



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



DISEÑO Y VALIDACIÓN DE ALGORITMOS DE CONTROL AVANZADO PARA UN SEPARADOR BIFÁSICO VIRTUALIZADO

Autores: Sr. Flores Bungacho, Francisco Ismael
Sr. Guerrero Solís, Jonathan Marcos

Tutor: Ing. Llanos Proaño, Jacqueline del Rosario PhD.

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE
2021



AGENDA

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3. DISEÑO DE CONTROLADORES

4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

6. RECOMENDACIONES



AGENDA

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3. DISEÑO DE CONTROLADORES

4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

6. RECOMENDACIONES



INTRODUCCIÓN

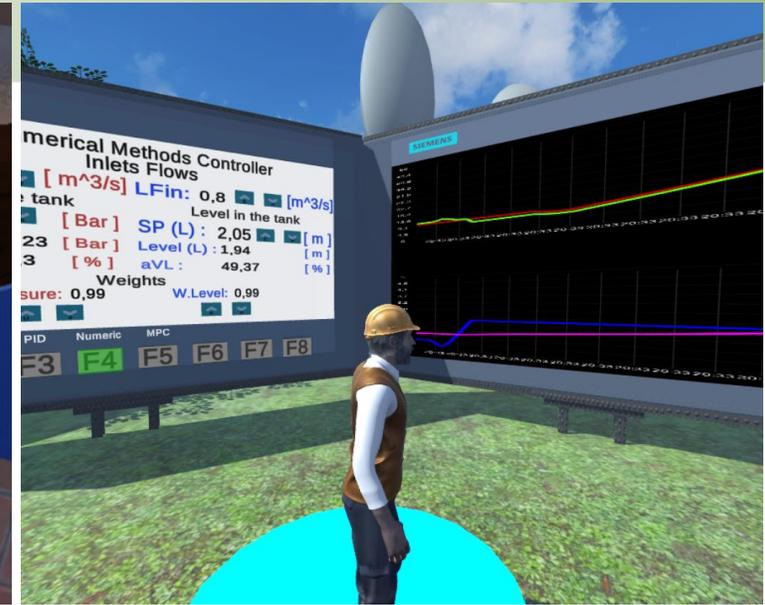
- Problemática

No se cuenta con plantas de procesos industriales multivariables en la carrera de Electrónica.

Las plantas de laboratorio tienen una orientación didáctica, ya que es complicado tener un ambiente industrial real para practicas.

El aprendizaje de controladores se ve beneficiado por la implementación de escenarios industriales virtualizados.

El uso de nuevas tecnologías es requisito para las tendencias actuales.



- **Objetivos**

- **General**

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

- **Específicos**

- Investigar usos prácticos de sistemas de realidad virtual, funcionamiento y modelamiento fenomenológico de un separador bifásico, estrategias de control y métodos de validación existentes para procesos multivariados en entornos industriales.
 - Desarrollar un modelo matemático que represente la dinámica de un separador bifásico.
 - Diseñar un entorno virtual de la planta industrial (separador bifásico) en un ambiente inversivo, lo más real

Específicos

- Diseñar e implementar una estrategia de control tradicional para un separador bifásico virtual.
- Diseñar e implementar estrategias de control avanzado para un separador bifásico virtual.
- Validar y comparar el desempeño de las estrategias de control propuestas.
- Elaborar guías de laboratorio referente al control y funcionalidad de la planta industrial virtual que permitan familiarizarse con procesos cercanos a los reales para mejorar el aprendizaje de los estudiantes y capacitarlos con nuevas herramientas tecnológicas.

AGENDA

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3. DISEÑO DE CONTROLADORES

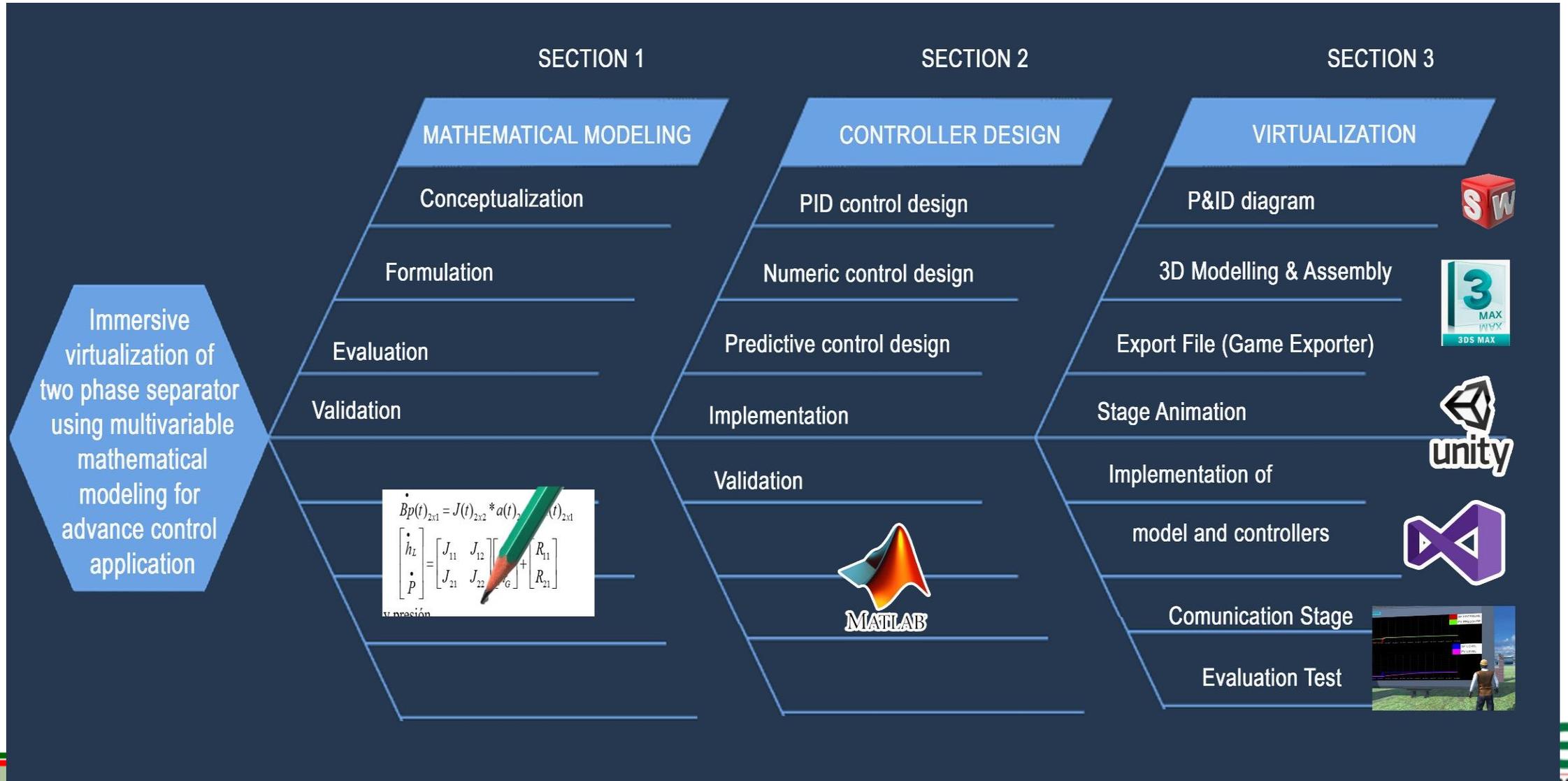
4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

