



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 Ingeniero en
Electrónica E Instrumentación**

**MONITOREO Y CONTROL DEL PROCESO DE MACERADO Y COCCIÓN DE MALTA
EN LA ELABORACIÓN DE CERVEZA ARTESANAL A TRAVÉS DE LA TÉCNICA
HARDWARE IN THE LOOP**

Autores:

Steven Israel Pogo Arteaga
Arias Bautista Jhonatan Fabricio

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D. *Tutor*
Ing. César A. Naranjo, Mg. *Cotutor*





SALENTO AVR 2021

8th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics

September 7 - 10, 2021

Control of the Malt Mashing and Boiling Process in Craft Beer Production: *Hardware-in-The-Loop-Technique*

Steven I. Pogo[✉], Jhonatan F. Arias, and Víctor H. Andaluz

Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
{sipogo, jfarrias5, vhandaluz1}@espe.edu.ec

Abstract. This work presents the design of control algorithms based on mathematical models algebra and PID, for the level and temperature control of a craft beer mashing and brewing plant, which will be designed in an immersive and interactive industrial virtual environment in the Unity 3D graphic engine. The controllers are implemented through the Hardware-in-the-Loop technique in order to allow the implementation of advanced control algorithms in an efficient and safe way. The virtual environment considers 3D models that provide a high level of realism to the process and the possibility of interaction with the user, also avoids the risk of damage to the system or loss of real control elements. For the virtualization of the industrial process, the mathematical model of the plant is considered and finally, the experimental results obtained in the implementation of the controllers through the Hardware-in-the-Loop technique are presented by means of a performance analysis of the same within the industrial process.

Keywords: Temperature control · Level control · Hardware-in-the-Loop · Industrial virtual environments · Virtual reality

1 Introduction

Throughout history, the industry has evolved by leaps and bounds [1], making the concept of automation as essential in modern industry in any field of application, since automatic processes play a fundamental role in the manufacture of a wide variety of products that aim to meet the needs of human beings [2], and nowadays, with the growing need to increase production, guarantee product quality and reduce costs, it is increasingly common to implement automatic systems in artisanal processes through classical and advanced control algorithms [3, 4]. For example, in the production of craft beer, fuzzy controllers have been applied in the malt mashing and boiling stages, by means of various actuators depending on the temperature and time of the process [5].

In the mashing process, automatic controls have also been carried out by controlling and monitoring pH, tank levels and temperature, using specific sensors to measure each of the variables and exchanging data with a PC [6]. Within the mashing process, temperature regulation is essential because the activity of enzymes that generate fermentable sugars

© Springer Nature Switzerland AG 2021
I. T. De Paolis et al. (Eds.), AVR 2021, LNCS 12980, pp. 1–17, 2021.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_51



About this paper



Check for updates

Cite this paper as:

Pogo S.I., Arias J.F., Andaluz V.H. (2021) Control of the Malt Mashing and Boiling Process in Craft Beer Production: *Hardware-in-The-Loop-Technique*. In: De Paolis L.T., Arpaia P., Bourdot P. (eds) Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics. AVR 2021. Lecture Notes in Computer Science, vol 12980. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_51

First Online	DOI	Publisher Name
16 September 2021	https://doi.org/10.1007/978-3-030-87595-4_51	Springer, Cham
Print ISBN	Online ISBN	eBook Packages
978-3-030-87594-7	978-3-030-87595-4	Computer Science Computer Science (R0)

[Reprints and Permissions](#)

Abstract

This work presents the design of control algorithms based on mathematical models algebra and PID, for the level and temperature control of a craft beer mashing and brewing plant, which will be designed in an immersive and interactive industrial virtual environment in the Unity 3D graphic engine. The controllers are implemented through the Hardware-in-the-Loop technique in order to allow the implementation of advanced control algorithms in an efficient and safe way. The virtual environment considers 3D models that provide a high level of realism to the process and the possibility of interaction with the user, also avoids the risk of damage to the system or loss of real control elements. For the virtualization of the industrial process, the mathematical model of the plant is considered and finally, the experimental results obtained in the implementation of the controllers through the Hardware-in-the-Loop technique are presented by means of a performance analysis of the same within the industrial process.

Keywords

Temperature control · Level control · Hardware-in-the-Loop · Industrial virtual environments · Virtual reality



International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics
AVR 2021: [Augmented Reality, Virtual Reality, and Computer Graphics](#) pp 701–716 | [Cite as](#)

Control of the Malt Mashing and Boiling Process in Craft Beer Production: *Hardware-in-The-Loop-Technique*

Authors [Authors and affiliations](#)

Steven I. Pogo[✉], Jhonatan F. Arias, Víctor H. Andaluz

Conference paper

First Online: 16 September 2021



345 Downloads

Part of the [Lecture Notes in Computer Science](#) book series (LNCS, volume 12980)



SALENTO AVR 2021

8th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality and Computer Graphics

September 7 - 10, 2021

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

Control of the Malt Mashing and Boiling Process in Craft Beer Production: Hardware-in-the-Loop-Technique

Autorees:
Pogo Artzaga Steven Israel
Arias Bautista Jonathan Fabricio

Ing. Victor H. Anshitz, Ph.D. Tutor

MATHEMATICAL MODEL

LEVEL MODEL.

Control valves : $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$
Solenoid valves : α_4, α_5
Outlet valve : α_6

Where : $\alpha \neq R [0 - 1]$

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = \alpha_1(t)q_1 + \alpha_2(t)q_2 - \alpha_3(t)q_3$$

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = \alpha_4(t)q_4 - \alpha_5(t)q_5 - \alpha_6(t)S_2 \sqrt{2gh_2(t)}$$

TEMPERATURE MODEL.

α_s : Steam control valve
 α_c : Cooling valve
 m_s : Saturated steam mass Flow
 m_c : Process mass flow

$$m_s C_p \frac{dT_1}{dt} = m_s C_p (T_1(t) - T_1(0)) + U A (T_2(t) - T_1(t))$$

$$m_c C_p \frac{dT_2}{dt} = m_c h_c - U A (T_2(t) - T_1(t))$$

External resources virtualization

REAL (Process, Factory, Instrumentation) → **3D MODELING** (Autodesk Plant 3D, Diagram P&ID, 3D Modeling, Assemble, SketchUp, Import 3D models, Layout adjustment, Assemble) → **PRODUCTION AND INTEGRATION** (Autodesk 3ds MAX, Graphic Optimization, UV Mapping, Materials Textures, Unity 3D, CAD Model, Import, Subdivide, Merge, Effects, Cameras, Illumination) → **DIGITIZED** (Process, Factory, Instrumentation)

