



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 Ingeniera en
Electrónica e Instrumentación**

**“CONTROL DE PROCESOS DE NIVEL CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE
TANQUES: TÉCNICA DE HARDWARE-IN-THE-LOOP ”**

Autoras

Lozada Herrera, Gissela Fernanda
Pruna Villegas, Jazmín Katherine

Ing. Andaluz Ortiz, Víctor Hugo, Ph.D. *Tutor*
Ing. Naranjo Hidalgo, César Alfredo, MSc. *Cotutor*



ICITED 21

International Conference in
Information Technology & Education
July 15-17, Sao Paulo, Brazil

Herramientas Ver Ayuda

Está compartiendo la pantalla

Deja de

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

ICITED 21

International Conference in Information Technology & Education July 15-17, Sao Paulo, Brazil

**“LEVEL PROCESS CONTROL WITH DIFFERENT TANK CONFIGURATIONS:
HARDWARE-IN-THE-LOOP TECHNIQUE”**

Authors:

- Lozada Herrera Gissela Fernanda gflozada@espe.edu.ec
- Pruna Villegas Jazmin Katherine jkpruna@espe.edu.ec
- Andaluz Ortiz Victor Hugo vandaluz1@espe.edu.ec
- Naranjo Hidalgo César Alfredo canaranjo@espe.edu.ec

123 - Gissela Lozada

43 - Xavier Esteban Ola

122 Jimmy Javier Pilic

Chair: Tiago C. Pereira

122 Jazmin Katherine ...

Herramientas Ver Ayuda

Está compartiendo la pantalla

Deja de

VIRTUAL ENVIRONMENT EXPLANATION

ESPE

123 - Gissela Lozada

Chair: Tiago C. Pereira

123 Jazmin Katherine ...

43. Xavier Esteb...

122 Jimmy Javier Pilic...

ICITED 21

International Conference in
Information Technology & Education
July 15-17, Sao Paulo, Brazil



ICITED 21 <info@icited.org>

para mí ▾

🌐 inglés ▾ > español ▾ [Traducir mensaje](#)

Dear Author,

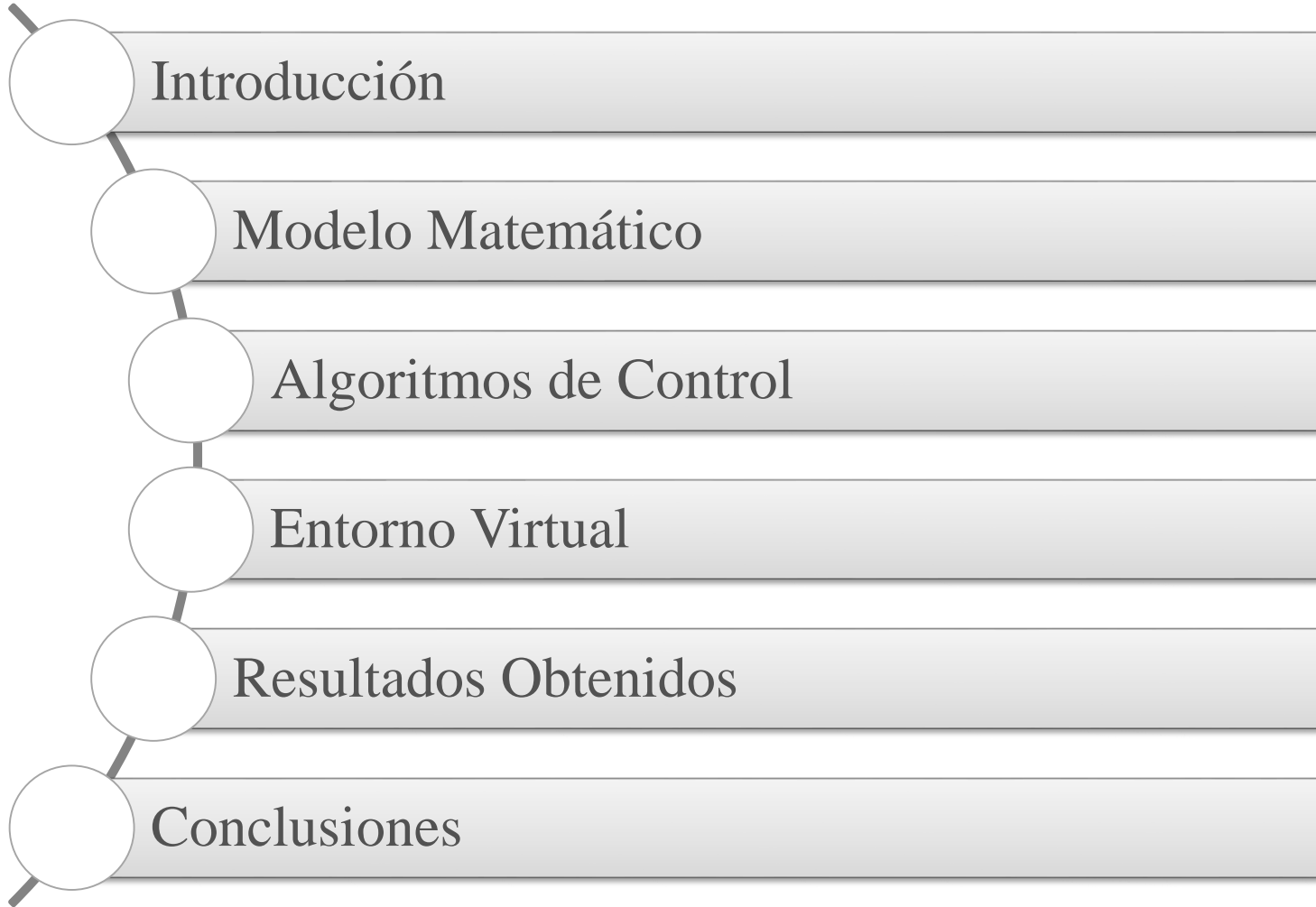
On behalf of the ICITED'21 - The 2021 International Conference in Information Technology & Education, I am pleased to inform you that your submission, titled

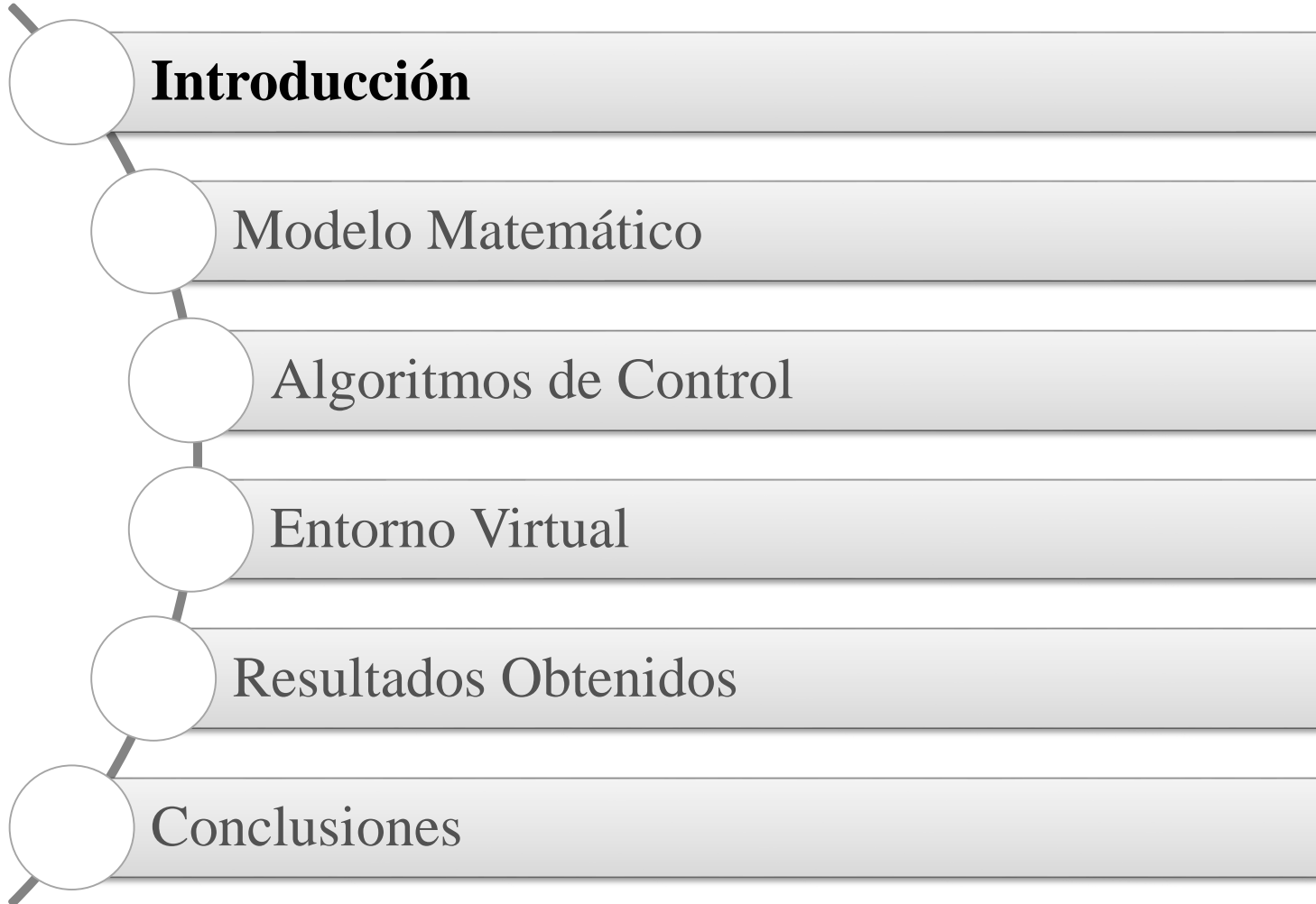
Level Process Control with Different Tank Configurations:
Hardware-in-the-Loop Technique

has been accepted.

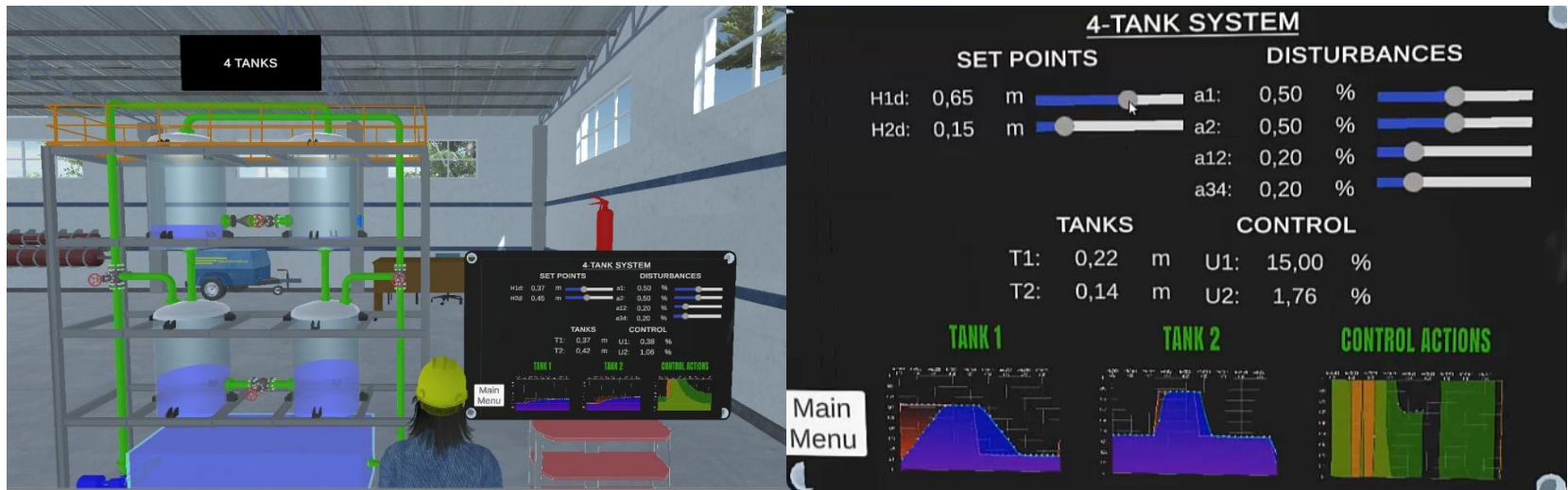
We have included the reviewers' feedback at the end of this message







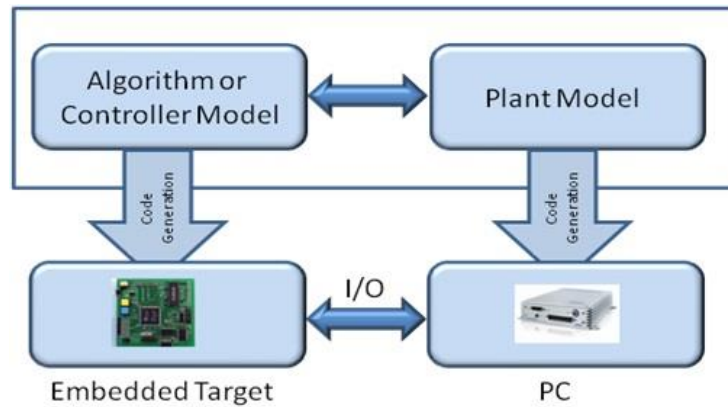
Existen procesos complejos MIMO en industrias que no pueden controlarse de manera óptima mediante algoritmos de control clásicos, lo cual que se resolvió mediante técnicas de control avanzadas, mismas que se evalúan mediante la técnica de simulación en tiempo real Hardware-in-the-Loop y el ambiente virtual del proceso en el entorno gráfico Unity 3D.



