



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 DE UN BIORREACTOR PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES EN UN ENTORNO VIRTUAL APLICANDO
LA TECNICA HARDWARE IN THE LOOP"**

Autores:

Kevin Joseph Gutiérrez Pilicita

Jimmy Javier Pilicita Lagla

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D. *Tutor*

Ing. César A. Naranjo, Mg. *Cotutor*



Chapter 48 3D Virtual Training System for a Bioreactor Using Hardware-in-the-Loop

Kevin J. Gutiérrez, Jimmy J. Pilicita, César A. Naranjo,
and Víctor H. Andaluz

Abstract This paper simulates a 3D virtual environment of a bioreactor based on the teaching-learning process in the engineering area. Using the Hardware-in-the-Loop simulation technique, the simulator was developed in the Unity 3D graphic engine, which is oriented to maintain in optimal conditions the variables involved in the process, such as: Biomass, recirculated biomass, dissolved oxygen, and chemical oxygen demand, the latter being the controlled variable. For the implemented simulator, traditional control techniques and modern control techniques are considered in order to evaluate the behavior of the variables. In order to give realism to the bioreactor, the hardware-in-the-Loop simulation technique is implemented in a low-cost hardware device, where the mathematical model of the process will be (On hardware-in-the-loop simulation. In 44th IEEE Conference on Decision and Control, and the European Control Conference, Seville, Spain), while the control algorithm is implemented in the mathematical software Matlab. Finally, the stability analysis is performed having the variables in their optimal operating points, as well as the good performance of the controllers in the presence of disturbances.

48.1 Introduction

The twenty-first century has faced different types of problems worldwide. From the depletion of non-renewable resources to facing climate change and pandemics.

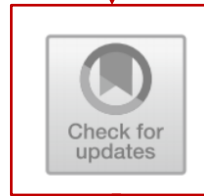
K. J. Gutiérrez - J. J. Pilicita (✉) - C. A. Naranjo - V. H. Andaluz
Universidad de Las Fuerzas Armadas ESPPE, Sangolquí, Ecuador
e-mail: jjpilicita@espe.edu.ec

K. J. Gutiérrez
e-mail: kjgutierrez@espe.edu.ec

C. A. Naranjo
e-mail: canaranjo@espe.edu.ec

V. H. Andaluz
e-mail: vhandaluz1@espe.edu.ec

© The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Singapore Pte Ltd. 2022
A. Mesquita et al. (eds.), *Perspectives and Trends in Education and Technology*,
Smart Innovation, Systems and Technologies 756,
https://doi.org/10.1007/978-981-16-5063-5_48



CrossMark

Document is current

Any future updates will be listed below

3D Virtual Training System for a Bioreactor Using Hardware-in-the-Loop

Crossref DOI link: https://doi.org/10.1007/978-981-16-5063-5_48

Published: 2022

Update policy: https://doi.org/10.1007/SPRINGER_CROSSMARK_POLICY

Authors

Gutiérrez, Kevin J.
Pilicita, Jimmy J.
Naranjo, César A.
Andaluz, Víctor H.

License Information

[Text and Data Mining](#) valid from 2021-11-17
[Version of Record](#) valid from 2021-11-17

SpringerLink



[Perspectives and Trends in Education and Technology](#) pp 573-586 | [Cite as](#)

3D Virtual Training System for a Bioreactor Using Hardware-in-the-Loop

Authors [Authors and affiliations](#)

Kevin J. Gutiérrez, Jimmy J. Pilicita ✉, César A. Naranjo, Víctor H. Andaluz

Conference paper

First Online: 17 November 2021

132

Downloads

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

ICITED 21

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



ICITED 21 International Conference in Information Technology & Education

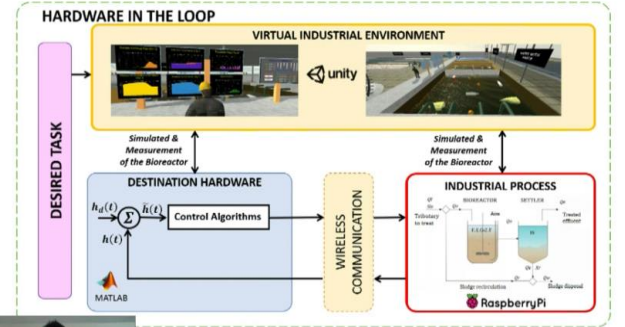
3D Virtual Training System for a Bioreactor using Hardware-in-the-Loop