VIRTUAL ENVIRONMENT

INDUSTRIAL ENVIRONMENT **CONTROL ROOM**

ADDED EFFECTS



September 7 - 10, 2021

This is to certify that

Pogo Arteaga, Steven Israel

presented

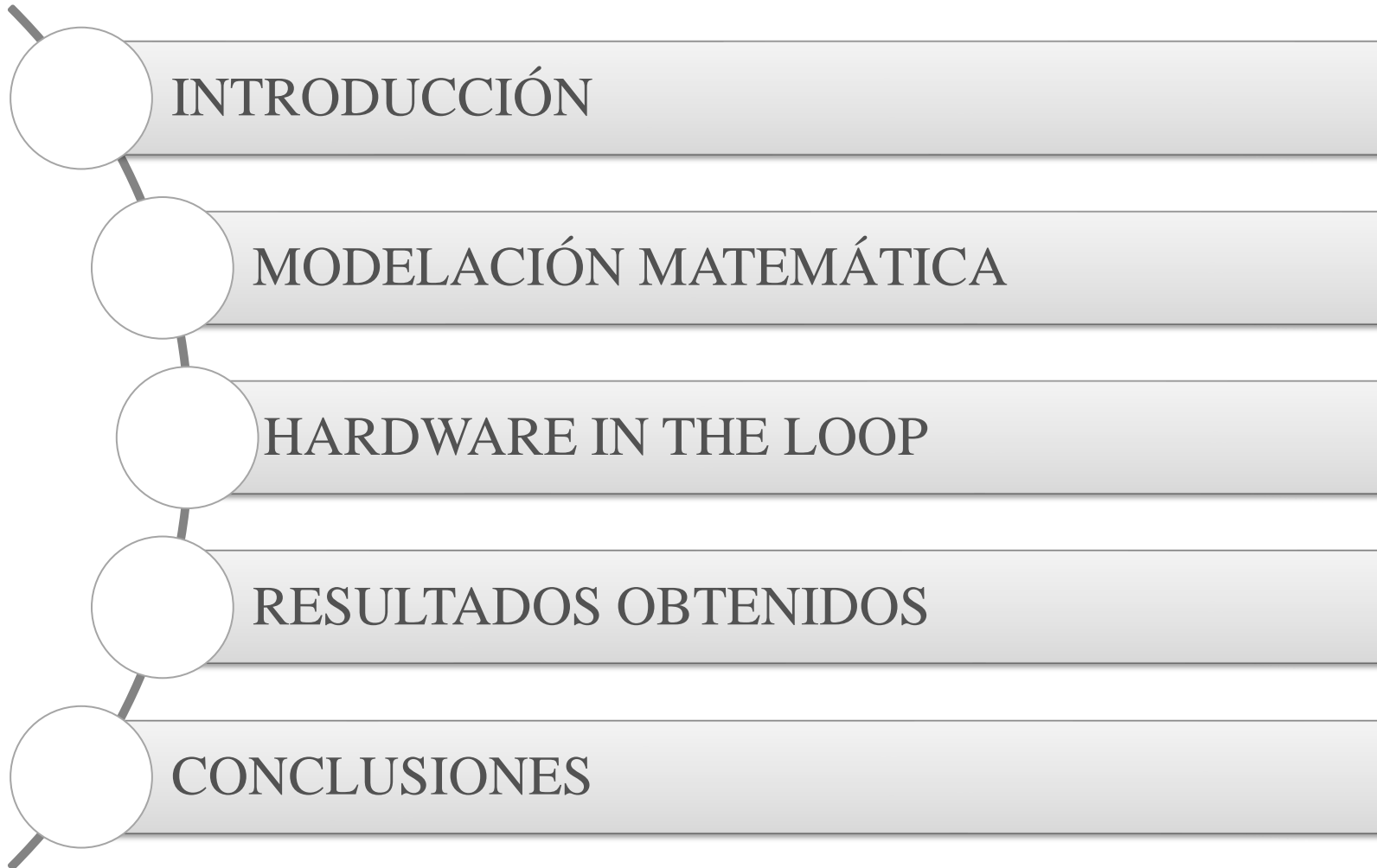
*"Control of the malt mashing and boiling process in craft beer production:
Hardware-in-the-Loop-Technique"*

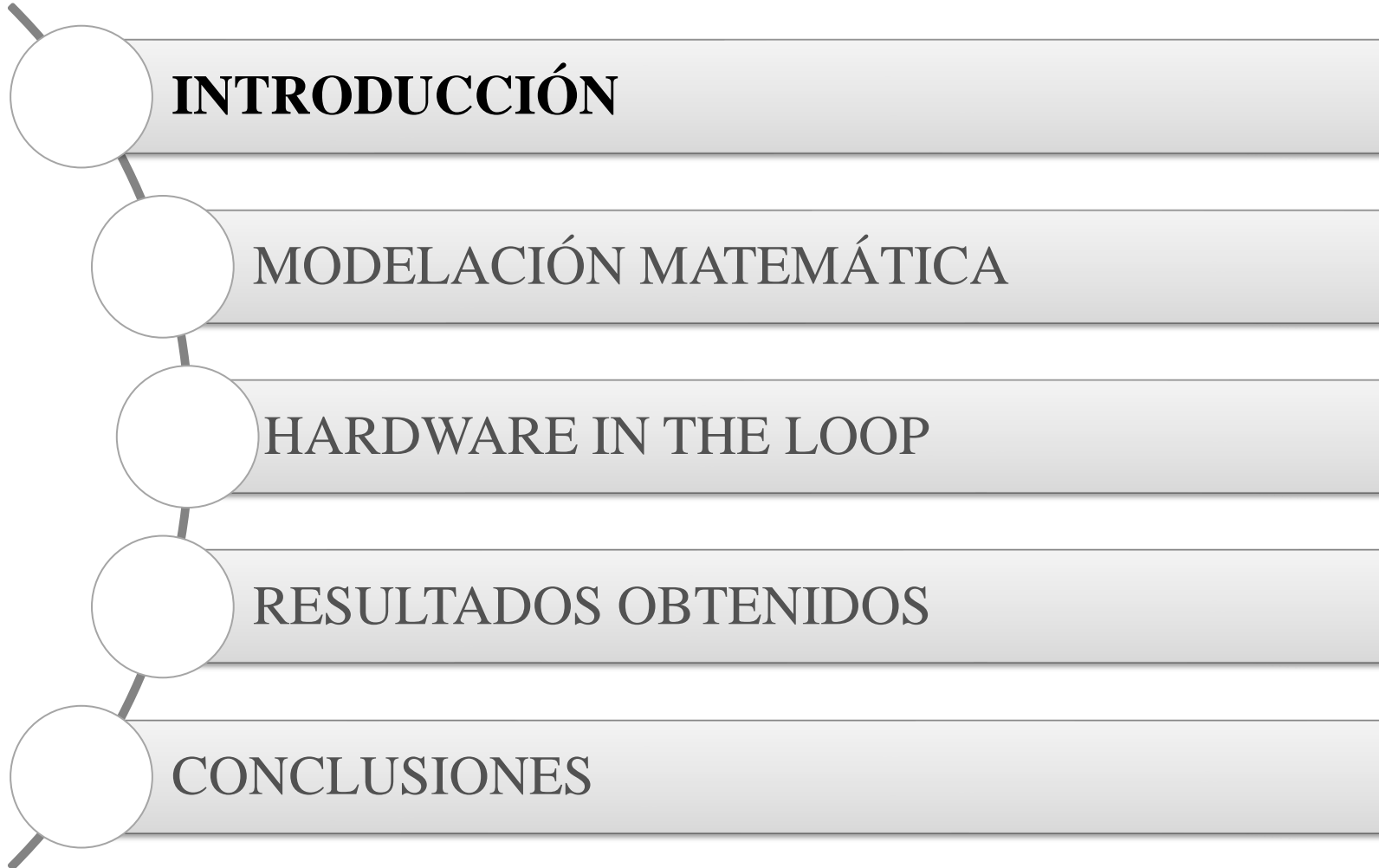
*in the 8th International Conference on Augmented Reality, Virtual Reality
and Computer Graphics*

(SALENTO AVR 2021)

September 7 - 10, 2021

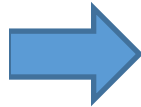
*Lucio Tommaso De Paolis
SALENTO AVR 2021 Conference Chair*







MOLIENDA



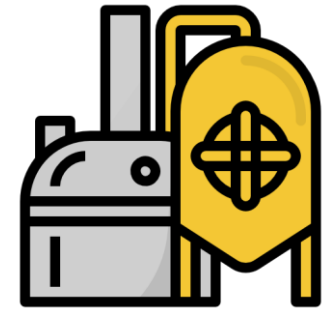
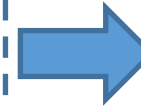
Planta de macerado y cocción



MACERADO



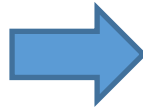
COCCIÓN



FERMENTACIÓN

En la investigación y desarrollo de algoritmos de control existen varias limitaciones como:

- Alto costo de implementación.
- Acceso limitado a la construcción de prototipos físicos.