Control de Procesos



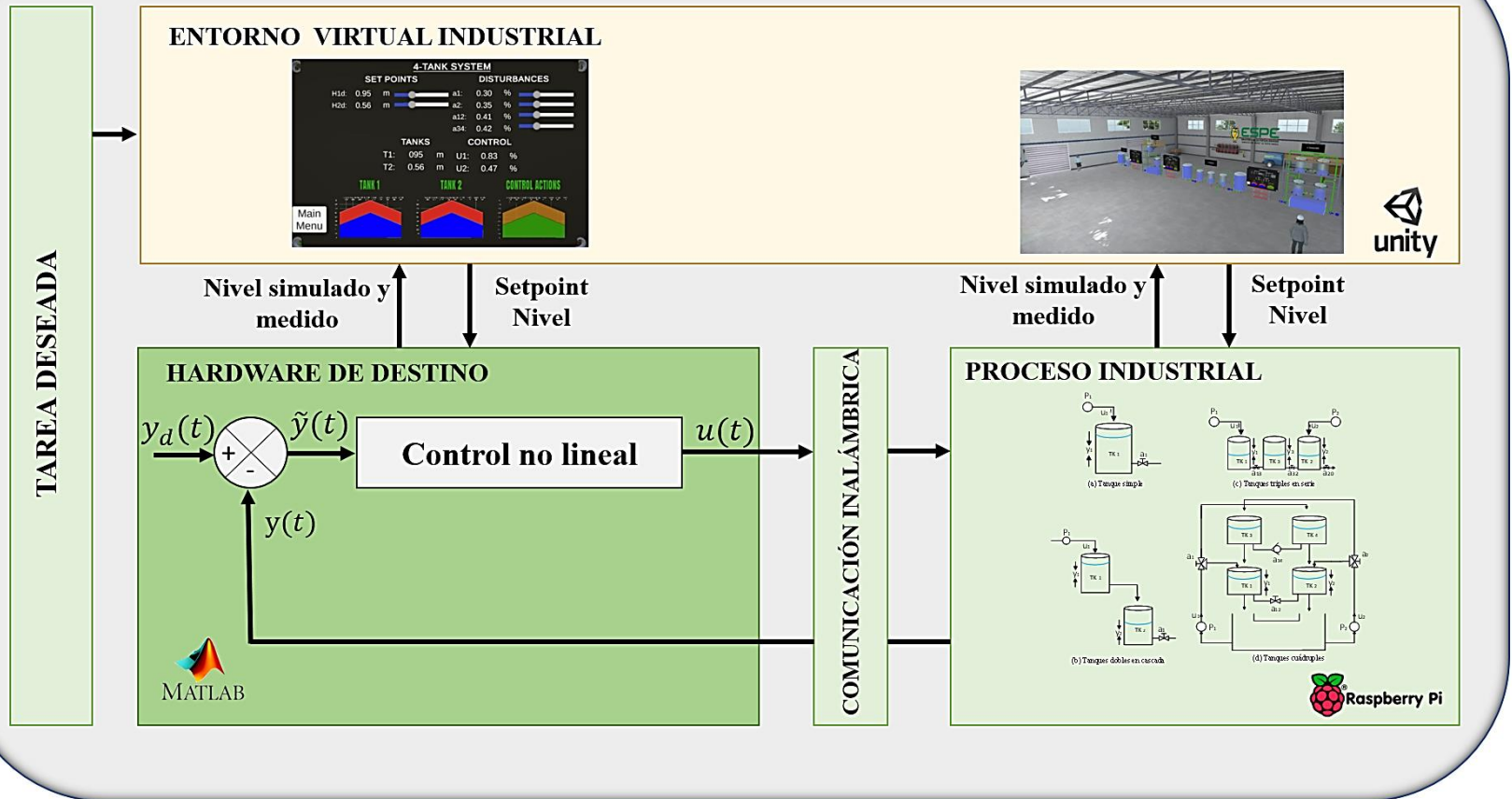
Hardware-in-the-Loop



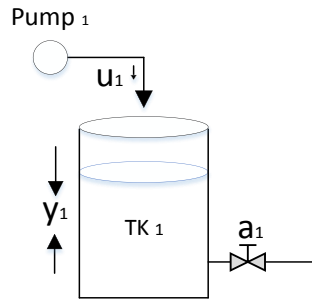
Realidad Virtual



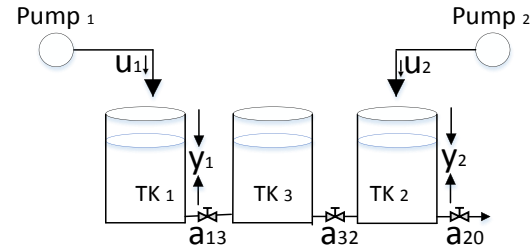
HARDWARE IN THE LOOP



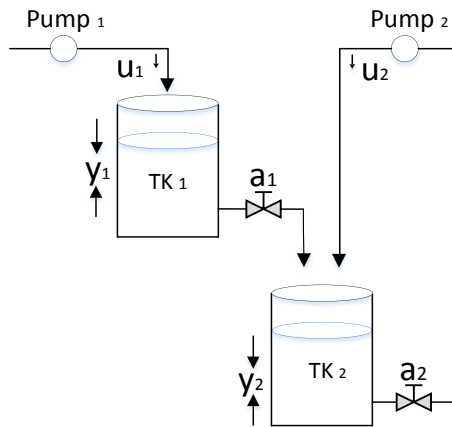
CONFIGURACIONES DE TANQUES



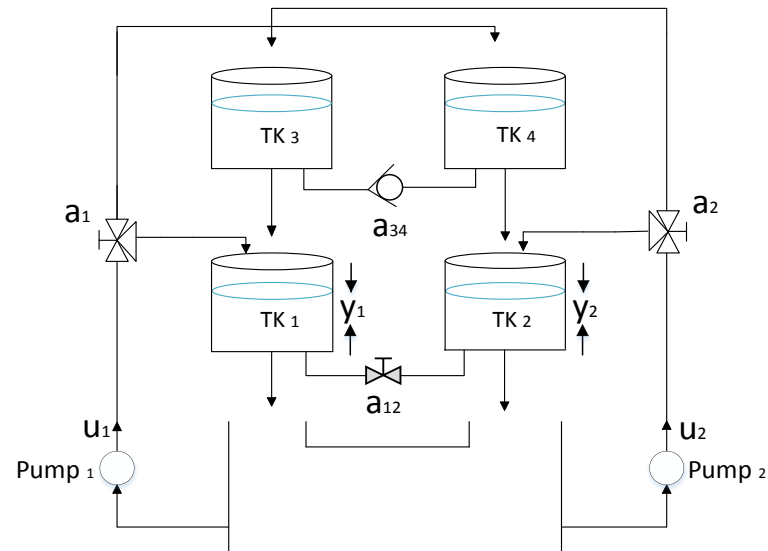
(a) Tanque simple



(c) Tanques triples



(b) Tanques dobles

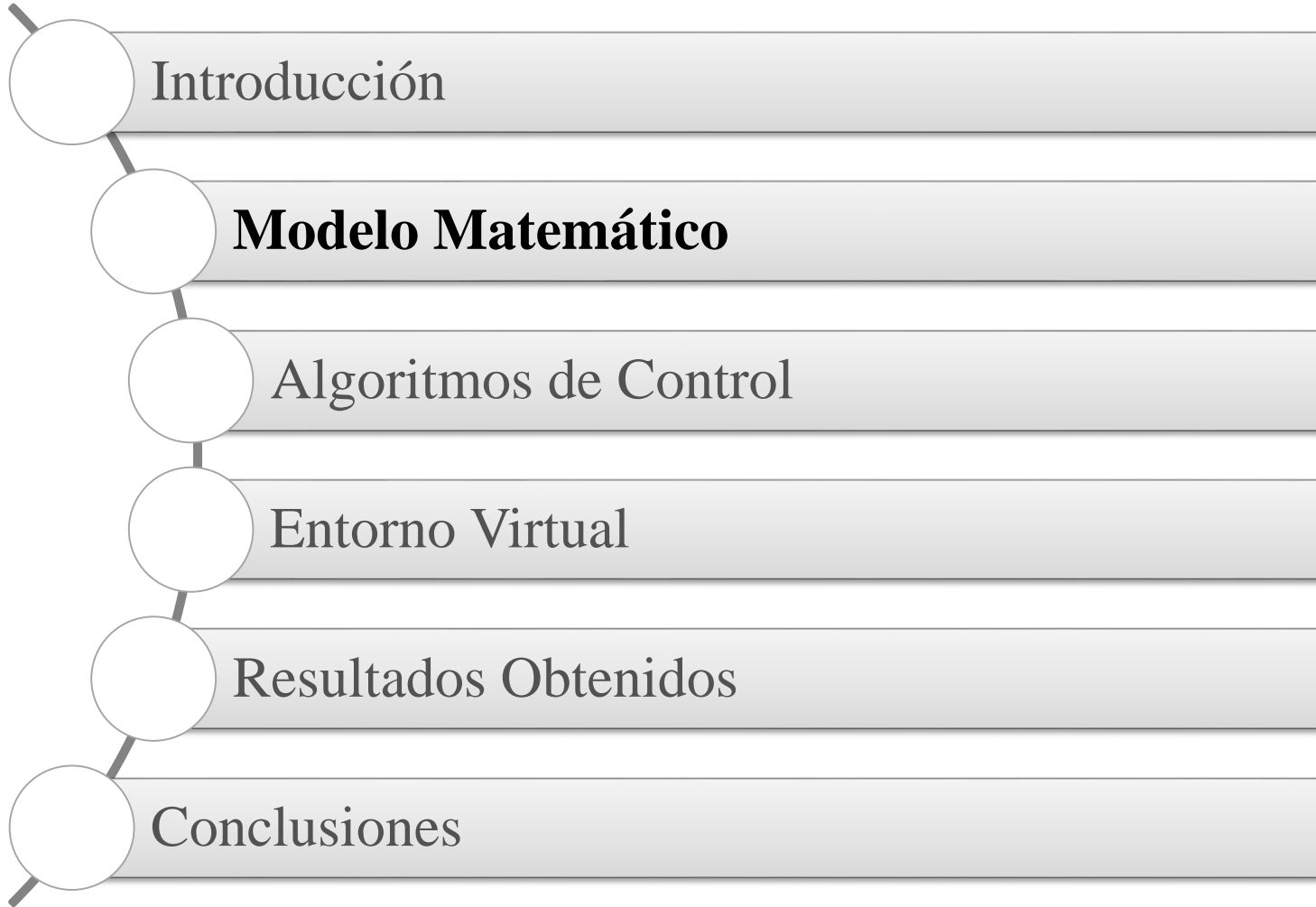


(d) Tanques cuádruples

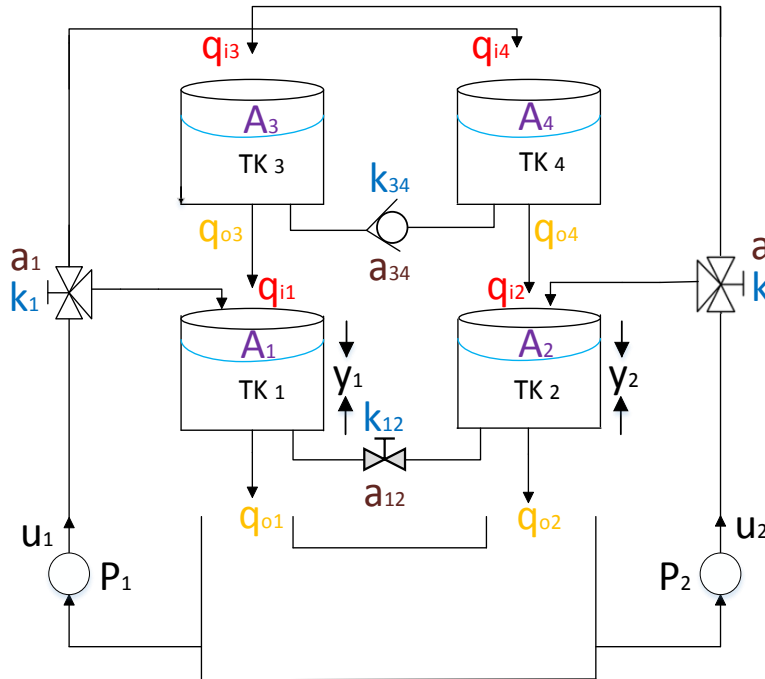
Implementar **algoritmos de control avanzado MIMO** (múltiples entradas – múltiples salidas) a través de la técnica **Hardware-in-the-loop**, HIL, para el control de la variable nivel en diferentes configuraciones de tanques.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Investigar en bases de datos científicas el método heurístico para la obtención del modelo matemático del proceso de nivel; a fin de implementar la técnica de simulación Hardware-in-the-loop.
- ✓ Determinar el **modelo matemático** que represente el comportamiento de un proceso de **control de nivel**, considerando **diferentes configuraciones de tanques**.
- ✓ Proponer un **algoritmo de control MIMO no lineal** para tareas de regulación, basado en el modelo matemático del proceso.
- ✓ Analizar **la estabilidad y robustez** del esquema de control propuesto.
- ✓ Implementar un **esquema de control** basado en la técnica “**Hardware-in-the-loop**” considerando el modelo matemático del proceso.
- ✓ Desarrollar un **entorno virtual inmersivo e interactivo** con el usuario en el motor gráfico Unity 3D que simule un laboratorio de procesos industriales.
- ✓ **Evaluar el desempeño del sistema de control** implementado con la técnica “Hardware-in-the-loop”, con el propósito de validar los modelos matemáticos obtenidos y el comportamiento de los errores de control, virtualizado en el motor gráfico Unity 3D.



