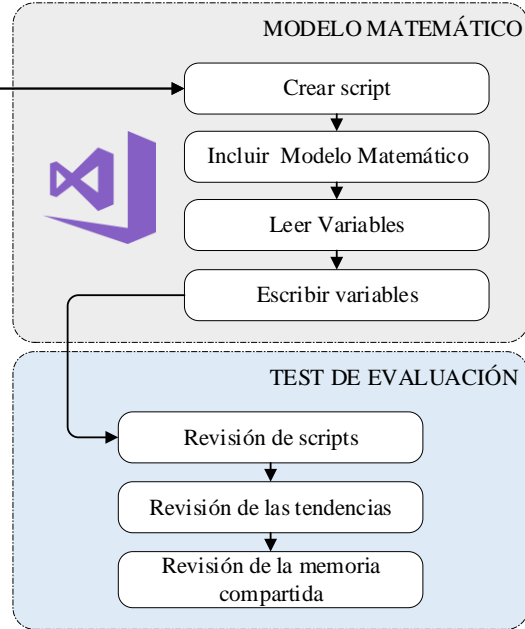
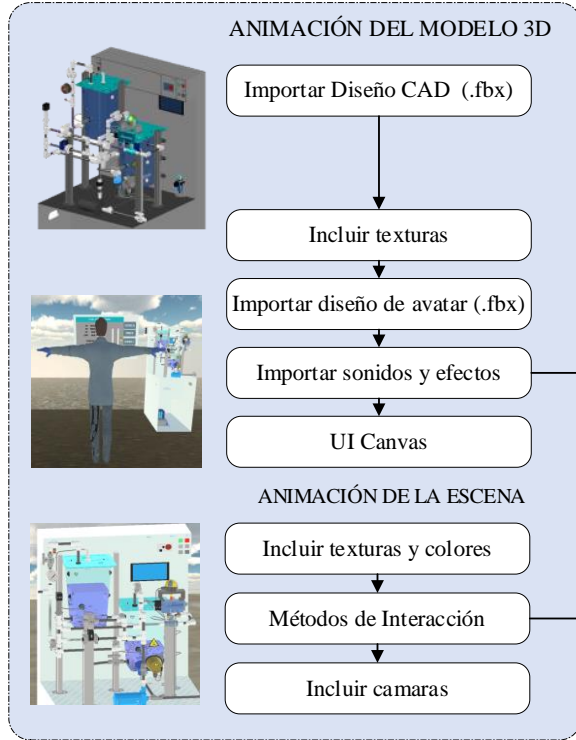
$$\dot{h}_2(t) = \frac{6.73 V - 0.28 h_2 + 1.43}{\left[ \left( \frac{W_T - W_B}{H} \right)^2 h_2^2(t) + 2W_B \left( \frac{W_T - W_B}{H} \right) h_2(t) + W_B^2 \right]} - \frac{R_1 \pi r^2 \sqrt{2g} \sqrt{2h_2 + Z_1 - h_0}}{\left[ \left( \frac{W_T - W_B}{H} \right)^2 h_2^2(t) + 2W_B \left( \frac{W_T - W_B}{H} \right) h_2(t) + W_B^2 \right]}$$

- **TEMPERATURA**

$$\rho V C_P \frac{dT_T}{dt} = q C_p [T_e(t) - T_T(t)] + Q(t)$$



# Virtualización: Etapa 2



• **Diseño de controlador: PID - Etapa 3**

El controlador PID para los dos procesos de la estación de trabajo Festo MPS® PA aplica el método de ajuste de ganancia Lambda  $\lambda$ . En este trabajo de investigación se utiliza el primer criterio  $\lambda = T$

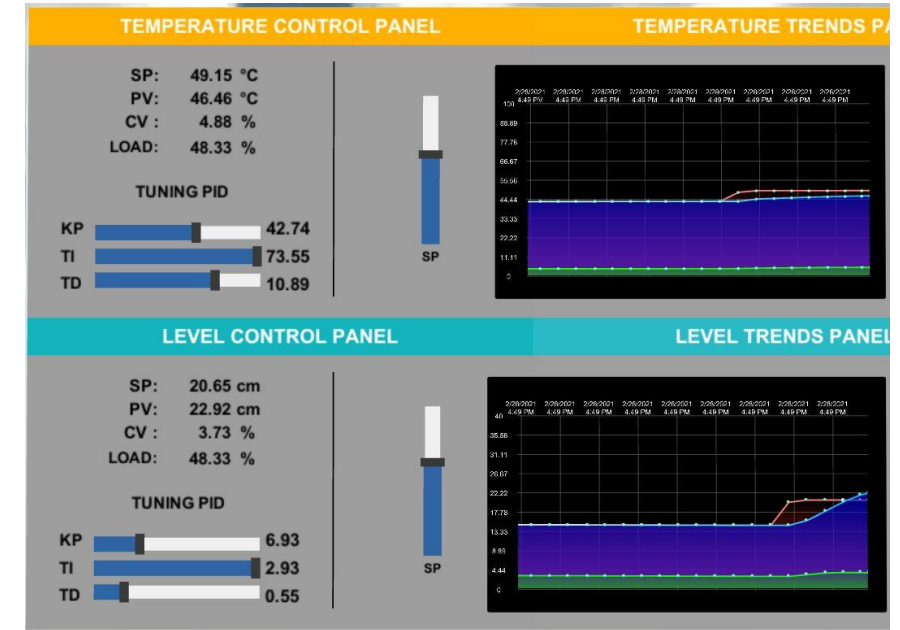
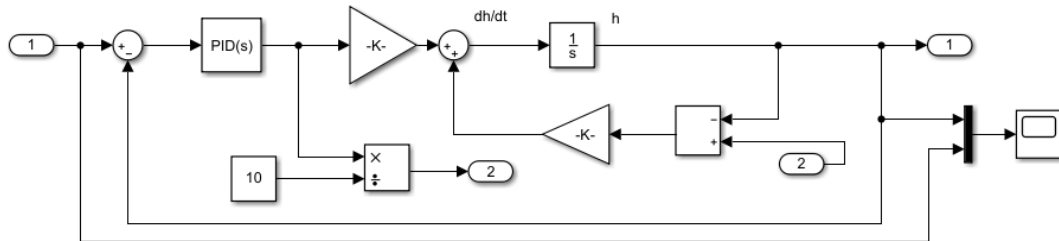
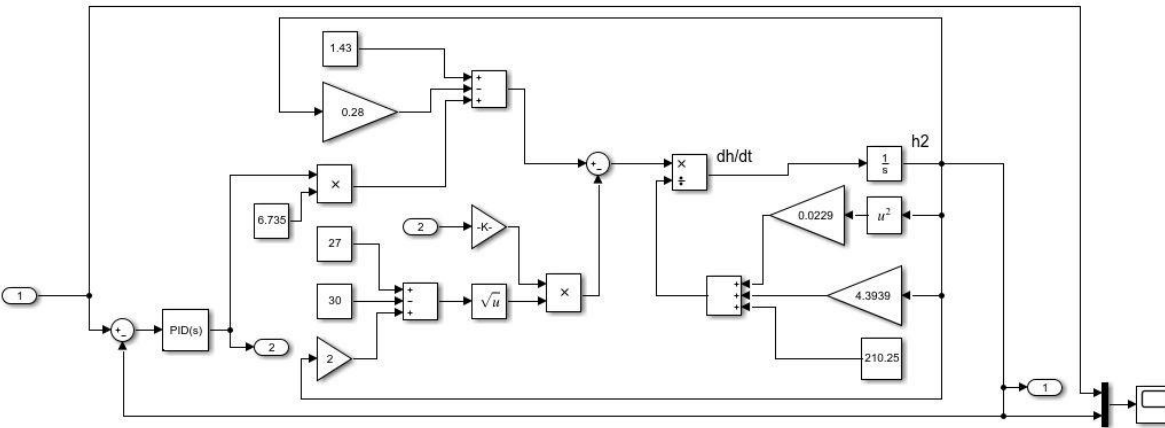
$$G(s) = \frac{K_P}{1 + T_S} e^{-\tau s}$$

