



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

1

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN  
MENCIÓN REDES INDUSTRIALES**

**TEMA:**

**ENTORNO VIRTUAL 3D DE UNA PLANTA DE NIVEL, MEDIANTE LA TÉCNICA HARDWARE  
IN THE LOOP, PARA EL CONTROL AVANZADO DE PROCESOS**

**AUTORA: ALPÚSIG CUICHÁN, SILVIA EMPERATRIZ**

**LATACUNGA AGOSTO 19, 2021**



# AGENDA

2

Antecedentes – Planteamiento del Problema

Objetivos

Hipótesis

Introducción

Arquitectura del entorno virtual 3D

Esquema de la planta industrial

Estructura del control en cascada

Diseño de la aplicación

Resultados

Comprobación de la Hipótesis

Conclusiones y Recomendaciones



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

- El diseño de aplicaciones de realidad virtual han permitido el desarrollo de prototipos virtuales que permiten tener una idea clara del funcionamiento real de cualquier entorno, se aprovecha las bondades que ofrecen los simuladores virtuales, para integrar dispositivos de diferentes marcas y licencias patentadas que encarecen los modelos comerciales de procesos industriales, desarrollando simuladores de bajo costo.
- La técnica de simulación de Hardware-In-the-Loop (HIL) proporciona plataformas eficaces para el ensayo de hardware y software, esta técnica se utiliza para el desarrollo y pruebas de control en el funcionamiento de máquinas y sistemas complejos en tiempo real, con la simulación HIL la parte física de una máquina o sistema es reemplazada por una simulación

# Planteamiento del Problema

- Actualmente los procesos ya no simplemente están basados en sistemas de control tradicionales, si no que por su complejidad y la aplicación de nuevas tecnologías se han empleado nuevas estrategias de control, que requieren de personal capacitado para su implementación y operación, el aprendizaje y entrenamiento en sistemas de control avanzado de procesos; permite el desarrollo de destrezas técnicas en los estudiantes,
- Uno de los inconvenientes para la falta de capacitación del futuro profesional en control automático es que se requiere de laboratorios implementados con estaciones y equipos que cuenten con las facilidades para implementar controles avanzados de procesos (Control en cascada).
- Las estaciones didácticas tienen un costo elevado en el mercado actual, es por esto que existe la necesidad de implementar nuevas herramientas en el proceso enseñanza – aprendizaje de control automático de procesos.



- Desarrollar un entorno virtual 3D de una planta de nivel, mediante la técnica Hardware-In-the-Loop, para el control avanzado de procesos.
  - Obtener los modelos matemáticos que representen la respuesta dinámica de un sistema de control de nivel (cascada).
  - Diseñar el entorno virtual 3D de la planta de nivel, mediante normas y estándares internacionales.
  - Implementar los algoritmos de control PI-PID, para el control en cascada mediante la técnica Hardware-In-the-Loop (HIL).
  - Validar el sistema virtual 3D del proceso de nivel mediante pruebas experimentales.

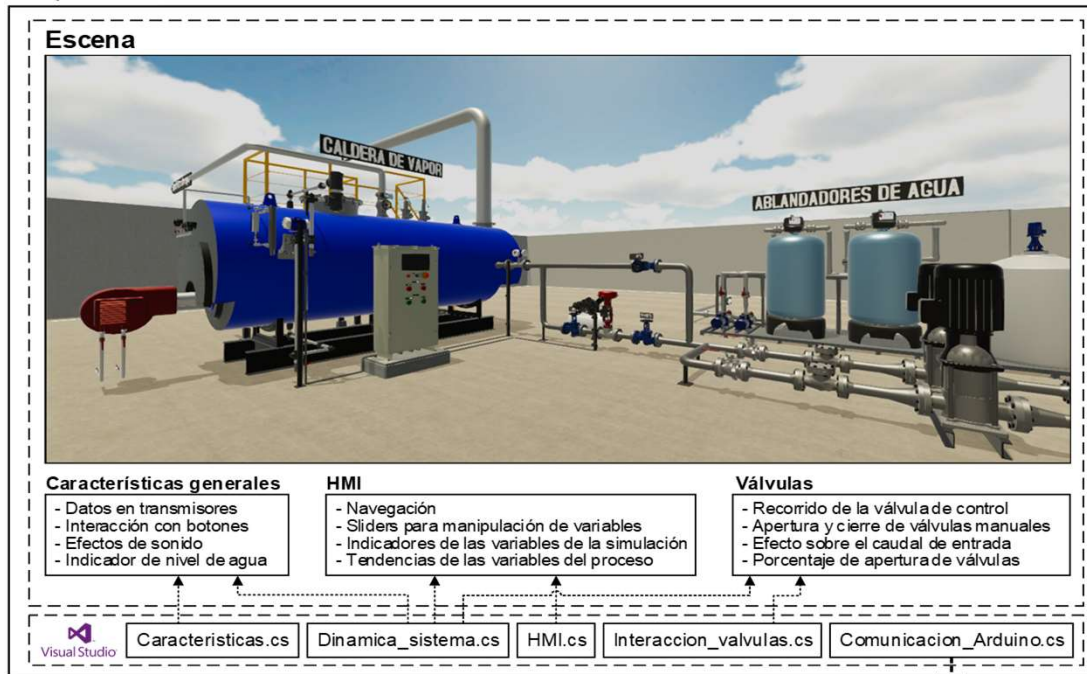


- El desarrollo de entornos en realidad virtual con técnicas de simulación HIL proporcionará un sistema de bajo costo para el proceso enseñanza – aprendizaje de control en cascada de la variable Nivel.



- El proyecto expone el diseño de un entorno de simulación virtual 3D didáctico en tiempo real de un proceso de nivel, mediante la técnica Hardware in the Loop (HIL), el entorno permite implementar un control avanzado de procesos para lo que se ha considerado la estrategia de control en cascada, y la interacción del hardware y software mediante un controlador de bajo costo.