Jimmy J. Pillicita, Kevin J. Gutiérrez, César A. Naranjo, and Victor H. Andaluz

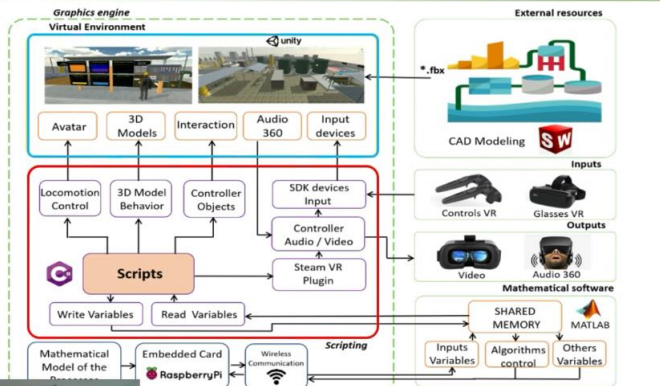
{jppilicita, kjgutierrez, canaranjo, vhandaluz1}@espe.edu.ec



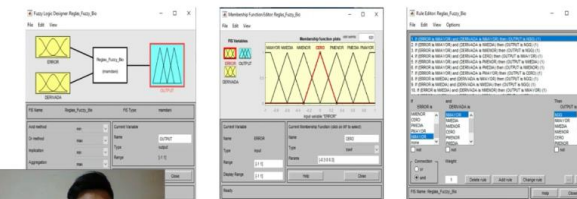
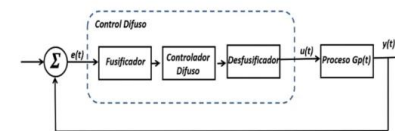
Hardware-in-the-Loop Structure



System Structure



Controlador Fuzzy



ICITED 21

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



This Certifies that the article Virtual Training System for a Bioreactor through
Hardware-in-the-Loop Technique, (Kevin J. Gutiérrez, Jimmy J. Pilicita, Victor H.
Andaluz) was presented in the
International Conference in Information Technology & Education
July 15-17, Sao Paulo, Brazil