$T$ : const. de tiempo  
 $\tau$ : tiempo muerto  
 $K_P$ : const. estática

$$K = \frac{1}{K_P} \times \frac{\tau}{\frac{\tau}{2} + T}$$

$$T_i = T + \frac{\tau}{2}$$

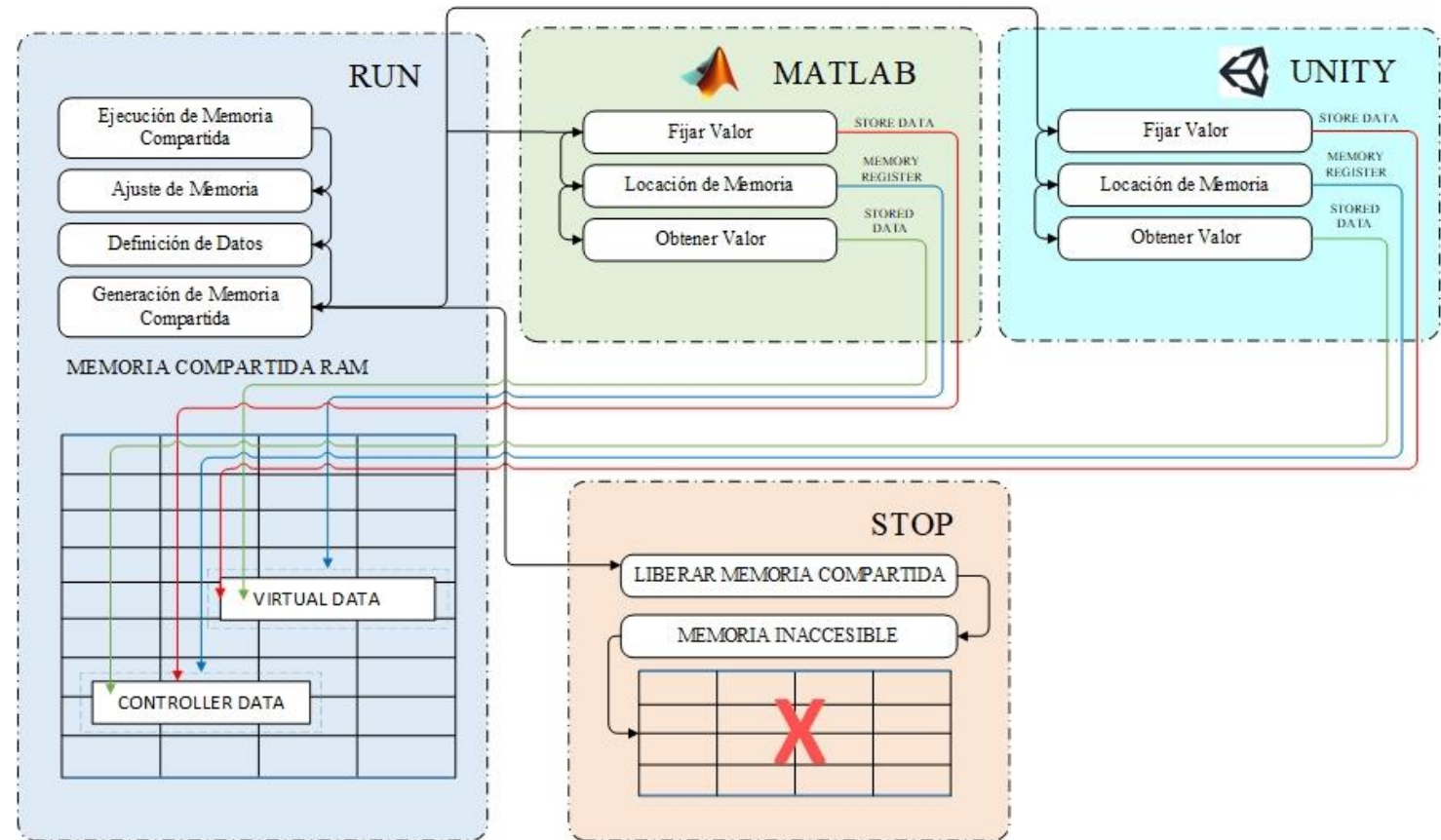
$$T_d = \frac{T * \tau}{\tau + 2T}$$



## • Etapa de comunicación: Etapa 4

La memoria compartida permite la transferencia de recursos a través de segmentos de memoria. Es posible crear 'n' número de memorias compartidas, con la opción de determinar el tamaño y tipo de datos.

Proporciona permisos para aplicaciones, etiqueta la memoria .espacio y libera espacio al detener la aplicación.







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

# DISEÑO Y VALIDACIÓN DE ESTRATEGIAS DE CONTROL BAJO UN ENFOQUE VIRTUAL, DE UN PROCESO MULTIVARIABLE

Segundo Artículo Científico:

**IEEE IFAC ICA - ACCA 2020**

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

## Advanced Controllers for Level and Temperature Process Applied to Virtual Festo MPS® PA Workstation

Juan D. Feijoo, Dario J. Chanchay, Jacqueline Llanos, D. Ortiz-Villalba

Marzo 22-26, 2021



## • Diseño de controladores: Fuzzy

Actúa o regula mediante reglas en un lenguaje más o menos natural, se generan 49 reglas de control con una estructura SI-Y-ENTONCES.