Definición de parámetros



a_1, a_2, a_{12}, a_{34} ; Apertura de las válvulas

k_1, k_2, k_{12}, k_{34} ; Constante de las válvulas

A_1, A_2, A_{12}, A_{34} ; Áreas de la sección transversal

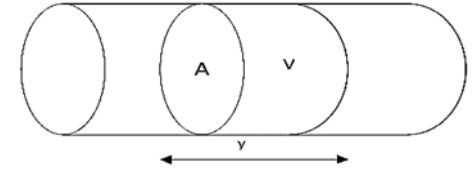
q_i ; Flujo de entrada

q_o ; Flujo de salida

u_1, u_2 ; Voltajes de las bombas

Flujo Volumétrico:

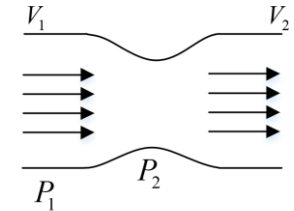
$$Q = \frac{v}{t} = \frac{A \cdot y}{t}$$



Principio de Bernoulli:

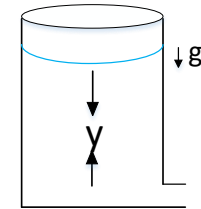
$$P_1 + \rho g \gamma_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \rho g \gamma_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2$$

$$V = \sqrt{2g\gamma}$$



Ley de Torricelli:

$$V = \sqrt{2gy}$$

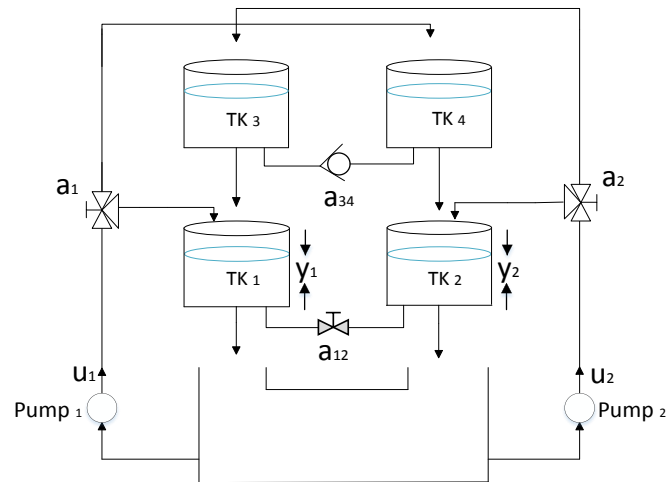


Ecuación del balance de masas:

Acumulación = Entrada - Salida

Tanques cuádruples

$$\left\{ \begin{array}{l} A_1 \frac{dy_1}{dt} = a_1 k_1 \mu_1 + S_3 \sqrt{2gy_3} - S_1 \sqrt{2gy_1} - \operatorname{sgn}(y_1 - y_2) a_{12} k_{12} \sqrt{2g(y_1 - y_2)} \\ A_2 \frac{dy_2}{dt} = a_2 k_2 \mu_2 + S_4 \sqrt{2gy_4} + \operatorname{sgn}(y_1 - y_2) a_{12} k_{12} \sqrt{2g(y_1 - y_2)} - S_2 \sqrt{2gy_2} \\ A_3 \frac{dy_3}{dt} = (1 - a_2) k_2 \mu_2 - S_3 \sqrt{2gy_3} + a_{34} k_{34} \sqrt{2g(y_4 - y_3)} \\ A_4 \frac{dy_4}{dt} = (1 - a_1) k_1 \mu_1 - S_4 \sqrt{2gy_4} - a_{34} k_{34} \sqrt{2g(y_4 - y_3)} \end{array} \right.$$



(d) Tanques cuádruples

Tanque simple

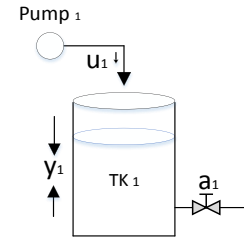
$$A_1 \frac{dy_1}{dt} = u_1 - a_1 k_1 \sqrt{2gy_1}$$

Sistema de tanques dobles

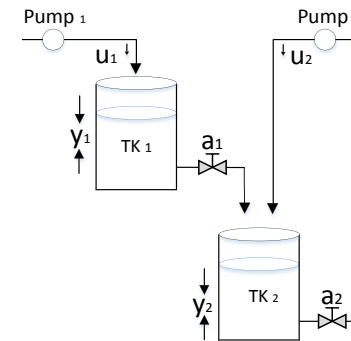
$$\begin{cases} A_1 \frac{dy_1}{dt} = u_1 - s_1 \sqrt{2gy_1} \\ A_2 \frac{dy_2}{dt} = s_1 \sqrt{2gy_1} - a_1 k_1 \sqrt{2gy_2} \end{cases}$$

Sistemas de tanques triples

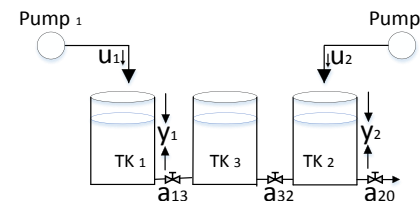
$$\begin{cases} A_1 \frac{dy_1}{dt} = u_1 - a_{13} k_{13} \sqrt{2g |y_1 - y_3|} \\ A_2 \frac{dy_2}{dt} = u_2 + a_{32} k_{32} \sqrt{2g |y_3 - y_2|} - a_{20} k_{20} \sqrt{2gy_2} \\ A_3 \frac{dy_3}{dt} = a_{13} k_{13} \sqrt{2g |y_1 - y_3|} - a_{32} k_{32} \sqrt{2g |y_3 - y_2|} \end{cases}$$