# Arquitectura del entorno virtual 3D





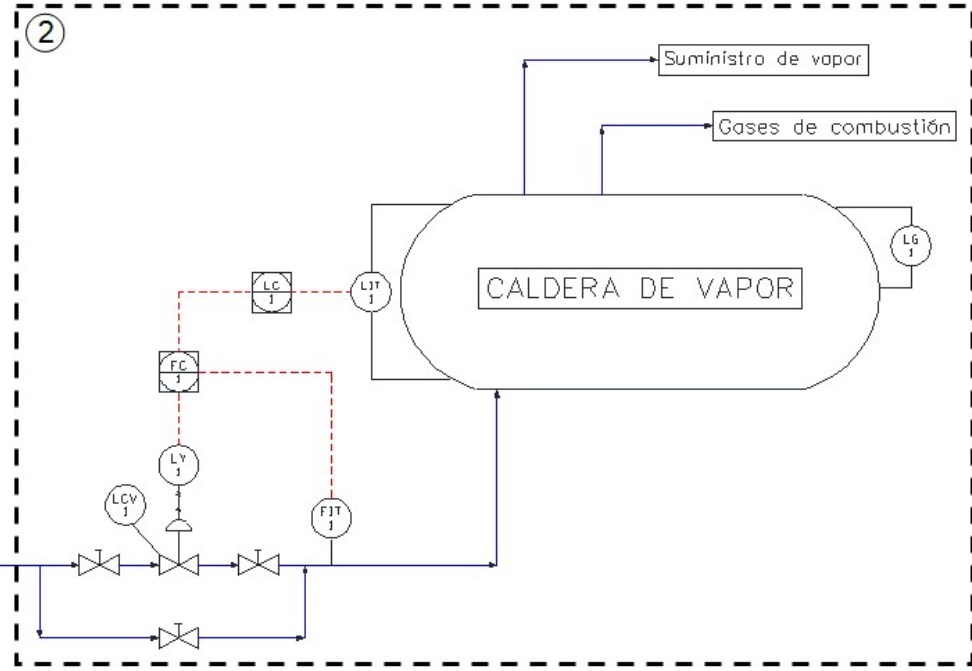
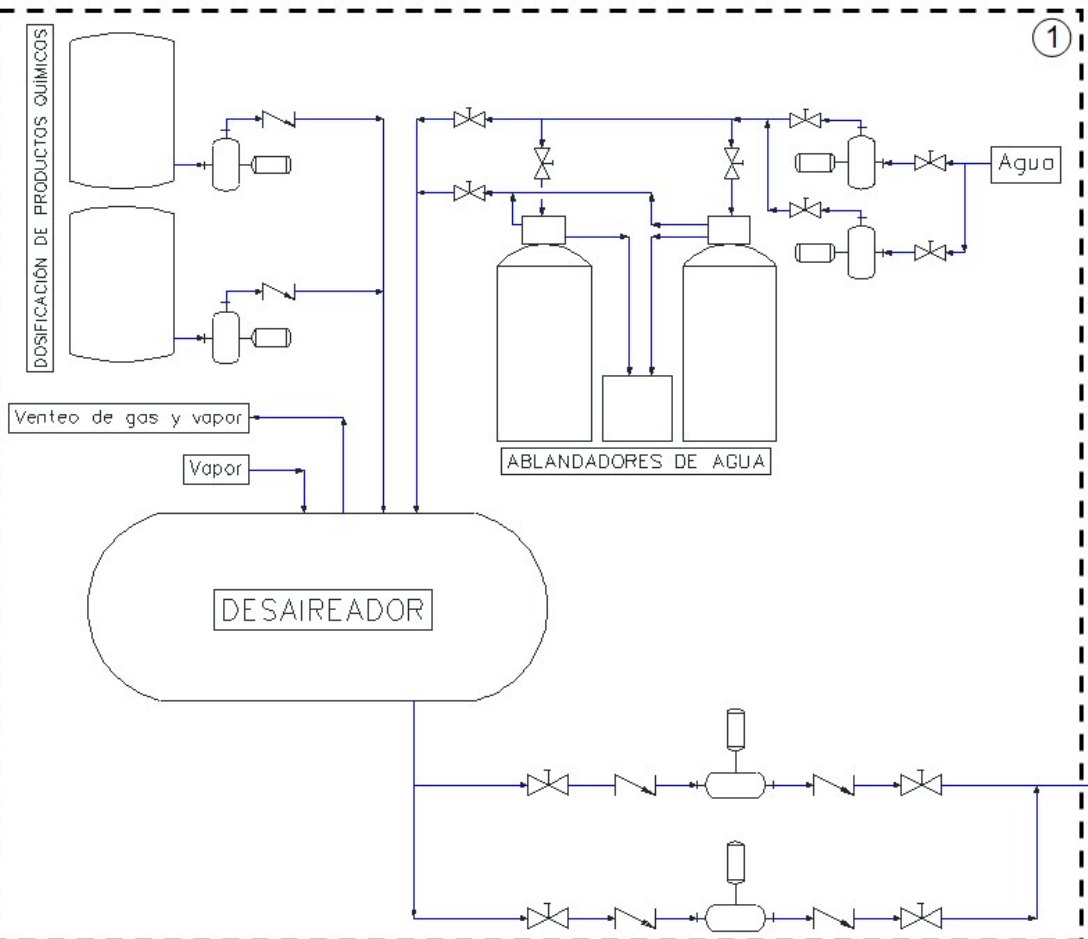
# Esquema de la planta Industrial

9

- El proceso seleccionado para su virtualización es un sistema de control de nivel del agua de alimentación de una caldera de vapor.
- El sistema propuesto consta de 2 etapas:
  - Tratamiento del agua de alimentación (1)
  - Generación de vapor a través de una caldera (2).



# Esquema de la planta industrial



# Componentes del sistema

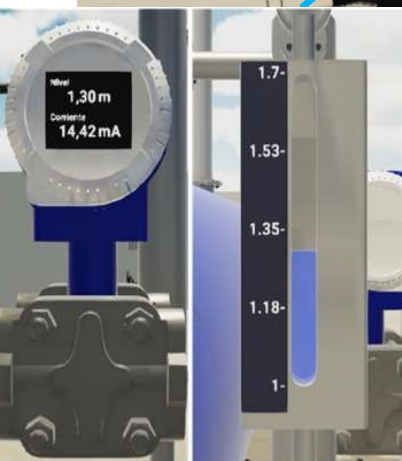
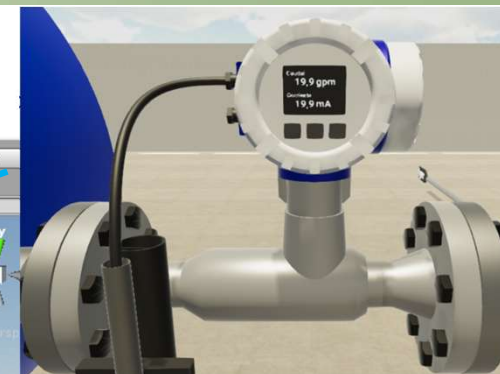
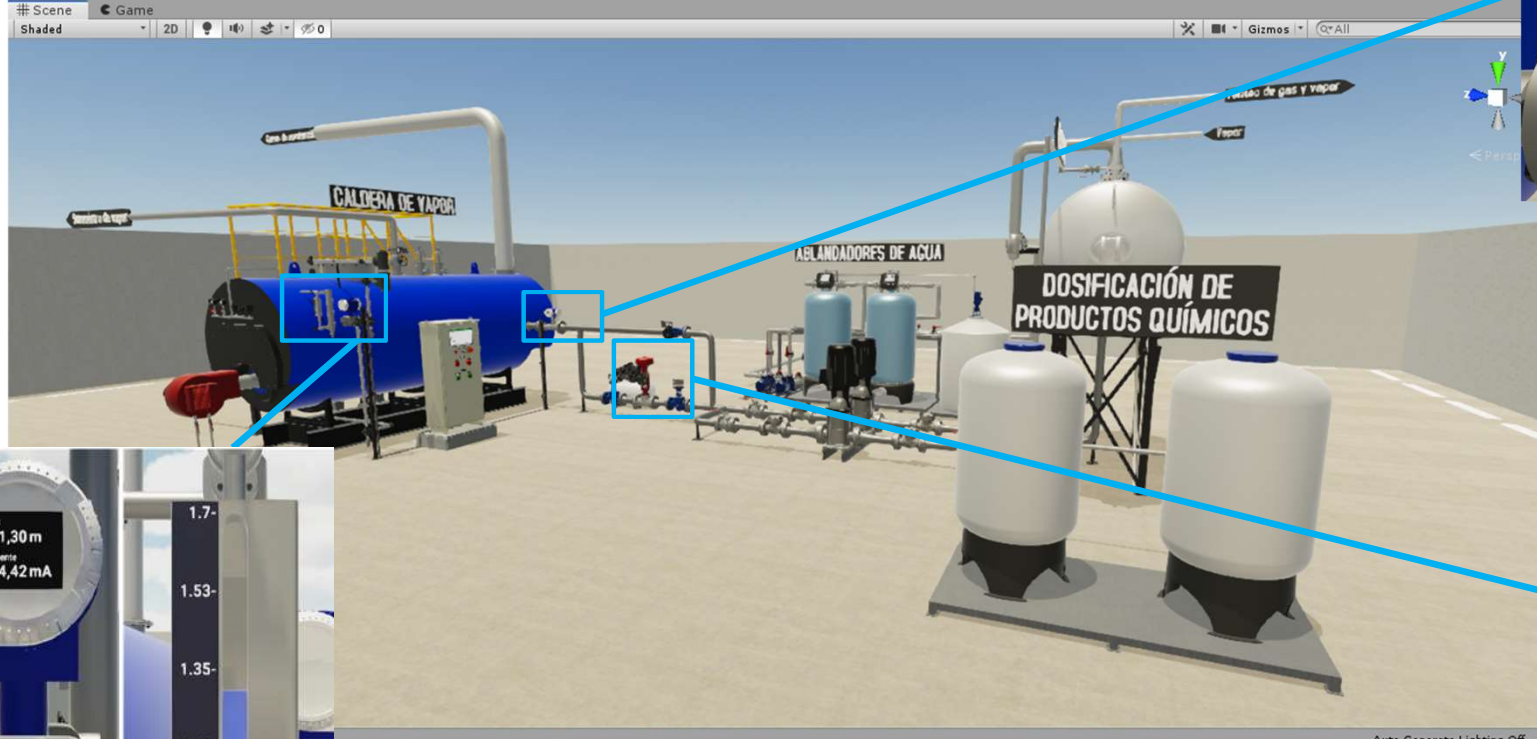
## Proceso industrial de nivel

