



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

DEPARTAMENTO DE ELECTRICA Y ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES INDUSTRIALES

Sistema de Entrenamiento para Controlar un Separador Trifásico Horizontal

Autor:

Ing. Zahira Proaño C

Ing. Víctor Andaluz PhD, **Director**



ICITED 21

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

 Springer Link



Perspectives and Trends in Education and Technology pp 633-647 | Cite as

Virtual Training System of a Horizontal Three-Phase Separator

Authors [Authors and affiliations](#)

Zahira Proaño C. , Víctor H. Andaluz

Conference paper

First Online: 17 November 2021

 49
Downloads

Part of the [Smart Innovation, Systems and Technologies](#) book series (SIST, volume 256)

About this paper



Check for updates

Cite this paper as:

Proaño C. Z., Andaluz V.H. (2022) Virtual Training System of a Horizontal Three-Phase Separator. In: Mesquita A., Abreu A., Carvalho J.V. (eds) Perspectives and Trends in Education and Technology. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 256. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-5063-5_52

First Online

17 November 2021

DOI

https://doi.org/10.1007/978-981-16-5063-5_52

Publisher Name

Springer, Singapore

Print ISBN

978-981-16-5062-8

Online ISBN

978-981-16-5063-5

eBook Packages

[Intelligent Technologies and Robotics](#)
[Intelligent Technologies and Robotics \(R0\)](#)

[Reprints and Permissions](#)



AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 MODELACIÓN
- 3 ESQUEMA DE CONTROL
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES

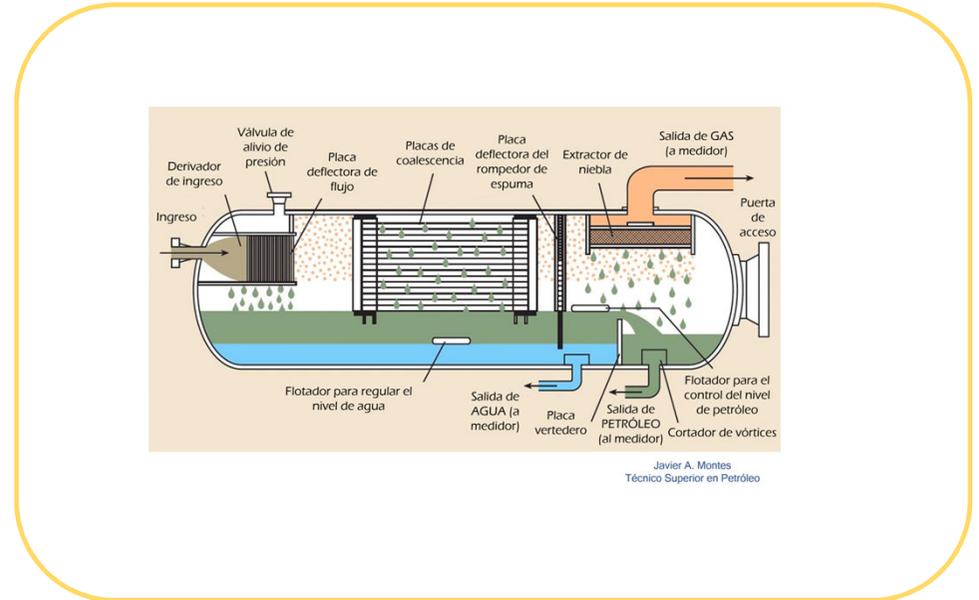
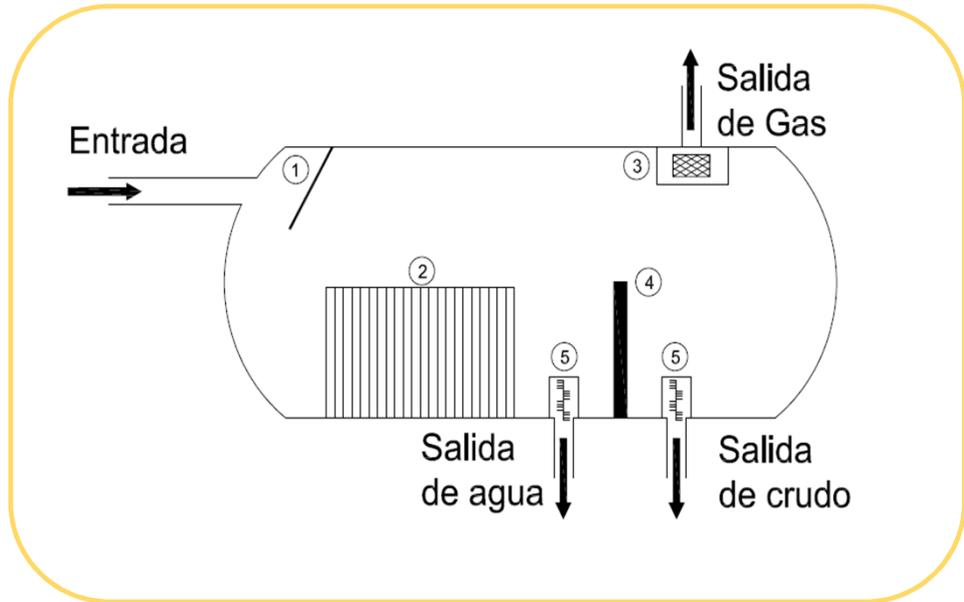
INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