6. RECOMENDACIONES



- Propuesta



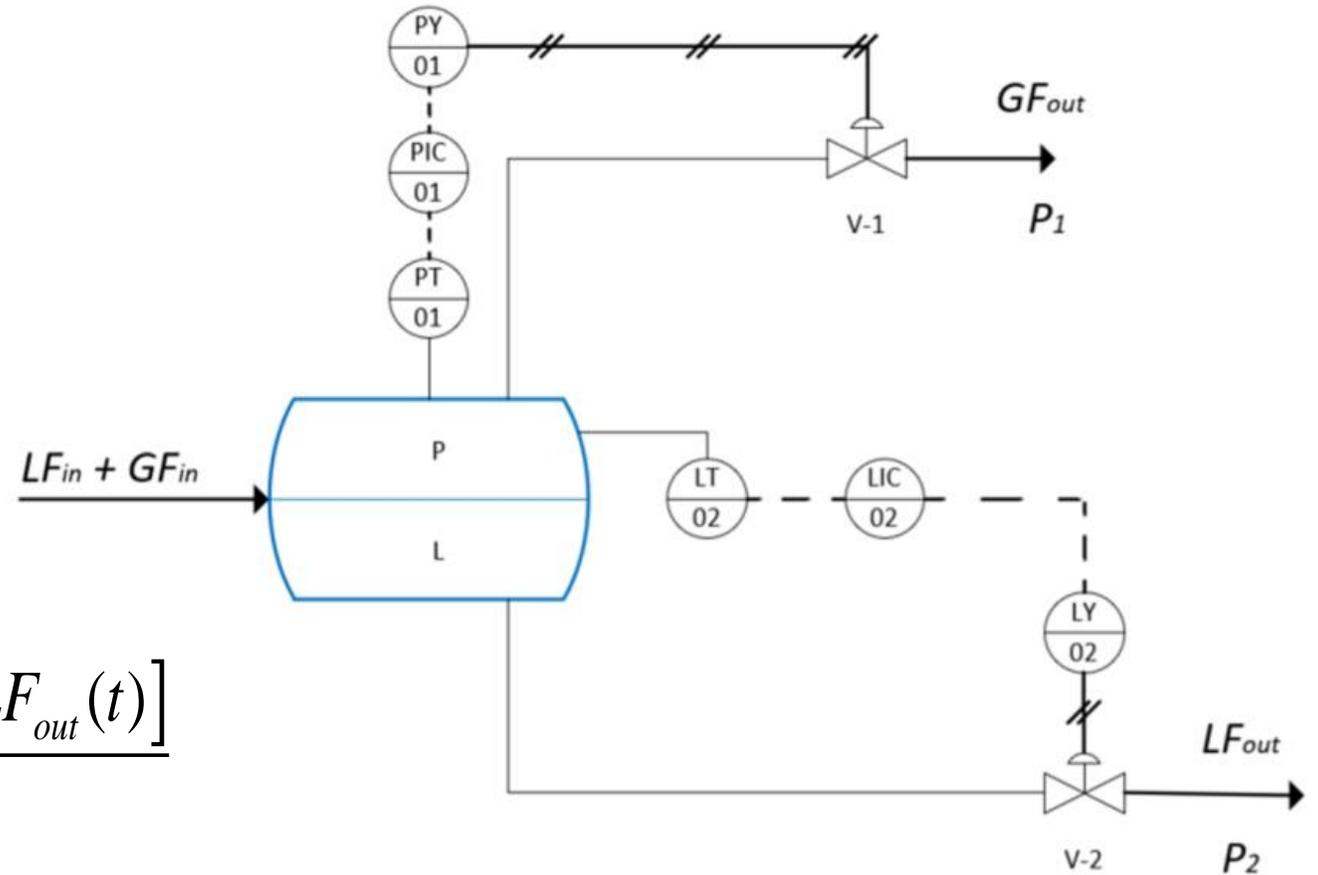
- **Modelo Matemático:**

- NIVEL

$$\frac{dh_L(t)}{dt} = \frac{LF_{in}(t) - LF_{out}(t)}{2C\sqrt{[D - h_L(t)]h_L(t)}}$$

- PRESIÓN

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P(t)[GF_{in}(t) - GF_{out}(t) + LF_{in}(t) - LF_{out}(t)]}{V - V_L(t)}$$



AGENDA

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3. DISEÑO DE CONTROLADORES

4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

6. RECOMENDACIONES



- **Diseño de controlador: PID**

El controlador PID para el Proceso MIMO del separador bifásico virtual se aplica la sintonía Lambda λ , utilizando el criterio $\lambda = T$

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

T : const. de tiempo
 L : Tiempo muerto
 K_p : const. estática

$$K = \frac{1}{K_p} \frac{\frac{L}{2} + T}{\frac{L}{2} + T_{cl}} \quad T_i = T + \frac{L}{2} \quad T_d = \frac{TL}{L + 2T}$$

