



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

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

**CONTROL DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE OXÍGENO CON TANQUES  
ESFÉRICOS A TRAVÉS DE LA TÉCNICA HARDWARE-IN-THE-LOOP**

**Autor:**

Pablo Norberto Granda Ortiz

Ph.D. Víctor H. Andaluz, *Tutor*



**FICC 2023**

2-3 March 2023 | Virtual

# *Certificate of Participation*

Presented to

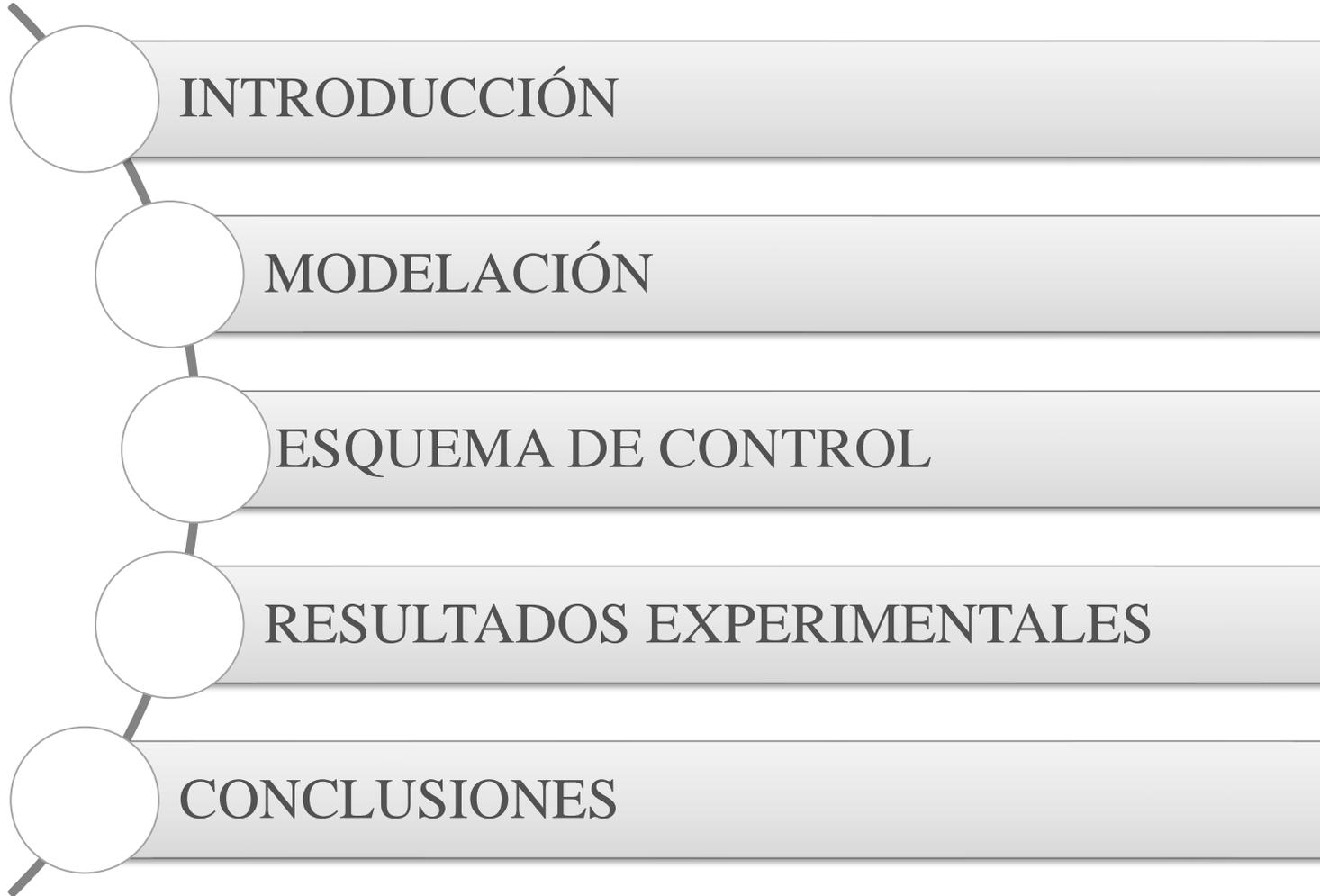
*Pablo Norberto Granda*

for his/her active and invaluable participation as Author in the  
Future of Information and Communication Conference (FICC) 2023  
held virtually on 2-3 March 2023.

He/She has also presented a paper titled "Virtual Training System for Oxygen Distribution Control through Hardware-in-the-Loop"

Pascal Lorenz  
Chair, Future of Information and Communication Conference 2023  
Professor, University of Haute Alsace  
France