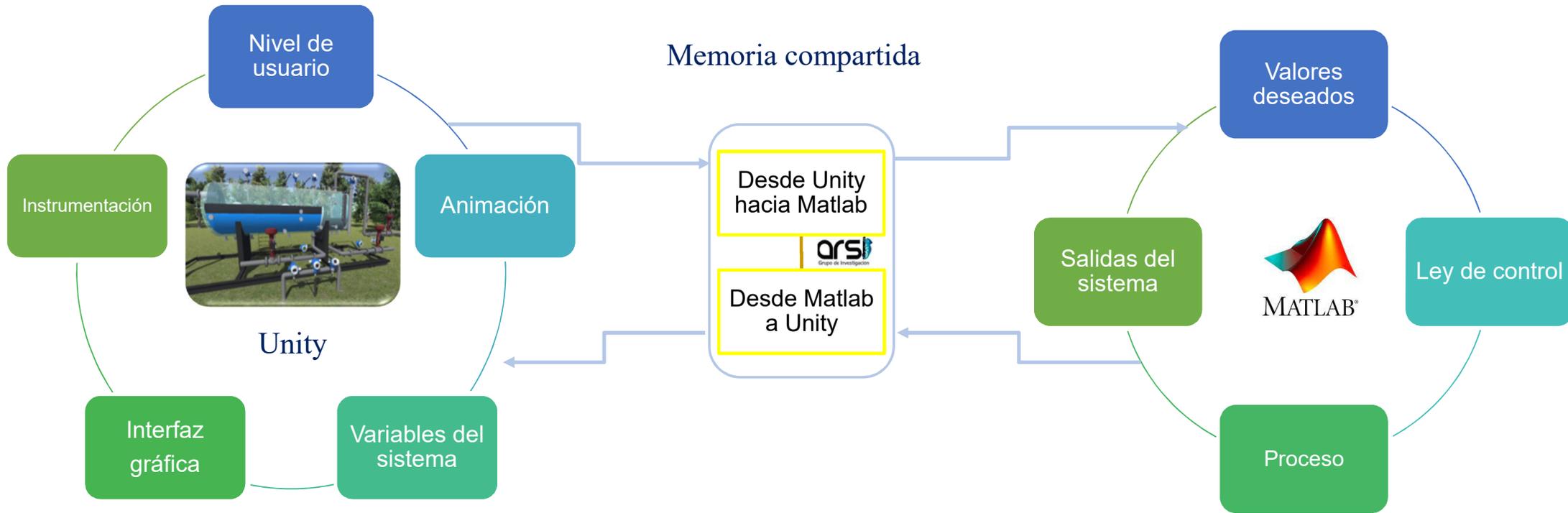


FORMULACIÓN DEL PROBLEMA



Partes del Separador

PROPUESTA



OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un **sistema de entrenamiento virtual para controlar un FWKO** en base a datos obtenidos de trabajos indexados.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Investigar en base de datos científicas** el proceso de separación de petróleo a fin de implementar algoritmos de control en lazo cerrado.
- Describir el **modelo matemático** que representa el comportamiento dinámico del separador trifásico horizontal, a fin de ser utilizados en esquemas de control.
- Proponer un esquema en lazo cerrado para el **control multivariable** del proceso industrial “separador trifásico horizontal”.
- Desarrollar un **entorno virtual 3D**, que permita la interacción e inmersión del usuario, para implementar algoritmos de control y usarlo en el entrenamiento del proceso industrial de un separador trifásico horizontal.
- **Evaluar** el esquema de control del separador trifásico horizontal propuesto, a través del entorno virtual desarrollado, a fin de comprobar la evolución de los estados de control.
- Difundir los resultados a través de un **artículo científico**.

AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 MODELACIÓN
- 3 ESQUEMA DE CONTROL
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES

Balance de masas-fase acuosa:

$$\frac{dM_w(t)}{dt} = [W_{in}(t) - W_{out}(t)]\rho_w$$

El balance de masas-fase de crudo:

$$\frac{dM_L(t)}{dt} = [L_{in}(t) - L_{out}(t)]\rho_L$$

El balance de masas-fase gaseosa:

$$\frac{dM_G(t)}{dt} = [G_{in}(t) - G_{out}(t)]\rho_G$$

Además:

$$\frac{dM(t)}{dt} = \rho \frac{dV(t)}{dt}$$

Cámara de Separación

Comportamiento-nivel agua:

$$\frac{dh_w}{dt} = \frac{L_{in}(t)BSW_{in}\varepsilon(t) - W_{out}}{2C_{CS}\sqrt{(D - h_w(t))h_w(t)}}$$

Flujo-salida agua:

$$W_{out}(t) = 2.4028 \times 10^{-4} X_W(t) C_{VW} \sqrt{\frac{\Delta P_W}{\frac{\rho_W}{\rho_{H2O,15.5^\circ C}}}}$$

MODELACIÓN

Cámara de Crudo

Comportamiento-nivel crudo:

$$\frac{dh_L(t)}{dt} = \frac{L_{VERT}(t) - L_{out}}{2C_{CL}\sqrt{(D - h_L(t))h_L(t)}}$$

Flujo-salida crudo:

$$L_{out}(t) = 2.4028 \times 10^{-4} X_L(t) C_{VL} \sqrt{\frac{\Delta P_L}{\frac{\rho_L}{\rho_{H2O,15.5^\circ C}}}}$$

Presión:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{P(t)(G_{in}(t) + L_{in}(t) - G_{out}(t) - L_{out}(t) - W_{out})}{V - V_W(t) - V_L(t)}$$

Flujo-salida gas:

$$G_{out}(t) = 2.4028 \times 10^{-4} X_G(t) C_{VG} \sqrt{\frac{(P(t) - P_2)(P(t) + P_2)}{\frac{\rho_G(t)}{\rho_{H2O,15.5^\circ C}} * T}}$$

MODELACIÓN

Donde:

$$\Delta P = P(t) - P_n$$

Entonces:

$$\Delta P_W = P(t) + \rho_{H_2O,15.5^\circ C} g h_W(t) 10^{-5} - P_3$$

$$\Delta P_L = P(t) + \rho_{H_2O,15.5^\circ C} g h_L(t) 10^{-5} - P_1$$

Si la presión dentro del separador $P(t)$, se aproxima a la presión aguas abajo de la válvula

$$\Delta P_W = \rho_{H_2O,15.5^\circ C} g h_W(t) 10^{-5}$$

$$\Delta P_L = \rho_{H_2O,15.5^\circ C} g h_L(t) 10^{-5}$$

Linealización

Un sistema no lineal puede ser linealizado considerándolo lineal en punto de equilibrio.

Planta linealizada:

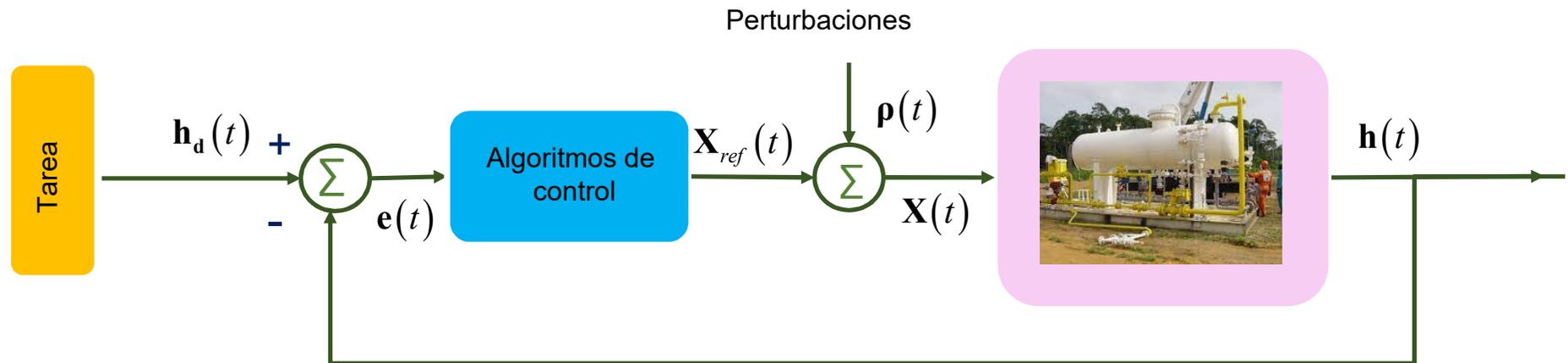
$$\begin{bmatrix} h_w(s) \\ h_L(s) \\ h_p(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{17}{206s+1} & 0 & \frac{2.4}{367s+1} \\ \frac{126}{322s+1} & -\frac{169}{330s+1} & \frac{43}{508s+1} \\ 0 & 0 & -\frac{2.4}{2s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w(s) \\ X_L(s) \\ X_G(s) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h}(s) = \mathbf{J}(s)\mathbf{x}(s) \quad (1)$$

AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 MODELACIÓN
- 3 ESQUEMA DE CONTROL
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES

ESQUEMA DE CONTROL



Tarea:

Regulación:

$$\mathbf{h}_d(t) = cte$$

Dimensiones:

$$\mathbf{h}(t), \mathbf{h}_d(t) \in \mathfrak{R}^+; \mathbf{e}(t) \in \mathfrak{R}; X_w(t) \in [0 \ 1], X_L(t) \in [0 \ 1], X_G(t) \in [-1 \ 0]$$

Objetivo de control:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{h}_d(t) - \mathbf{h}(t)) = 0$$

Dominio de tiempo

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_W(t) \\ \dot{h}_L(t) \\ \dot{h}_p(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{17}{206}e^{-\frac{T}{206}} & 0 & -\frac{12}{1835}e^{-\frac{T}{367}} \\ -\frac{9}{23}e^{-\frac{T}{322}} & -\frac{169}{330}e^{-\frac{T}{330}} & \frac{43}{508}e^{-\frac{T}{508}} \\ 0 & 0 & -\frac{6}{5}e^{-\frac{T}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W(t) \\ X_L(t) \\ X_G(t) \end{bmatrix}$$

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(t)\mathbf{x}(t)$$

Dominio de frecuencia

$$\begin{bmatrix} h_W(s) \\ h_L(s) \\ h_p(s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{17}{206s+1} & 0 & \frac{2.4}{367s+1} \\ -\frac{126}{322s+1} & -\frac{169}{330s+1} & \frac{43}{508s+1} \\ 0 & 0 & -\frac{2.4}{2s+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W(s) \\ X_L(s) \\ X_G(s) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{h}(s) = \mathbf{J}(s)\mathbf{x}(s)$$

CONTROLADOR 1: Inversa de la Planta

Proceso:

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(t)\mathbf{X}(t) \quad (2)$$

$$\mathbf{X}(t) = \mathbf{J}^{-1}(t)\dot{\mathbf{h}}(t) \quad (3)$$

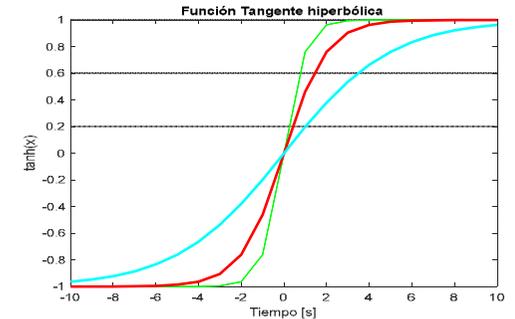
Ley de control:

$$\begin{bmatrix} X_{W_{ref}}(t) \\ X_{L_{ref}}(t) \\ X_{G_{ref}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{17}{206}e^{-\frac{T}{206}} & 0 & -\frac{12}{1835}e^{-\frac{T}{367}} \\ -\frac{9}{23}e^{-\frac{T}{322}} & -\frac{169}{330}e^{-\frac{T}{330}} & \frac{43}{508}e^{-\frac{T}{508}} \\ 0 & 0 & -\frac{6}{5}e^{-\frac{T}{2}} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \kappa_W \tanh(\gamma_W (h_{W_d} - h_W(t))) \\ \kappa_L \tanh(\gamma_L (h_{L_d} - h_L(t))) \\ \kappa_P \tanh(\gamma_P (h_{P_d} - h_P(t))) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{x}_{ref}(t) = \mathbf{J}^{-1}(t)\mathbf{K} \tanh(\boldsymbol{\gamma}\mathbf{e}(t)) \quad (5)$$

Con :

$$\mathbf{K} = \text{diag}(\kappa_W, \kappa_L, \kappa_G) \quad (6)$$



CONTROLADOR 1: Inversa de la Planta-Estabilidad

Proceso

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(t)\mathbf{x}(t) \quad (2)$$

Ley de Control

$$\mathbf{x}_{ref}(t) = \mathbf{J}^{-1}(t)\mathbf{K} \tanh(\gamma\mathbf{e}(t)) \quad (5)$$

Ecuación en lazo cerrado, considerando $\mathbf{x}(t) \equiv \mathbf{x}_{ref}(t) \rightarrow \boldsymbol{\rho}(t) = 0$ (7)