Antônio João Vidal Carvalho

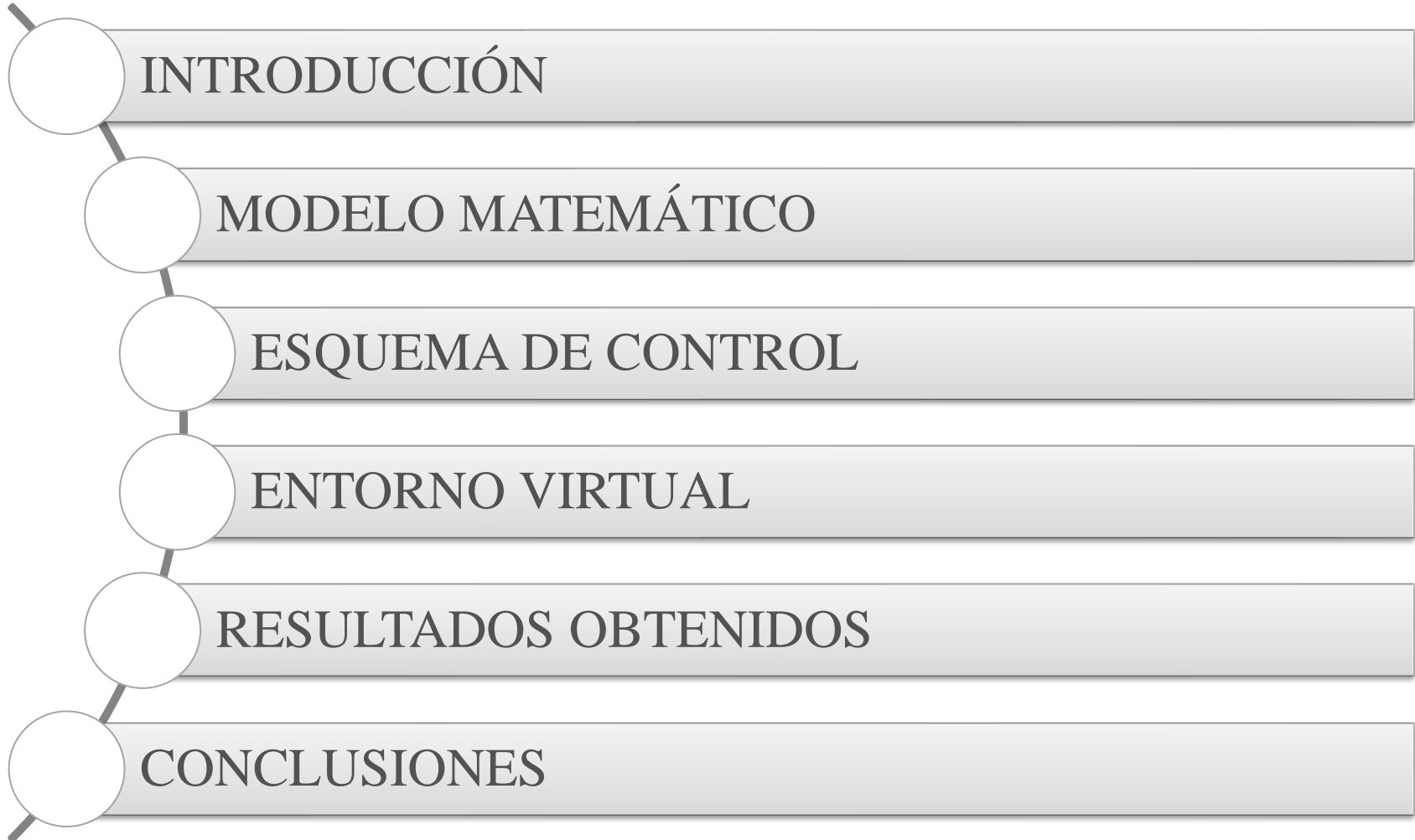
Antônio João Vidal Carvalho

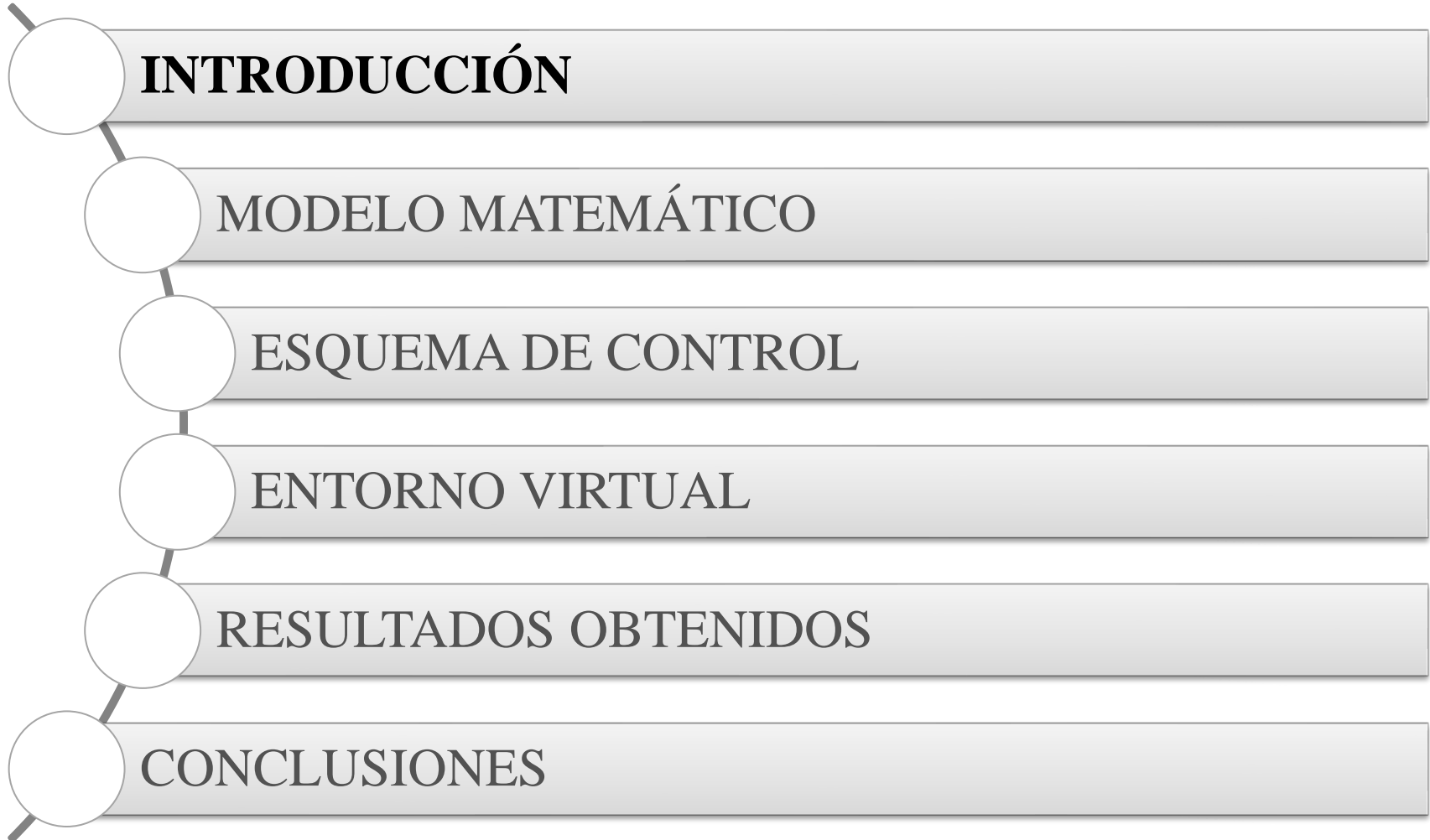
Antônio José Abreu Silva

Antônio José Abreu Silva

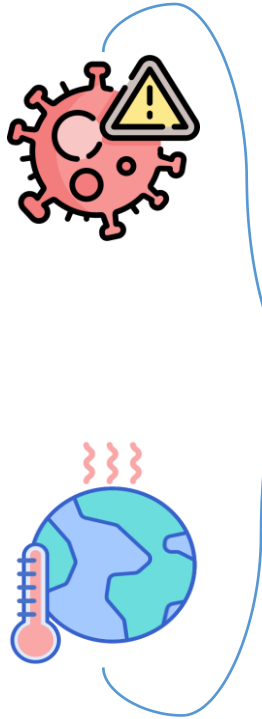
ICITED'21 General Chairs







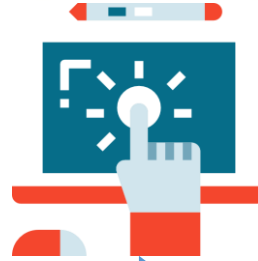
Siglo XXI



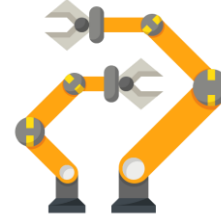
Cambios de Patrones



Digitalización



Automatización



Realidad Virtual



Internet de las cosas

Ingeniería



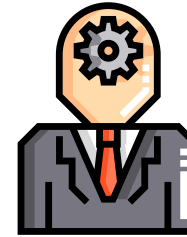
relación



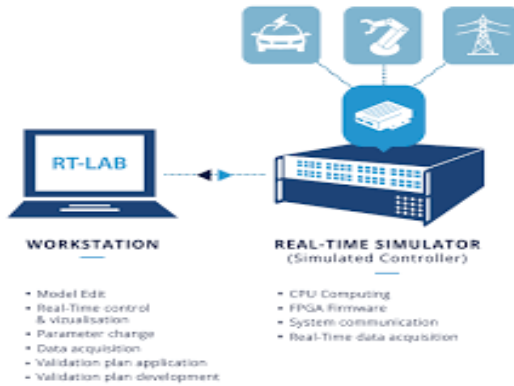
Educación



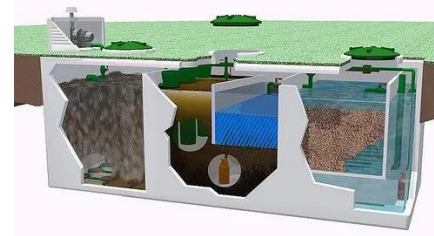