$$e(k) = SP - y(k)$$

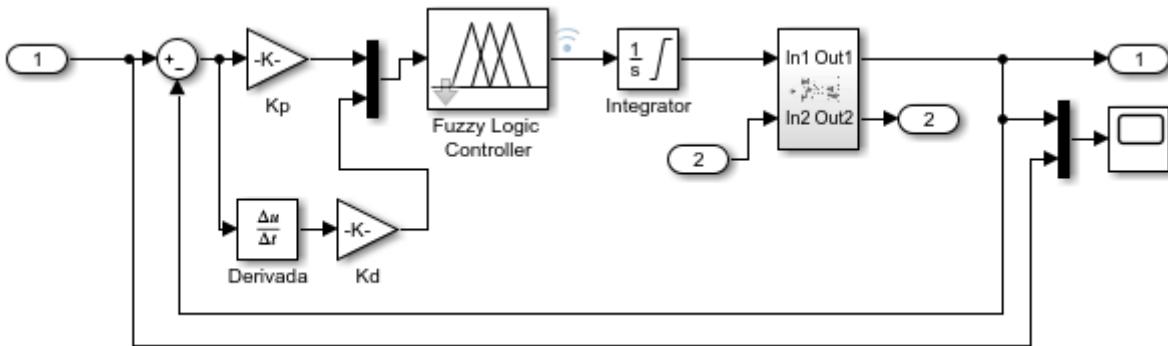
$$de(k) = e(k) - e(k-1)$$

$e(k)$ : error

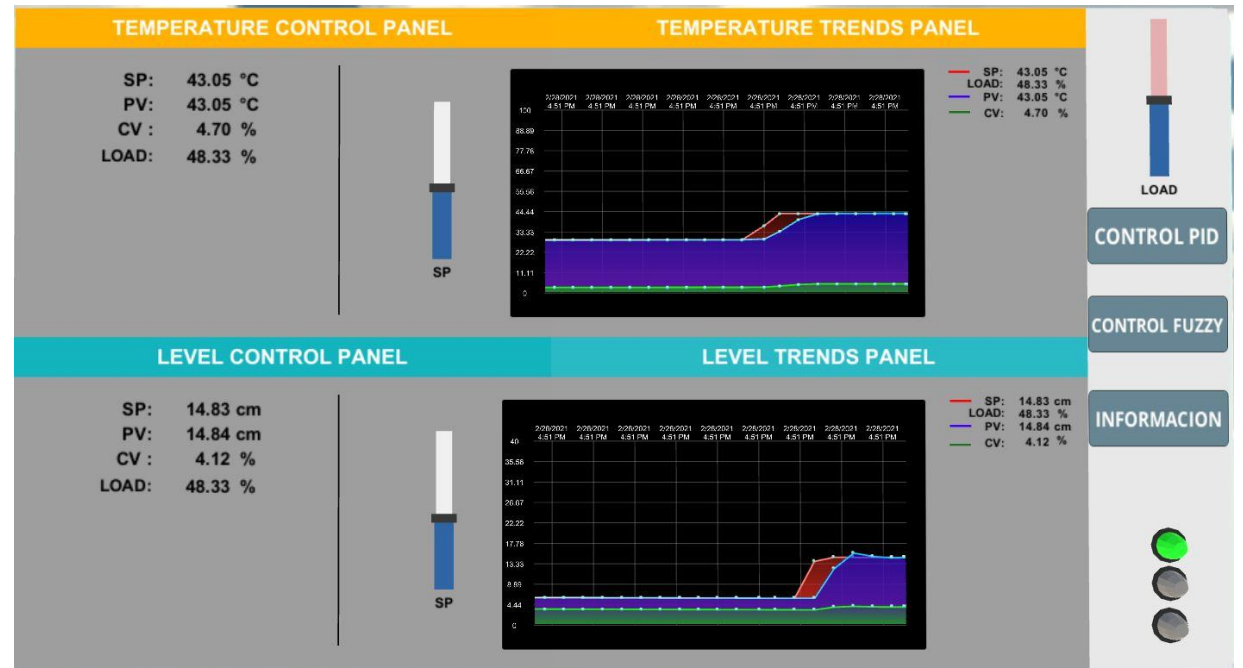
$SP$ : valor deseado

$y(k)$ : valor medido

$de(k)$ : tasa de cambio del error



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



## • Diseño de controladores: MPC

El control predictivo basado en modelo (Model Based Predictive Control – MBPC o simplemente MPC) es una metodología de control que hace uso del modelo del proceso para predecir las salidas futuras de la planta y con base en ello optimizar las acciones de control futuras.

***Función objetivo:***

$$\text{Min } J(u) = \sum_{j=1}^p \lambda_1 [\hat{y}(t+j|t) - w(t+j)]^2 + \sum_{j=1}^m \lambda_2 [\Delta u(t+j-1)]^2$$

$\hat{y}$ : salida del modelo de predicción

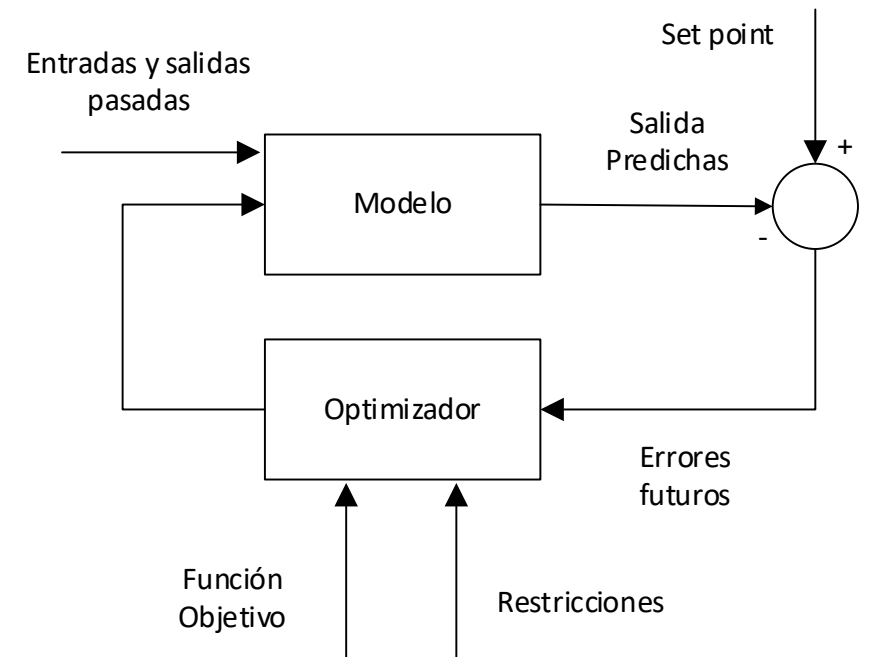
$w$  : vector de puntos de ajuste

$\Delta u$ : cambio mínimo en la acción de control

$\lambda_1, \lambda_2$ : pesos asociadas con los objetivos de control

$p$ : horizonte de predicción

$m$ : horizonte de control



- **Diseño de controladores: MPC**

Variable	$p$	$m$	$\lambda_1$	$\lambda_2$	$u_{min}$	$u_{max}$	$y_{min}$	$y_{max}$
Nivel	15	2	0.5	0.5	0 [v]	10 [v]	0 [cm]	30 [cm]
Temperatura	300	20	0.5	0.5	0 [w]	1000 [w]	25 [°C]	65 [°C]

**Restricciones:**

$y_{min} \leq y \leq y_{max}$  : restricción de la variable de salida o variable controlada.

$u_{min} \leq u \leq u_{max}$  : restricción de la acción de control.

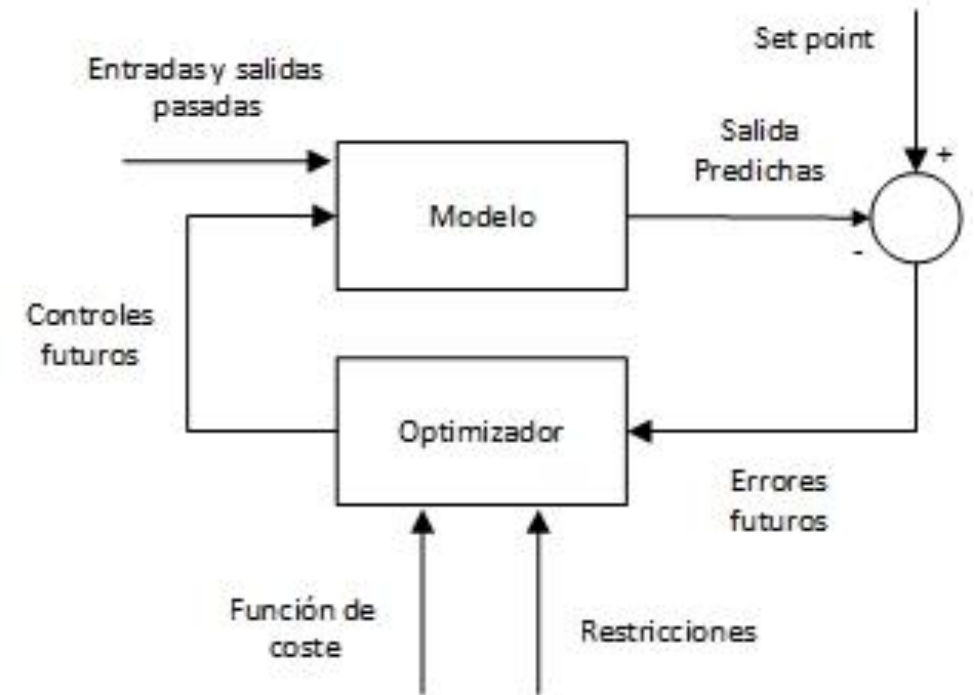
**Modelo de predicción en espacio de estados:**