HIL - Control en cascada de nivel - SampleScene - PC, Mac & Linux Standalone - Unity 2019.2.0f1 Personal\* <DX11>

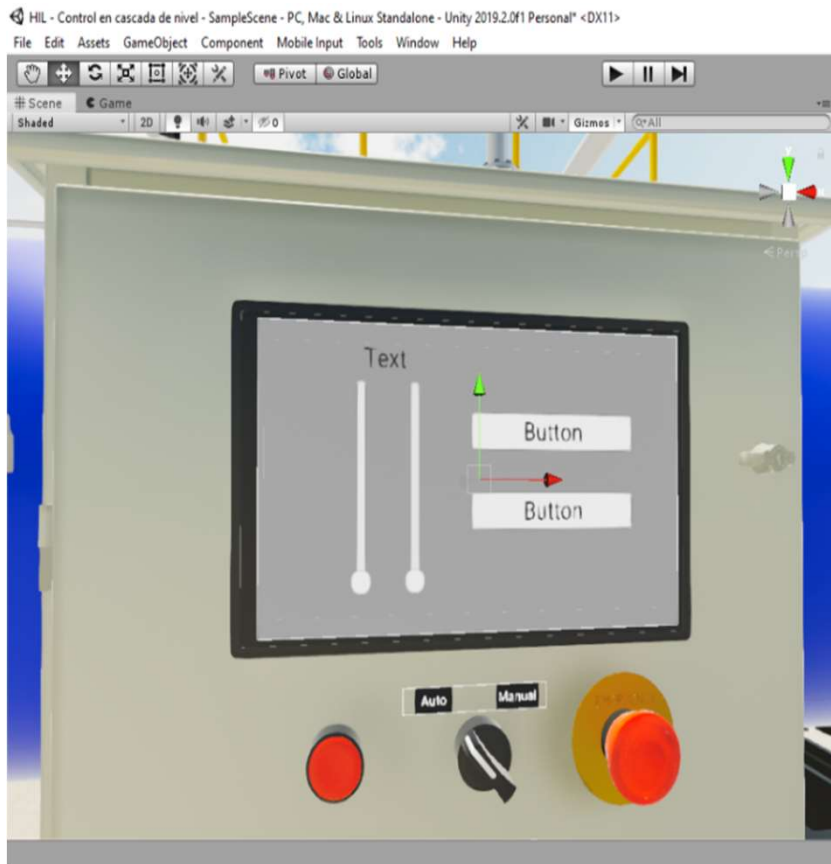
File Edit Assets GameObject Component Mobile Input Tools Window Help

Pivot Global

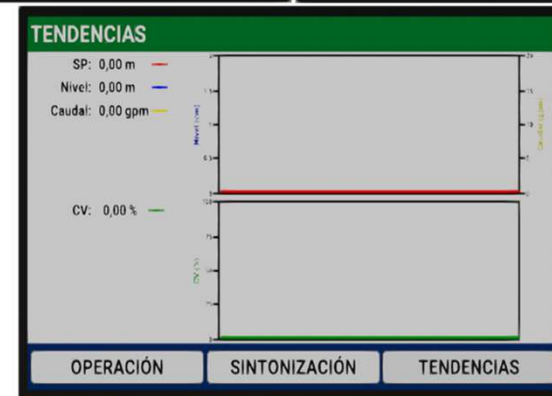
Collab Account Layers 2 by 3



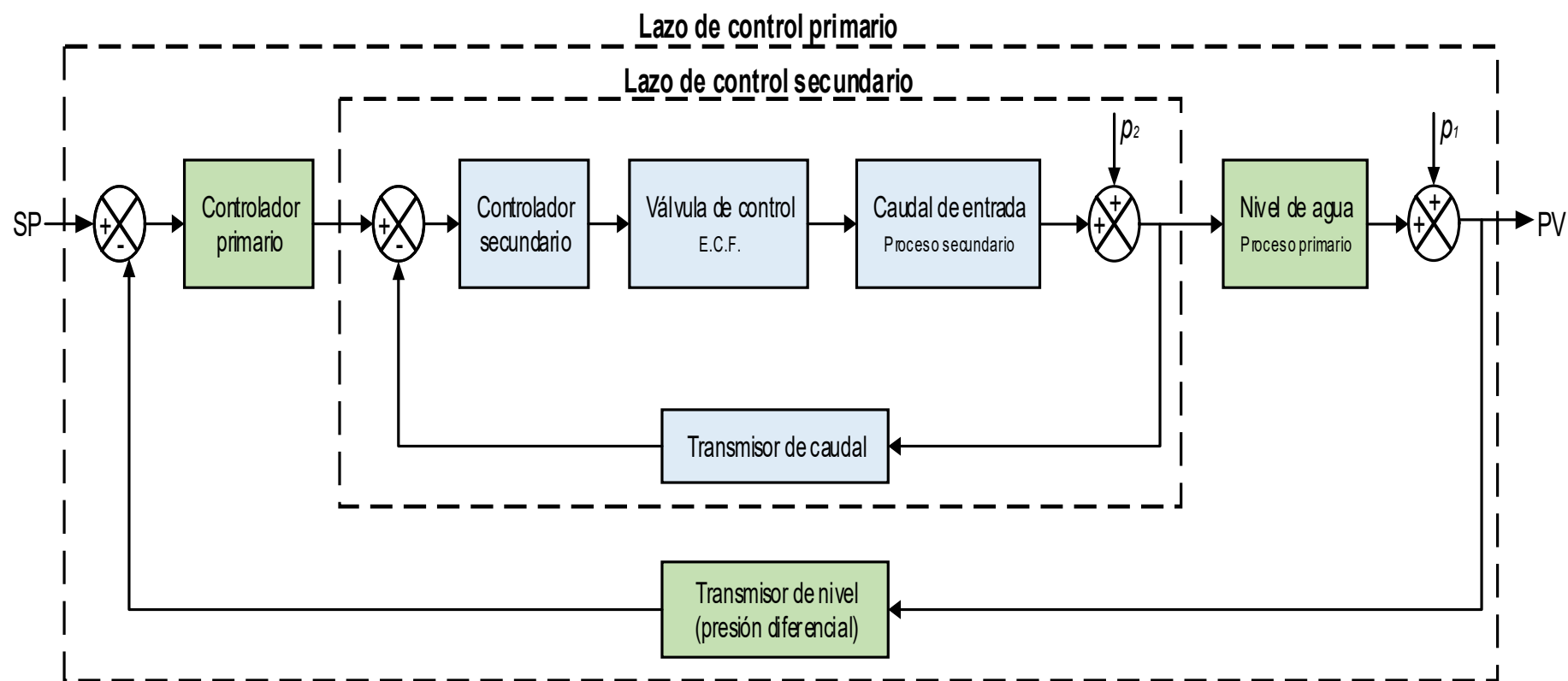
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