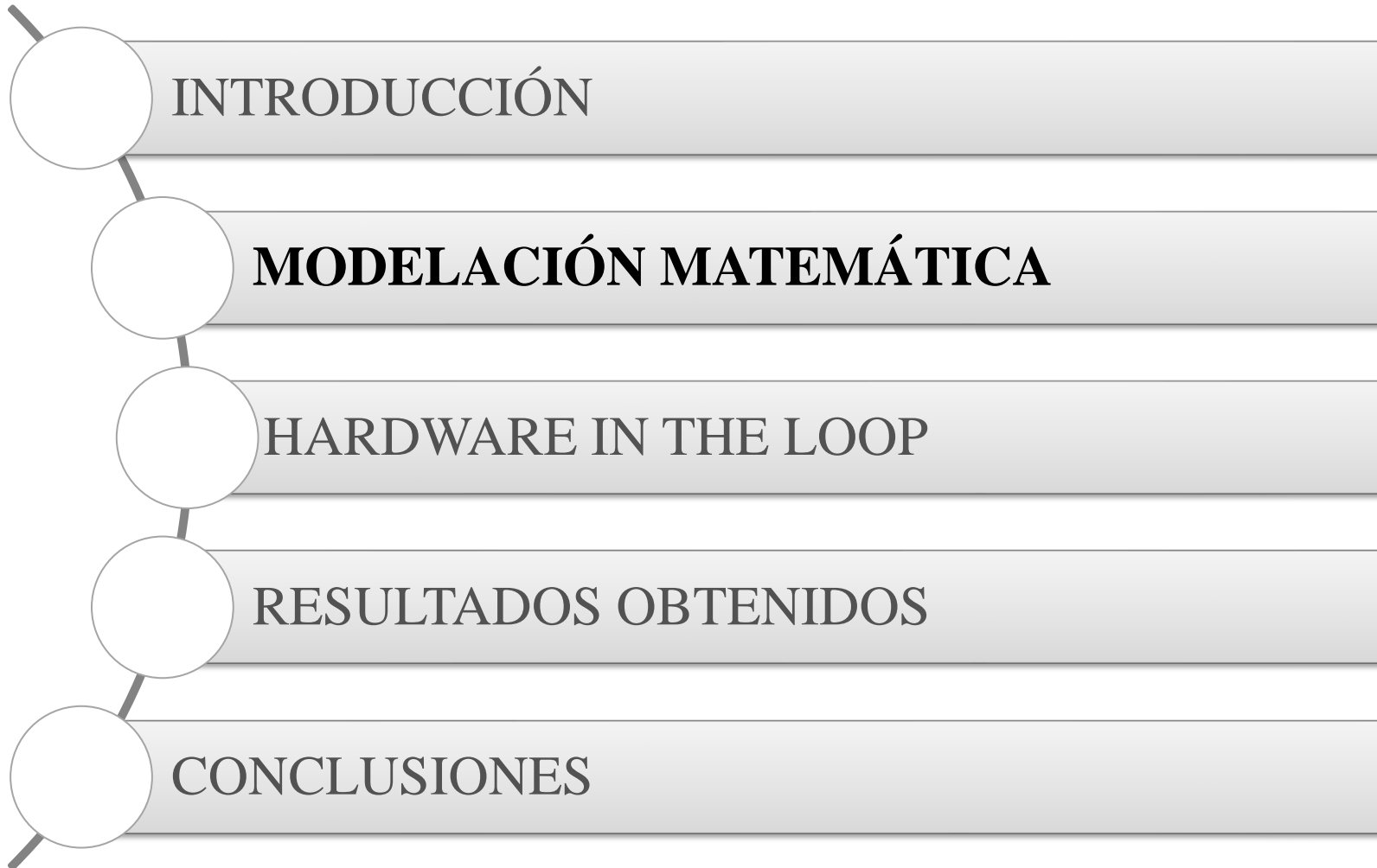


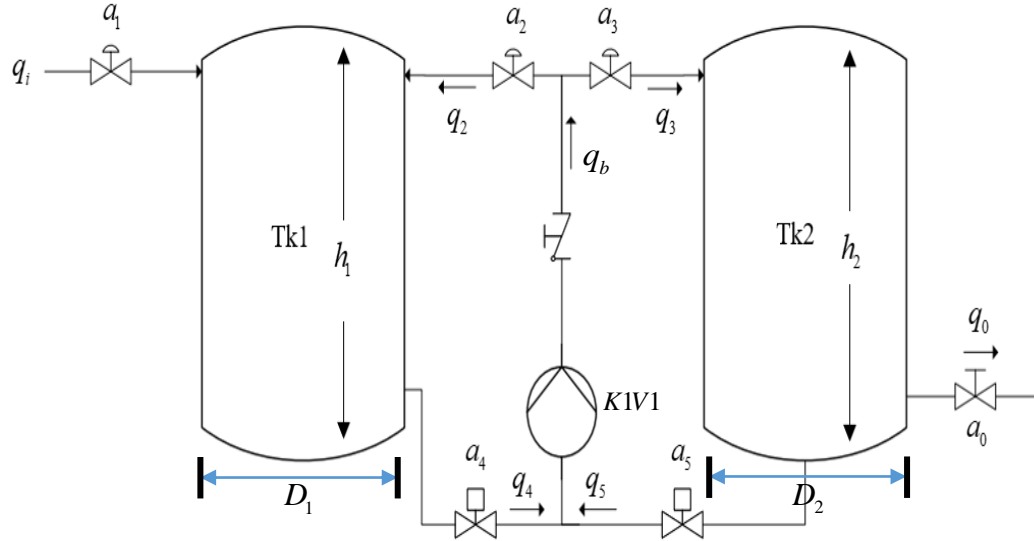
La solución es utilizar la técnica Hardware in the Loop !!

Implementar un entorno virtual Hardware-in-the-Loop, HIL, para el **monitoreo y control** del proceso de elaboración de cerveza artesanal; para lo cual, se considerará el modelo matemático que represente la maceración y cocción de la malta.

- Investigar en las diferentes bases de datos científicos acerca de la modelación y control del proceso artesanal en la elaboración de cerveza, con el propósito de **implementar algoritmos de control autónomos**.
- Determinar el **modelo matemático** que represente el comportamiento de la maceración y cocción de la malta en el proceso de elaboración de cerveza artesanal, con el fin de implementar algoritmos de control avanzados.
- Proponer **un algoritmo de control en lazo cerrado** basado en el modelo matemático de la maceración y cocción de la malta, a fin de automatizar el proceso artesanal de la elaboración de cerveza.
- Implementar un esquema de control basado en la **técnica “hardware in the loop”** considerando el modelo matemático del proceso de maceración y cocción en la elaboración de cerveza.