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

A: matriz de estado

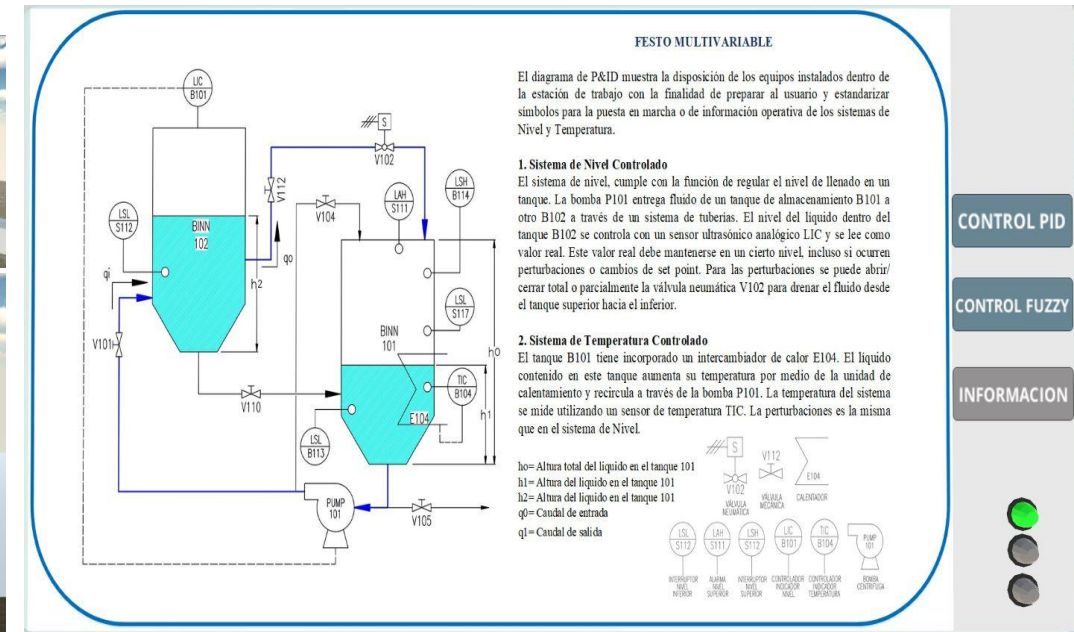
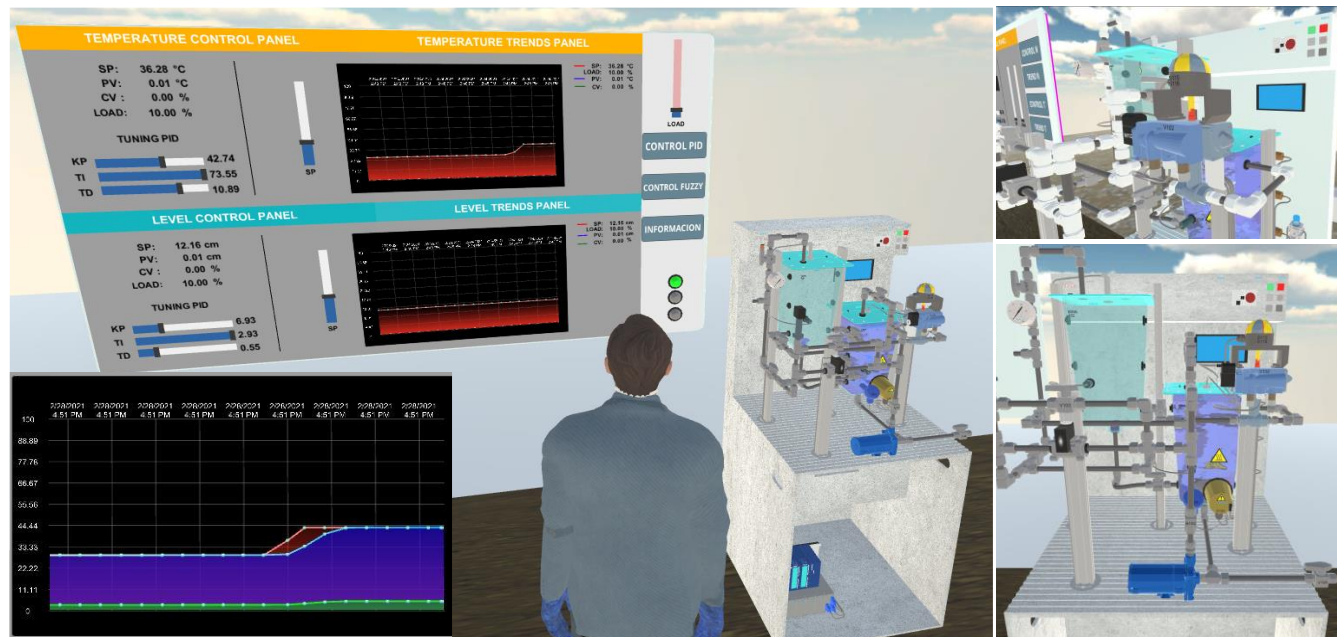
B: matriz de entrada