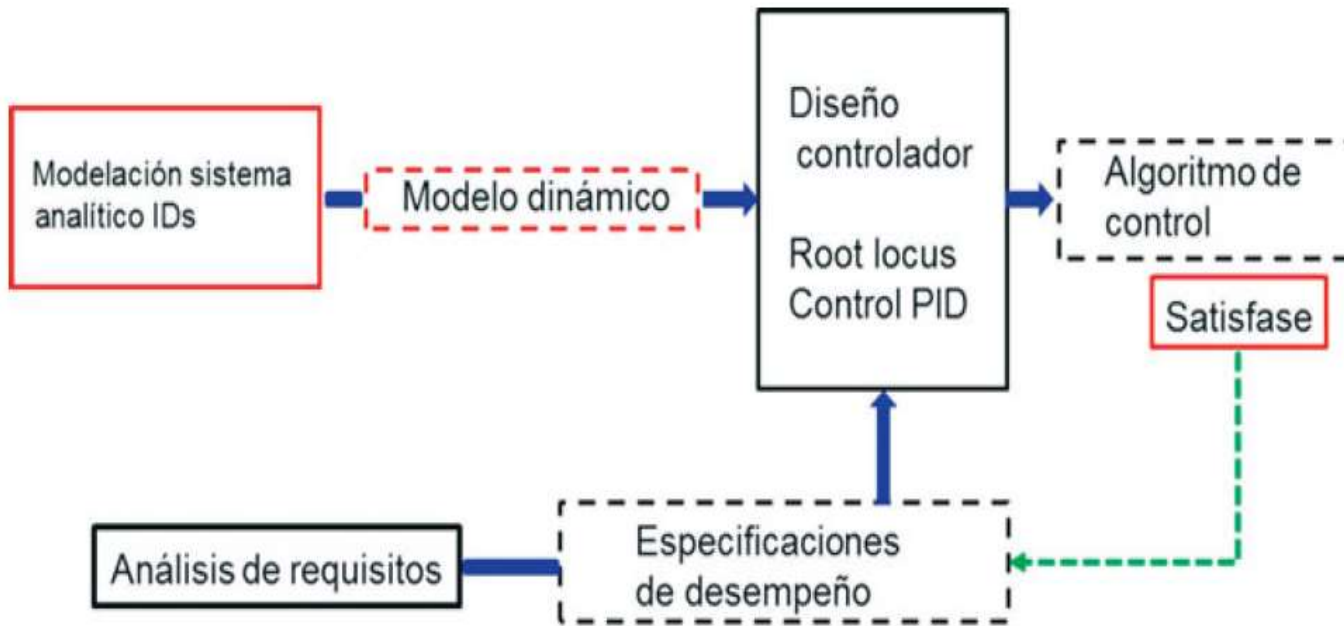


| OPERACIÓN           |   |                           | SINTONIZACIÓN  |   |            |
|---------------------|---|---------------------------|--|---|------------|
| SP<br><b>0,00 m</b> | Nivel<br><b>0,00 m</b>                    | Caudal<br><b>0,00 gpm</b> | <b>Controlador Primario</b><br>Kp: 177,00<br>Ti: 28,00<br>Td: 0,10 | <b>Controlador Secundario</b><br>Kp: 0,40<br>Ti: 2,28<br>Td: 0,56 |            |
| CV<br><b>0,00 %</b> | Comunicación con Arduino<br>Puerto COM... |                           |  |   |            |
| OPERACIÓN           | SINTONIZACIÓN                             | TENDENCIAS                | OPERACIÓN  | SINTONIZACIÓN   | TENDENCIAS |