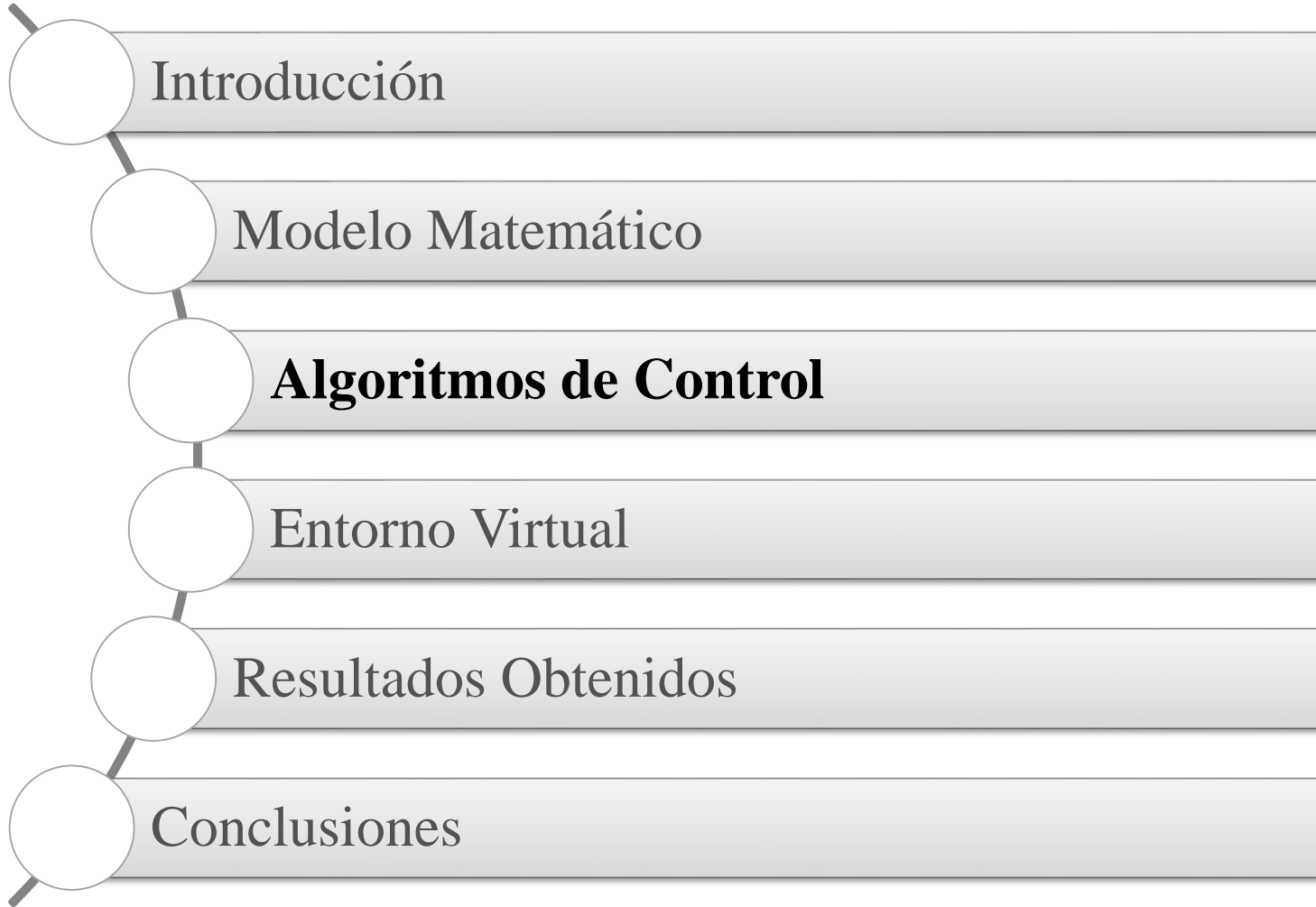
(a) Tanque simple

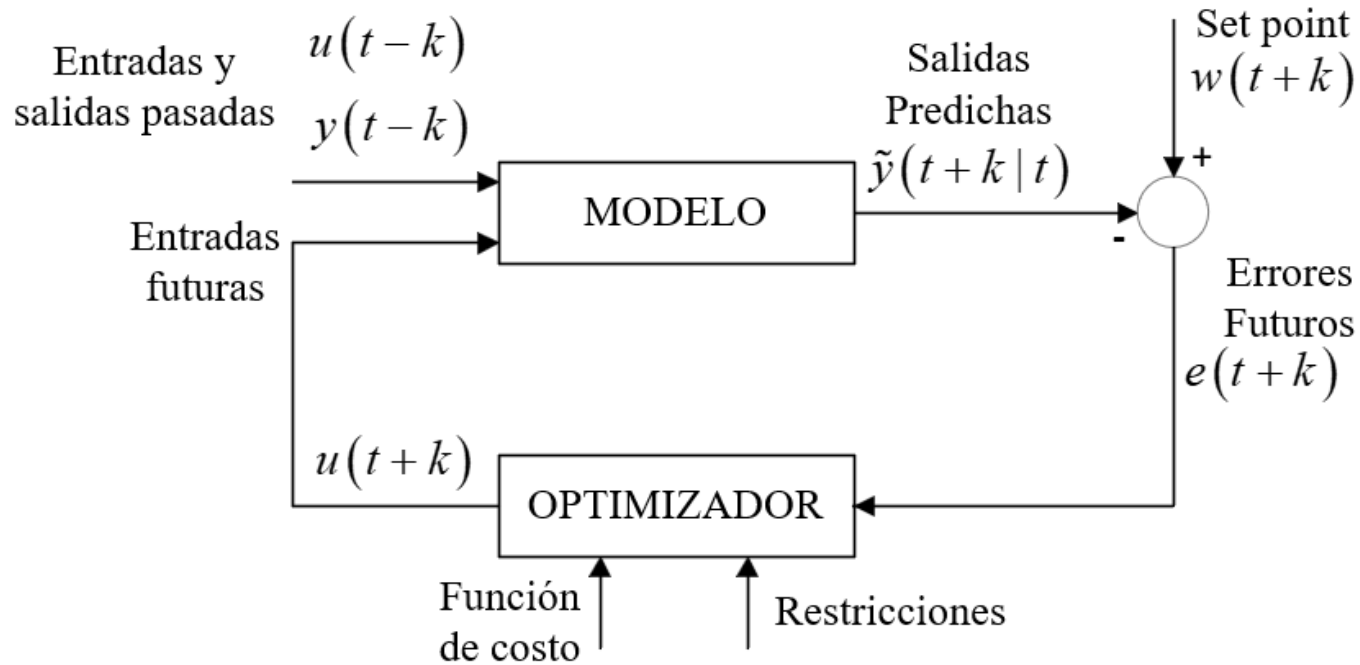


(b) Tanques dobles

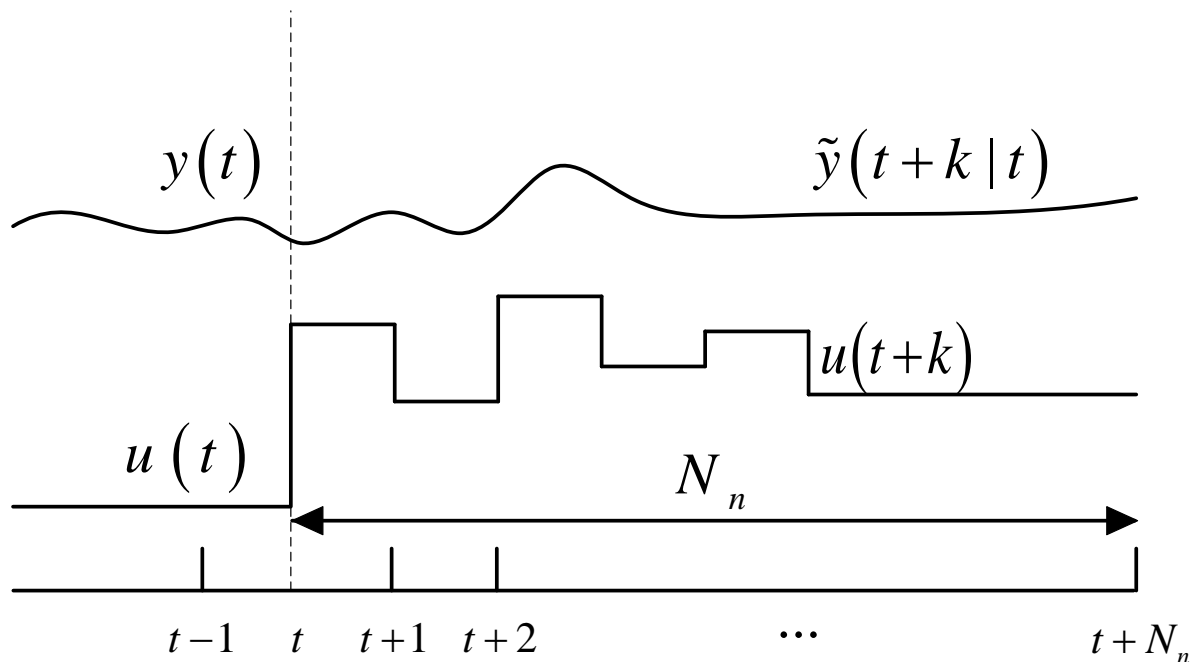


(c) Tanques triples





$$C(N_1, N_2, N_n) = \sum_{k=N_1}^{N_2} \delta_1(k) \left[\tilde{y}(t+k|t) - w(t+k) \right]^2 + \sum_{k=1}^{N_n} \delta_2(k) \left[\Delta u(t+k-1) \right]^2$$



Se asume que:

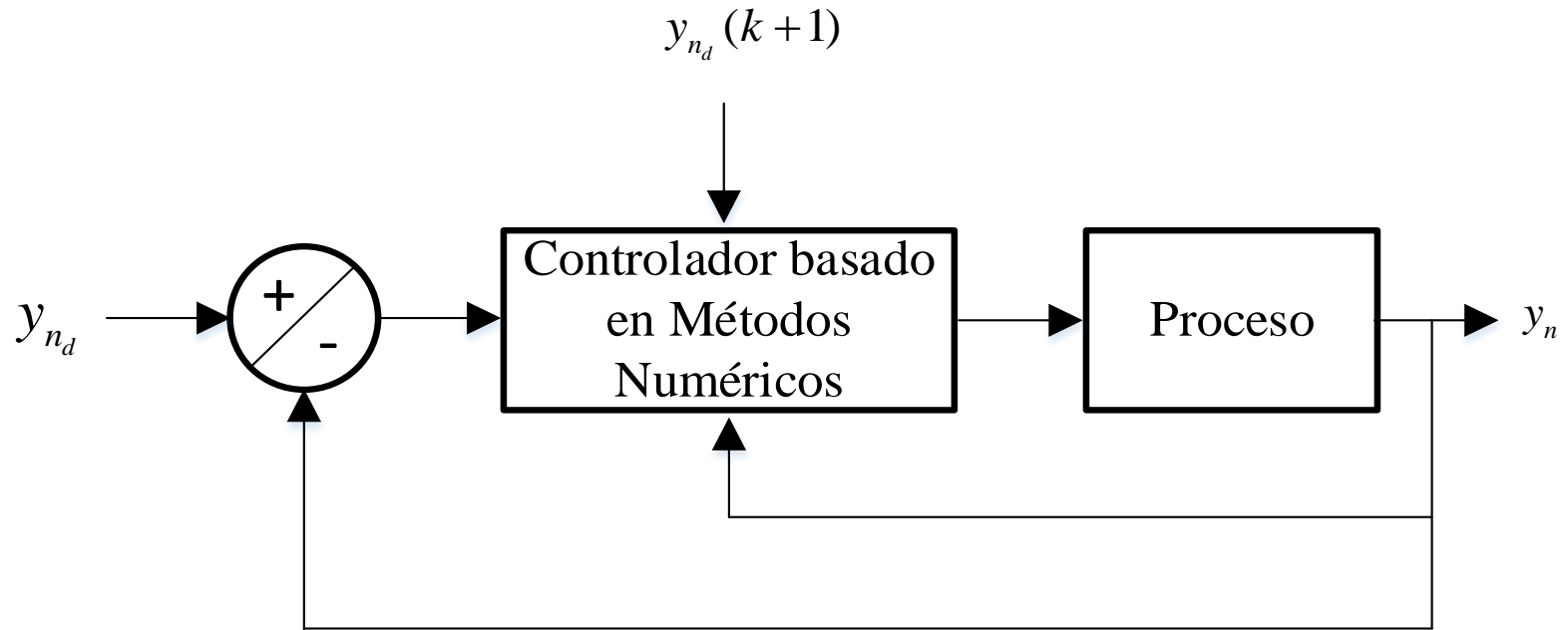
1. $f(\tilde{y}, u)$ es continua de acuerdo a Lipschitz y $f(0, 0) = 0$.
2. $g_{\tilde{y}}(w_s)$ es continua en λ_s .
3. $\delta_0 : \square^p \rightarrow \square$ es convexa y definida positiva. Además,
 $\hat{w}_s = \arg \min_{w_s \in \lambda_s} \delta_0(w_s - w_t)$ es único.
4. Existe una función $\sum_{i=0}^{N-1} |u(i) - u_s| \leq \zeta(|\tilde{y} - \tilde{y}_s|)$.
5. El conjunto de salidas admisibles λ_s es convexo.

Asumiendo que se cumplen estas hipótesis, para cada estado inicial y_0 , el sistema es estable, si:

(i) Si $w_t \in \lambda_s$, entonces $\lim_{k \rightarrow \infty} |y(k) - w_t| = 0$.

(ii) Si, $w_t \notin \lambda_s$ entonces, $\lim_{k \rightarrow \infty} |y(k) - \hat{w}_t| = 0$ en donde

$$\hat{w}_s = \arg \min_{w_s \in \lambda_s} \delta_0(w_s - w_t).$$



Modelo discretizado del sistema:

$$\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{y}(k) + T_0 \mathbf{J}(\mathbf{y}(k)) \mathbf{u}_{ref}(k)$$

Mediante Markov:

$$\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{W}(\mathbf{y}_d(k) - \mathbf{y}(k))$$

Ley de control:

$$u_{ref}(k) = \frac{\mathbf{J}^\#(\mathbf{y}(k))(\mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{W}(\mathbf{y}_d(k) - \mathbf{y}(k)) - \mathbf{y}(k))}{T_0} ; k \in \{0, 1, 2, 3, \dots\}$$

Ecuación de lazo cerrado:

$$\mathbf{u}(k) \equiv \mathbf{u}_{ref}(k)$$

Modelo discretizado:

$$\mathbf{y}(k+1) = \mathbf{y}(k) + T_0 \mathbf{J}(\mathbf{y}(k)) \mathbf{u}(k)$$

Ley de control:

$$\mathbf{u}_{ref}(k) = \frac{\mathbf{J}^\#(\mathbf{y}(k))(\mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{W}(\mathbf{y}_d(k) - \mathbf{y}(k)) - \mathbf{y}(k))}{T_0}$$

Igualando los voltajes:

$$\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{y}(k) = T_0 \mathbf{J}(\mathbf{y}(k)) \left(\frac{1}{T_0} \mathbf{J}^\#(\mathbf{y}(k))(\mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{W}(\mathbf{y}_d(k) - \mathbf{y}(k)) - \mathbf{y}(k)) \right)$$
$$\tilde{\mathbf{y}}(k+1) = \mathbf{W} \tilde{\mathbf{y}}(k)$$

k	$\tilde{\mathbf{y}}(k+1)$	$W \tilde{\mathbf{y}}(k)$
1	$\tilde{\mathbf{y}}(2)$	$W \tilde{\mathbf{y}}(1)$
2	$\tilde{\mathbf{y}}(3)$	$W \tilde{\mathbf{y}}(2) = W^2 \tilde{\mathbf{y}}(1)$
3	$\tilde{\mathbf{y}}(4)$	$W^3 \tilde{\mathbf{y}}(1)$
\vdots	\vdots	\vdots
n	$\tilde{\mathbf{y}}(n+1)$	$W^n \tilde{\mathbf{y}}(1)$

El controlador es asintóticamente estable:

$\Rightarrow \tilde{\mathbf{y}}(k) \rightarrow 0$, cuando $k \rightarrow \infty$,

y $0 < \text{diag}(W_{11}, W_{22}) < 1$

Para el análisis de robustez se considera:

$$\mathbf{u}(k) = \mathbf{u}_{ref}(k) - \tilde{\mathbf{u}}(k)$$

$$\frac{1}{T_0}(\mathbf{y}(k+1) - \mathbf{y}(k)) = \frac{1}{T_0} \mathbf{J}(\mathbf{y}(k)) \mathbf{J}^\# (\mathbf{y}_d(k+1) - \mathbf{y}(k) - \mathbf{W}(\tilde{\mathbf{y}}(k)) - \tilde{\mathbf{u}}(k))$$

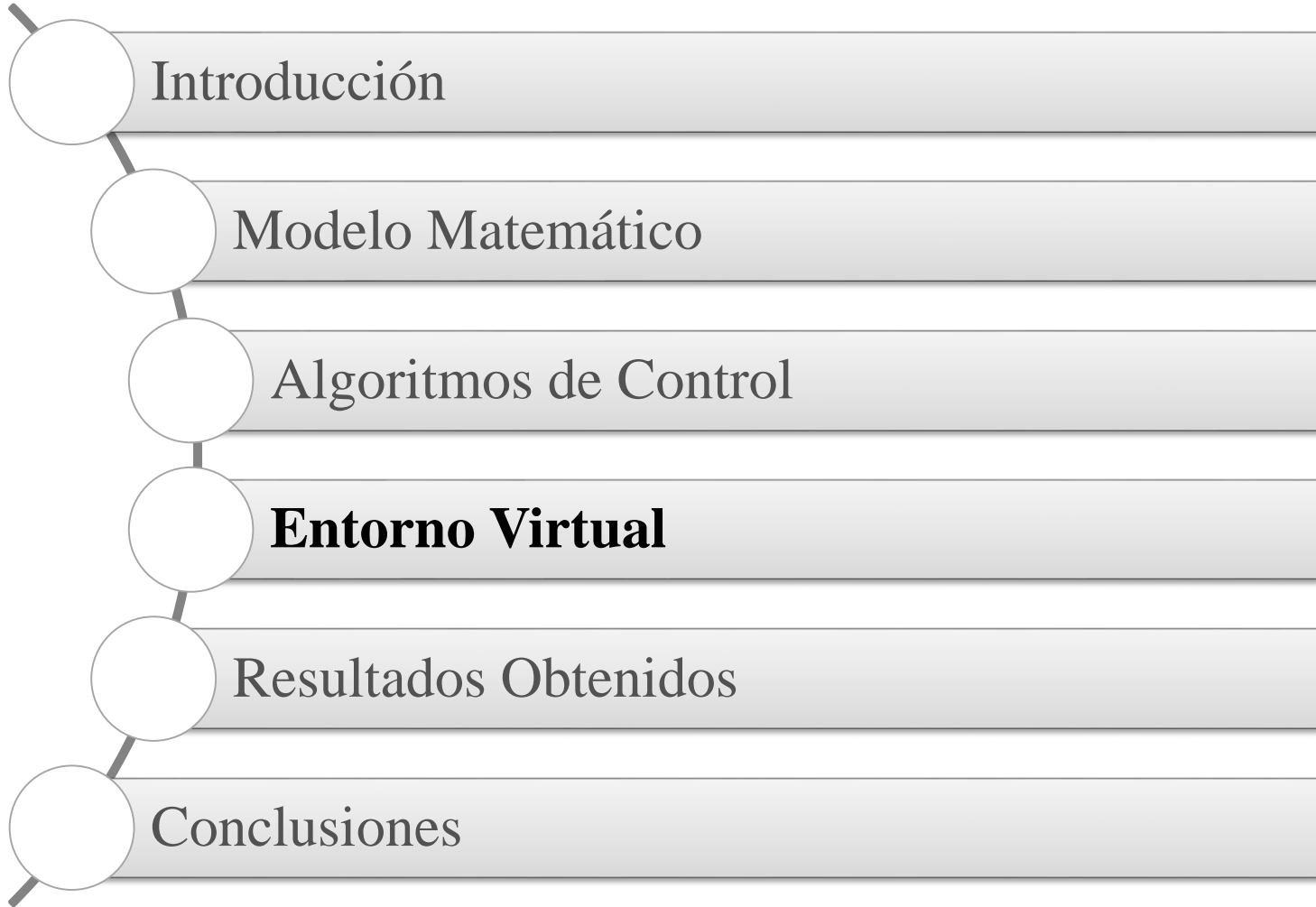
Simplificando los términos, la ecuación se define como:

$$\tilde{\mathbf{y}}(k+1) = \mathbf{W}\tilde{\mathbf{y}}(k) + \mathbf{J}(\mathbf{y}(k))\tilde{\mathbf{u}}(k)$$