En efecto



• Técnica HIL



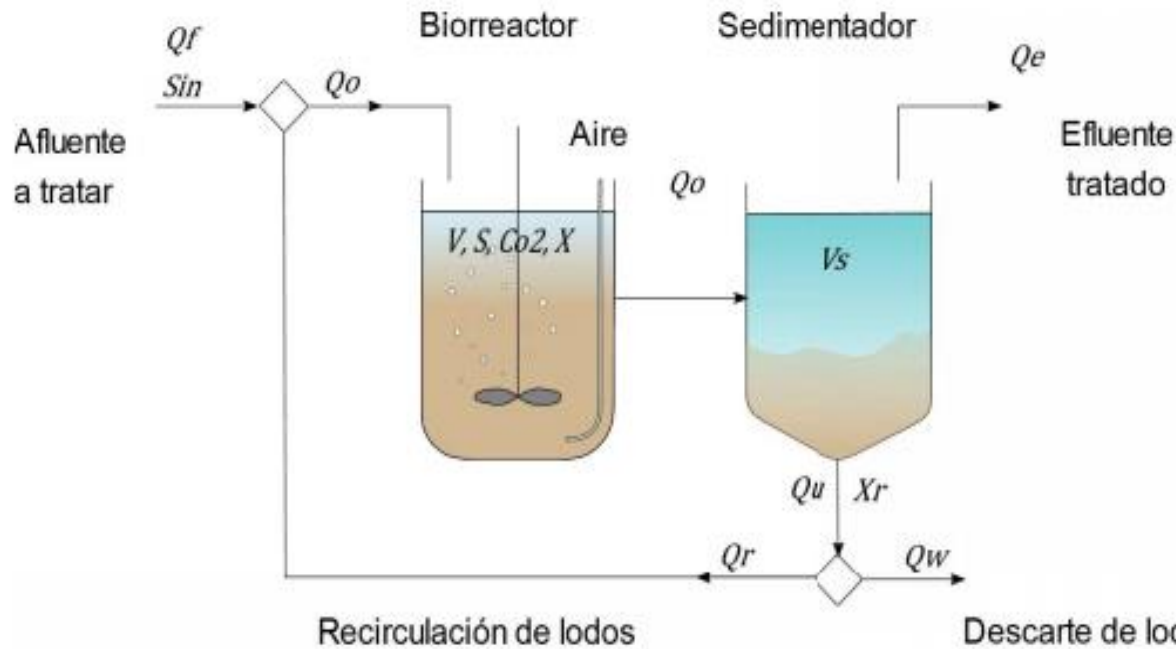
Bioreactor



- Proponer **algoritmos de control** para un sistema virtual 3D permitido evaluar las variables que interactúan en un biorreactor, a través de la técnica **Hardware-in-the-loop**.

- **Investigar en las diferentes bases de datos científicas** la teoría de controladores y el funcionamiento de un biorreactor con el propósito de implementar algoritmos de control.
- **Determinar el modelo matemático** que represente el comportamiento de un biorreactor, con el fin de implementar algoritmos de control.
- **Proponer algoritmos de control en lazo cerrado**, con la finalidad de analizar la estabilidad de los esquemas de control propuestos en el biorreactor.
- **Desarrollar un entorno hardware-in-the-loop** que evalúe el control de un biorreactor con la utilización de tarjetas de adquisición de datos.
- **Desarrollar una interfaz virtual 3D** que permita visualizar los resultados de los distintos controladores, así como las variables que interactúan en el biorreactor.
- **Evaluar el desarrollo de los algoritmos de control** implementado la técnica Hardware-in-the-loop, con el fin de verificar el comportamiento del biorreactor, virtualizado en una interfaz 3D.