# Estructura del control en cascada





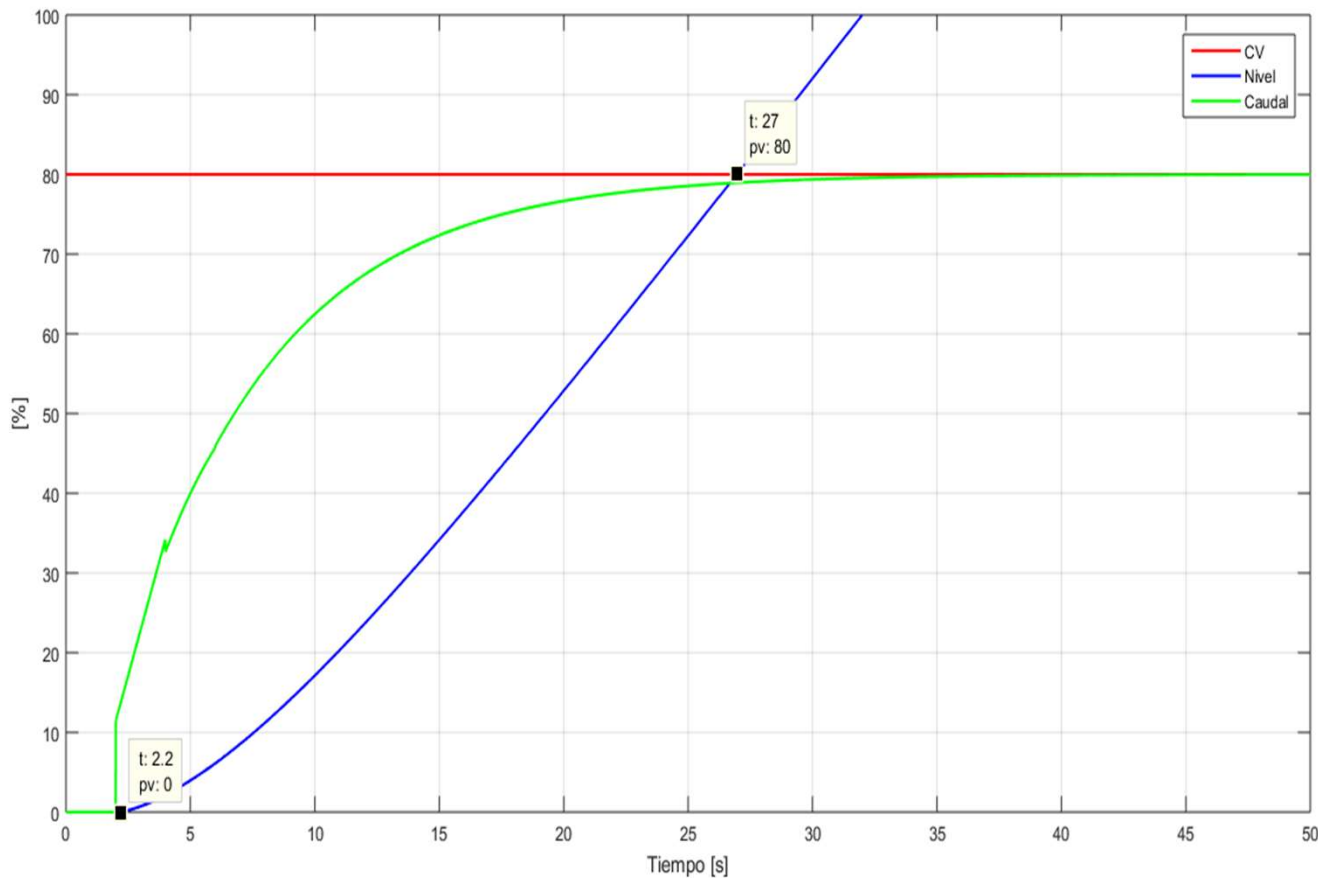
**Caudal**

$$G(s) = \frac{0.81625}{1 + 1.28s} e^{-2}$$

**Nivel**

$$G(s) = \frac{0.0404}{s} e^{-2.2s}$$





## Caudal

$$G(s) = \frac{0.81625}{1 + 1.28s} e^{-2s}$$

## Nivel

$$G(s) = \frac{0.0404}{s} e^{-2.2s}$$



*Constantes de sintonía para el controlador secundario*

| Método/Constantes       | Kp     | Ti [s] | Td [s] |
|-------------------------|--------|--------|--------|
| Ziegler - Nichols       | 0.9409 | 4      | 1      |
| Cohen - Coon            | 1.3648 | 3.296  | 0.7139 |
| Parr                    | 0.9801 | 5      | 0.8    |
| Lambda ( $\lambda=3L$ ) | 0.399  | 2.28   | 0.5614 |

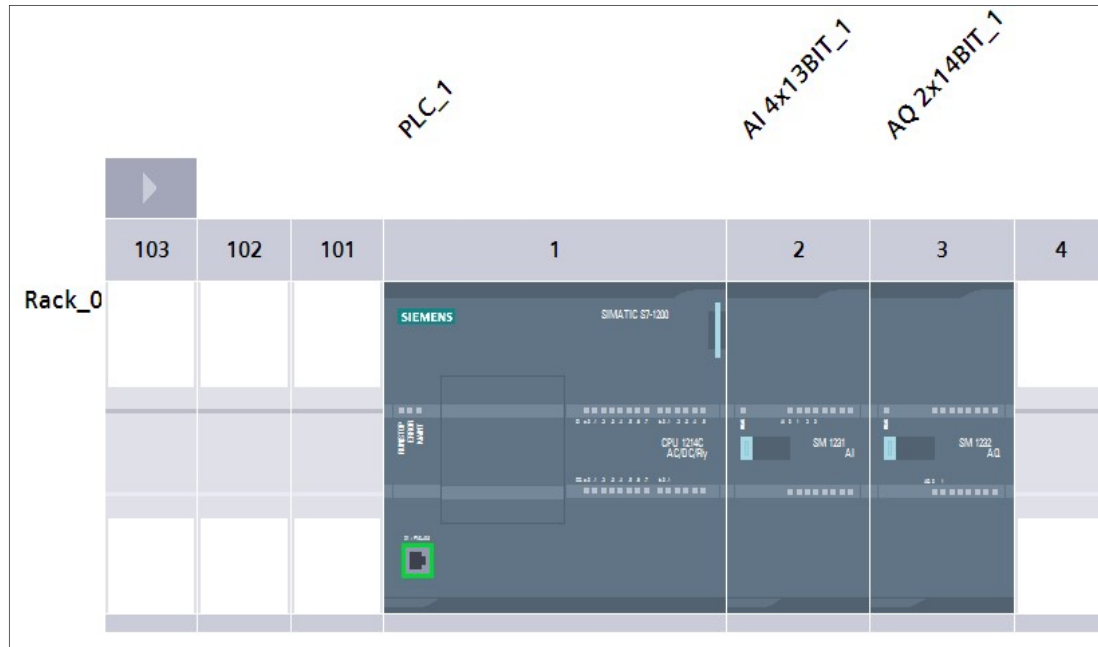
*Constantes de sintonía para el controlador primario*

| Método/Constantes              | Kp      | Ti [s] | Td [s] |
|--------------------------------|---------|--------|--------|
| Ford                           | 16.6517 | 4.4    | 0.814  |
| Astrom - Hagglund              | 10.5761 | 4.4    | 1.1    |
| Hay                            | 4.5005  | 7.04   | 1.76   |
| Zou - Brigham ( $\lambda=3L$ ) | 6.4292  | 15.4   | 1.0214 |





# Implementación del Algoritmo de Control



> Canal0

Dirección de canal: IW96

Tipo de medición: Tensión

Rango de tensión: +/- 5 V

Filtrado: Fuerte (32 ciclos)