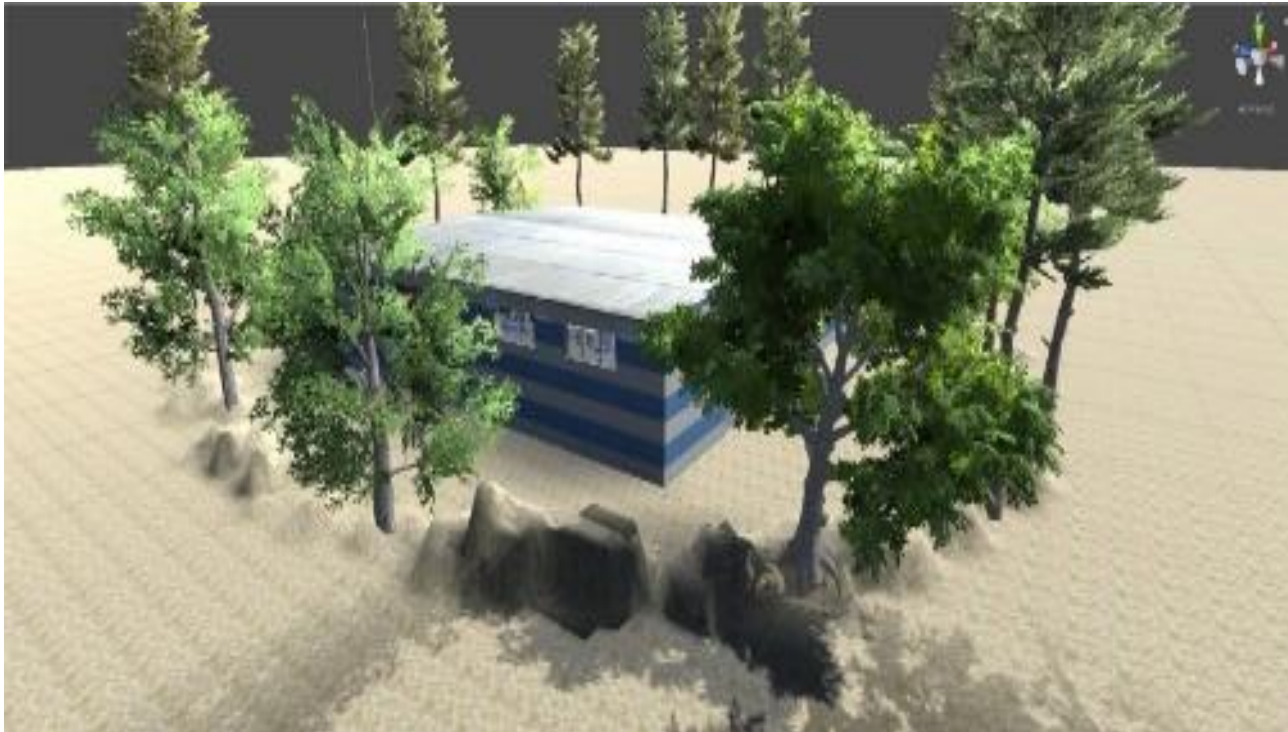
$$\tilde{\mathbf{y}}(n+1) = \mathbf{W}^n \tilde{\mathbf{y}}(n) + \mathbf{J}(\mathbf{y}(n))\tilde{\mathbf{u}}(n)$$

$$\tilde{\mathbf{y}}(n) \rightarrow 0, \text{ cuando } n \rightarrow \infty \quad \text{y} \quad 0 < \text{diag}(W_{11}, W_{22}) < 1$$

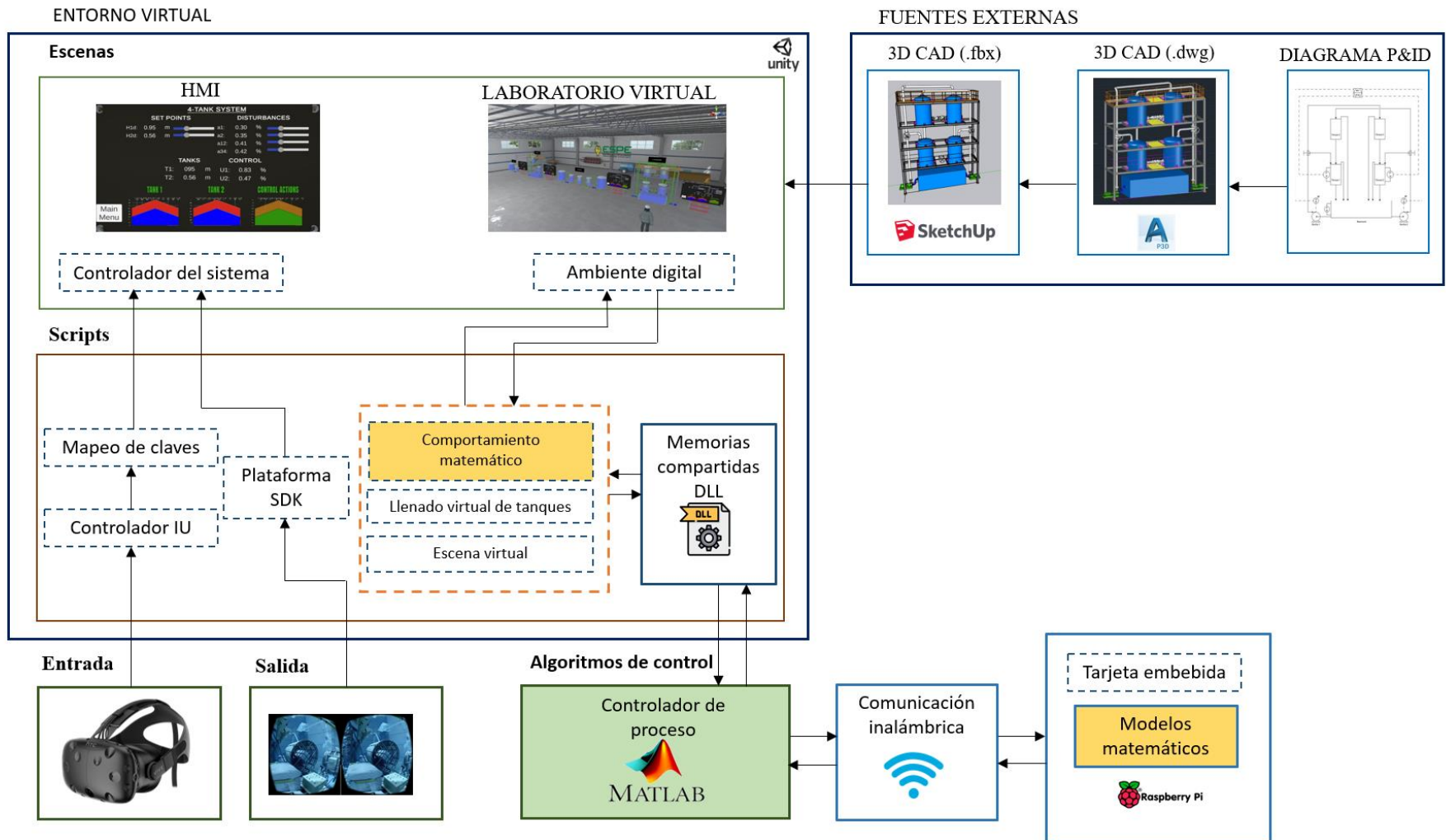
$$\Rightarrow \|\tilde{\mathbf{y}}(n+1)\| < \|\mathbf{J}(\mathbf{y}(n))\tilde{\mathbf{u}}(n)\|$$

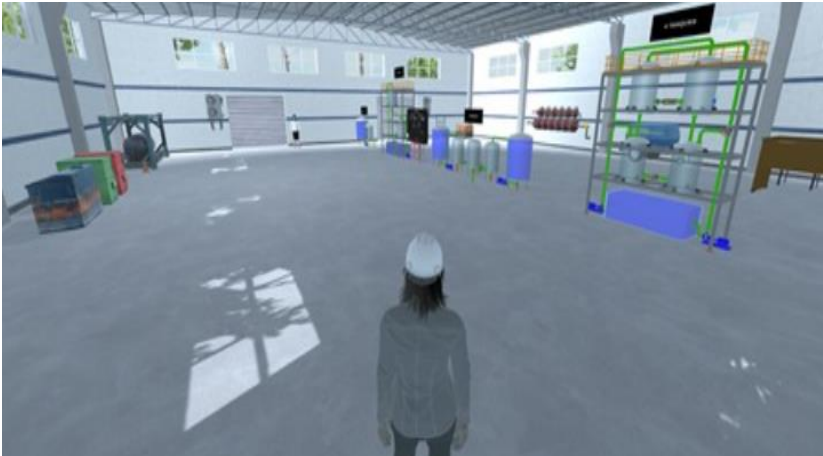


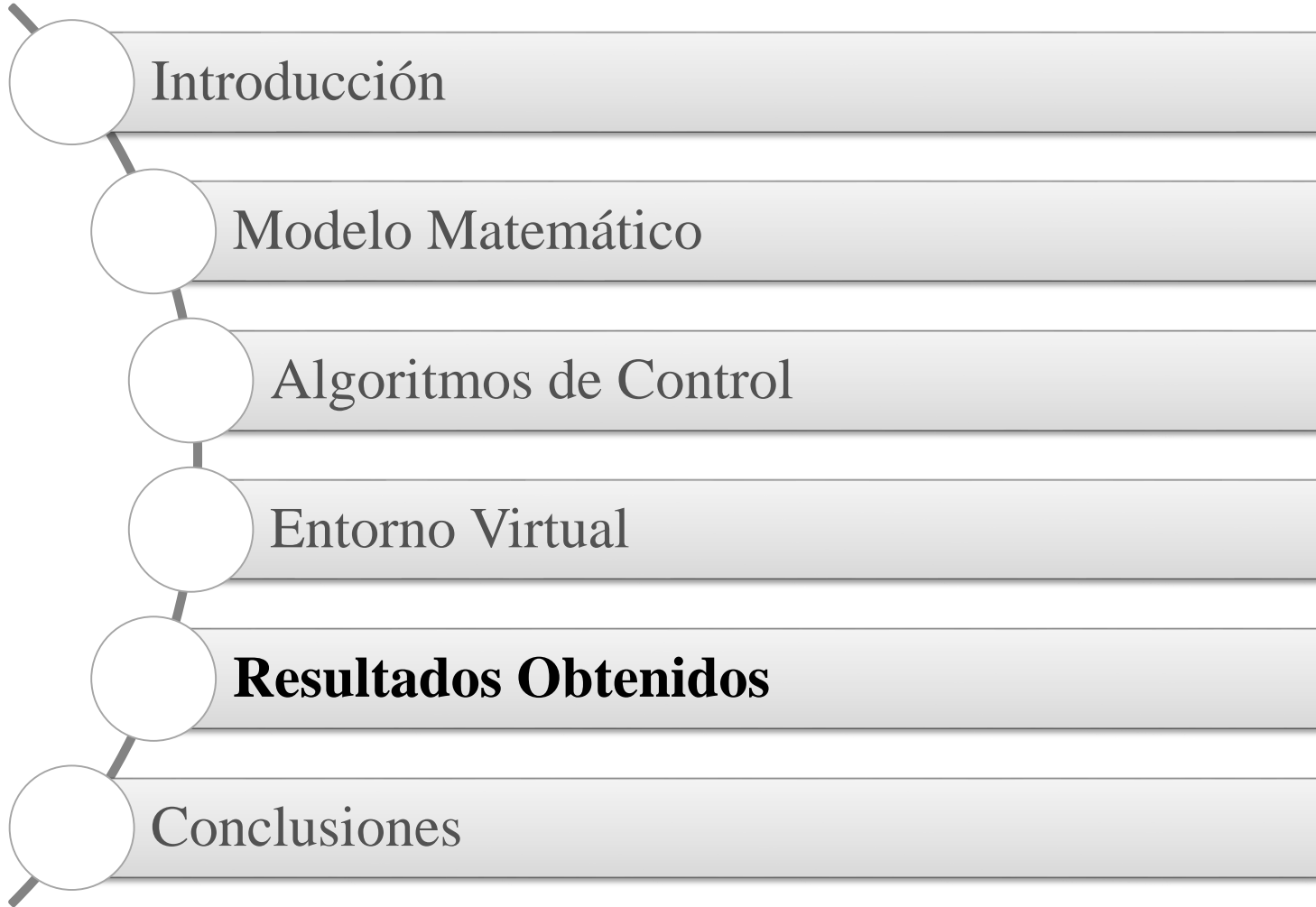
En un laboratorio virtual se presentan cuatro configuraciones de tanques, con los que el usuario puede interactuar para visualizar, monitorear y controlar las variables del proceso de nivel.