Para realizar la sintonía del controlador PID, se ocupan modelos aproximados de la variable presión y la variable nivel

$$P(s) = \frac{44.72}{1 + 3.31s} e^{-0.004s} \quad H(s) = \frac{2.36}{1 + 56.56s}$$

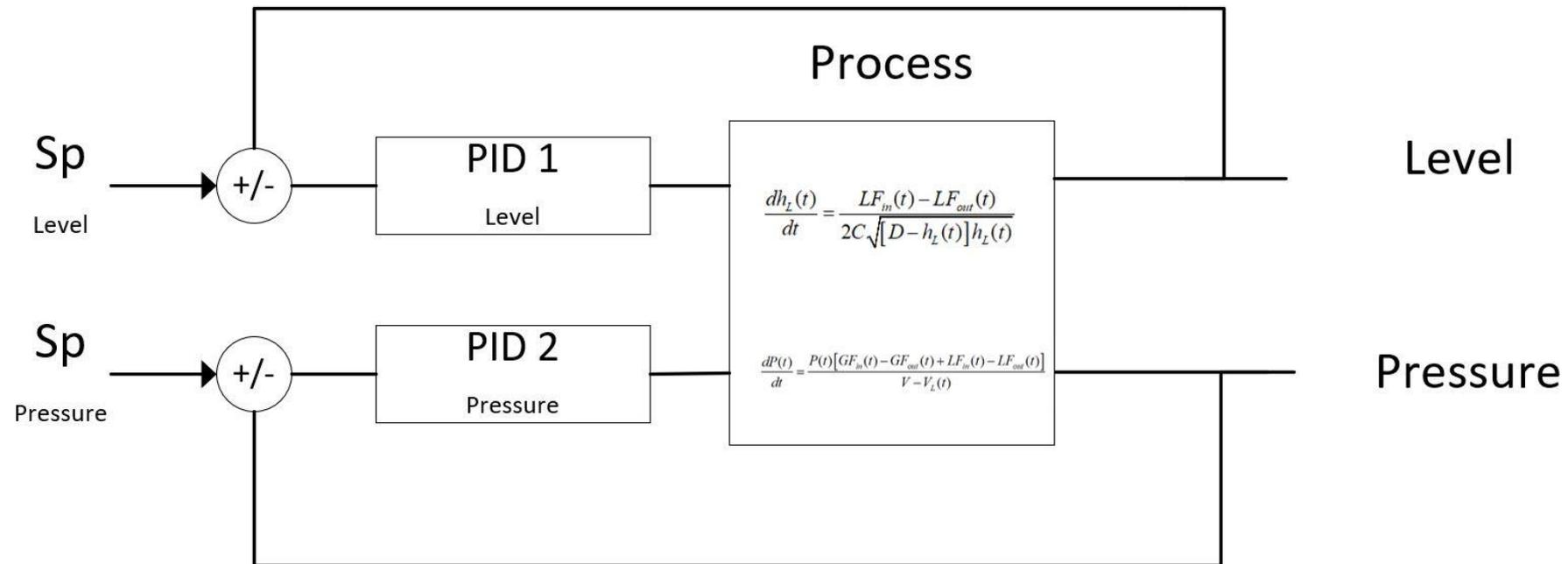
- **Diseño de controlador: PID**

Ganancias del controlador PID.

CTES	Nivel	Presión
Kp	3	0.36
Ki	0.03	0.01
Kd	0	0

- **Diseño de controlador: PID**

Gráfico de lazo cerrado implementado en el controlador PID.



- **Diseño de controladores: Controlador Numérico**

Se necesita el modelo matemático en forma matricial

$$\dot{B}(t)_{2 \times 1} = J(t)_{2 \times 2} * a(t)_{2 \times 1} + R(t)_{2 \times 1}$$

Donde $\dot{B}(t)$ es el vector de las derivadas de nivel y presión, $J(t)$ es la Matriz Jacobiana, $a(t)$ es el vector de apertura de válvulas, $R(t)$ es el vector del comportamiento de la planta.

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_L \\ \dot{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_L \\ a_G \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{21} \end{bmatrix}$$

- **Diseño de controlador: Numérico**

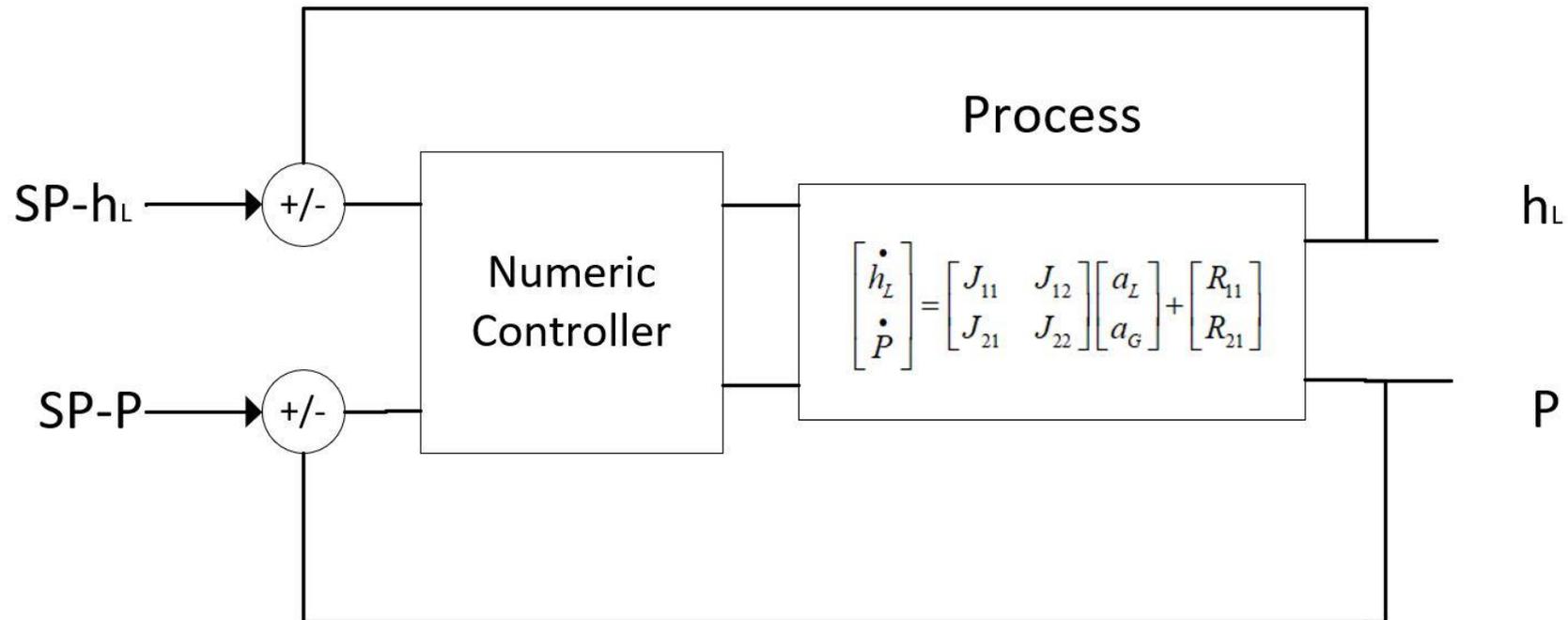
Ganancias del controlador Numérico.