## Sistema de almacenamiento de oxígeno



## Ventajas de Automatizar el proceso

Calidad



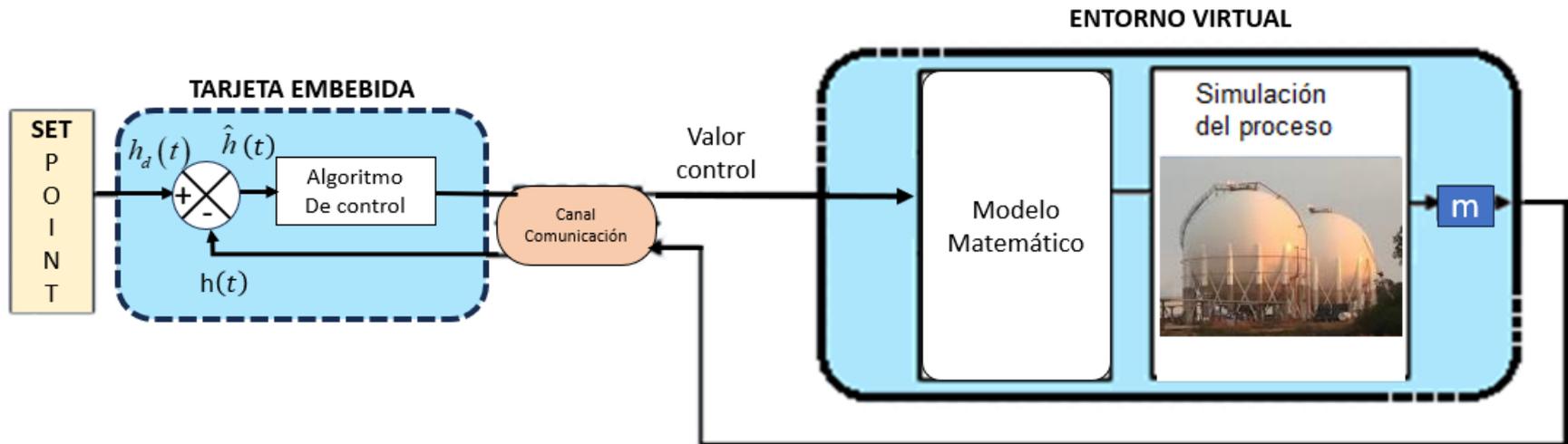
Costo



Seguridad



## HARDWARE IN THE LOOP



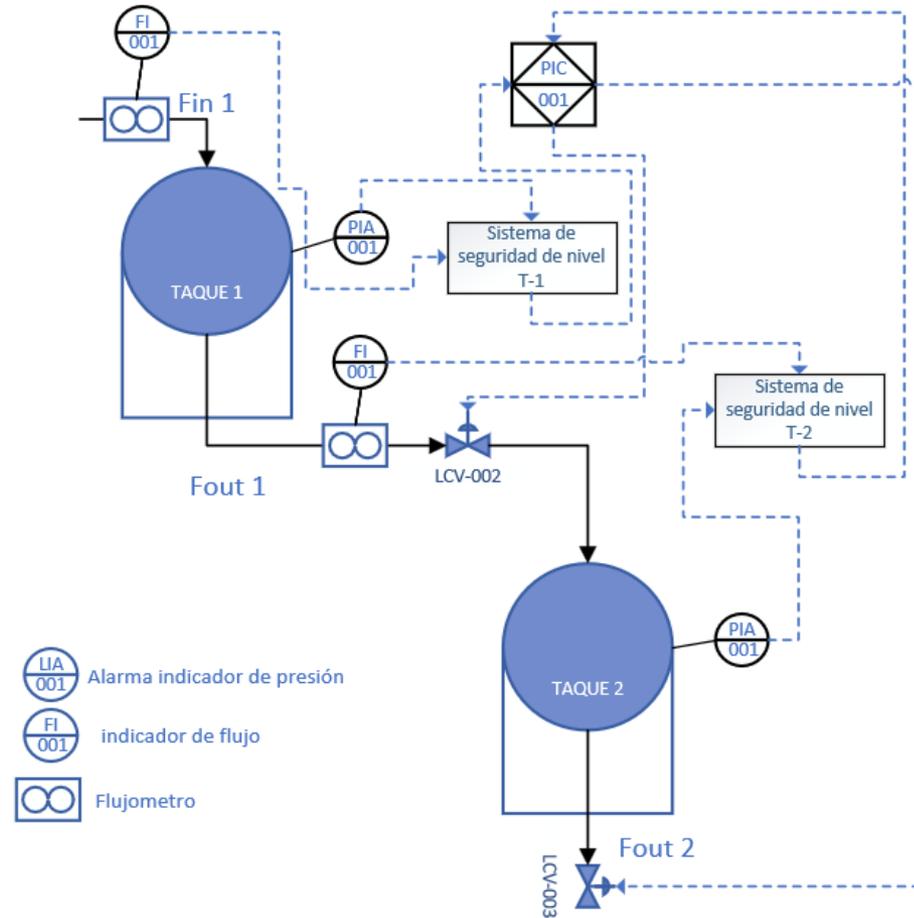
**Implementar algoritmos de control avanzado**, para un sistema de distribución de oxígeno con tanques esféricos a través de la técnica Hardware-in-the-Loop, HIL.

- **Investigar** en bases de datos científicas la modelación y control de un sistema de distribución de oxígeno, a fin de ser implementados a través de la técnica Hardware-in-the-Loop.
- **Identificar y validar** el modelo matemático que represente el comportamiento de un sistema de distribución de oxígeno, conformado por tanques esféricos. El modelo matemático obtenido deberá tener una estructura matemática adecuada, a fin de ser utilizados en el diseño de algoritmos de control.
- **Proponer un algoritmo de control no lineal** para tareas de regulación, basado en el modelo matemático del proceso de nivel para un sistema de distribución de oxígeno.

- **Implementar un esquema de control** basado en la técnica “hardware in the loop” considerando el modelo matemático del proceso de distribución de oxígeno.
- **Desarrollar** en el motor gráfico Unity 3D **un entorno virtual** inmersivo e interactivo con el usuario, que permita monitorear e implementar algoritmos de control para un sistema de distribución de oxígeno.
- **Evaluar** el desempeño y **Analizar la estabilidad** del sistema de control implementado con la técnica Hardware-in-the-Loop, con el propósito de validar el modelo matemático obtenido y el comportamiento de los errores de control virtualizado en el motor gráfico Unity 3D.



## *P&ID - Almacenamiento oxígeno*



Por principio de la conservación de masa

$$A_i \frac{dh_i}{dt} = q_{ti} - q_{oi} \quad (1)$$

Por flujo Volumétrico

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{Ah}{t} \quad (2)$$

Por casquete esférico

$$V = \frac{\pi h^2}{3} (3R - h) \quad (3)$$

$$A_1 = \pi (2R_1 h_1 - h_1^2) \quad (4)$$

$$A_2 = \pi (2R_2 h_2 - h_2^2) \quad (5)$$

Donde

$q_{ti}$ : Flujo de entrada,  $q_{oi}$ : Flujo de salida,  $h_i$ : Altura,  $t$ : Tiempo,  $R$ : Radio esfera

$A_1, A_2$  : área Transversal del tanque 1 y tanque 2

## Principio de Bernoulli

$$p_1 + \rho g \gamma_1 + \frac{1}{2} \rho V_{p1}^2 = p_2 + \rho g \gamma_2 + \frac{1}{2} \rho V_{p2}^2 \quad (6)$$

$$gh = \frac{1}{2} V_{p2}^2$$
$$V_{p2} = \sqrt{2gh} \quad (7)$$

## Ecuación de continuidad

$$q_{oi} = a_i \sqrt{2gh} \quad (8)$$

(8) En (1)