C: matriz de salida

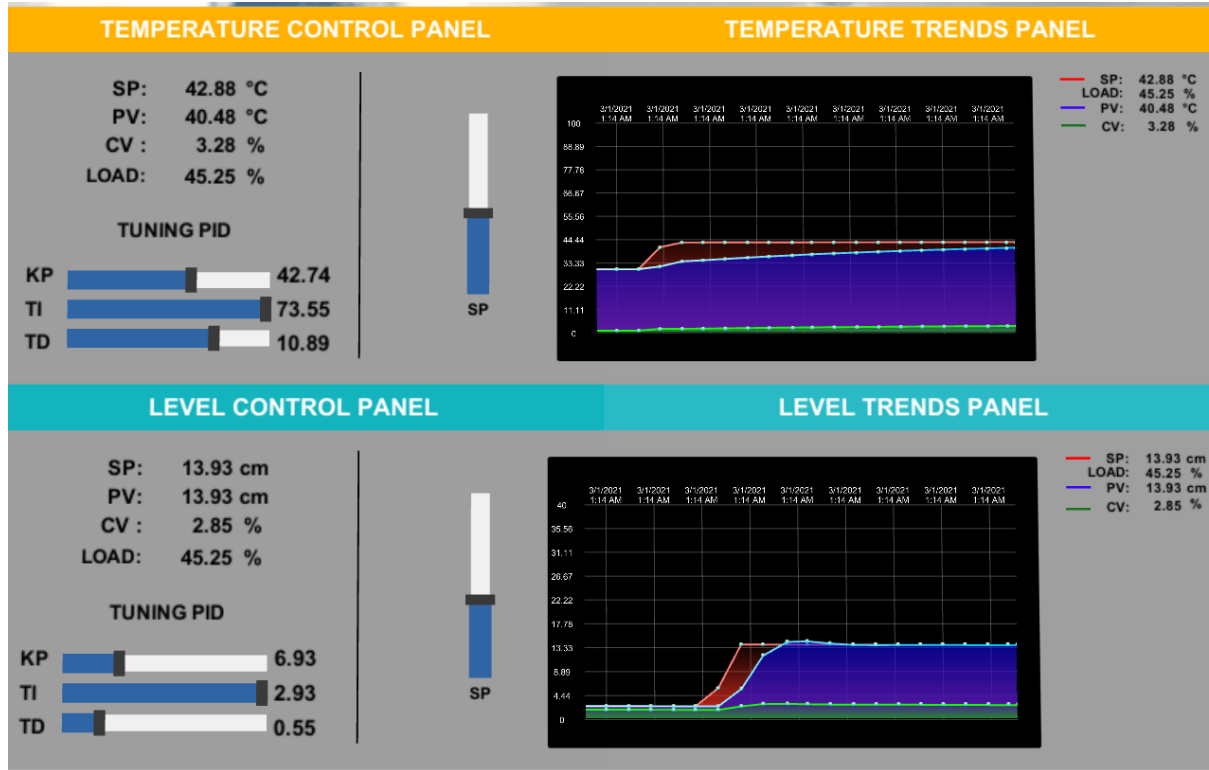


## Resultados

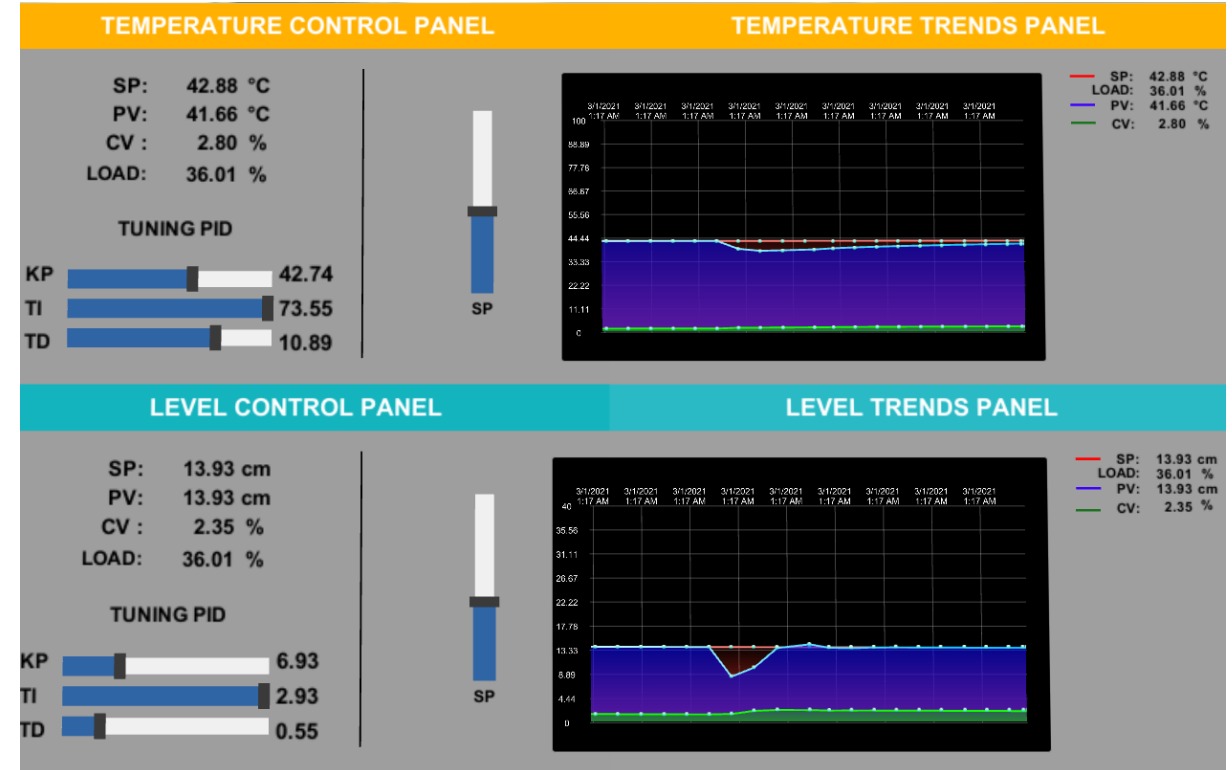
- Funcionalidad de la planta virtual Festo MPS® PA .
- Las respuestas se analizan a lo largo del tiempo, a través de una pantalla principal (HMI) que contiene información sobre el proceso de nivel y temperatura. Las tendencias de las señales de entrada y salida son las principales características para establecer resultados dentro de los sistemas de control en base a las decisiones del operador.



## Resultados



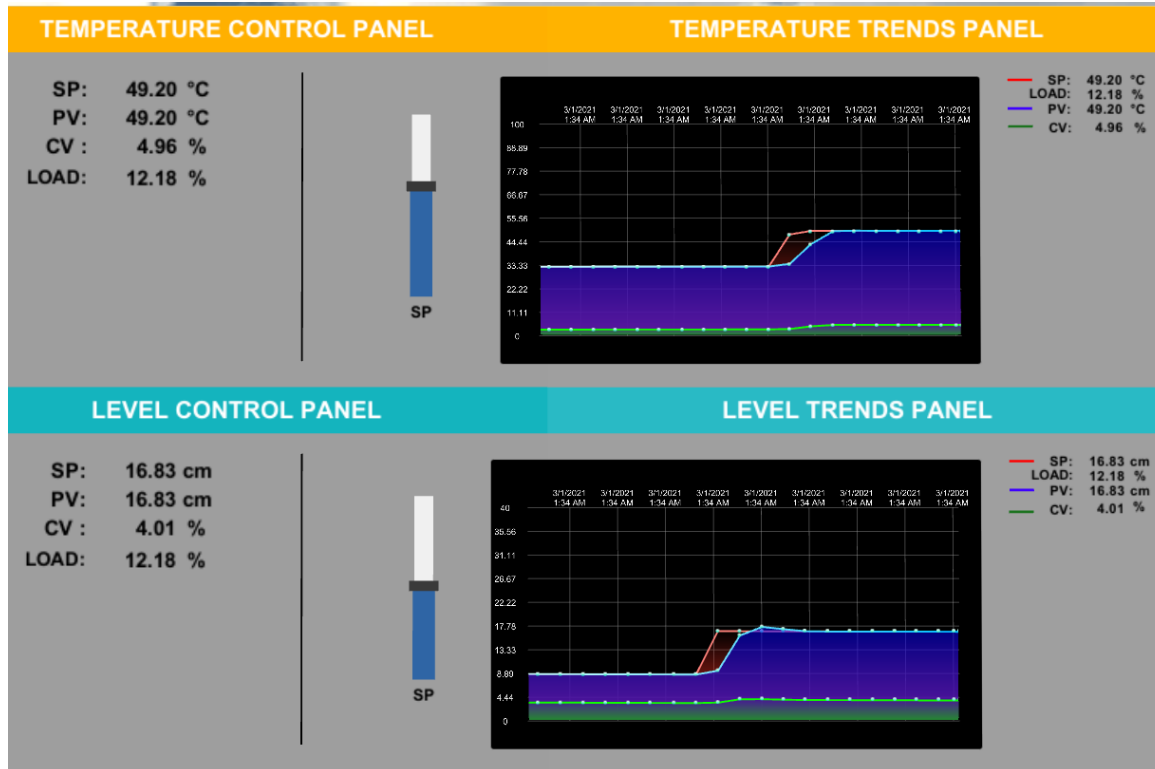
Respuesta del sistema de lazo cerrado con controlador PID:  
 a) Proceso de temperatura, b) Proceso de nivel.