EXPLICACIÓN DEL ENTORNO VIRTUAL



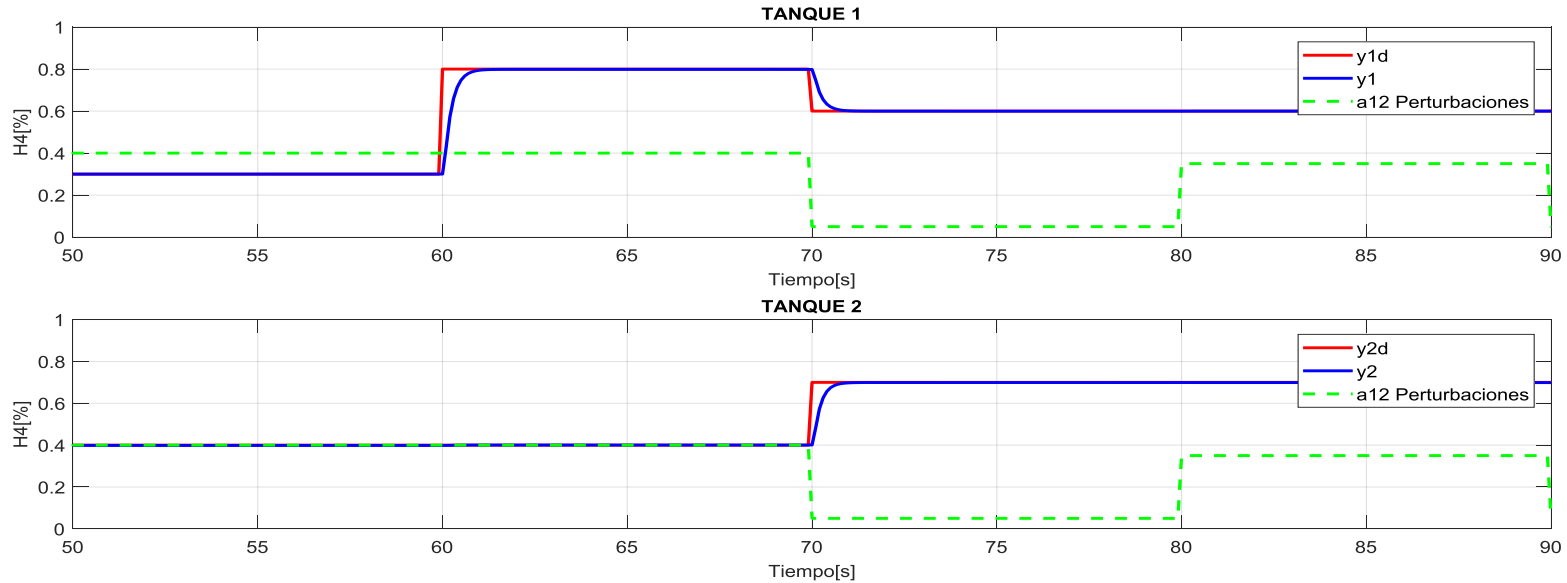




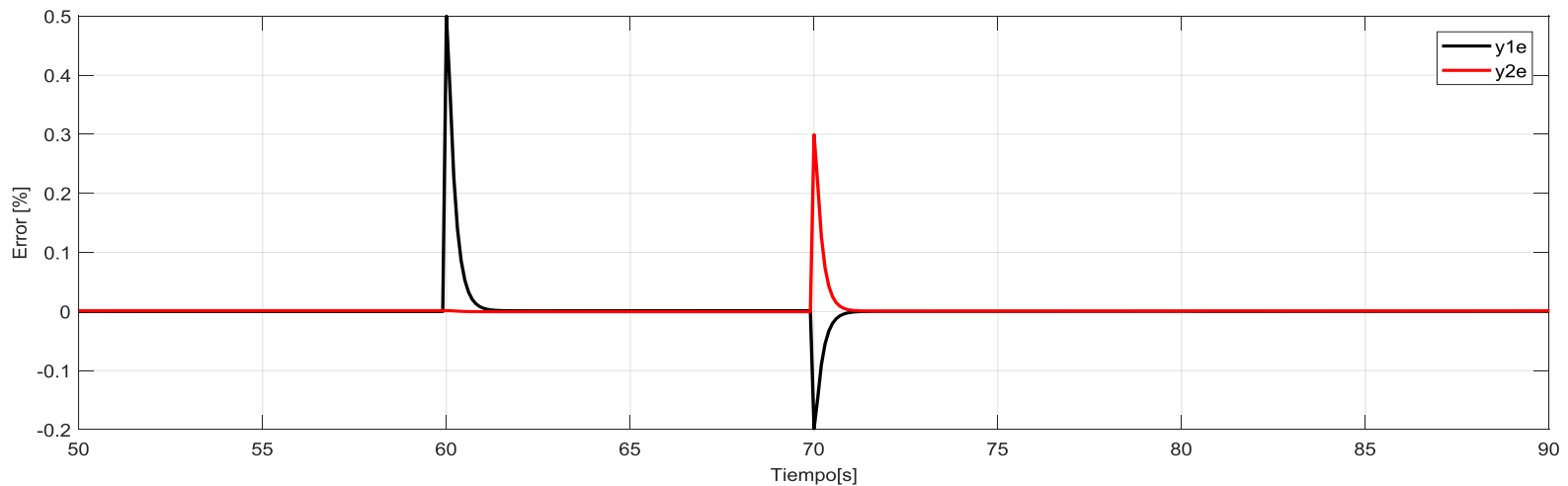


CONFIGURACIÓN TANQUES CUÁDRUPLES

a. Curva de respuesta del control MPC

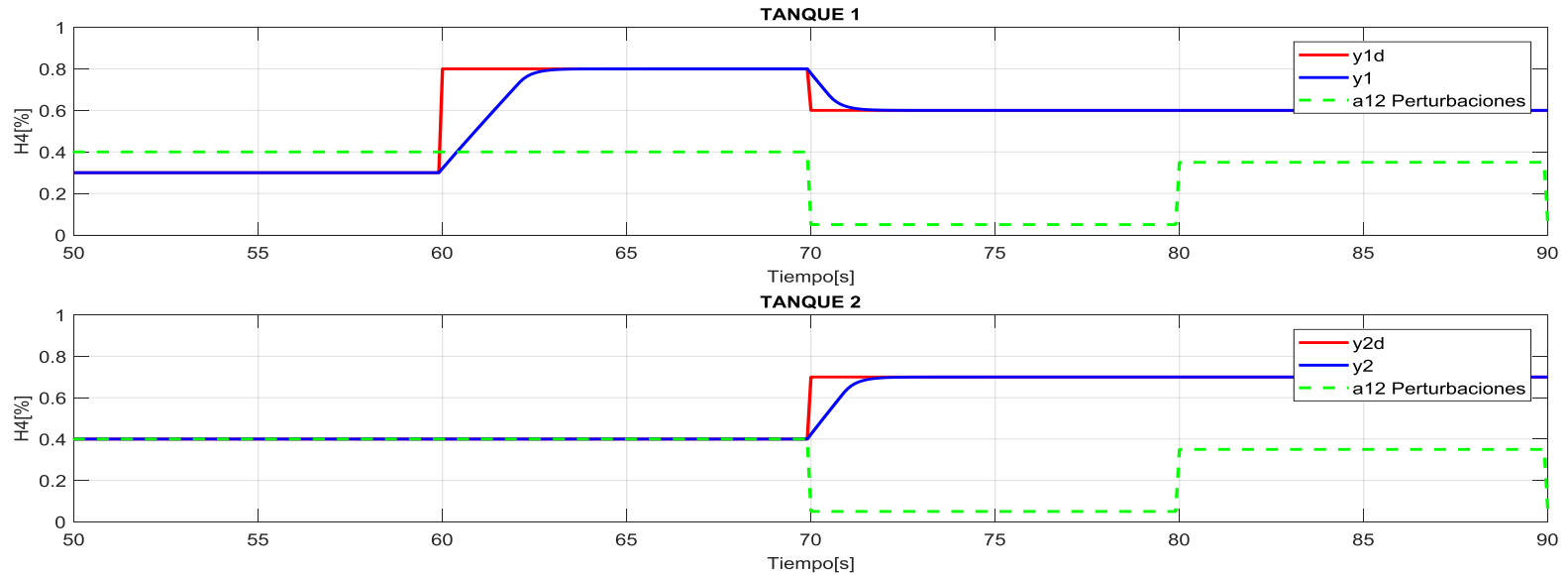


b. Curva de errores del controlador MPC

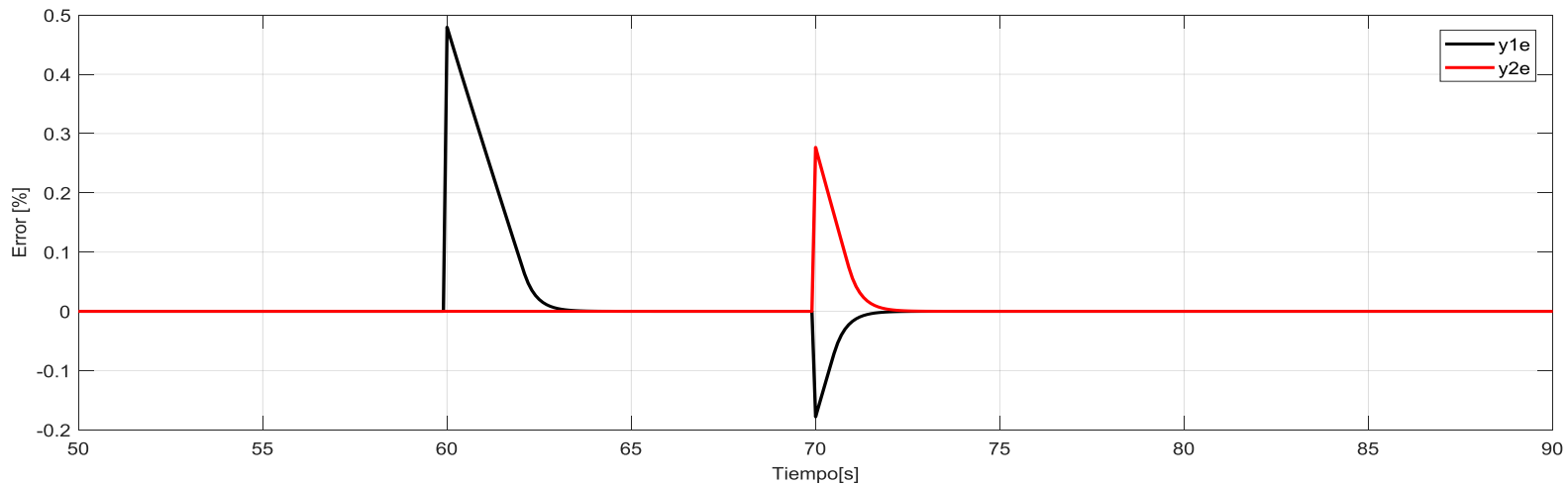


CONFIGURACIÓN TANQUES CUÁDRUPLES

a. Curva de respuesta del control basado en Métodos Numéricos

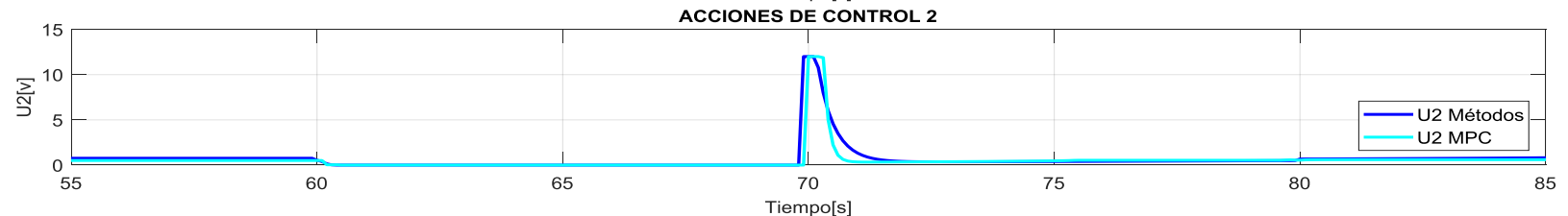
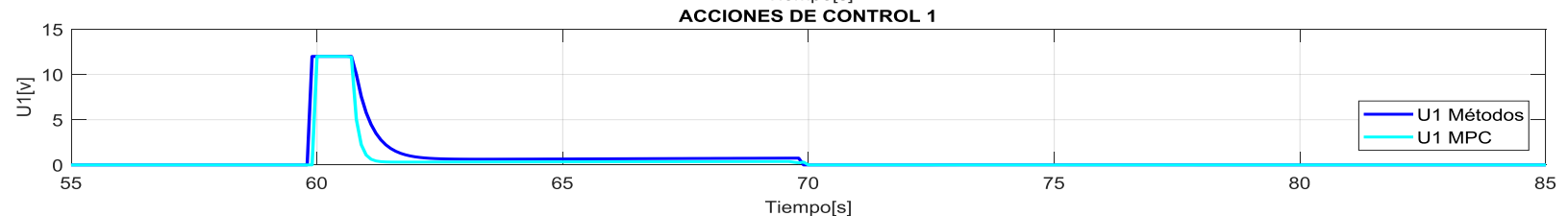