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = -\mathbf{K} \tanh(\gamma\mathbf{e}(t)) \quad (8)$$

Teoría de Lyapunov

$$V(\mathbf{e}(t)) = \frac{1}{2}\mathbf{e}^T(t)\mathbf{e}(t) \quad \rightarrow \quad \dot{V}(\mathbf{e}(t)) = -\mathbf{e}^T\gamma\mathbf{K} \tanh(\gamma\mathbf{e}(t)) < 0 \quad (9)$$

Por tanto:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{h}_d(t) - \mathbf{h}(t)) = \mathbf{0} \in \mathfrak{R}^3$$

Con $\gamma \in \mathfrak{R}^+$ y $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} \kappa_W & 0 & 0 \\ 0 & \kappa_L & 0 \\ 0 & 0 & \kappa_p \end{bmatrix} > 0$ (10)

CONTROLADOR 1: Inversa de la Planta-Robustez

Perturbaciones en la entrada

$$\mathbf{X}_{ref}(t) = \mathbf{X}(t) + \boldsymbol{\rho}(t) \quad (11)$$

Ecuación en lazo cerrado, considerando

$$\dot{\mathbf{e}}(t) = -\mathbf{K} \tanh(\boldsymbol{\gamma}\mathbf{e}(t)) + \mathbf{J}\boldsymbol{\rho}(t) \quad (12)$$

Teoría de Lyapunov

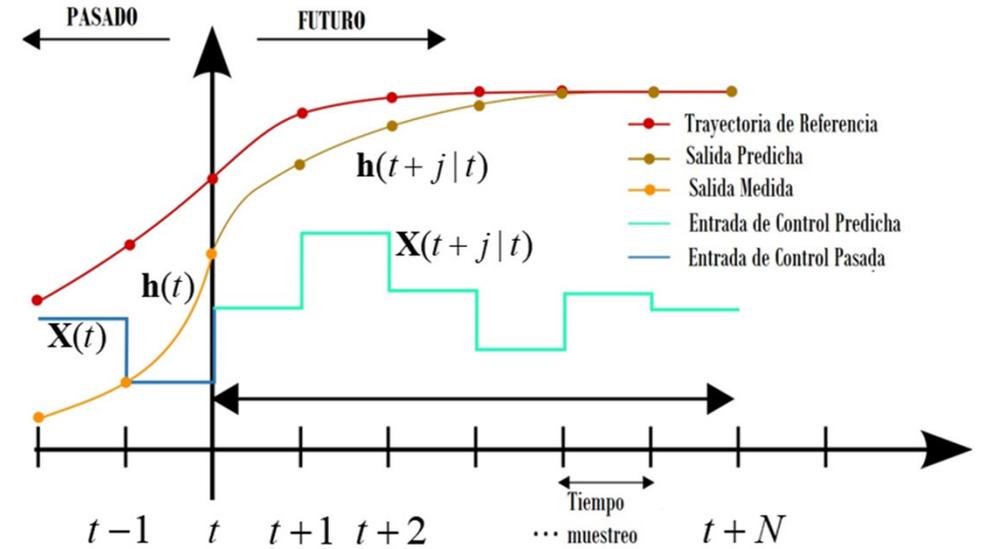
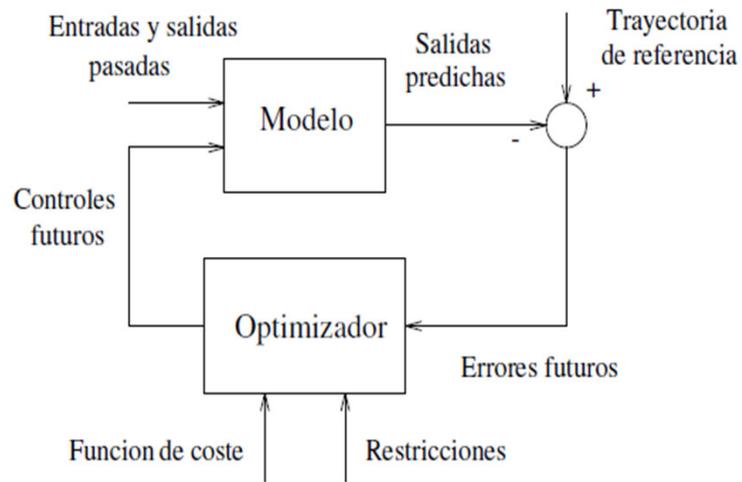
$$V(\mathbf{e}(t)) = \frac{1}{2} \mathbf{e}^T(t) \mathbf{e}(t) \quad \Rightarrow \quad \dot{V}(\mathbf{e}(t)) = -\mathbf{e}^T(t) \mathbf{K} \tanh(\boldsymbol{\gamma}\mathbf{e}(t)) + \mathbf{e}^T(t) \mathbf{J}\boldsymbol{\rho}(t) \quad (13)$$

$$|\mathbf{e}^T \mathbf{K} \tanh(\boldsymbol{\gamma}\mathbf{e}(t))| > |\mathbf{e}^T \mathbf{J}\boldsymbol{\rho}(t)| \quad (14)$$