Variable	Peso	Valor óptimo
Nivel	$W_{1,1}$	0.99
Presión	$W_{2,2}$	0.99



- **Diseño de controladores: Controlador Numérico**

Gráfico de lazo cerrado implementado en el controlador Numérico.



- **Diseño de controladores: MPC**

El término Control Predictivo no designa a una estrategia de control particular sino a un conjunto de métodos de control que hacen uso explícito de un modelo del proceso para obtener la señal de control minimizando una función objetivo.

Función objetivo:

$$J(k) = \sum_{i=N_w}^{N_p} \delta_1(k) \left[h(k+i|k) - hd(k+i|k) \right]^2 + \delta_2(k) \left[p(k+i|k) - pd(k+i|k) \right]^2 \dots$$

$$\dots + \sum_{i=0}^{N_c-1} \lambda_1(k) \left[\Delta u_1(k+i-1) \right]^2 + \lambda_2(k) \left[\Delta u_2(k+i-1) \right]^2$$

Donde	N_w	inicio del horizonte de predicción	
	N_p	número de muestras del horizonte de predicción	
	N_c	horizonte de control	
	\hat{h}	salida predicha de nivel	λ_1, λ_2 pesos asociadas con los objetivos de control
	\hat{p}	salida predicha de presión	δ_1, δ_2 pesos asociadas con los errores
	hd	valor deseado de nivel	$\Delta u_1, \Delta u_2$ acciones de control
	pd	valor deseado de presión.	

- **Diseño de controladores: MPC**

Sujeto a las restricciones:

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u_1 \leq \Delta u_{\max}$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u_2 \leq \Delta u_{\max}$$

$$\Delta u_{\max} = 1$$

$$\Delta u_{\min} = 0$$

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

$$h_{\max} = 3[m]$$

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

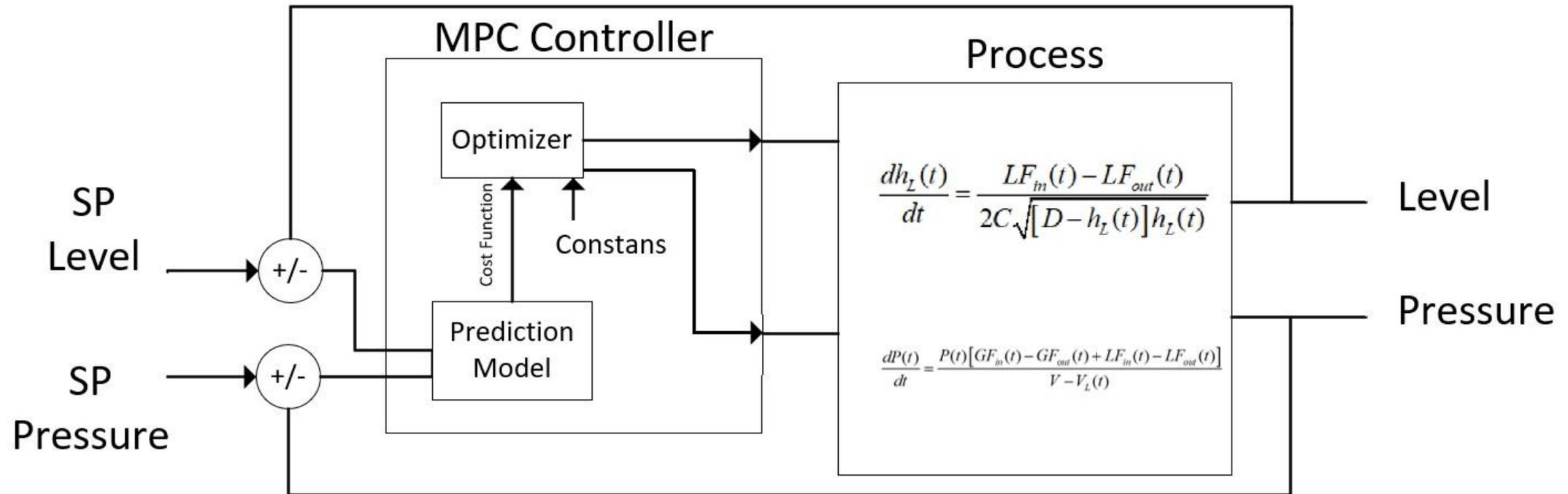
$$p_{\min} \leq p \leq p_{\max}$$

$$p_{\max} = 50[bar]$$

$$p_{\min} = 7[bar]$$

- **Diseño de controladores: MPC**

Gráfico de lazo cerrado implementado en el controlador MPC



- **Diseño de controlador: MPC**

Ganancias del controlador MPC.