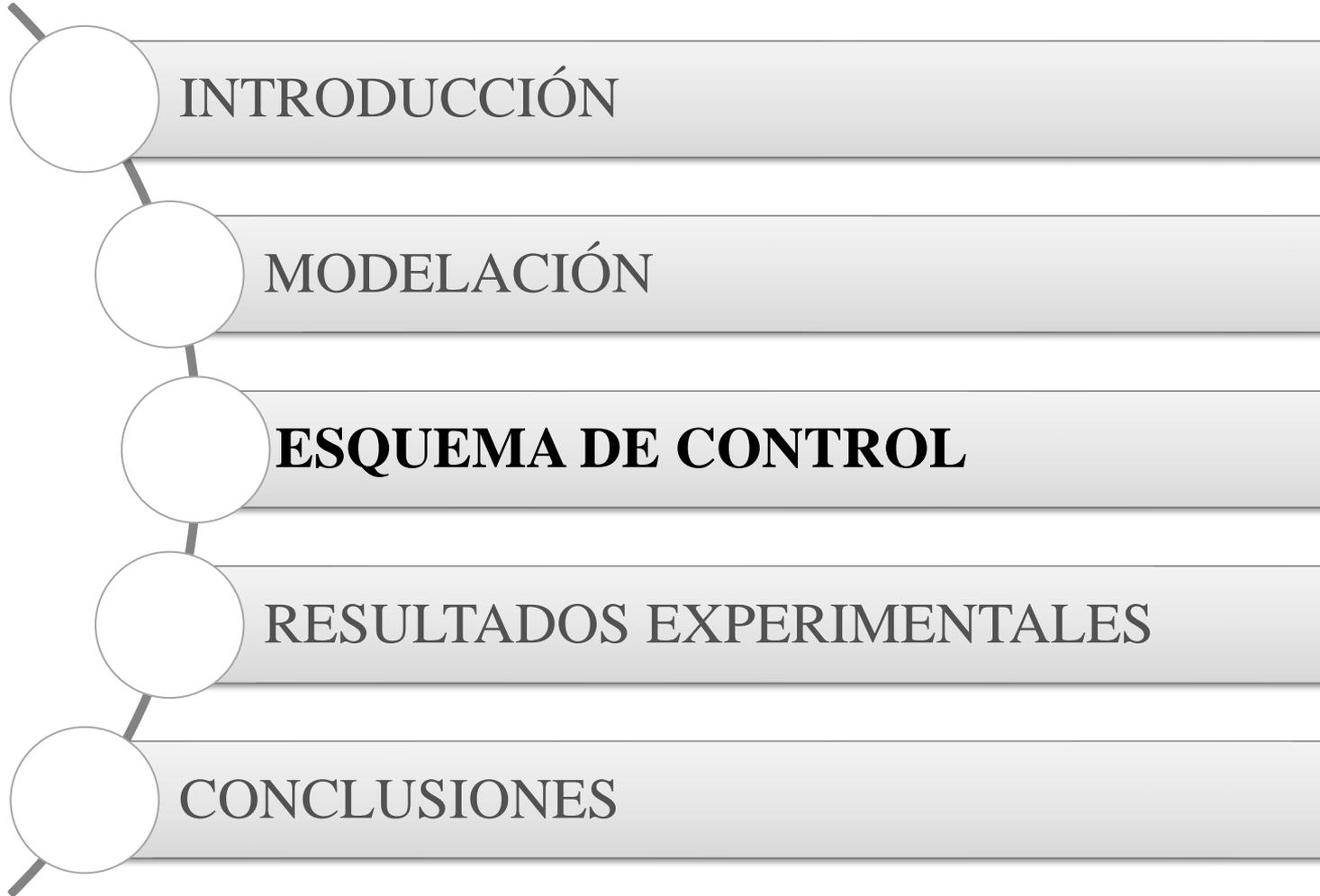
$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = q_{ii} - k_1 a_1 \sqrt{2gh_1}$$

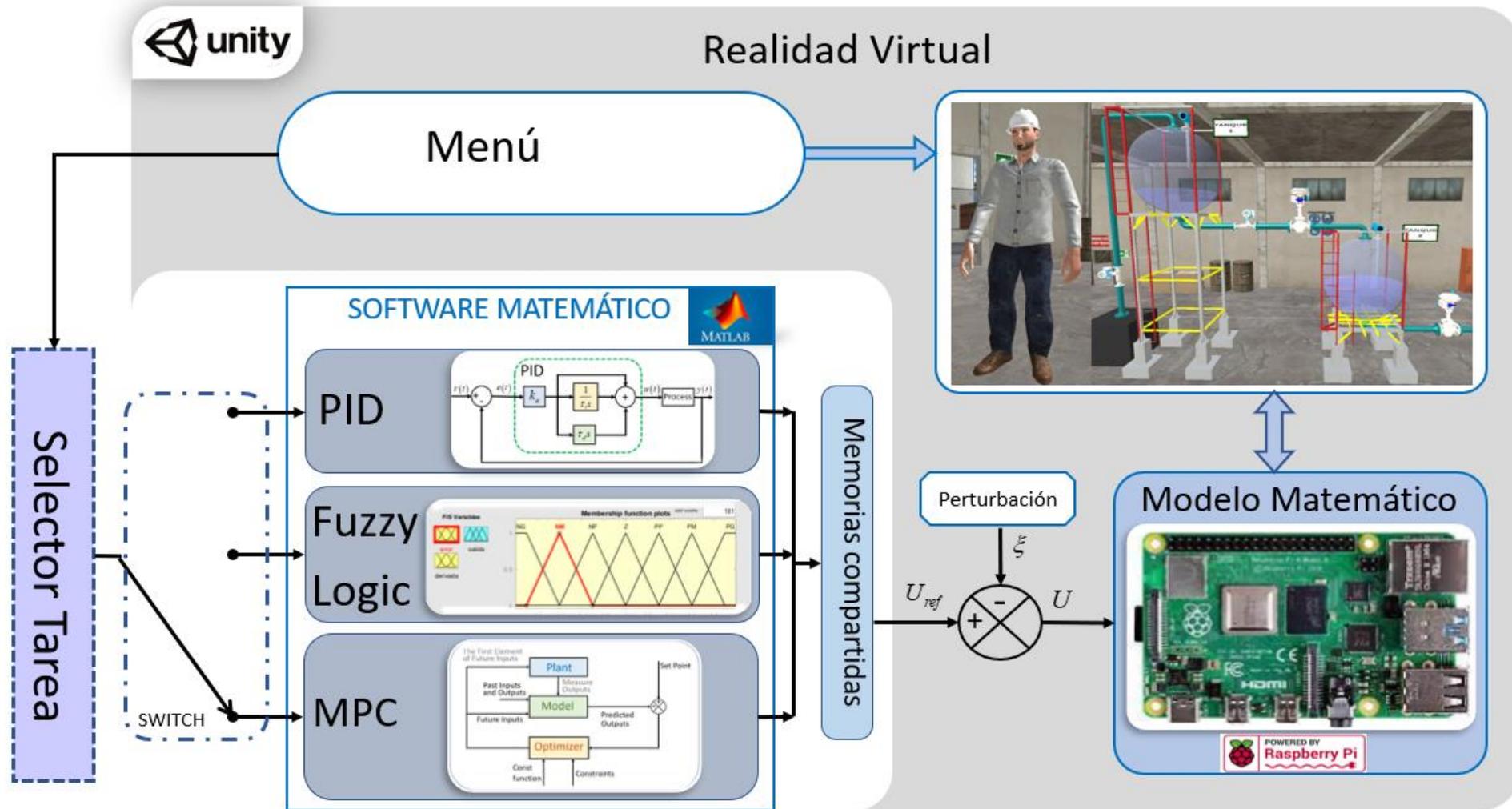
$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = k_1 a_1 \sqrt{2gh} - k_2 a_2 \sqrt{2gh_2}$$