- Analizar analíticamente la **estabilidad y robustez** del esquema de control propuesto, con la finalidad de evaluar el comportamiento de los errores de control ante perturbaciones en el proceso.
- Desarrollar un **entorno virtual** en el motor gráfico Unity 3D que represente el proceso de elaboración de cerveza. El entorno desarrollado deberá ser inmersivo e interactivo con el usuario, a fin de monitorear y controlar los estados de control del proceso virtualizado.
- **Evaluar el desempeño** del esquema de control implementado en un entorno “hardware in the loop”, con el propósito de validar el comportamiento de los errores de control, durante el proceso de elaboración de cerveza virtualizado en el motor gráfico Unity 3D.





Válvulas de control : a_1, a_2, a_3

Electroválvulas : a_4, a_5

Válvula de salida : a_0

Donde : $a \in R [0-1]$

Flujo de salida de los tanques:

$$q_4 = a_4 S_1 \sqrt{2gh_1(t)}; \quad q_5 = a_5 S_2 \sqrt{2gh_2(t)}$$

Flujo a la salida de la bomba:

$$q_b = \frac{1}{2}(q_4 + q_5 + K_1 V_1)$$

$$A_1 \frac{dh_1}{dt} = a_1(t) q_i + a_2(t) q_b - a_4(t) q_4$$

$$A_2 \frac{dh_2}{dt} = a_3(t) q_b - a_5(t) q_5 - a_0(t) S_3 \sqrt{2gh_2(t)}$$

Donde:

q_i : Flujo de entrada

q_b : Flujo de bomba

S_1, S_2, S_3 : Area de la seccion trasversal de las tuberias

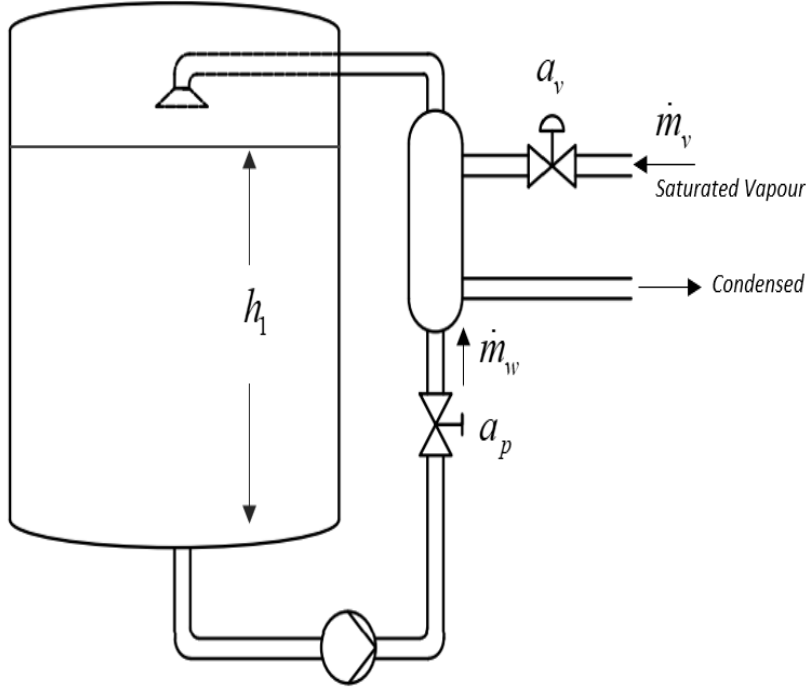
A_1, A_2 : Area de la superficie del tanque

K_1 : Constante de la bomba

Modelo de Nivel

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_1(t) \\ \dot{h}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{q_i}{A_1} & \frac{q_b}{A_1} & -\frac{q_b}{A_1} \\ 0 & -\frac{q_b}{A_2} & \frac{q_b}{A_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1(t) \\ a_2(t) \\ a_3(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{s_3 \sqrt{2gh_2}}{A_2} \end{bmatrix} [a_0]$$

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t) + \boldsymbol{\eta}$$



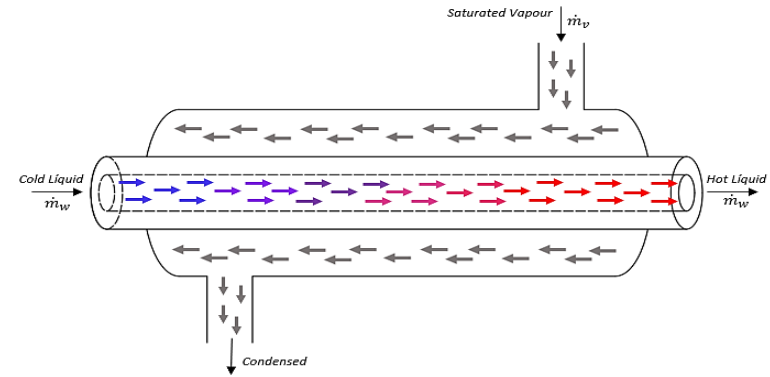
Donde:

a_v : Válvulas de control vapor

a_p : Válvula de carga

\dot{m}_v : Flujo masico de vapor saturado

\dot{m}_w : Flujo masico del proceso



Balace de energía en el intercambiador de calor:

$$m_v C_{pv} \frac{T_v}{dt} = \dot{m}_v h_{fg} - UA_s (T_v(t) - T_o(t))$$

$$m_p C_{pw} \frac{T_o}{dt} = \dot{m}_w C_{pw} (T_i(t) - T_o(t)) + UA_s (T_v(t) - T_o(t))$$

Modelo deflujo:

$$\dot{m}_v = a_v(t) K_v \sqrt{\Delta P}$$

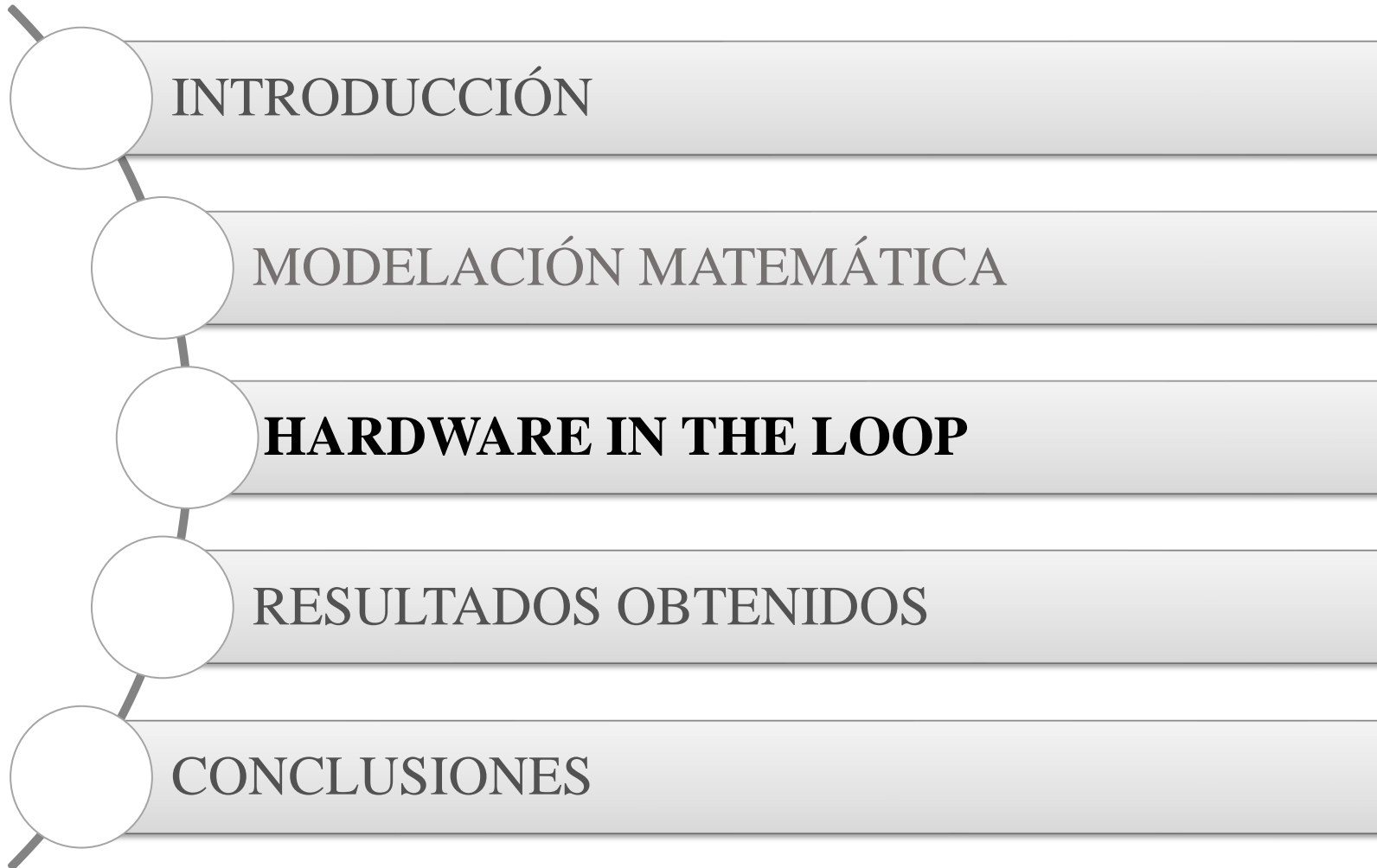
$$\dot{m}_w = a_p(t) K_2 V_2$$

Donde:

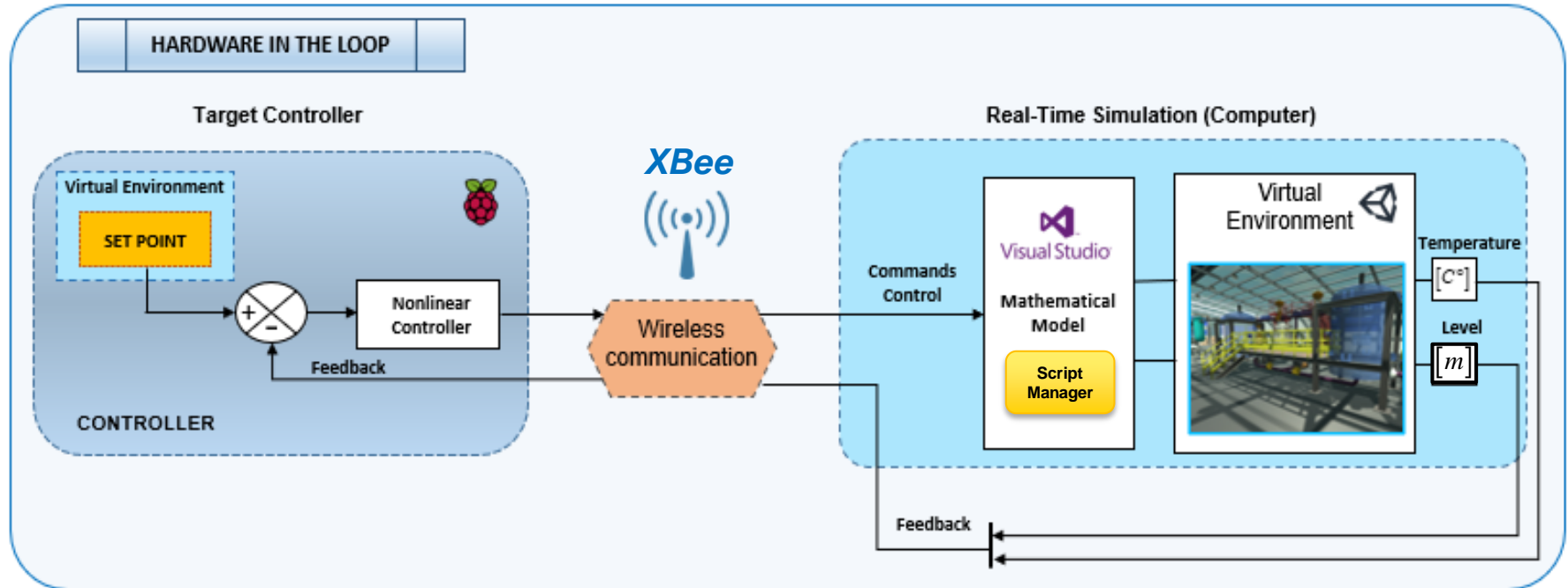
U : Coeficiente de trasferencia de calor

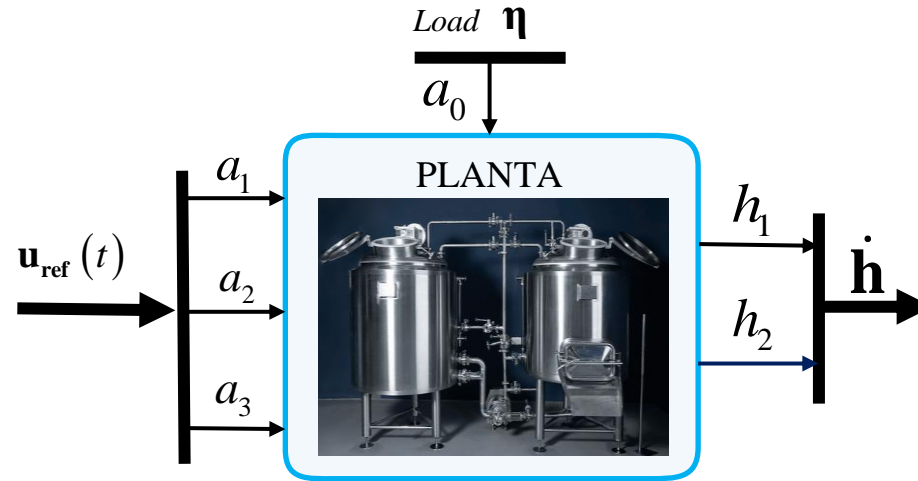
C_p : Calor específico.

h_{fg} : Entalpia de evaporización



Esquema de la técnica HIL propuesta





Modelo Matemático:

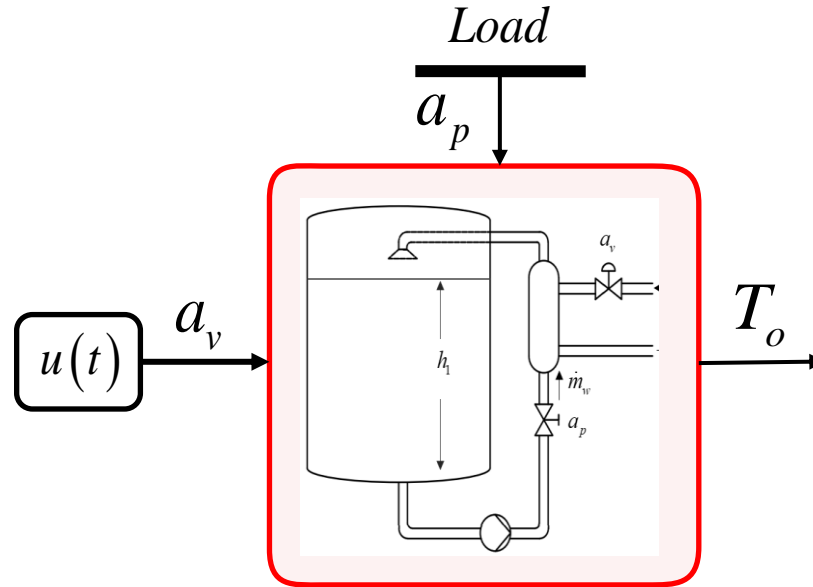
$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t) + \boldsymbol{\eta} \quad (1)$$

Comportamiento inverso de la planta:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{A}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}(t) - \boldsymbol{\eta}) \quad (2)$$

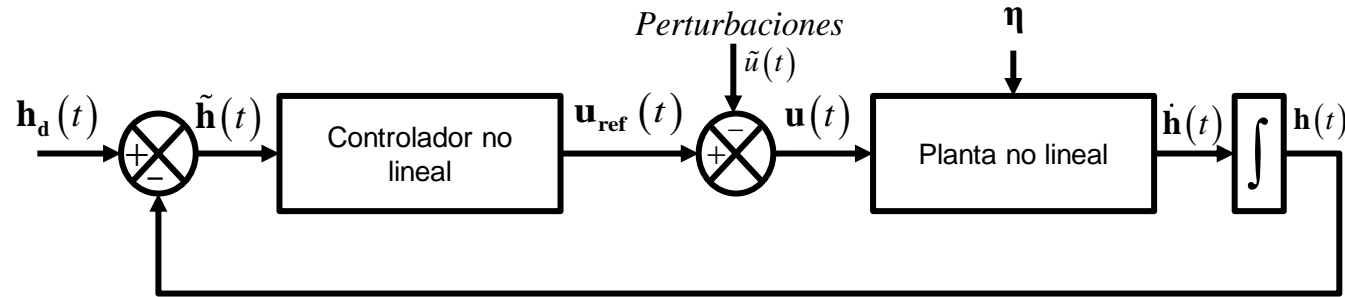
Ley de control propuesta:

$$\mathbf{u}_{\text{ref}}(t) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) - \boldsymbol{\eta}) \quad (3)$$



Control PID

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$



Perturbaciones a la entrada de la planta:

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_{\text{ref}}(t) - \tilde{\mathbf{u}}(t) \quad (4)$$

Ecuación de lazo cerrado considerando (4)

$$\tilde{\mathbf{h}}(t) = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) + \mathbf{A}\tilde{\mathbf{u}}(t) \quad (5)$$

Se considera la función candidata a Lyapunov

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{h}}(t)) = \tilde{\mathbf{h}}(t)^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}}(t) \quad \longrightarrow \quad \dot{V}(\tilde{\mathbf{h}}(t)) = -\tilde{\mathbf{h}}(t)^T \mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) + \tilde{\mathbf{h}}(t)^T \mathbf{A}\tilde{\mathbf{u}}(t)$$

$$\|\mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}\| > \|\mathbf{A}\tilde{\mathbf{u}}\|$$

Por lo tanto:

$$\|\tilde{\mathbf{h}}\| < \frac{\|\mathbf{A}\tilde{\mathbf{u}}\|}{\lambda_{\min} \mathbf{K}} \quad (6)$$

Proceso:

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{u}(t) + \boldsymbol{\eta}$$

Ley de control:

$$\mathbf{u}_{\text{ref}}(t) = \mathbf{A}^{-1}(\mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) - \boldsymbol{\eta})$$

Ecuación en lazo cerrado considerando $\mathbf{u}_{\text{ref}}(t) \equiv \mathbf{u}(t) \rightarrow \tilde{\mathbf{u}}(t) = 0$

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}}(t) = -\mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t)$$

Teoría de Lyapunov

$$\mathbf{V}(\tilde{\mathbf{h}}(t)) = \tilde{\mathbf{h}}(t)^T \tilde{\mathbf{h}}(t) \quad \longrightarrow \quad \dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}(t)) = -\tilde{\mathbf{h}}(t)^T \mathbf{K}\tilde{\mathbf{h}}(t) < 0$$

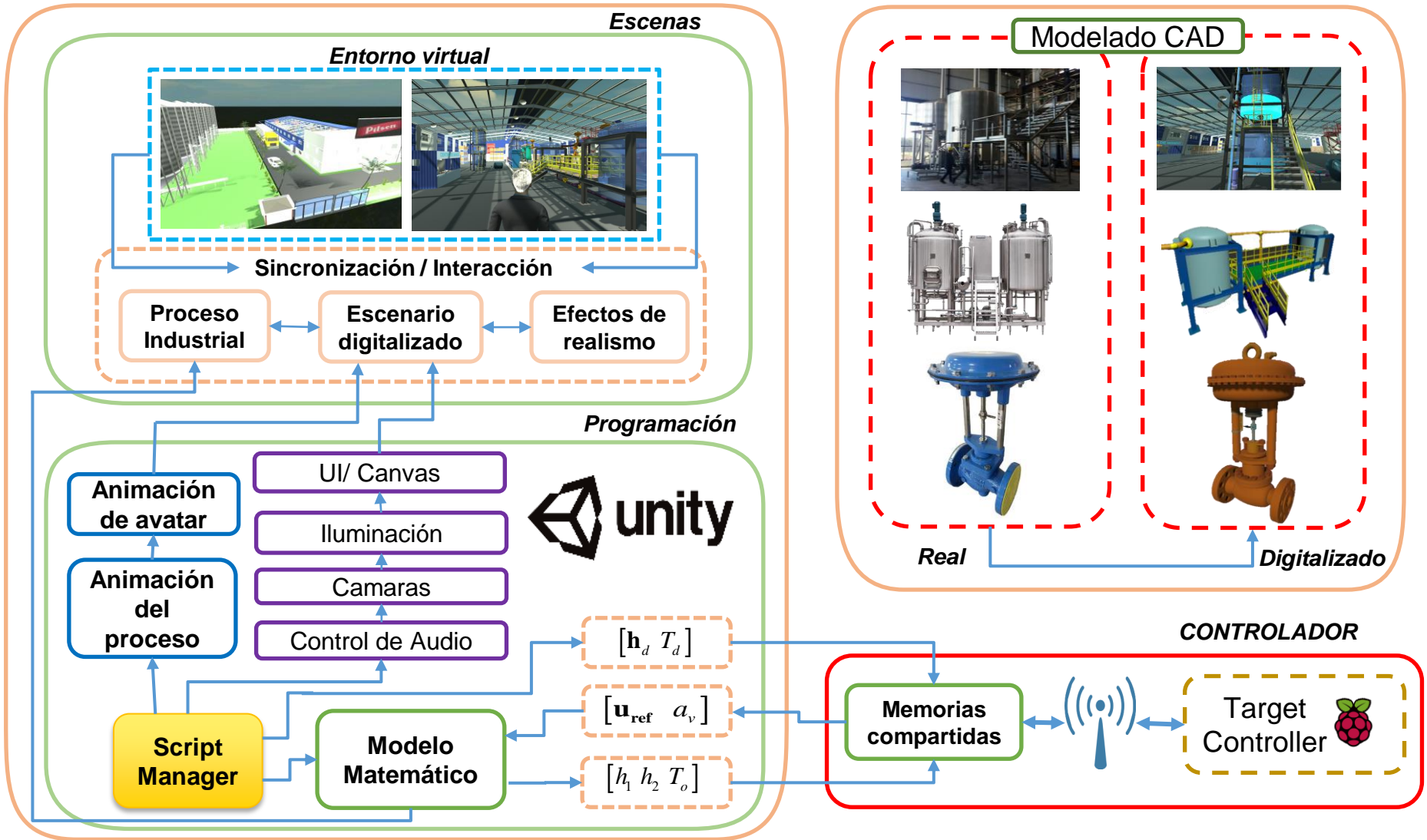
Por lo tanto:

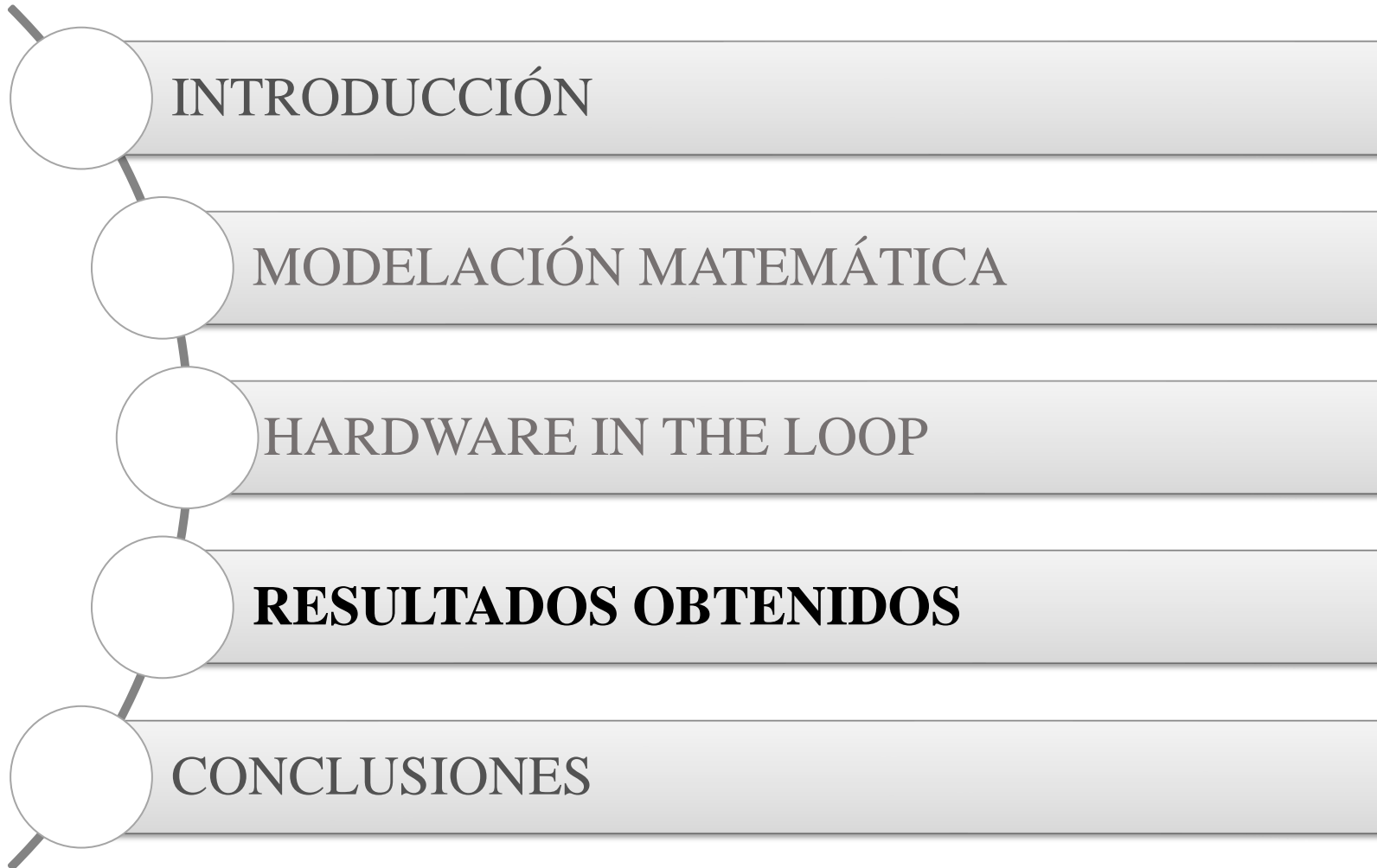
$$\lim_{t \rightarrow \infty} (\mathbf{h}_d(t) - \mathbf{h}(t)) = \mathbf{0} \in \mathfrak{R}^2$$

$$\text{con} \quad \mathbf{K} = \begin{bmatrix} K_1 & 0 \\ 0 & K_2 \end{bmatrix} > 0$$