Variables	Nivel	Presión
Parámetros		
Horizonte de Predicción	$N_w = 18$	$N_w = 18$
Horizonte Control	$N_c = 8$	$N_c = 8$
Peso de error	$\delta_1 = 100$	$\delta_2 = 0.1$
Peso de las acciones de control	$\lambda_1 = 0.001$	$\lambda_2 = 0.001$

AGENDA

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3. DISEÑO DE CONTROLADORES

4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

6. RECOMENDACIONES

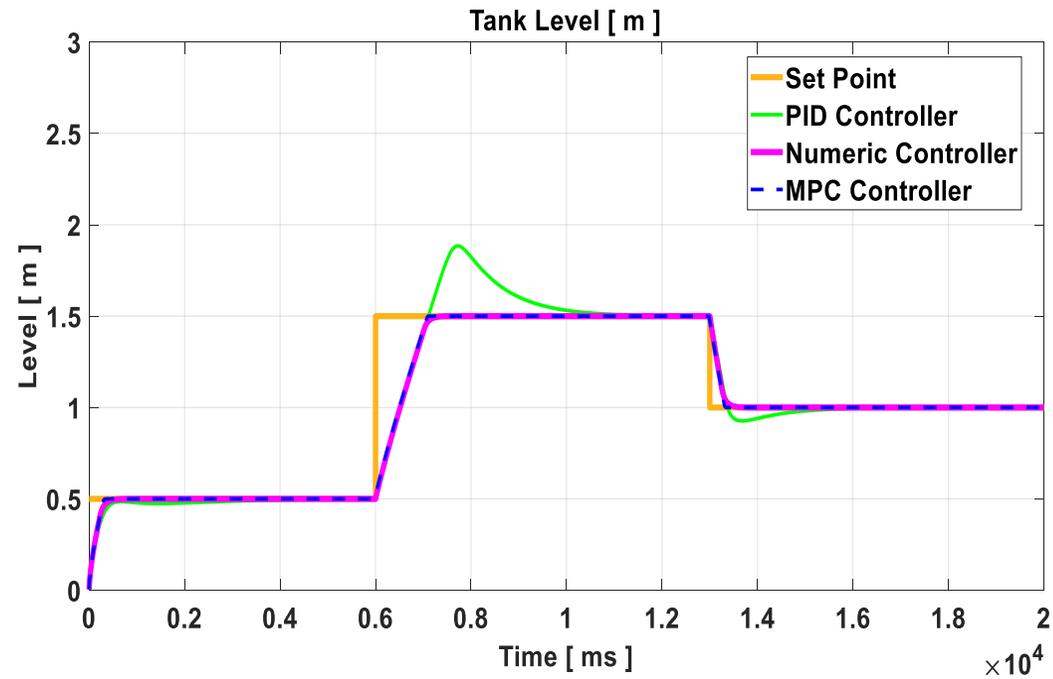


Resultados

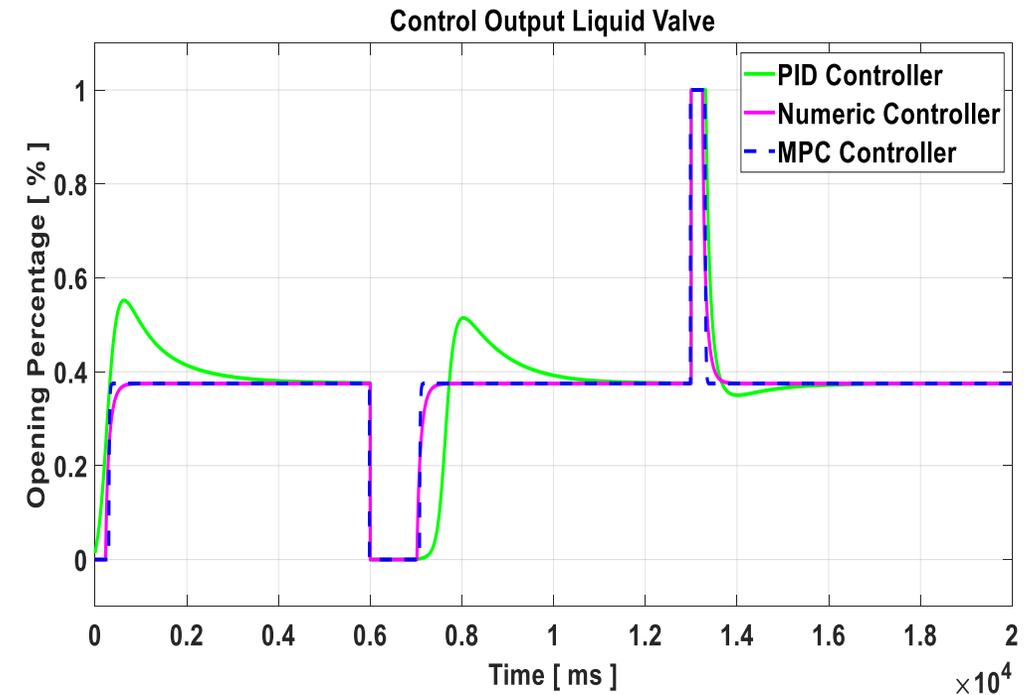
- Debido a la complejidad del modelo multivariable (MIMO) presentada por el separador bifásico, se ve la necesidad de plantear escenarios con diferentes condiciones de funcionamiento y diferentes perturbaciones, para obtener resultados donde se observe de manera adecuada el comportamiento de cada variable, la robustez de cada controlador y el desempeño de las acciones de control de los actuadores.