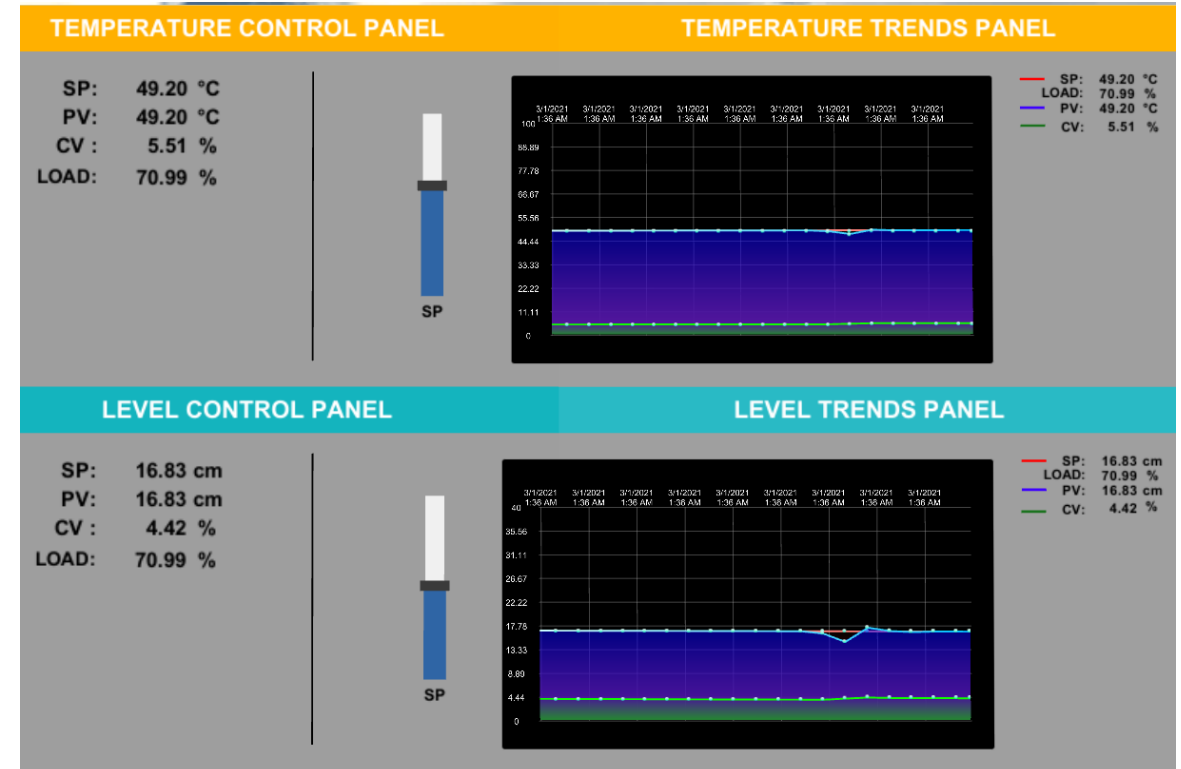
Respuesta del sistema de lazo cerrado con controlador PID  
 con perturbaciones: a) Proceso de temperatura, b) Proceso  
 de nivel.



## Resultados



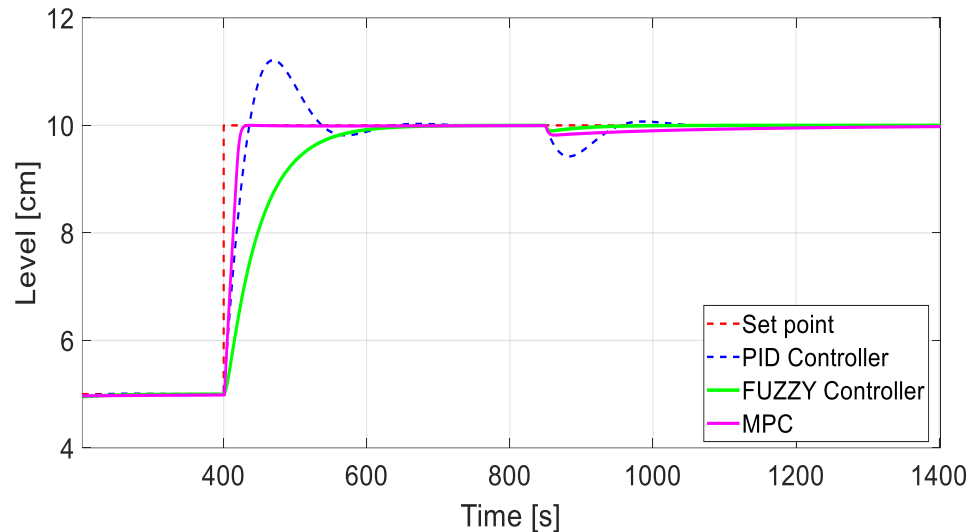
Respuesta del sistema de lazo cerrado con controlador Fuzzy: a) Proceso de temperatura, b) Proceso de nivel.



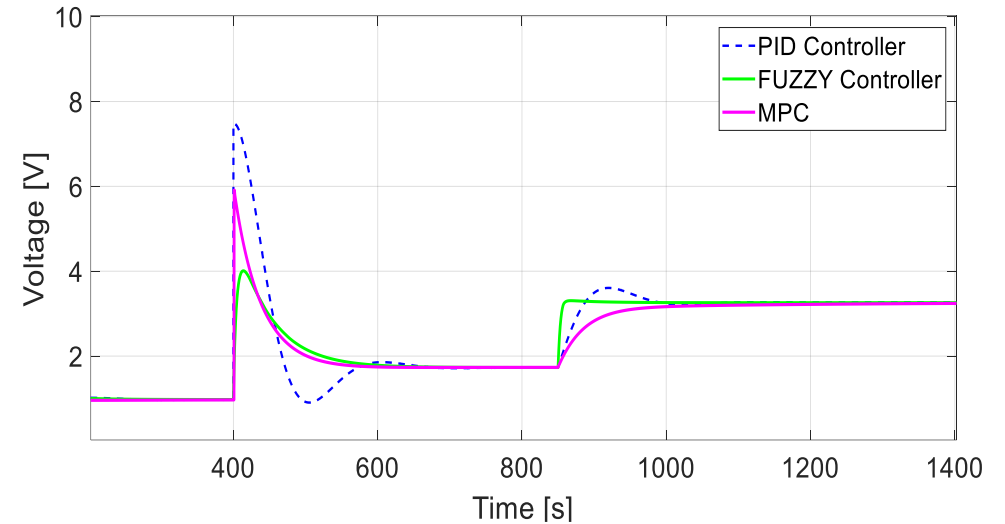
Respuesta del sistema de lazo cerrado con controlador Fuzzy con perturbaciones: a) Proceso de temperatura, b) Proceso de nivel.



## • Resultados



Comparación entre controladores (PID, Fuzzy, MPC) para el control de nivel.



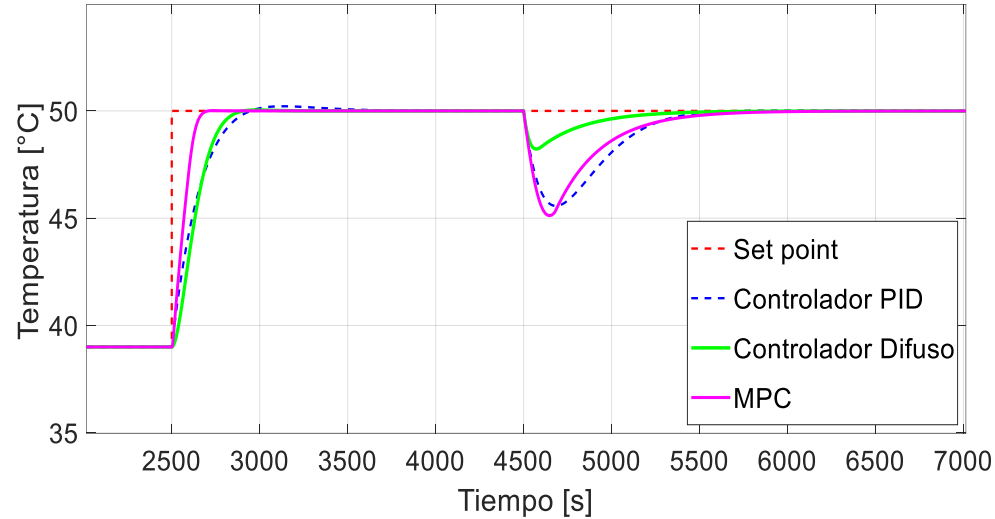
Comparación entre los tres controladores (PID, Fuzzy, MPC) considerando el voltaje en la bomba para la variable de nivel.