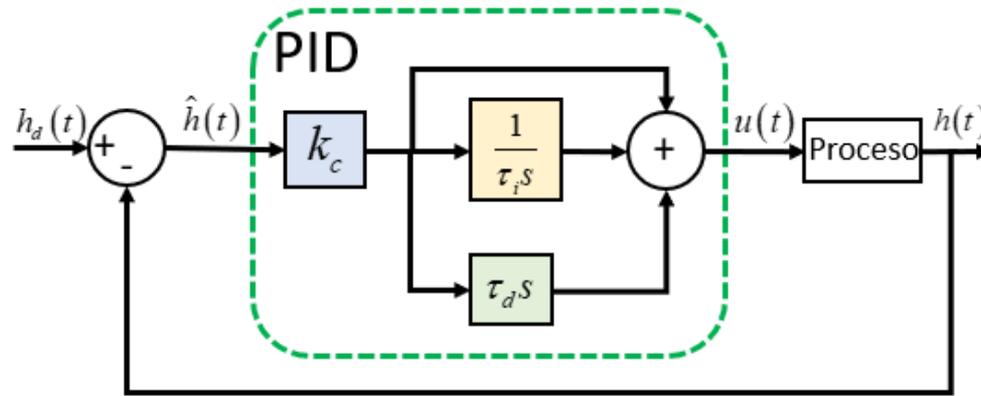
Donde  $a_i$ : Área del tubo,  $\rho$ : Densidad de fluido,  $\gamma$ : Altura del tubo

Donde el modelo es:

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1 \\ \dot{h}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-k_1 \sqrt{2gh_1}}{\pi(2R_1 h_1 - h_1^2)} & 0 \\ \frac{k_1 \sqrt{2gh_1}}{\pi(2R_2 h_2 - h_2^2)} & \frac{-k_2 \sqrt{2gh_2}}{\pi(2R_2 h_2 - h_2^2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{q_{ti}}{\pi(2R_1 h_1 - h_1^2)} \\ 0 \end{bmatrix}$$







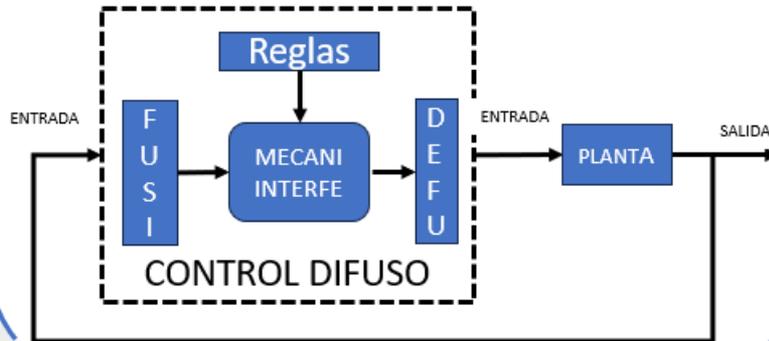
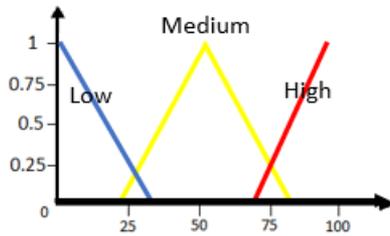
$$u(t) = k_c \hat{h}(t) + \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t \hat{h}(t) dt + k_c \tau_d \frac{d\hat{h}(t)}{dt}$$

Discretizado

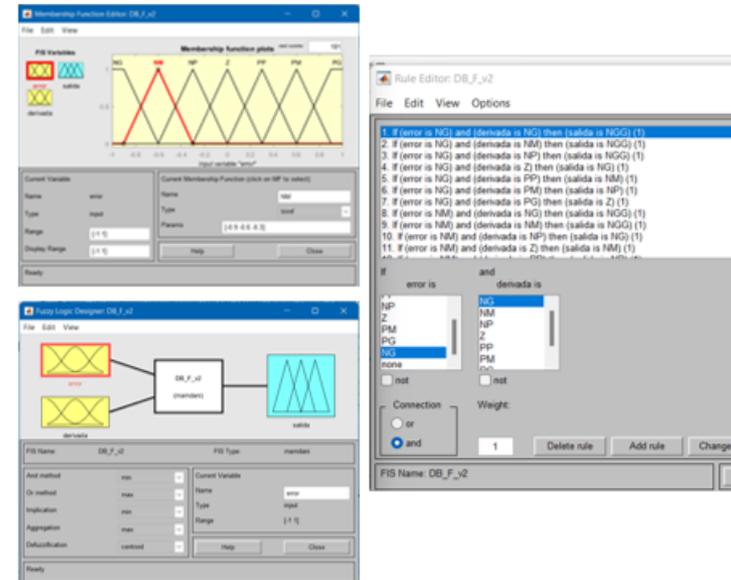
$$u(i) = k_c \hat{h}(i) + \frac{k_c T_o}{\tau_i} \left( \frac{\hat{h}(i) + \hat{h}(i-1)}{2} \right) + k_c \tau_d \left( \frac{\hat{h}(i) - \hat{h}(i-1)}{T_o} \right)$$

## Fuzzy Logic

### Esquema



### Control



**Membership Function Editor: DB\_F\_v2**

**Rule Editor: DB\_F\_v2**

```

1. If (error is NG) and (derivada is NP) then (salida is NGG) (1)
2. If (error is NG) and (derivada is NM) then (salida is NGG) (1)
3. If (error is NG) and (derivada is NP) then (salida is NGG) (1)
4. If (error is NG) and (derivada is Z) then (salida is NG) (1)
5. If (error is NG) and (derivada is PP) then (salida is NM) (1)
6. If (error is NG) and (derivada is PM) then (salida is NP) (1)
7. If (error is NG) and (derivada is PG) then (salida is Z) (1)
8. If (error is NM) and (derivada is NG) then (salida is NGG) (1)
9. If (error is NM) and (derivada is NM) then (salida is NGG) (1)
10. If (error is NM) and (derivada is NP) then (salida is NG) (1)
11. If (error is NM) and (derivada is Z) then (salida is NM) (1)
    
```

**Fuzzy Logic Designer: DB\_F\_v2**

FIS Name: DB\_F\_v2 | FIS Type: number

Current Variable: error (Type: input, Range: [-1 %; 1 %])

Current Variable: derivada (Type: input, Range: [-1 %; 1 %])

Output Variable: salida (Type: output, Range: [-1 %; 1 %])