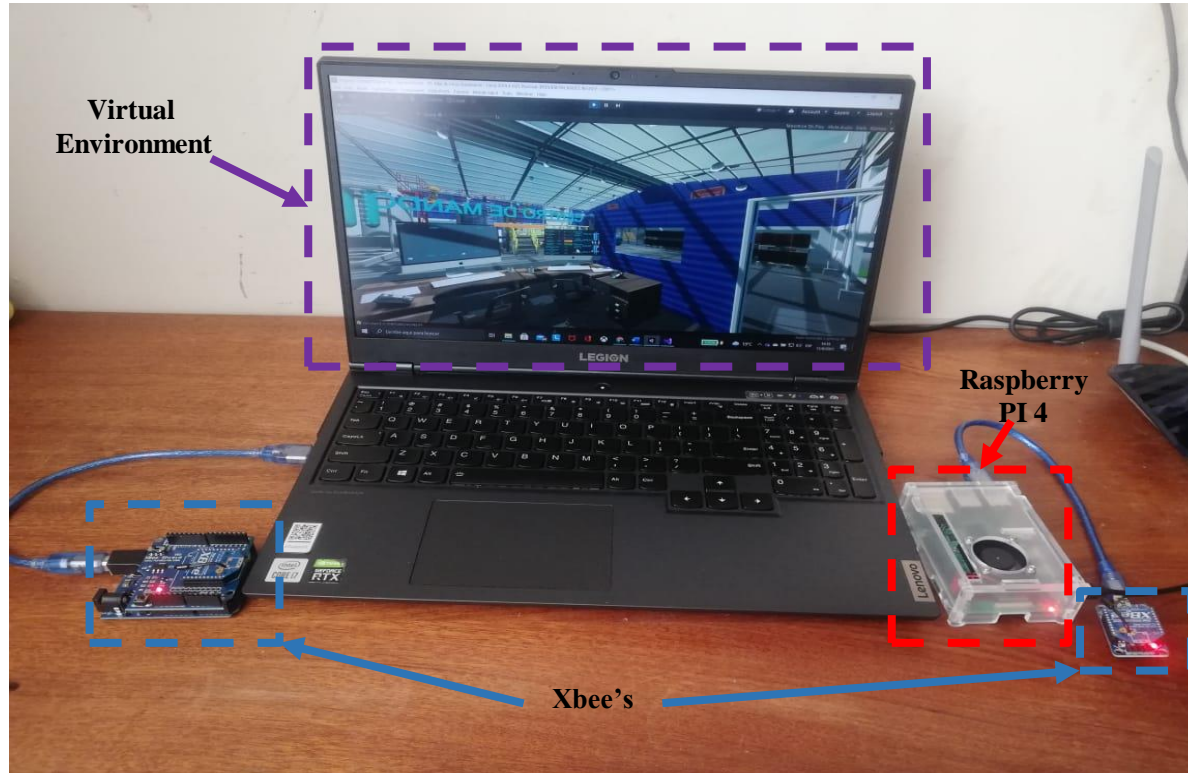
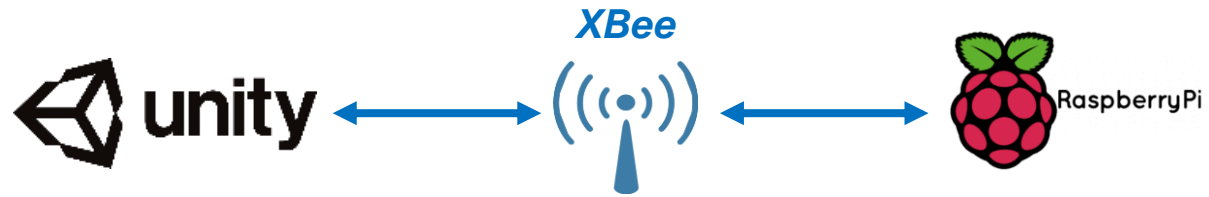
MOTOR DE GRÁFICOS 3D

RECURSOS EXTERNOS





HADWARE IN THE LOOP





Entorno Industrial



Centro de Control

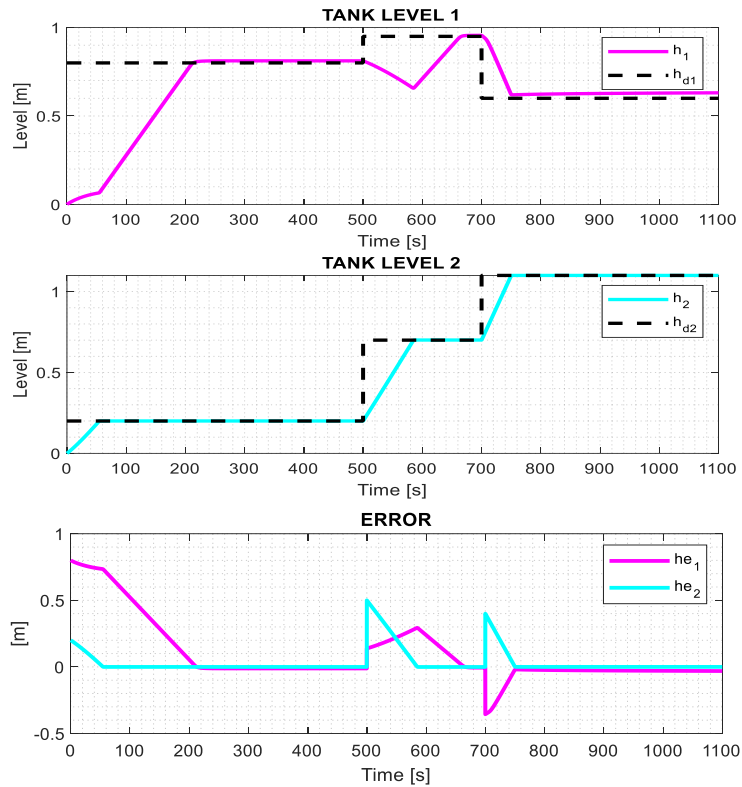


Efectos integrados

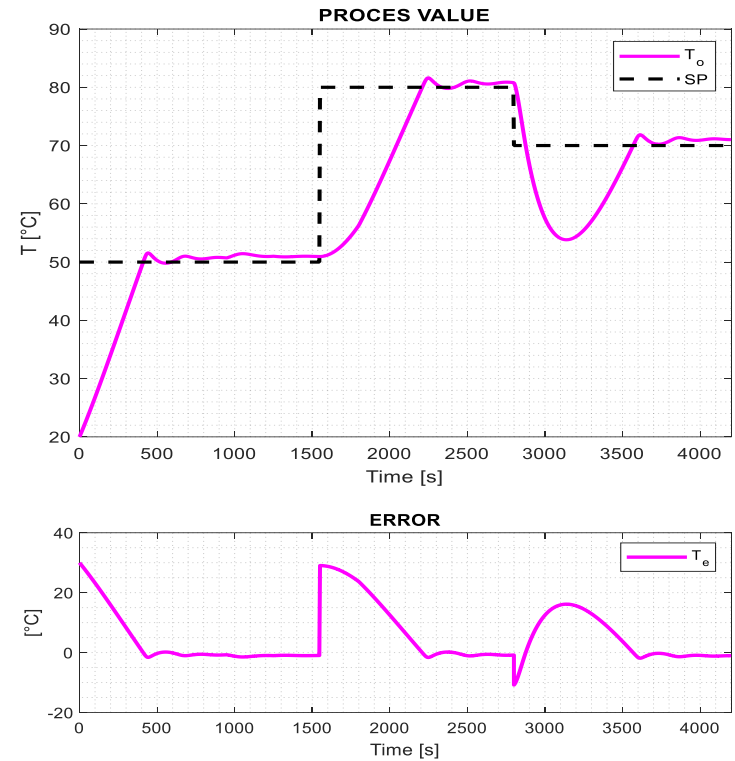


Instrumentación

CONTROL DE NIVEL



CONTROL DE TEMPERATURA





CONCLUSIONES

- ✓ La **automatización** de los procesos artesanales mediante la aplicación de controladores avanzados permite obtener una **mayor productividad y mejorar la calidad** del procesamiento de la materia prima, como la malta en el proceso de elaboración de cerveza.
- ✓ El **modelo matemático** del proceso de nivel y temperatura permite representar adecuadamente el **comportamiento de la planta** ya que toma en cuenta las **dimensiones reales** de los componentes que conforman la planta de macerado y cocción.
- ✓ Mediante el **análisis de estabilidad y robustez** se determinó que los errores tienden a cero cuando el tiempo tiende al infinito y de existir perturbaciones al entrada de la planta los errores se encuentran saturados en función de la norma del proceso por la perturbación entre los autovalores mínimos.
- ✓ La **técnica Hardware-in-the-Loop** permite simular en tiempo real un proceso industrial lo que concede **implementar algoritmos de control avanzados** en procesos que presentan desventajas por su alto coste o disponibilidad.



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 NO LINEAL DE ROBOTS MANIPULADORES AÉREOS BASADO EN MÉTODOS NUMÉRICOS”

Autores:

Jaime Alejandro Alegría Vizueté

David Fernando Grijalva López

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D. *Tutor*

Ing. César A. Naranjo, Mg. *Cotutor*