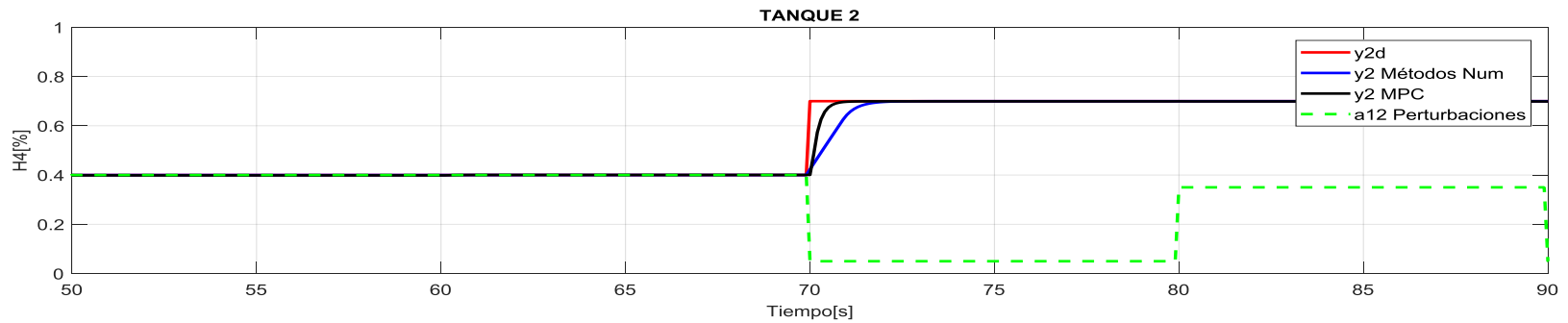
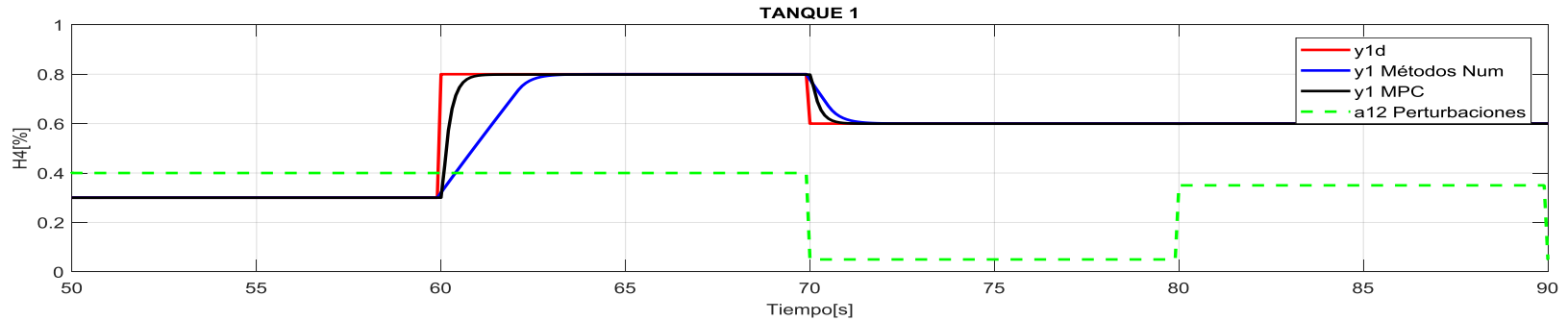


b. Curva de errores del controlador basado en Métodos Numéricos.



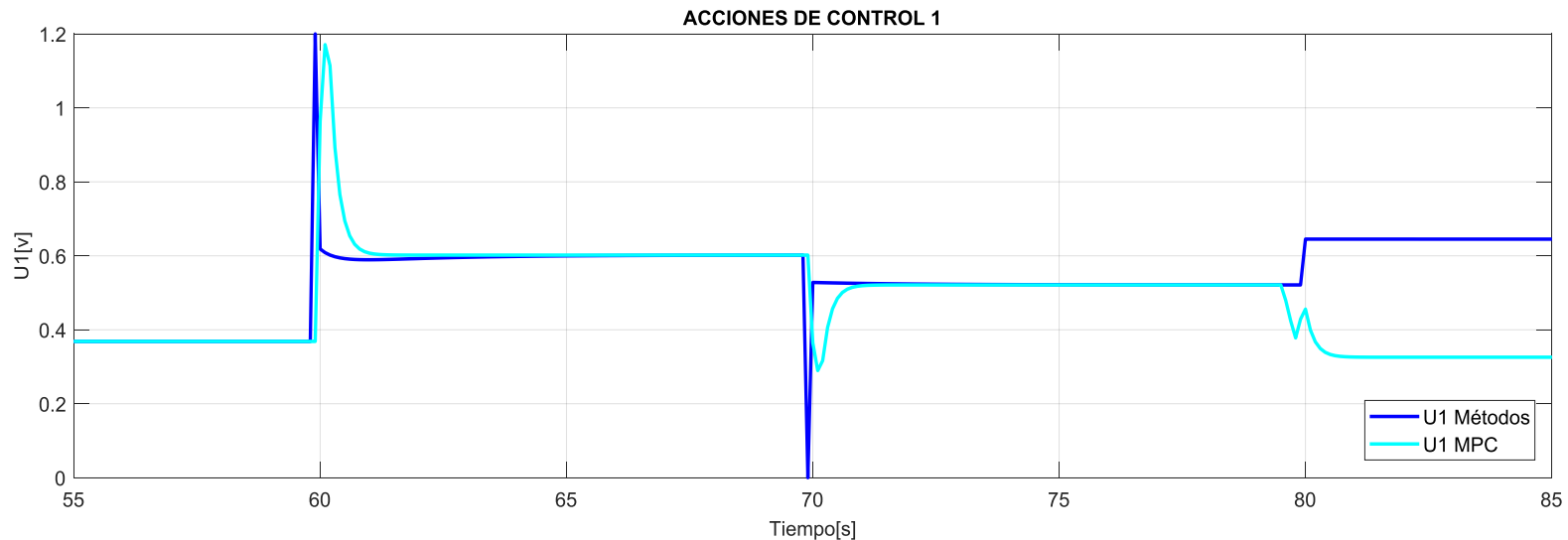
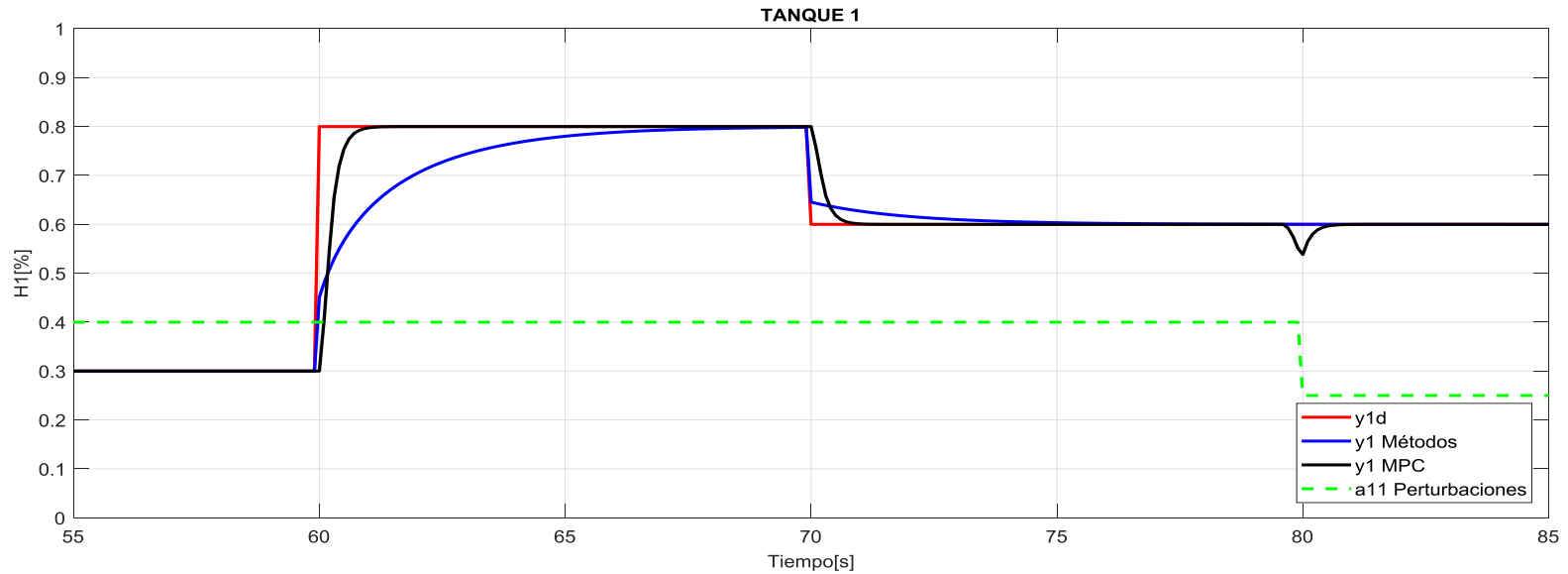
CONFIGURACIÓN TANQUES CUÁDRUPLES

Comparación del control MPC y Control Basado en Métodos Numéricos



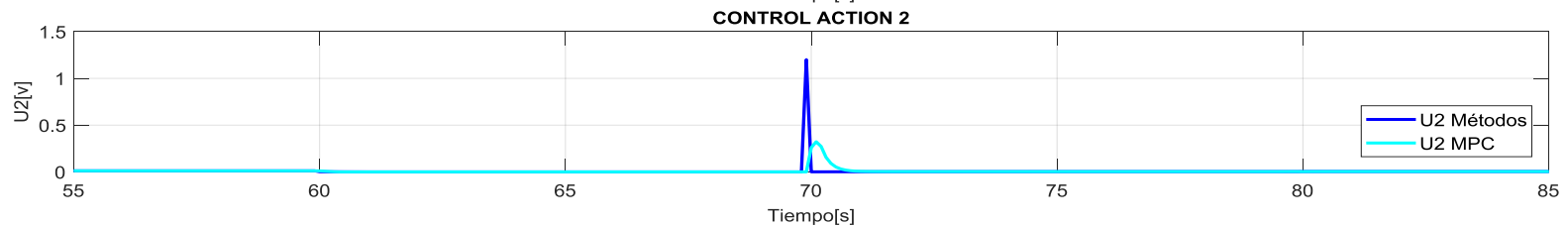
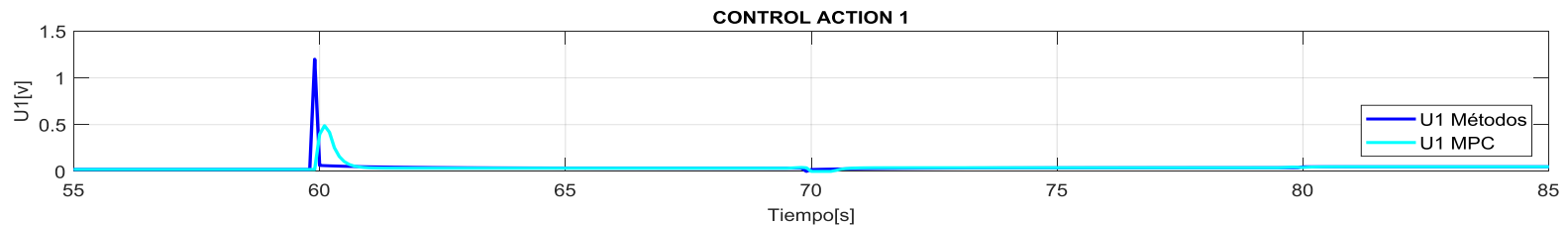
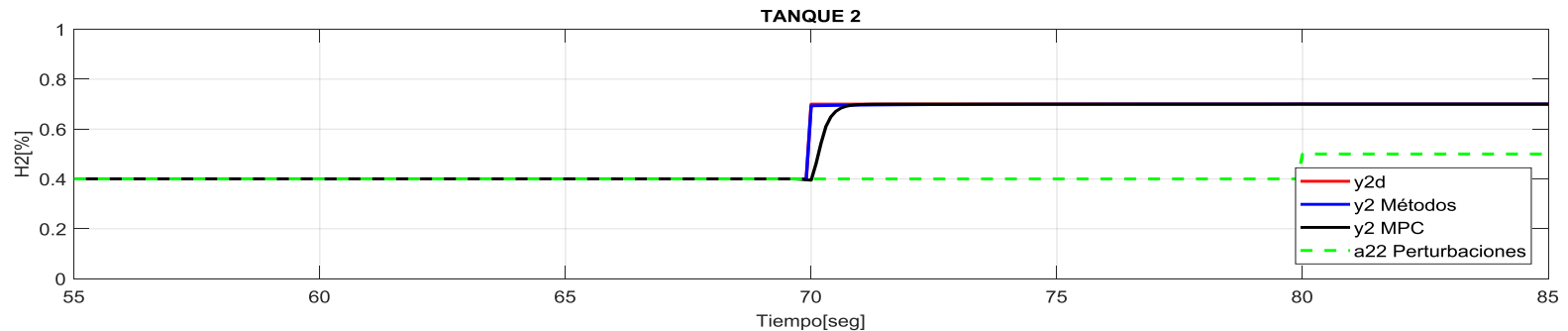
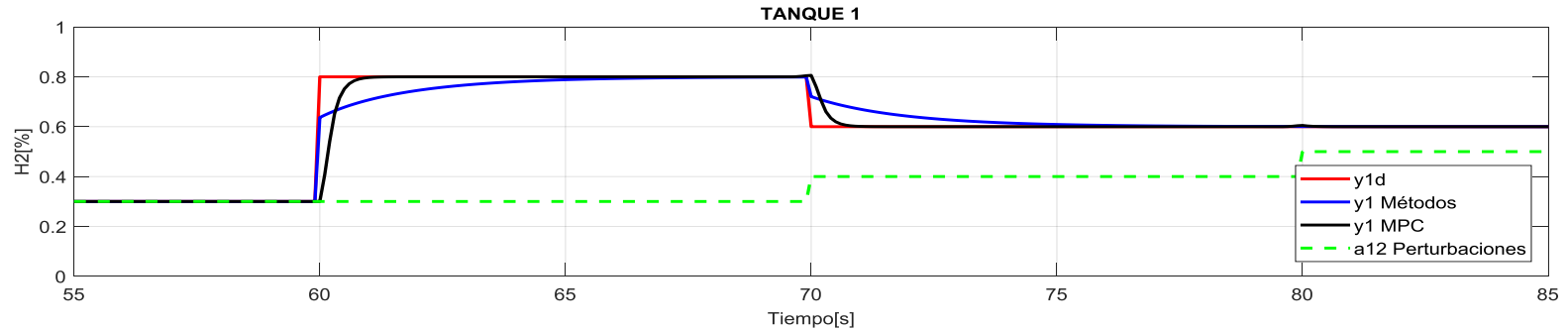
CONFIGURACIÓN TANQUE SIMPLE