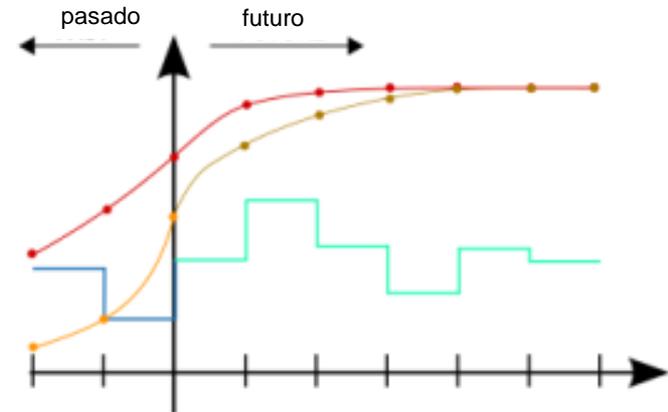
## Función Objetivo

$$J(k) = \sum_{i=1}^P \delta(i) \left[ h(k+i|k) - \hat{h}(k+i) \right]^2 + \sum_{i=1}^N \lambda(i) \left[ \Delta a(k+i-1) \right]^2$$

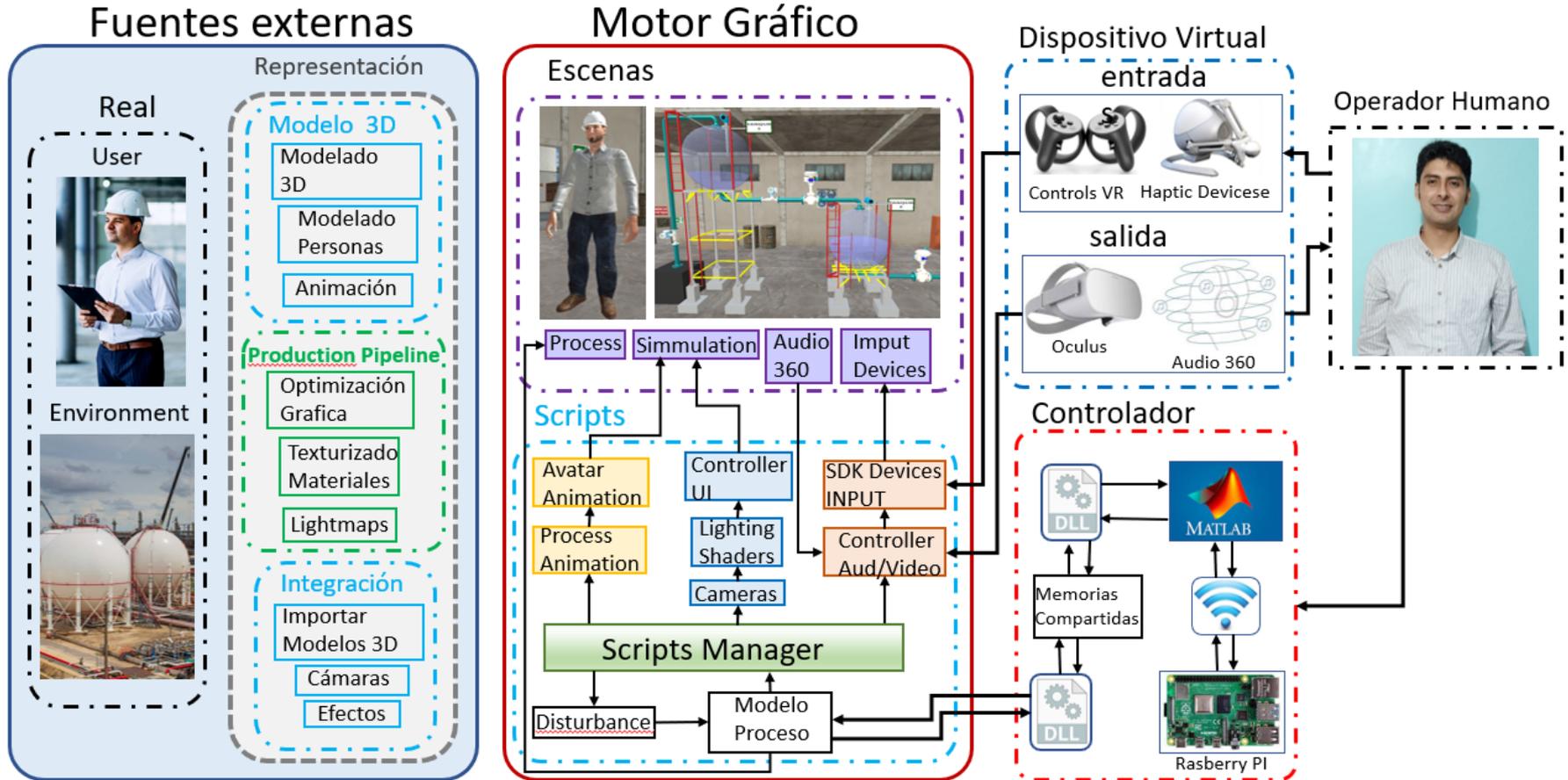