Resultados: Escenario Uno Variable Nivel

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

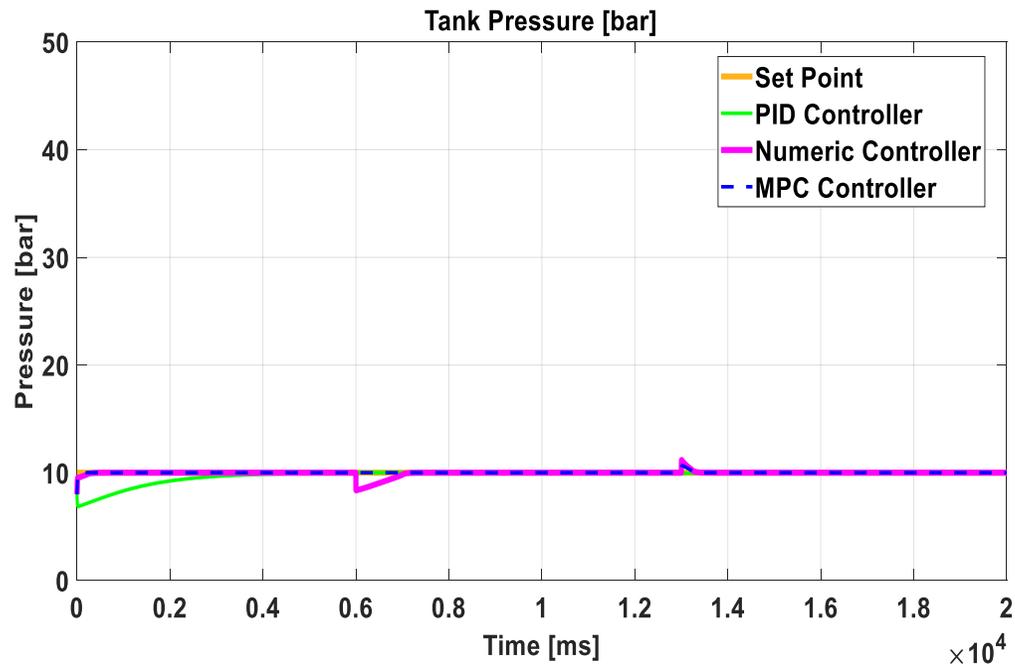


Respuesta del Actuador en el sistema de lazo cerrado con los controladores PID, Numérico y MPC

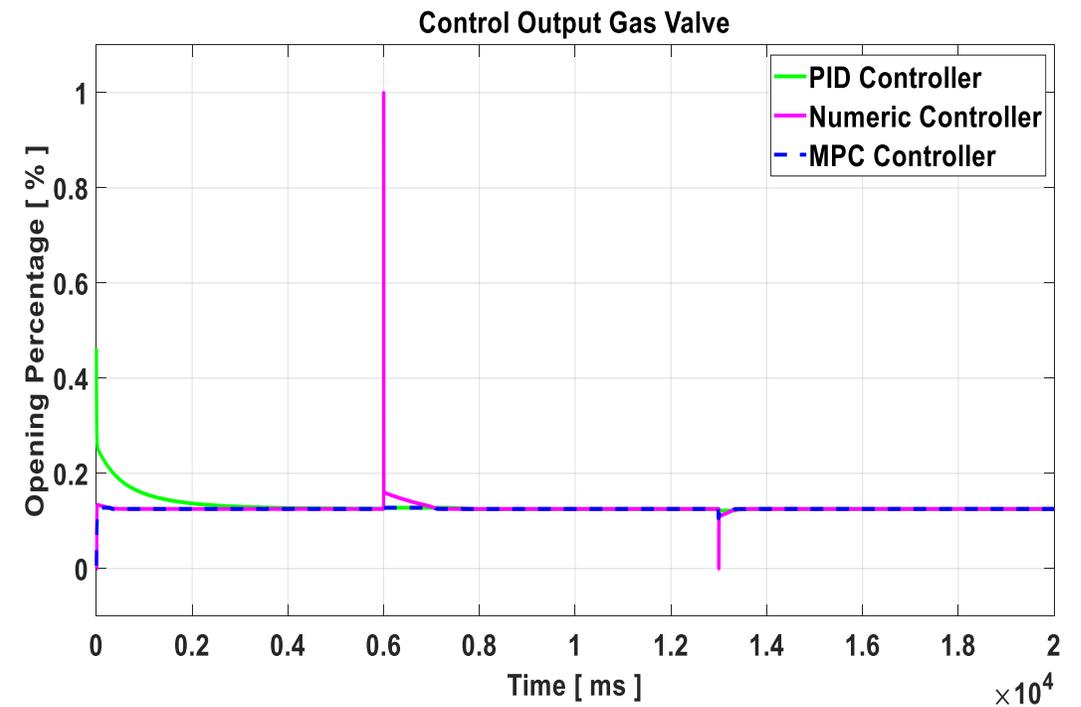


Resultados: Escenario Uno Variable Presión

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

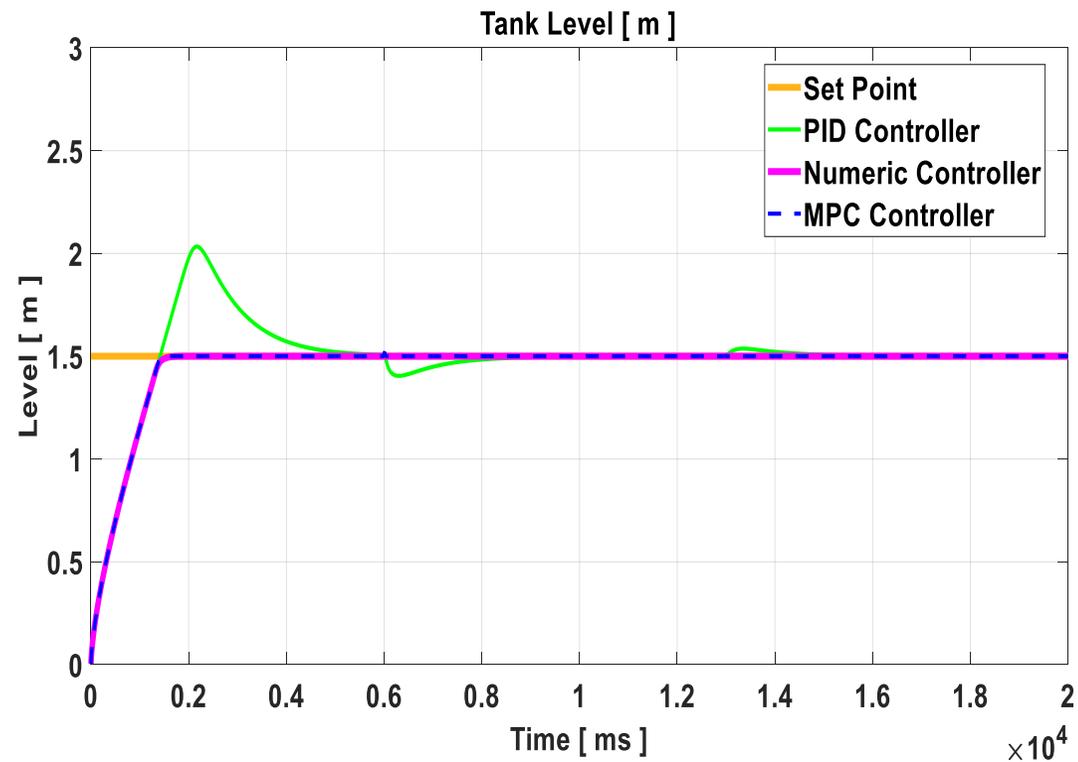


Respuesta del Actuador en el sistema de lazo cerrado con los controladores PID, Numérico y MPC