Parámetros	PID	Fuzzy	MPC
Sobreimpulso	17.7%	0%	0%
Tiempo de establecimiento	212.2 s	199.2 s	41.8 s
Error en estado estacionario	$4 \times 10^{-16}$ cm	$2 \times 10^{-16}$ cm	$4.4 \times 10^{-4}$ cm

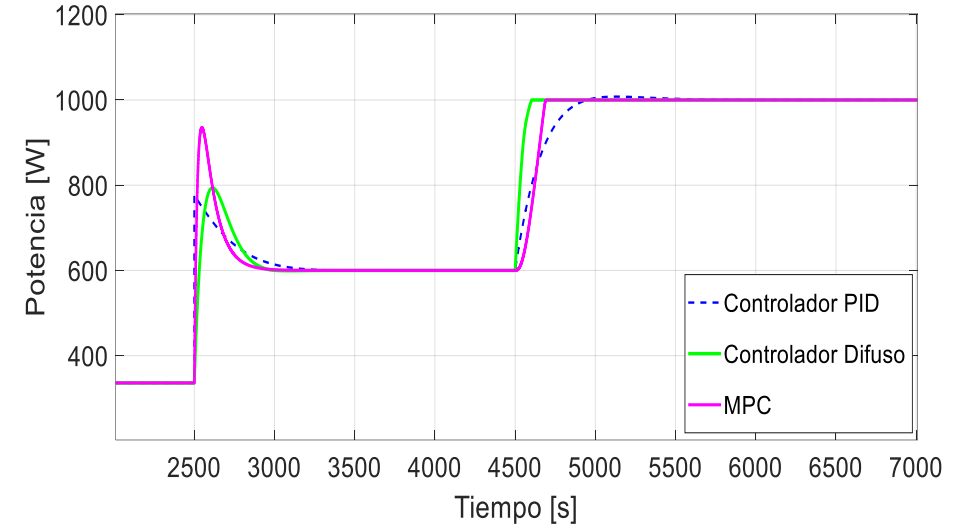
Parámetros de rendimiento del controlador para la variable de nivel



## • Resultados



Comparación entre controladores (PID, Fuzzy, MPC) para el control de temperatura.



Comparación entre los tres controladores (PID, Fuzzy, MPC) considerando la potencia del calentador para la variable de temperatura.

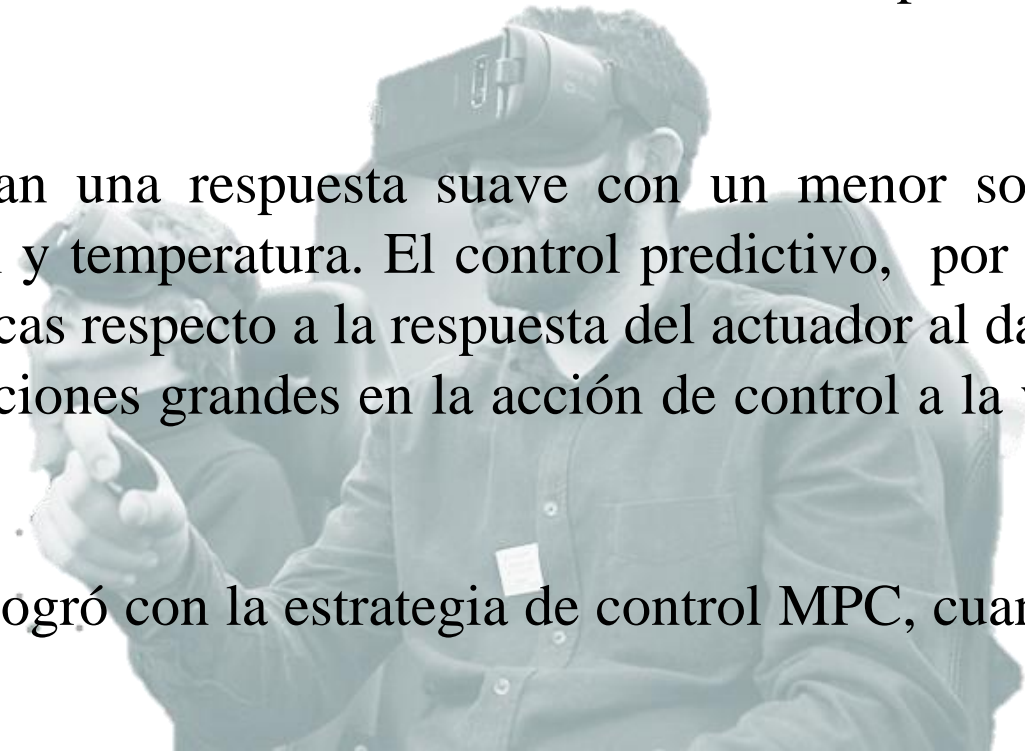
Parámetros	PID	Fuzzy	MPC
Sobreimpulso	0.9820%	0.1777%	0.0872%
Tiempo de establecimiento	903.2475 s	807.5890 s	585.3114 s
Error en estado estacionario	11e-12 °C	11e-12 °C	14e-15 °C

Parámetros de rendimiento del controlador para la variable de temperatura



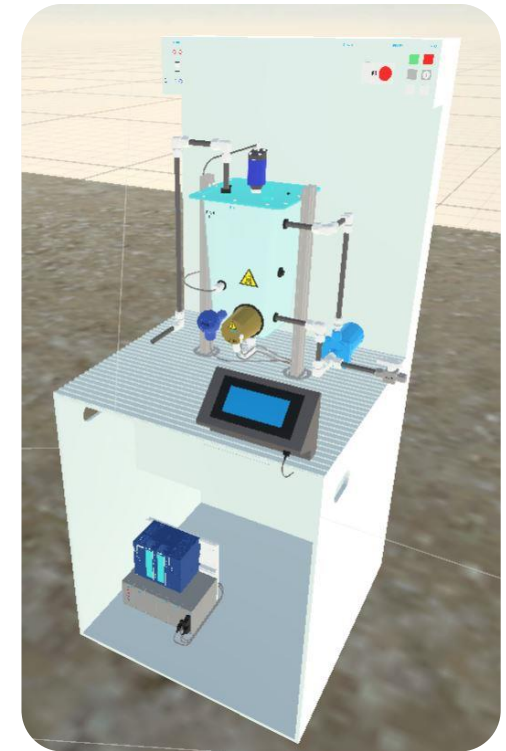
## • Conclusiones

- La investigación desarrollada tiene dos aportes; el primero, orientado al diseño de controladores avanzados para procesos multivariables y el segundo orientado a la virtualización de procesos industriales.
- Los controladores avanzados Fuzzy y MPC muestran una respuesta suave con un menor sobre impulso en las variables de control del procesos nivel y temperatura. El control predictivo, por sus características de diseño puede mejorar las características respecto a la respuesta del actuador al darle mayor peso al objetivo de control que minimiza variaciones grandes en la acción de control a la vez que reduce el error de estado estable.
- Los resultados mostraron que el mejor desempeño se logró con la estrategia de control MPC, cuando se sometió a cambios de referencia y perturbaciones.