## Restricciones

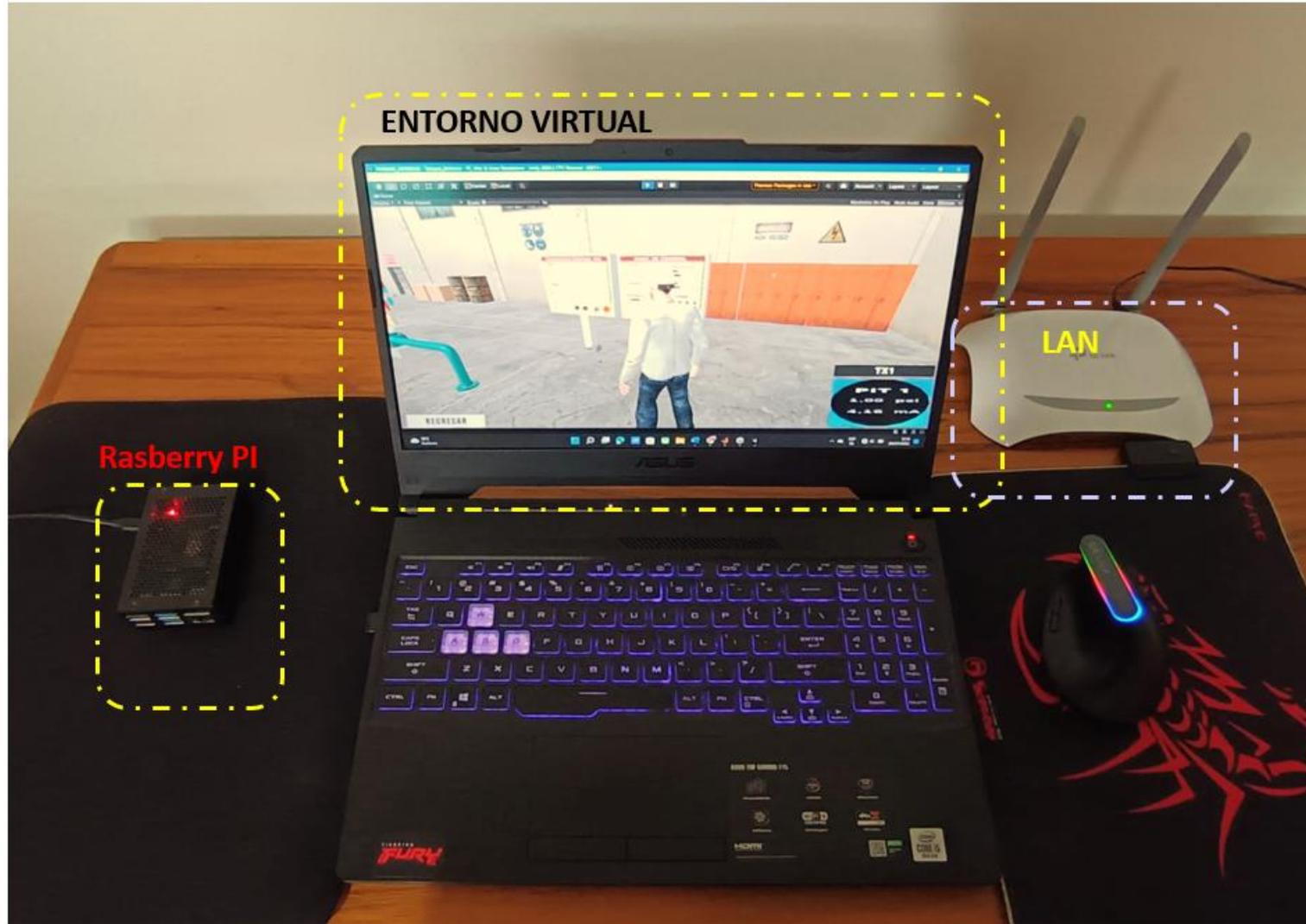
$$0 \leq \Delta a \leq 1$$

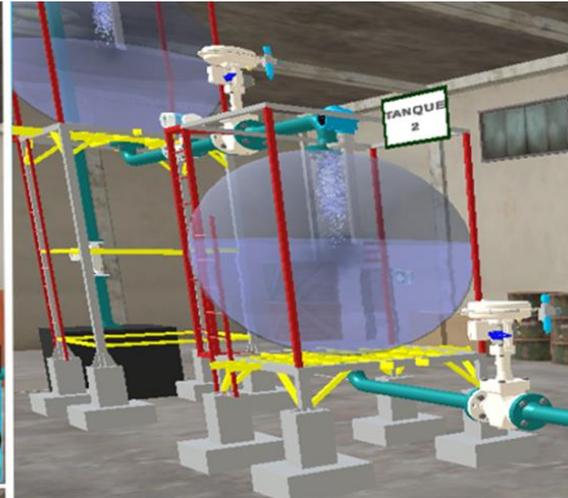
$$0m \leq h \leq 1m$$

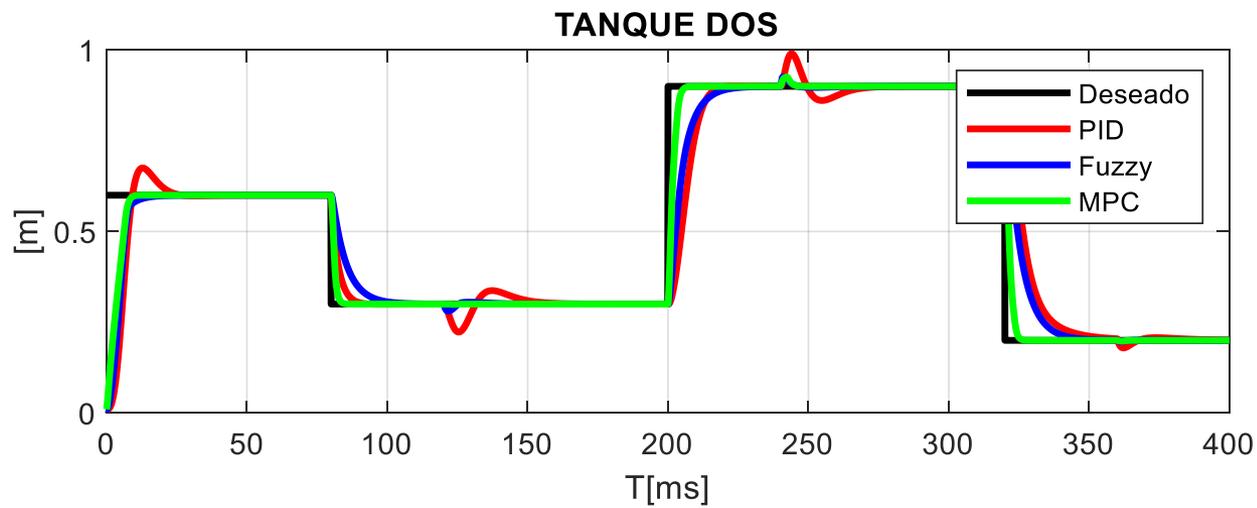
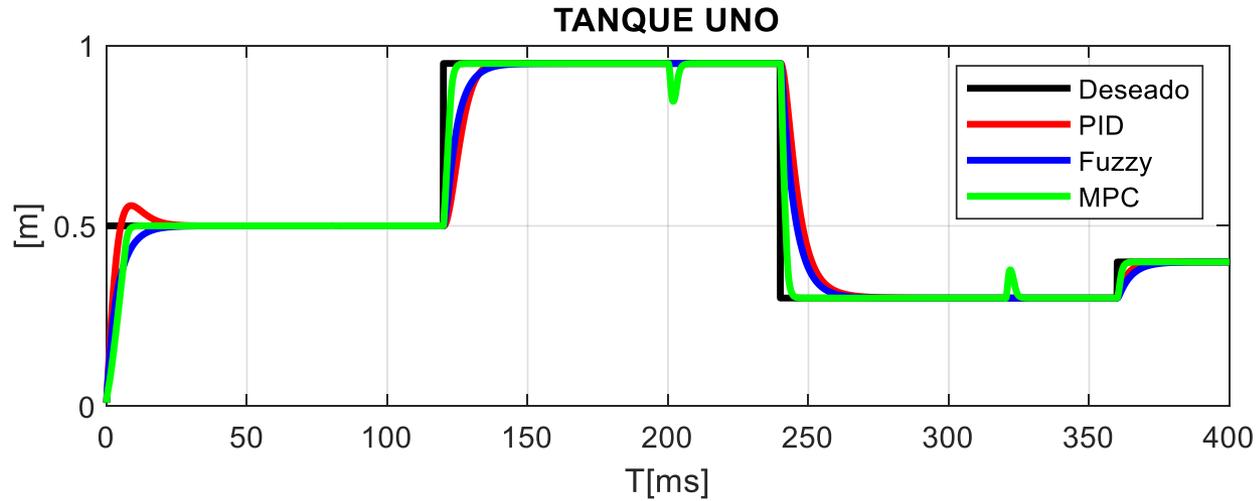