Activar diagnóstico de rebase por exceso

Activar diagnóstico de rebase por defecto

> Canal0

Dirección de canal: QW12

Tipo de salida analógica: Tensión

Rango de tensión: +/- 10 V

Valor sustitutivo para canal en caso de transición de RUN a S...: 0.000

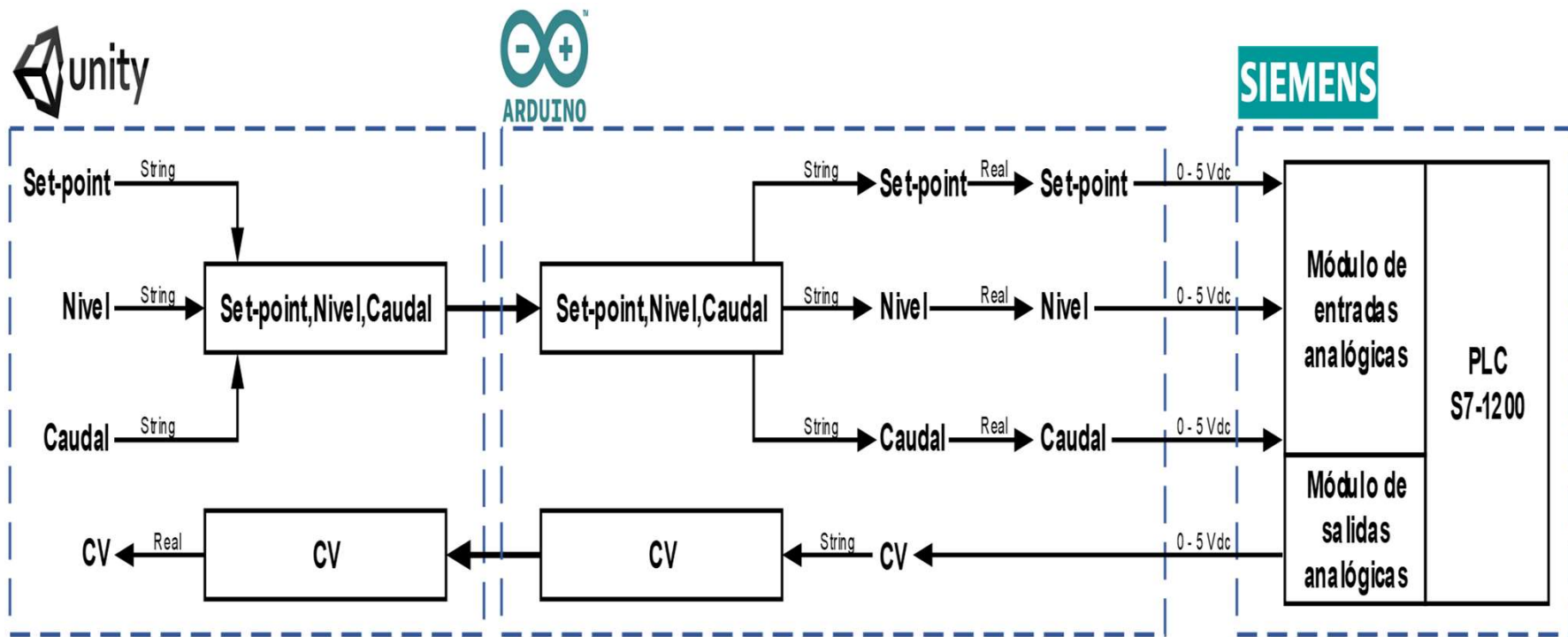
Activar diagnóstico de cortocircuito

Activar diagnóstico de rebase por exceso

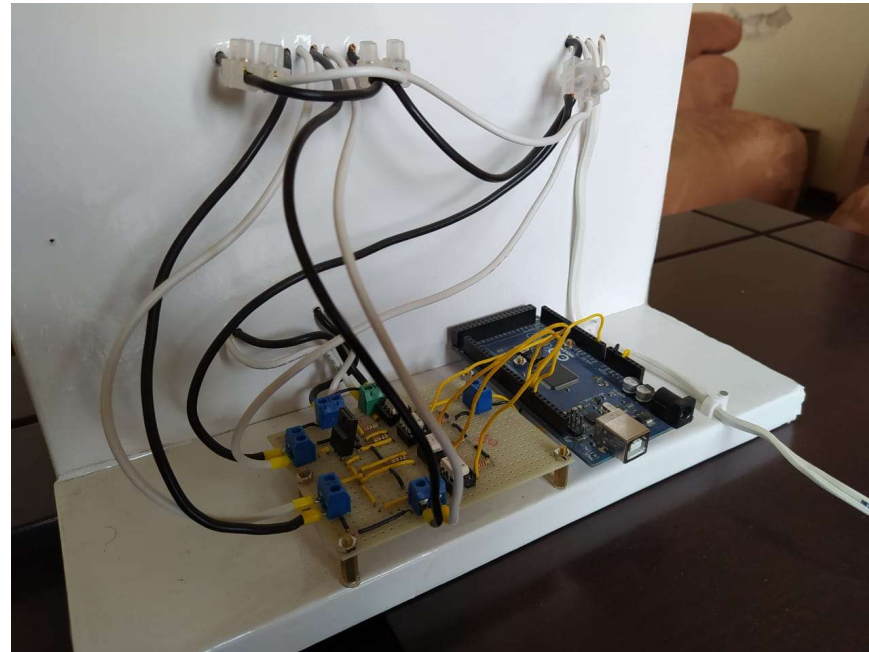
Activar diagnóstico de rebase por defecto