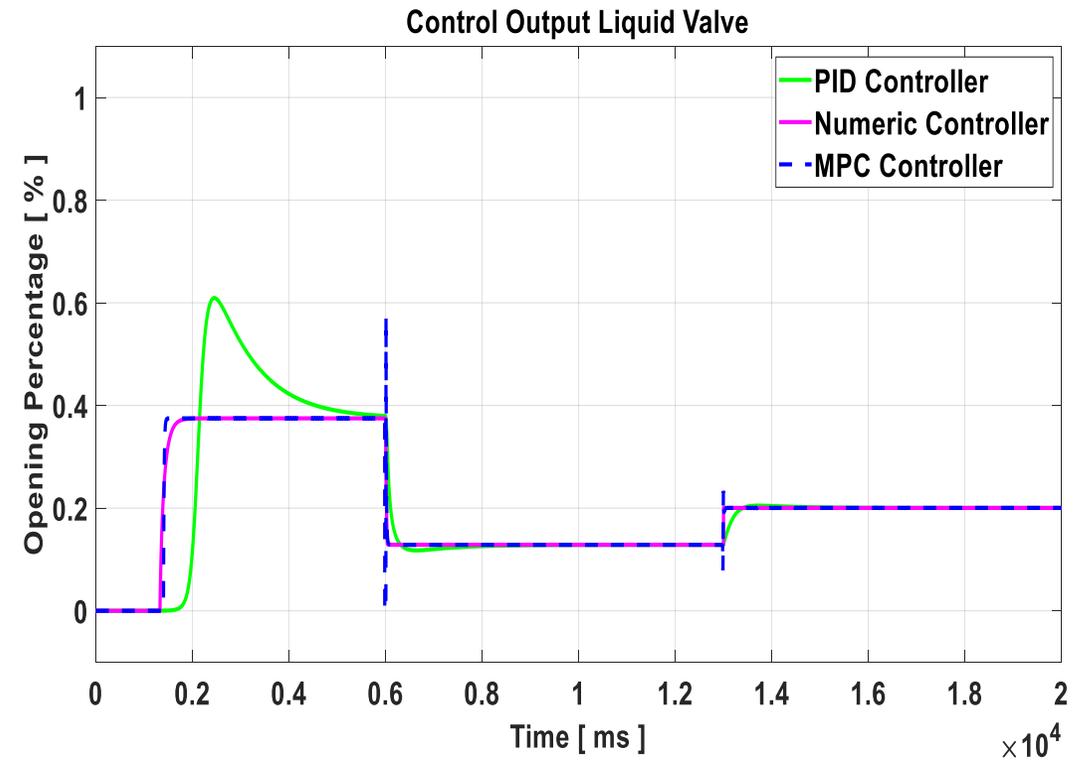


Resultados: Escenario Dos Variable Nivel

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



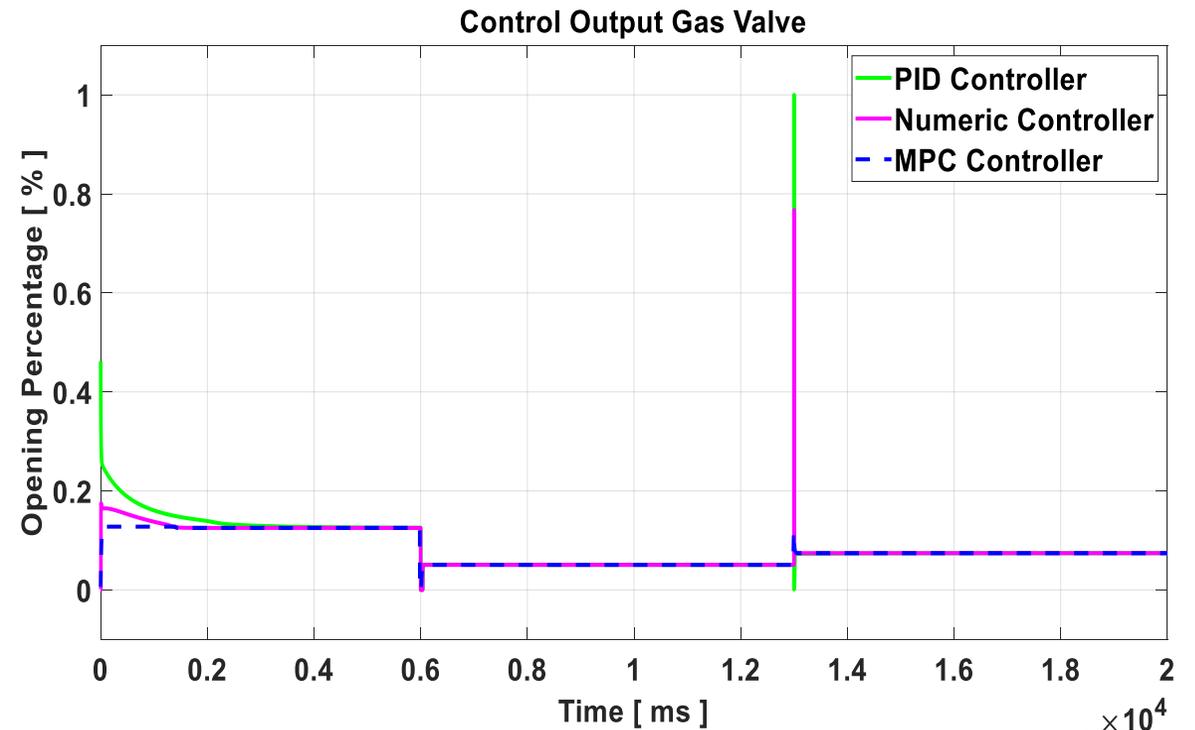
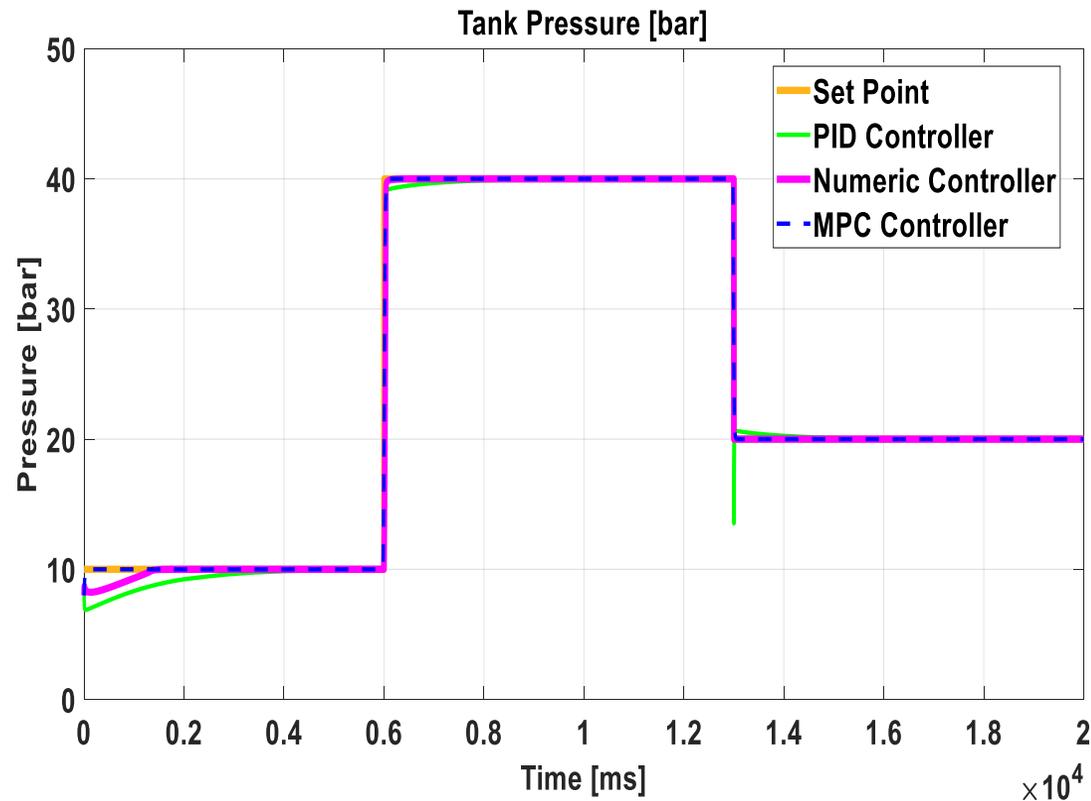
Respuesta del Actuador en el sistema de lazo cerrado con los controladores PID, Numérico y MPC