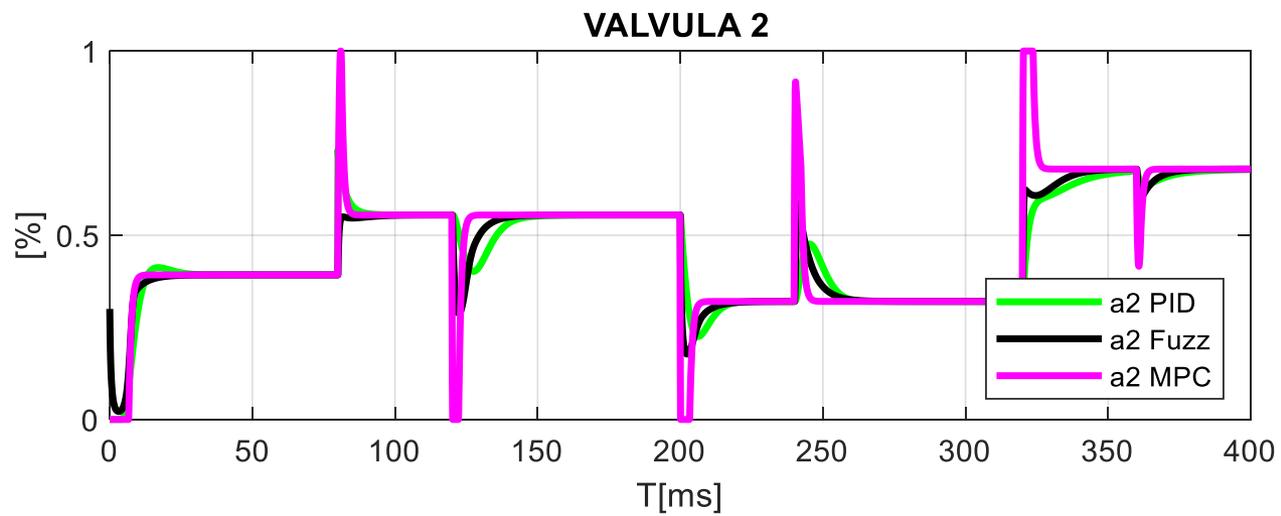
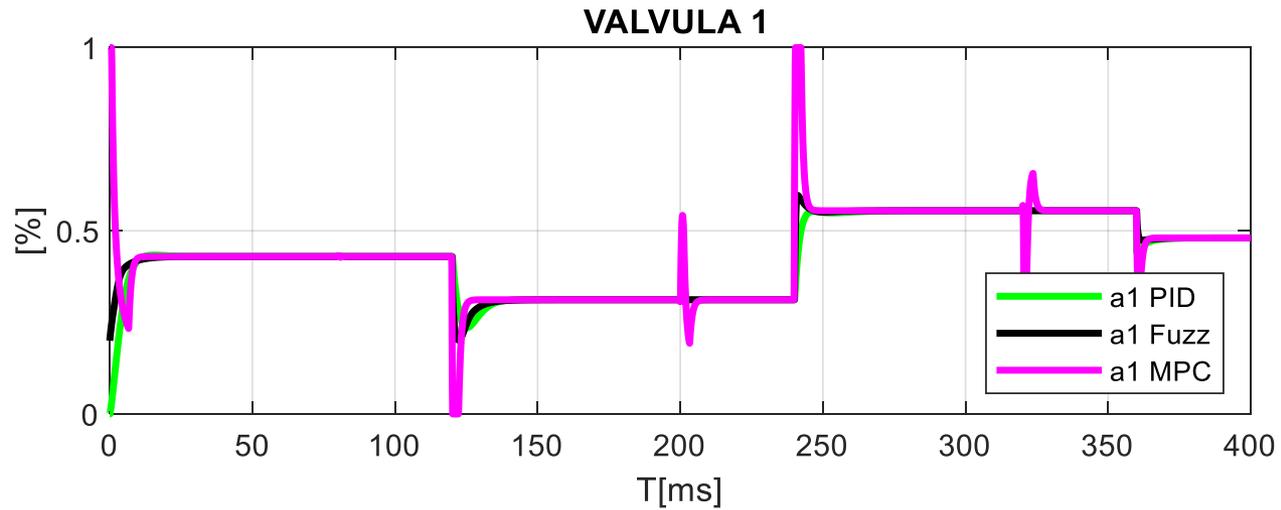


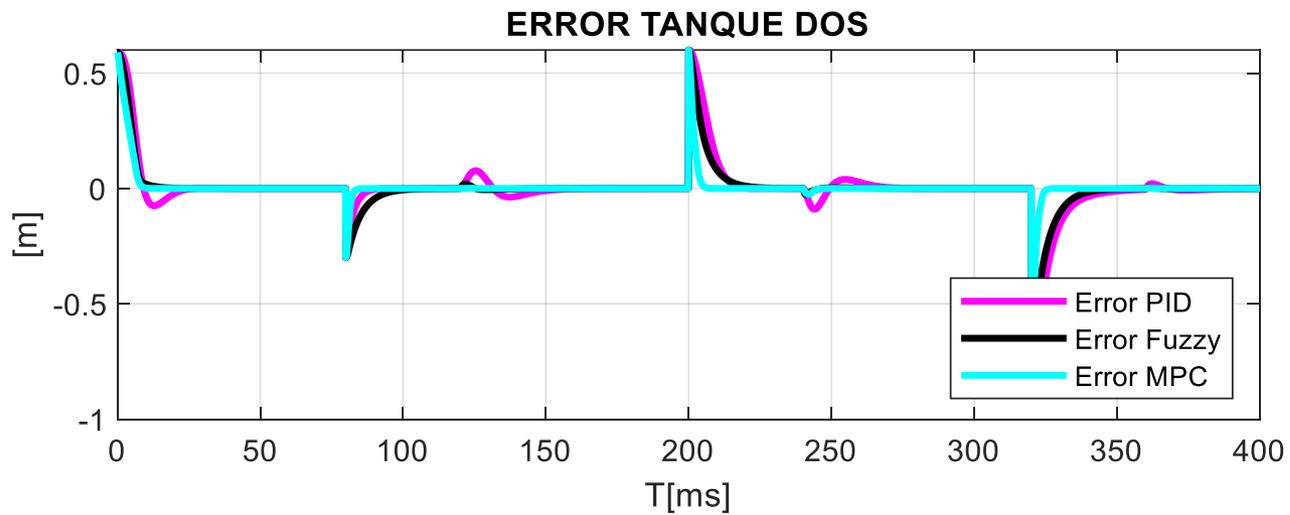
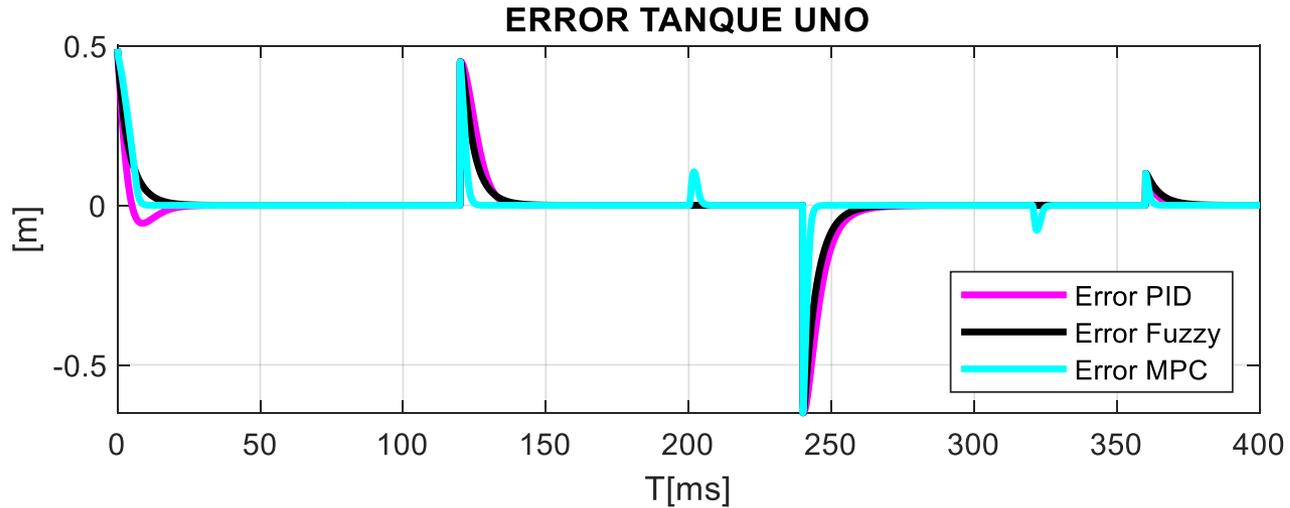