# Intercambio de datos entre Unity 3D, Arduino y PLC

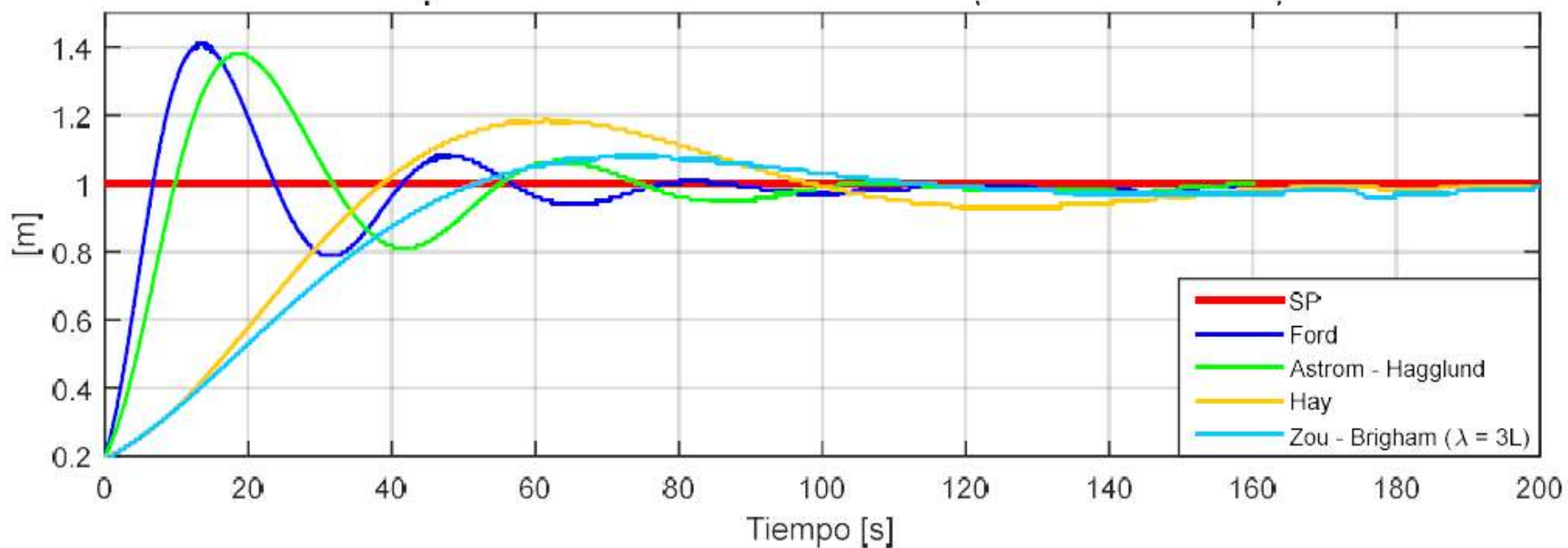


# Implementación del Algoritmo de Control



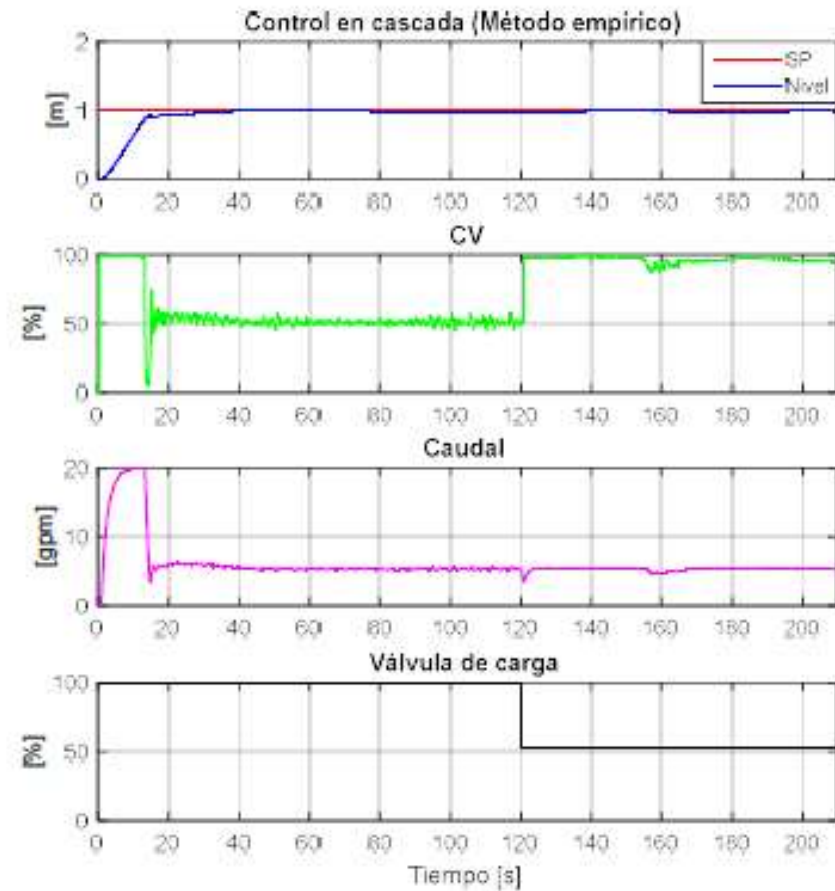
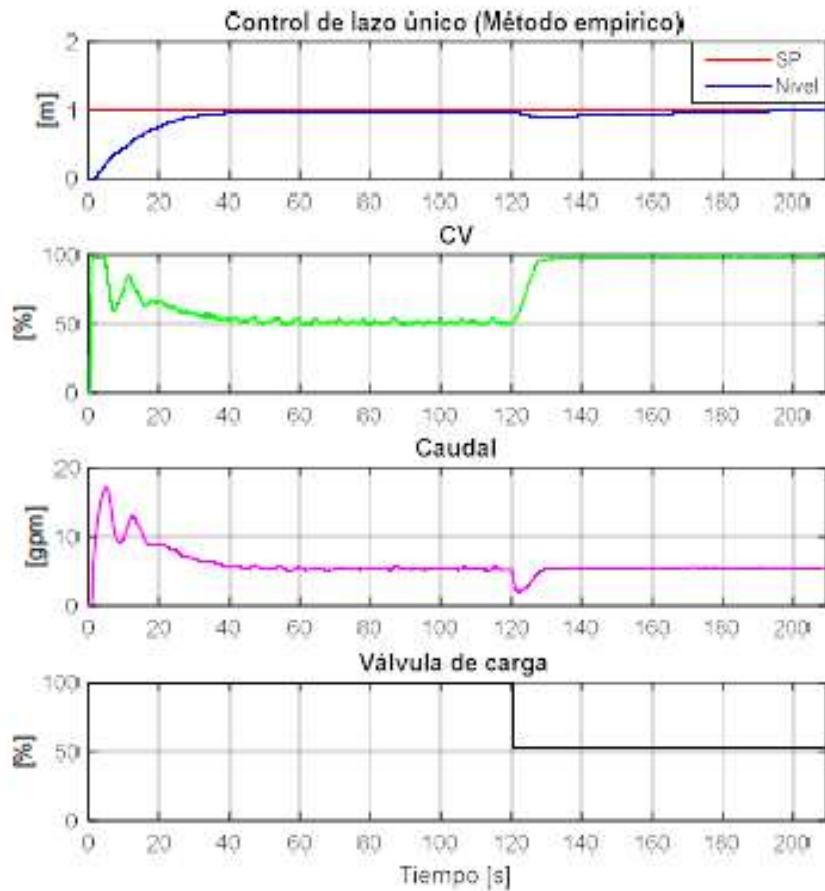
# Desempeño de la estrategia de control en cascada

Comparación entre métodos de sintonía para el control en cascada (PLC)



## Gráfica comparativa para el control clásico de lazo único vs. control en cascada (Método empírico)

21



## ***Parámetros de rendimiento para cada estrategia de control - Método de sintonía empírico***

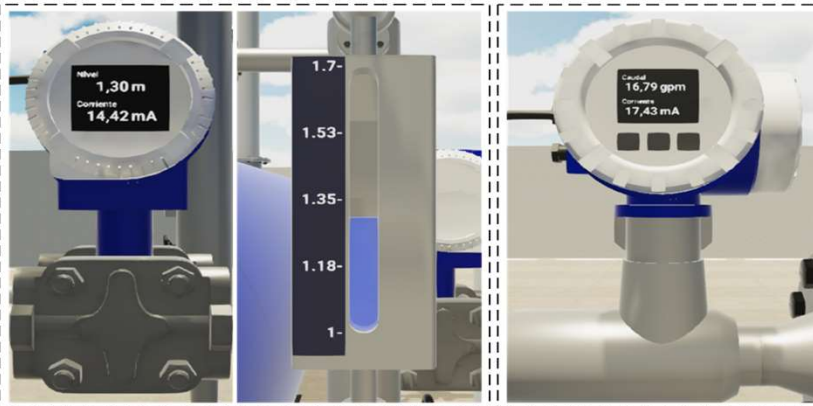
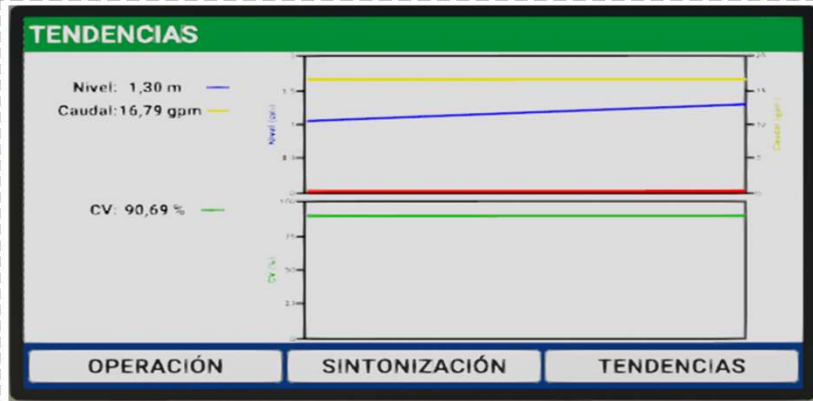
23

| <b>Estrategia de control</b> | <b>Sobreimpulso</b> | <b>Tiempo de establecimiento</b> | <b>IAE</b> |
|------------------------------|---------------------|----------------------------------|------------|
| Control de lazo único        | 0%                  | 42.36 s                          | 19.75      |
| Control en cascada           | 0%                  | 29.52 s                          | 12.29      |