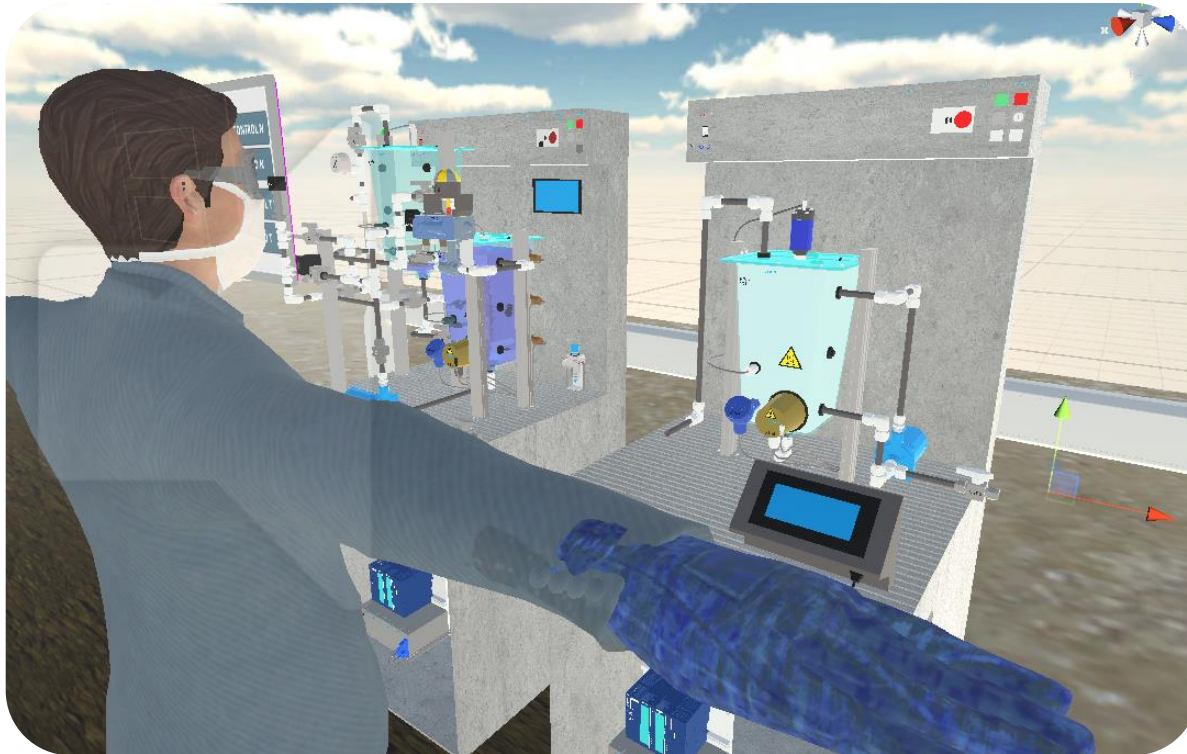
## • Conclusiones

- Los resultados obtenidos de los controladores en la estación virtual son similares a los de la estación real. Aplicando la metodología de virtualización propuesta, se diseñó una estación con alta similitud a la estación real.
- La estación de trabajo virtual no debe entenderse como un sustituto de una estación de trabajo real, sin embargo, la planta virtual es capaz de recrear el comportamiento dinámico de la estación de trabajo real.
- La investigación desarrollada también aportó dentro del proyecto: Tecnologías Inmersivas Multi-Usuario Orientadas a Sistemas Sinérgicos de Enseñanza-Aprendizaje, incluyendo además la virtualización y control de un reactor (Festo).



### • Trabajos Futuros

- Se propone como trabajo futuro incorporar características óptimas de funcionamiento de los actuadores, para obtener una mayor eficiencia.





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



## Advanced Controllers for Level and Temperature Process Applied to Virtual Festo MPS® PA Workstation

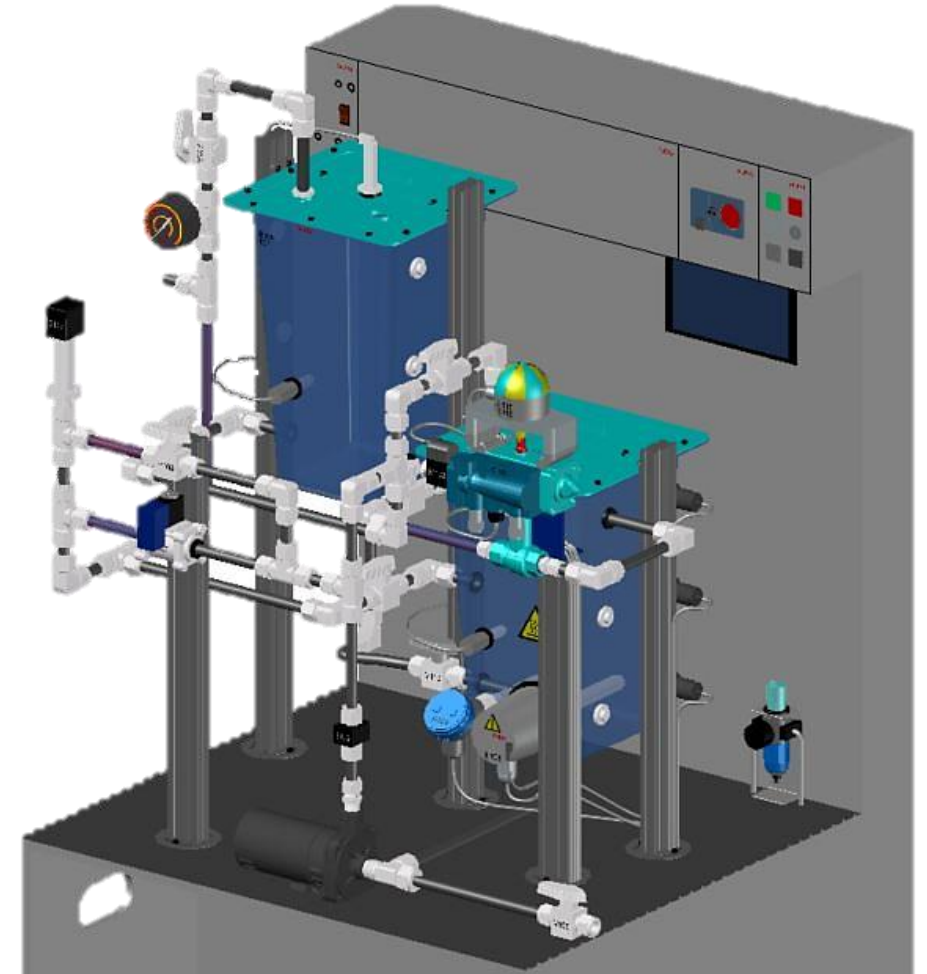
**Autores:** Sr. Juan Feijoo  
Sr. Darío Chanchay

**Director:** Dr. Jaqueline Llanos

**Co-Director:** Dr. Diego Ortiz

{djchanchay, jdfeijoo, jdllanos1, ddortiz5}@espe.edu.ec

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE



- **ANEXOS**

**GUIA DE PRACTICA DE LABORATORIO DE PLANTA VIRTUAL DE PROCESOS MULTIVARIABLES  
FFESTO MPS® PA**

**PRACTICA Nª 1: DISEÑO DE CONTROLADORES**

<b>Datos Generales.</b>	
<b>Nombres:</b>	<b>Apellidos:</b>
<b>ID:</b>	<b>Carrera:</b>
<b>Docente:</b>	
<b>Fecha:</b>	<b>Hora:</b>
<b>Materiales:</b>	
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Computador: Core i-7, 16RAM</b></li><li>• <b>Matlab</b></li></ul>	