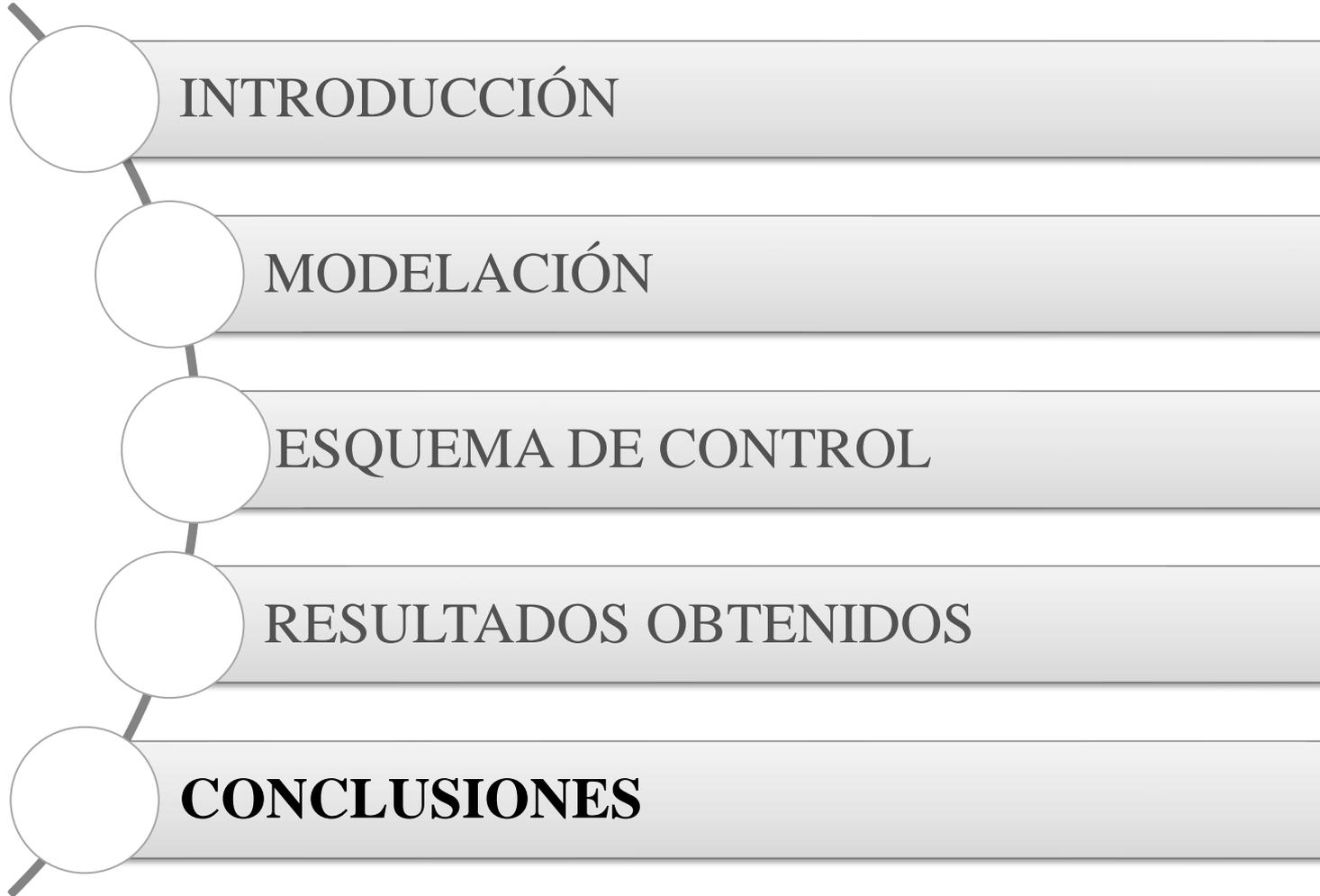












- Los modelos matemáticos permiten corroborar el desempeño del simulador y crear entornos virtuales con características muy cercanas a la realidad.
- Los algoritmos de control son usados para mejorar el control de cualquier proceso sin la intervención continua o al 100% de un humano, las estrategias de control MPC tienen el mejor desempeño, al evaluar: sobre impulso, error en estado estable, tiempo de establecimiento con: el controlador MPC, y el controlador Fuzzy tiene el segundo mejor desempeño.
- La implementación de un sistema virtual permite al usuario interactuar con un sistema de control sin la necesidad de invertir en el mismo, el cual tiene algunas ventajas como: no producir daños en los equipos por errores humanos, ahorro de tiempo al construir dicho sistema. Además, se puede usar la técnica HIL que permite realizar pruebas de señales reales, en un entorno virtual, engañando al controlador para que piense que está en el proceso real.



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

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

**SISTEMA DE ENTRENAMIENTO VIRTUAL PARA EL CONTROL, DISTRIBUCIÓN DE  
OXÍGENO A TRAVÉS DE HARDWARE-IN-THE-LOOP**

**Autore:**

Pablo Norberto Granda Ortiz

Ph.D. Víctor H. Andaluz, *Tutor*