Comparación del control MPC y Control Basado en Métodos Numéricos



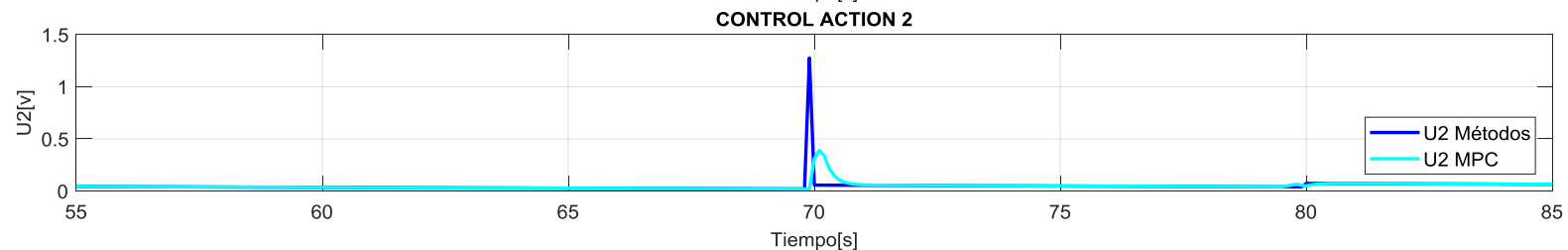
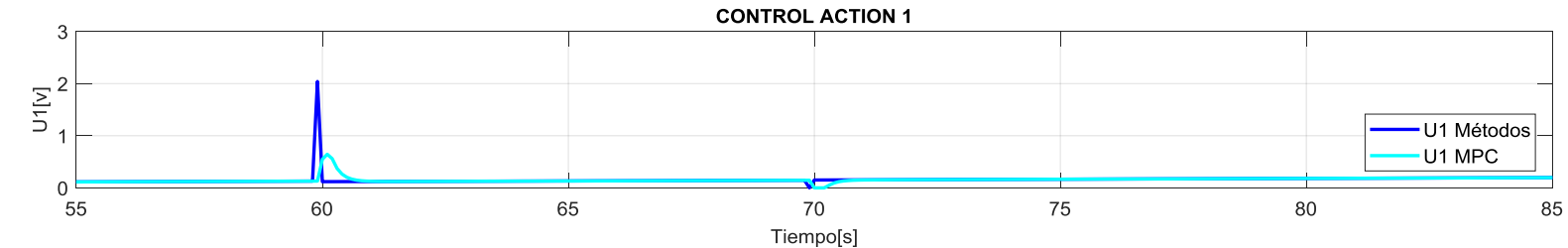
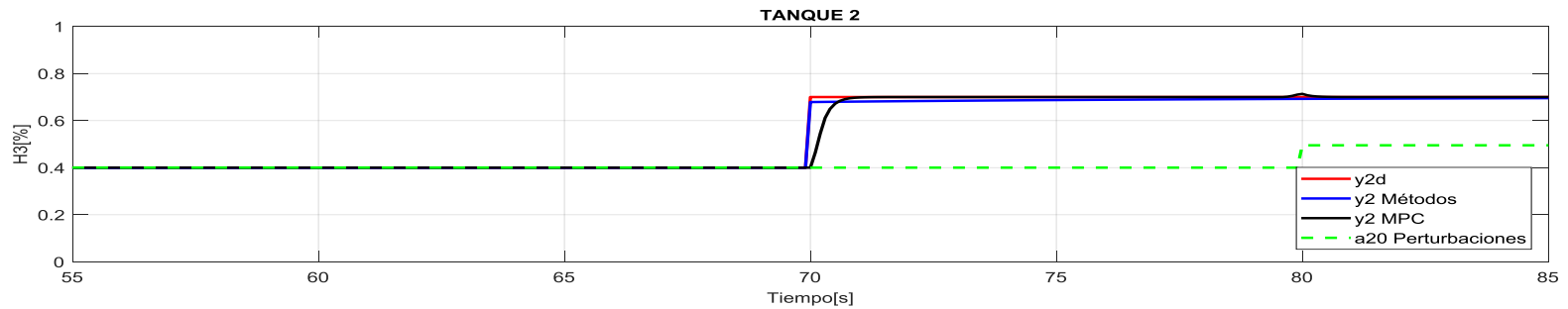
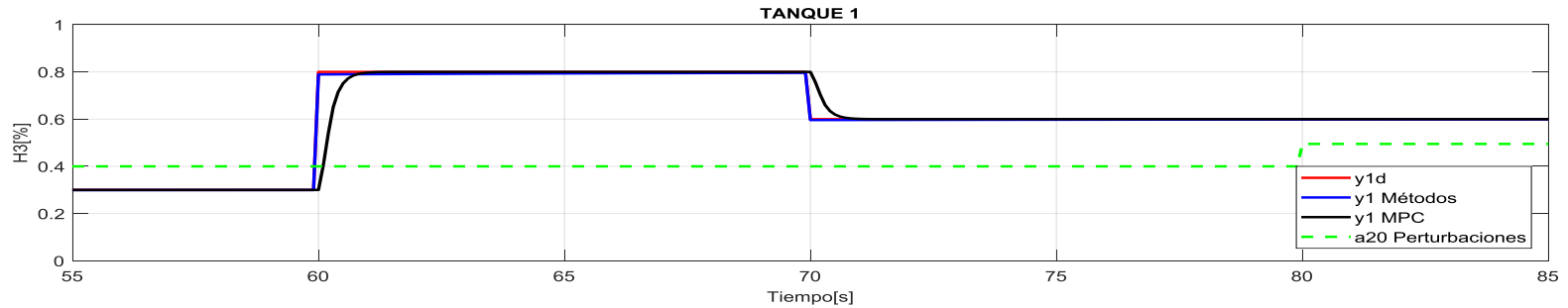
CONFIGURACIÓN TANQUES DOBLES

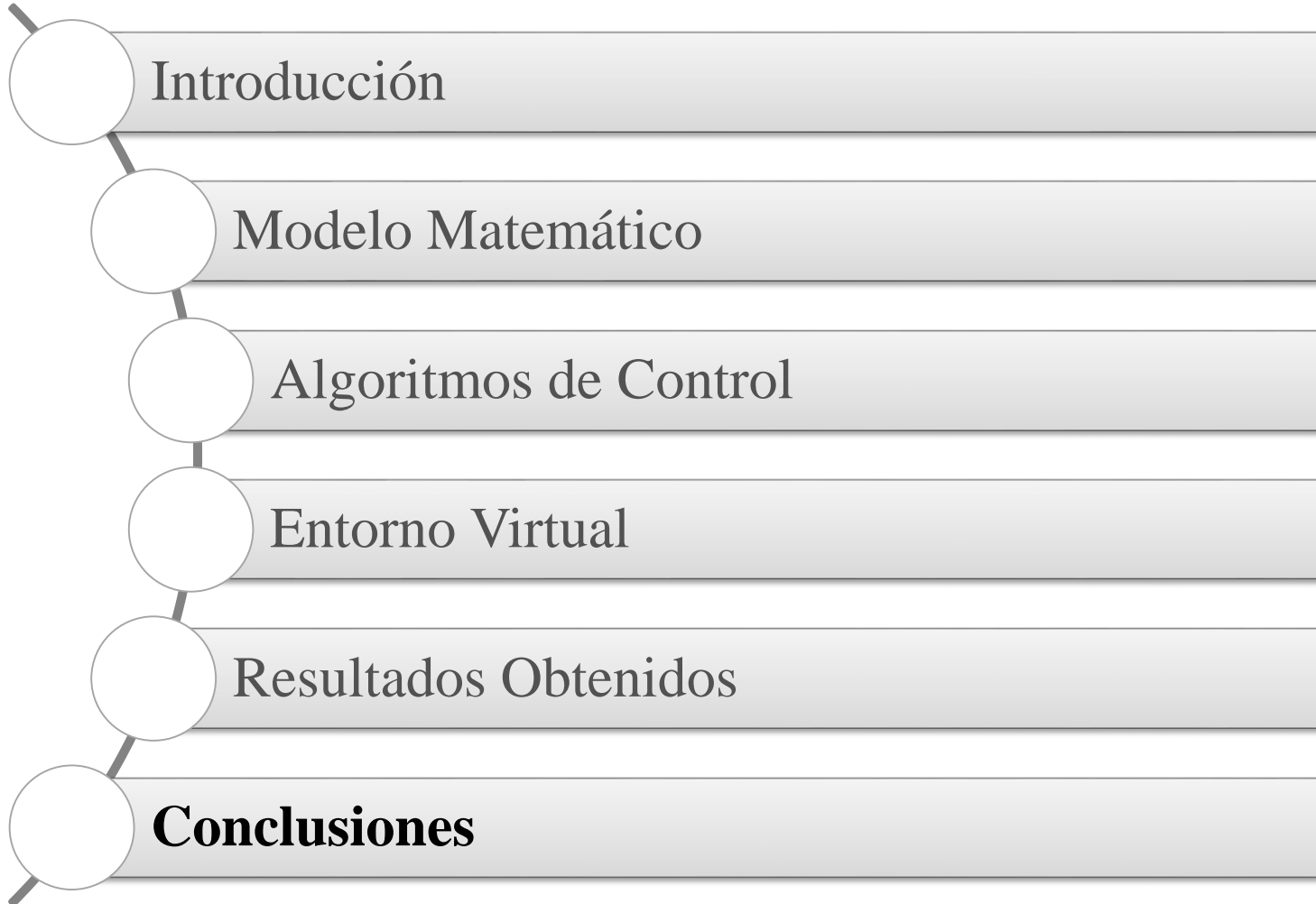
Comparación del control MPC y Control Basado en Métodos Numéricos



CONFIGURACIÓN TANQUES TRIPLES

Comparación del control MPC y Control Basado en Métodos Numéricos





- El modelo matemático del sistema permite representar el comportamiento de un sistema para evaluar algoritmos de control sin necesidad de un sistema real.
- Se implementaron los algoritmos de control partiendo de los modelos matemáticos obtenidos de cada una de las configuraciones de tanques.
- Se realizó el análisis de estabilidad de los controladores, demostrando estabilidad asintótica del sistema en bucle cerrado controlado por cada controlador propuesto.
- La técnica de simulación HIL junto con el entorno virtual permite evaluar algoritmos de control y llevar a la planta a situaciones de riesgo que normalmente no se podrían ejecutar, facilitando la enseñanza-aprendizaje acerca del control de procesos
- De acuerdo a las curvas obtenidas se determinó que el control MPC presenta resultados más precisos con respecto al control basado en métodos numéricos, ya que utiliza una estrategia de optimización que anticipa el efecto del control futuro.



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 Ingeniera en
Electrónica e Instrumentación**

**“CONTROL DE PROCESOS DE NIVEL CON DIFERENTES CONFIGURACIONES DE
TANQUES: TÉCNICA DE HARDWARE-IN-THE-LOOP ”**

Autoras

Lozada Herrera, Gissela Fernanda
Pruna Villegas, Jazmín Katherine

Ing. Andaluz Ortíz, Víctor Hugo, Ph.D. *Tutor*
Ing. Naranjo Hidalgo, César Alfredo, MSc. *Cotutor*