Por tanto:

$$\|\mathbf{e}(t)\| < \frac{\|\mathbf{J}\boldsymbol{\rho}(t)\|}{\lambda_{\min}(\mathbf{K}) \tanh(\boldsymbol{\gamma}\mathbf{e}(t))} \quad (15)$$

CONTROLADOR2: MPC



Tarea regulación:

$$\mathbf{h}_d(t+j) = cte$$

Función objetivo:

$$\mathbf{J}(t) = \sum_{j=N_{P1}}^{N_{P2}} \delta[\mathbf{h}_d(t+j) - \mathbf{h}(t+j|t)]^2 + \sum_{j=1}^{N_C} \lambda[\Delta\mathbf{X}(t+j-1)]^2$$

Restricciones:

$$0 \leq X_W \leq 1$$

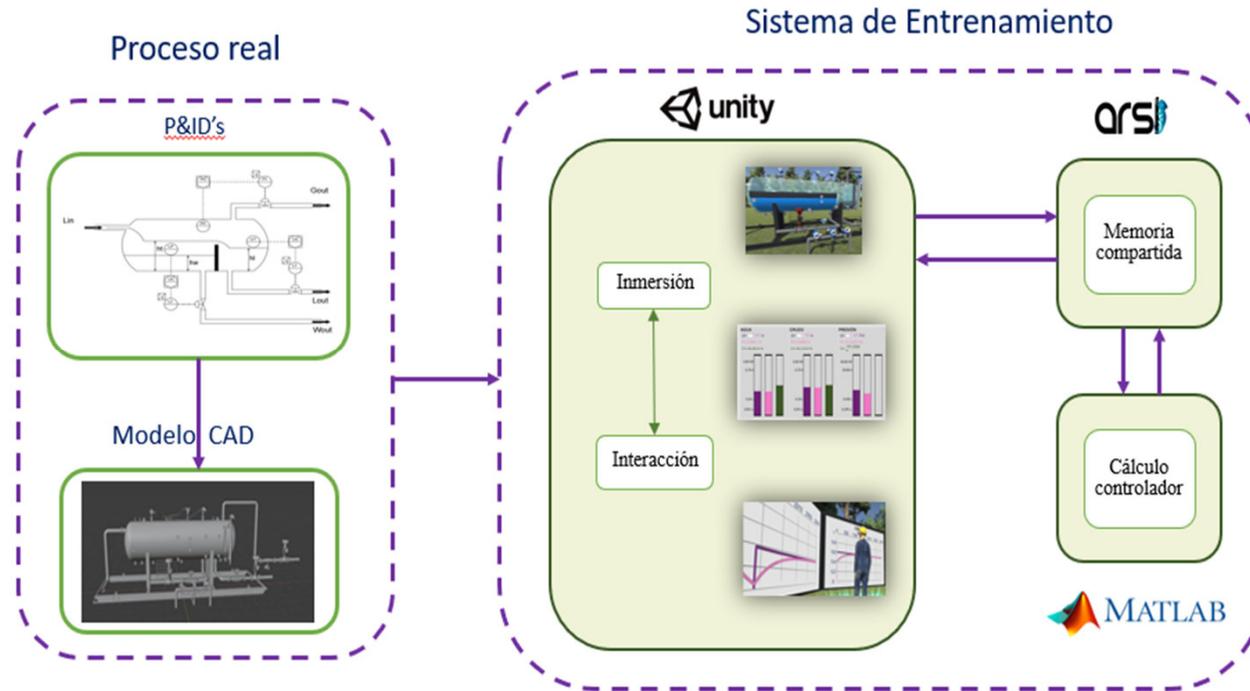
$$0 \leq X_L \leq 1$$

$$-1 \leq X_G \leq 0$$

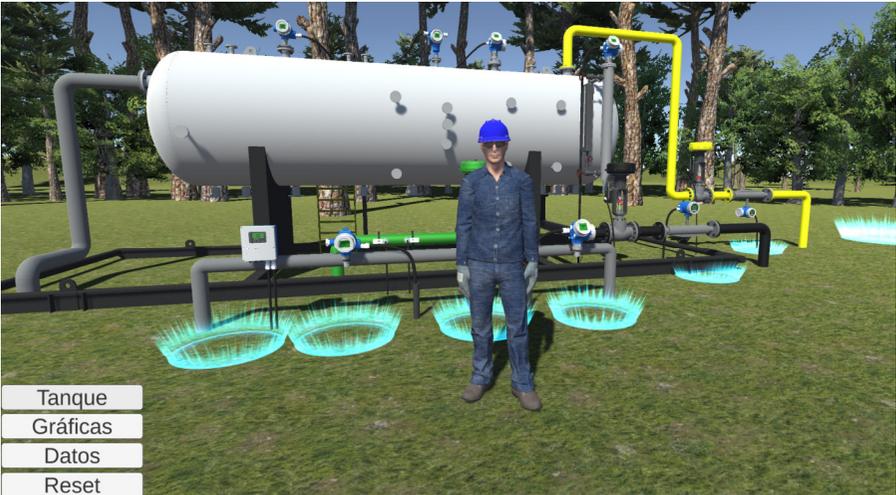
AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 MODELACIÓN
- 3 ESQUEMA DE CONTROL
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES

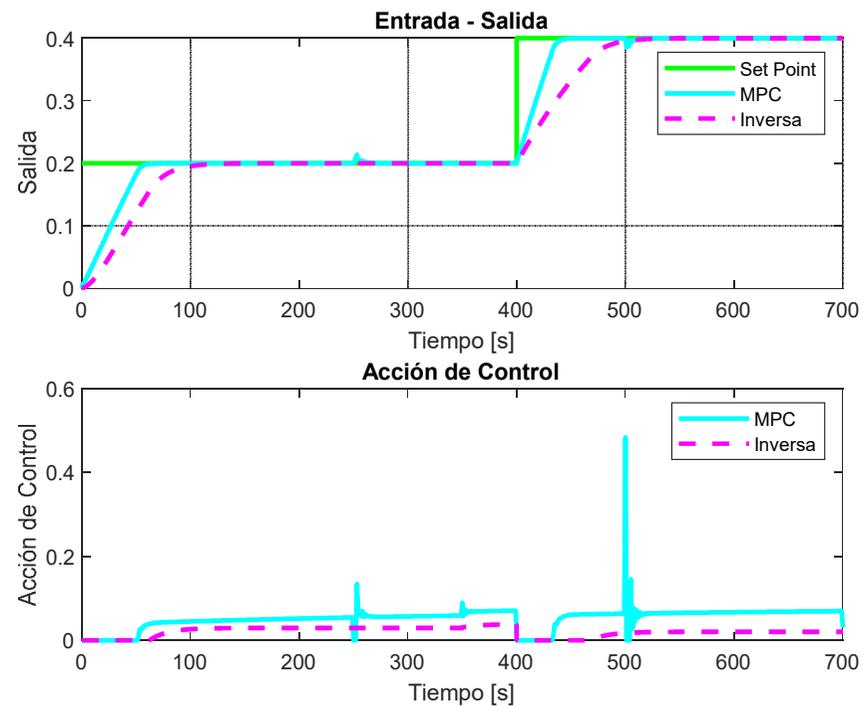
SISTEMA DE ENTRENAMIENTO



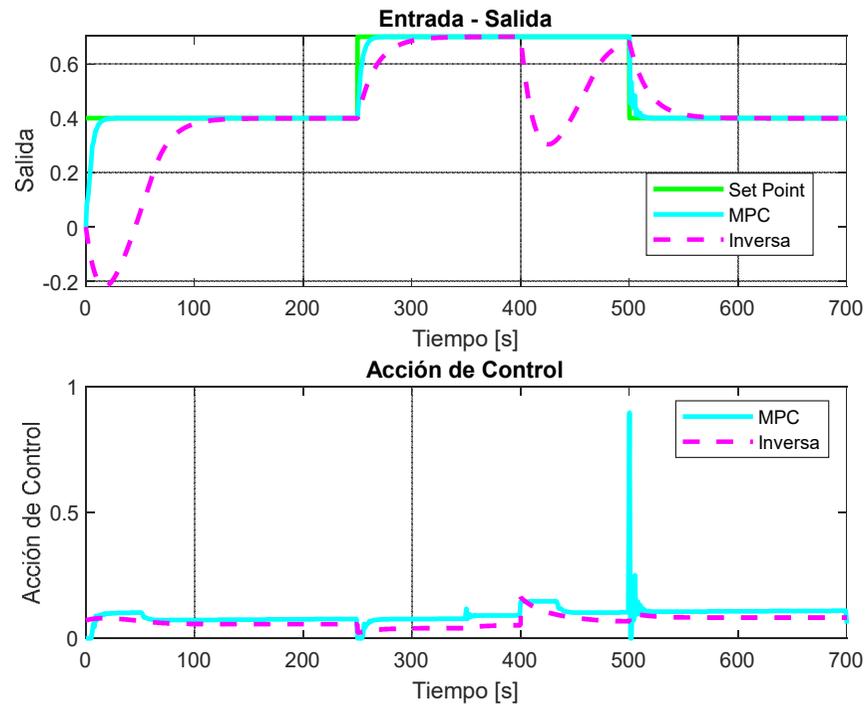
RESULTADOS



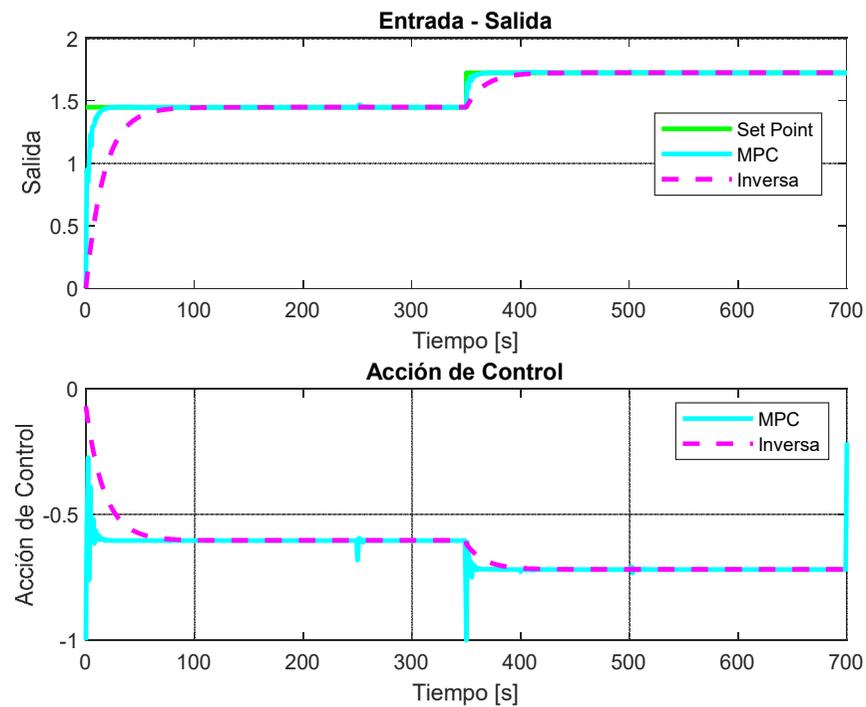
NIVEL AGUA



NIVEL CRUDO



PRESIÓN



RESUMEN

	PARÁMETRO	CONTROLADOR	
		INV-P	MPC
NIVEL AGUA	Tiempo de asentamiento (ts)	100 s	50 s
	Máximo sobreimpulso	0%	0%
	Acciones de control	suaves	bruscas
NIVEL CRUDO	Tiempo de asentamiento (ts)	100 s	10 s
	Máximo sobreimpulso	0%	0%
	Acciones de control	suaves	bruscas
PRESIÓN	Tiempo de asentamiento (ts)	60 s	10 s
	Máximo sobreimpulso	0%	0%
	Acciones de control	suaves	bruscas

INV-P: Inversa de la Planta

MPC: Control Predictivo basado en Modelos

AGENDA

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 MODELACIÓN
- 3 ESQUEMA DE CONTROL
- 4 RESULTADOS
- 5 CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- El petróleo representa el 2.5% en el PIB global, mientras que en el Ecuador representa el 8.9% de la economía nacional (2019); por esta razón, impacta en la economía de todas las naciones, especialmente de los países petroleros convirtiéndose así, en el recurso energético más importante a nivel mundial.
- Los modelos matemáticos de procesos industriales deben ser desarrollados en base a principios físicos y químicos, a fin de representar de una manera simplificada el comportamiento dinámico del proceso.
- El diseño de algoritmos de control avanzado como el MPC y el de la inversa de la planta, se basa en el modelo del proceso por tanto, es necesario que el modelo represente fielmente la dinámica de la planta.
- La RV, permite desarrollar entornos virtuales para simular procesos industriales a los cuales los estudiantes no tienen acceso, sobre todo en la industria de Oil&Gas donde las actividades de explotación, producción y refinamiento que se ejecutan son restringidas y se puede decir que sería imposible implementar, para entrenamiento, algoritmos de control en el FWKO.



UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

DEPARTAMENTO DE ELECTRICA Y ELECTRÓNICA

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN MENCIÓN REDES INDUSTRIALES

Sistema de Entrenamiento para Controlar un Separador Trifásico Horizontal

Autor:

Ing. Zahira Proaño C

Ing. Víctor Andaluz PhD, **Director**