Resultados: Escenario Dos Variable Presión

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

Respuesta del Actuador en el sistema de lazo cerrado con los controladores PID, Numérico y MPC



AGENDA

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3. DISEÑO DE CONTROLADORES

4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

6. RECOMENDACIONES



- **Conclusiones**

- En este trabajo de investigación se desarrolló un ambiente industrial virtualizado inmersivo de un separador bifásico para aplicaciones orientadas a inducción y aprendizaje de estrategias de control. Este proceso posee características multivariantes y no lineales, las cuales fueron incorporadas en su modelamiento. En esta planta virtual se diseñan y validan varias estrategias de control con el objetivo de analizar la estrategia con mejor desempeño para esta aplicación.

- Se demostró que el modelo matemático propuesto del separador bifásico es una buena representación de un sistema no lineal debido a la forma cilíndrica del tanque con múltiples entradas y múltiples salidas MIMO ya que existe una correlación en las variables controladas: nivel de líquido y presión de gas, manipulando el flujo de salida de líquido y el flujo de salida de gas mediante el porcentaje de apertura de las válvulas correspondientes a cada flujo.

- **Conclusiones**

•Se comprobó que los componentes de la virtualización del ambiente industrial permiten realizar prácticas de control que van desde la obtención del modelo hasta el diseño de controladores avanzados. Con el uso de un avatar que permite la libre exploración en el entorno, además los componentes de visualización de gráficas de información y evolución de las variables, apertura de válvulas, variación de parámetros de consigna y manipulación de parámetros de sintonía de controladores.

•Se demostró que el controlador PID implementado en el modelo multivariable del separador bifásico no es la mejor opción debido a que presenta resultados poco aceptables: altos tiempos de establecimiento, valores altos de sobre impulso y acciones de control bruscas.

- **Conclusiones**

- Las estrategias de control MPC y controlador Numérico presentan un mejor desempeño al evaluar el valor de sobre impulso, el error de estado estable, el tiempo de establecimiento y se tienen acciones de control conservadoras que buscan alargar la vida útil del actuador, esto debido a que son controladores diseñados en base al modelo de la planta.

- El buen desempeño de las estrategias de control numérico y MPC dependen del modelamiento de la planta, si el modelo se aleja del comportamiento real entonces las decisiones de los controladores no serán las más acertadas.

- **Conclusiones**

- La planta virtual conjuntamente con las guías de laboratorio desarrolladas, permiten realizar prácticas relacionadas al modelamiento de plantas, diseño de controladores PID, diseño de controladores Numérico y diseño de controladores MPC, permitiendo que el usuario se familiarice e interactúe con el ambiente industrial, contribuyendo en la formación de nuevos profesionales en el área de control.
- La planta virtual diseñada es altamente flexible con capacidad de implementación de cualquier estrategia de control, favoreciendo al aprendizaje en los tópicos relacionados a sistemas de control.

AGENDA

1. INTRODUCCIÓN

2. METODOLOGÍA DEL PROYECTO

3. DISEÑO DE CONTROLADORES

4. RESULTADOS

5. CONCLUSIONES

6. RECOMENDACIONES



• Recomendaciones

- Plantear controladores avanzados diseñados con modelos matemáticos aproximados y comparar los resultados obtenidos con los resultados del presente trabajo de investigación.
- La aplicación de una metodología es importante al momento de realizar la virtualización del proceso industrial, debido a la complejidad presentada en el proyecto de investigación.

• Recomendaciones

- Al momento de implementar los controladores en el ambiente virtualizado se recomienda realizar un proceso de sintonía fina a las ganancias de los controladores para garantizar su correcto desempeño.
- Continuar la línea de investigación con el uso de la metodología de virtualización, técnicas de modelamiento y control avanzado en procesos industriales que sirvan como laboratorios virtuales para la enseñanza.

Preguntas