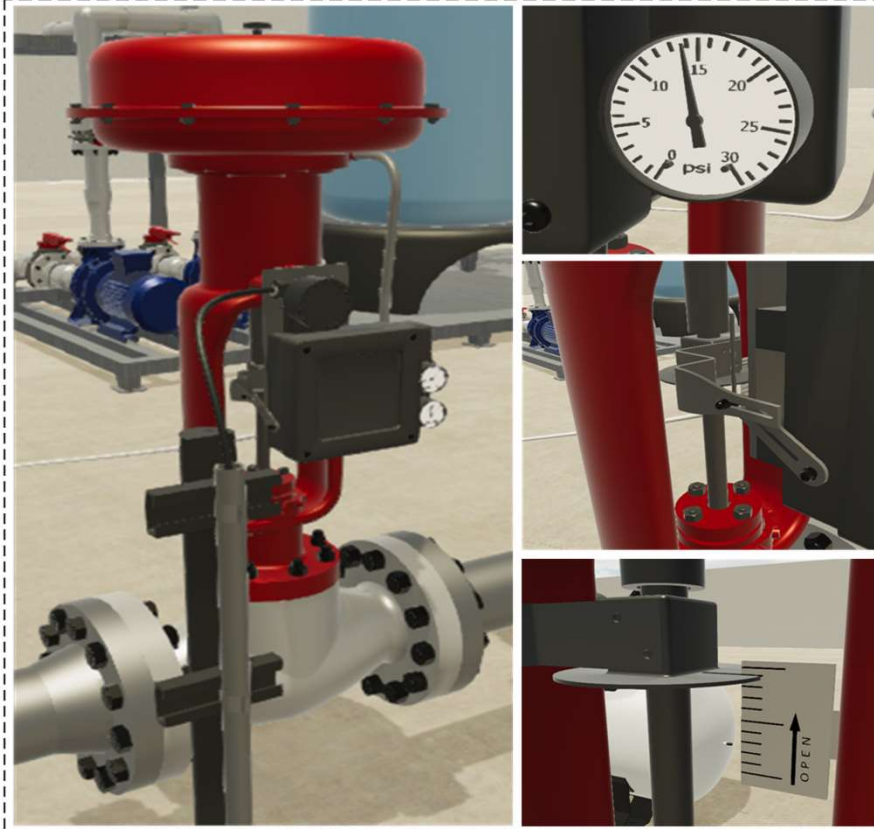
# Rendimiento de la Aplicación

## HMI



Nivel de agua  
(variable primaria)

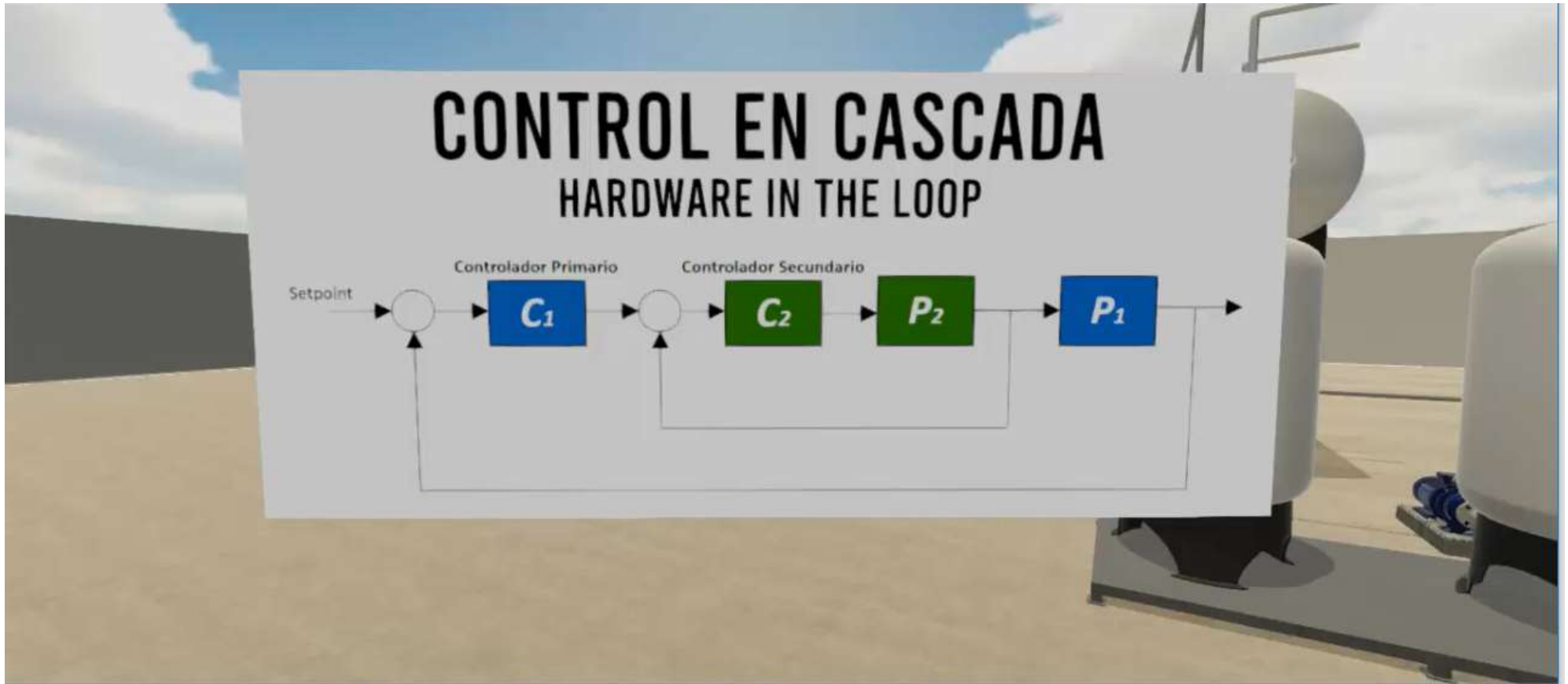
Caudal de agua  
(variable secundaria)



Válvula de control neumática  
(Elemento de control final)



# Video Funcionamiento





# Comprobación de la Hipótesis

- El Entorno virtual 3D de una planta de nivel, mediante la técnica Hardware-In-the-Loop, para el control avanzado de procesos implementado, es una solución de bajo costo ya que su valor estimado es de: 1500 dólares, en comparación con sistemas didácticos comerciales que ofrecen las mismas características cuyos precios oscilan entre los 20000 y 25000 dólares. (FESTO, 2021).
- De las encuestas realizadas se determina que el entorno virtual presenta un alto nivel de realismo, así como permite identificar las etapas del proceso, los usuarios identificaron de forma clara las variables del proceso, así como indican que el sistema les ha proporcionado información relevante sobre el control en cascada y comprenden de forma práctica el diseño e implementación de esta estrategia de control.

- El entorno virtual 3D de la planta de nivel, está conformado por dos modelos matemáticos, el lazo principal tiene la respuesta dinámica de un proceso integrante (Nivel del tanque) y el lazo secundario tiene la respuesta dinámica de un proceso autorregulado (Caudal de la tubería), los mismos que permiten la simulación del sistema de control en cascada.
- Del diseño e implementación de varios algoritmos (PI-PID) y la estrategia de control en cascada, se determina que el controlador más eficiente para el lazo primario es el algoritmo PID con las constantes de sintonía ( $K_p=0.43$ ;  $T_i=0.891s$ ;  $T_d=0.08s$ ), y para el lazo secundario es el algoritmo PID con las constantes de sintonía ( $K_p=190$ ;  $T_i=8.85s$ ;  $T_d=0.0012s$ ). Estos controladores proporcionan un sistema de control sin sobreimpulso con un tiempo de establecimiento de 29.52 segundos y la Integral Absoluta del Error (IAE) de 12.29, y presenta una mejor respuesta en comparación con el control en lazo único.



- Debido a que el diseño del entorno 3D representa una herramienta de entrenamiento en control de procesos, es recomendable seleccionar un sistema que contenga instrumentos y equipos utilizados en procesos industriales reales para que el estudiante se pueda familiarizar fácilmente con las características físicas y operativas de los mismos.
- Para la implementación del control en cascada es importante considerar que la variable primaria del proceso, en este caso el nivel de alimentación de agua de la caldera presenta una respuesta lenta, y el flujo en la tubería que corresponde a la variable secundaria presenta una respuesta rápida, lo que permita un desempeño óptimo de la estrategia de control en cascada dentro del proceso.

# GRACIAS POR SU ATENCIÓN



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