S : Concentración del sustrato, mg/l

V : Volumen del biorreactor, m^3

X : Concentración de biomasa, mg/l

t : Tiempo, d (días)

k_{la} : Concentración de transferencia de masa para el oxígeno, d^{-1}

X_r : Concentración de biomasa en el sedimentador, mg/l

Q_f : Flujo de entrada, m^3/d

Q_r : Flujo de recirculación de biomasa, m^3/d

Q_r : Flujo de recirculación de biomasa, m^3/d

Q_w : Flujo de descarga de biomasa, m^3/d

Q_o : Flujo de salida del biorreactor, m^3/d

Q_u : Flujo de sedimentador, m^3/d

S_{in} : Concentración de flujo en entrada, mg/l

CO_2 : Concentración de oxígeno disuelto, mg/l

CO_{2in} : Concentración de oxígeno disuelto en el flujo de entrada, mg/l

CO_{2sat} : Concentración de saturación de oxígeno disuelto, mg/l

▷ Tasa de cambio del sustrato(S)

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q_f}{V} S_{in} - \frac{Q_o}{V} S - \frac{\mu_{max}}{Y_{x/s}} \left(\frac{S}{K_S + S} \right) \left(\frac{CO_2}{K_{OH} + CO_2} \right) X + k_d (1 - f_n) X - k_{ev} S$$

▷ Tasa de cambio de la biomasa(X)

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q_r}{V} X_r - \frac{Q_o}{V} X - \frac{\mu_{max}}{Y_{x/s}} \left(\frac{S}{K_S + S} \right) \left(\frac{CO_2}{K_{OH} + CO_2} \right) X + k_d X$$

▷ Tasa de cambio de Oxígeno Disuelto(CO₂)

$$\frac{dCO_2}{dt} = \frac{Q_r}{V} CO_{2in} - \frac{Q_o}{V} CO_2 - \frac{\mu_{max}}{Y_{O_2}} \left(\frac{S}{K_S + S} \right) \left(\frac{CO_2}{K_{OH} + CO_2} \right) X + k_{la} (CO_{2in} - CO_2)$$

▷ Tasa de cambio de Biomasa de Recirculación(X_r)

$$\frac{dX_r}{dt} = \frac{Q_o}{V_s} X - \frac{Q_U}{V_s} X_r$$

▷ Posición de la Valvula(V_p)

$$\frac{dV_p}{dt} = \frac{1}{\tau V_p} [m - V_p]$$

▷ Concentración de saturación de oxígeno disuelto ($O_{2_{sat}}$)

$$O_{2_{sat}} = (0.0035T^2 - 0.3355T + 14.465)(0.985)(1.4185)$$

▷ Coeficiente de velocidad de desgasificado (k_{ev})

$$k_{ev} = 0.016T - 0.165$$

▷ Tasa máxima crecimiento especificado (μ_{max})

$$\mu_{max} = 0.759 \exp \left[- \left(\frac{T - 26.42}{33.27} \right)^2 \right]$$

▷ Coeficiente de transferencia de masa para el oxígeno (k_{la})

$$k_{la} = k_{la0} 1.02^{(T-20)}$$

Este método de aproximación se obtiene a partir del método de dos puntos de Smith en la curva de reacción del proceso.

$$\frac{Y(s)}{u(s)} = \frac{Ke^{-t_0s}}{\tau s + 1}$$

$Y(s)$ ▷ Transformada de Laplace de la variable controlada

$u(s)$ ▷ Transformada de Laplace de la variable manipulada

K ▷ Ganancia de tiempo del sistema

t_0 ▷ Retardo de tiempo del sistema

τ ▷ Constante de tiempo del sistema

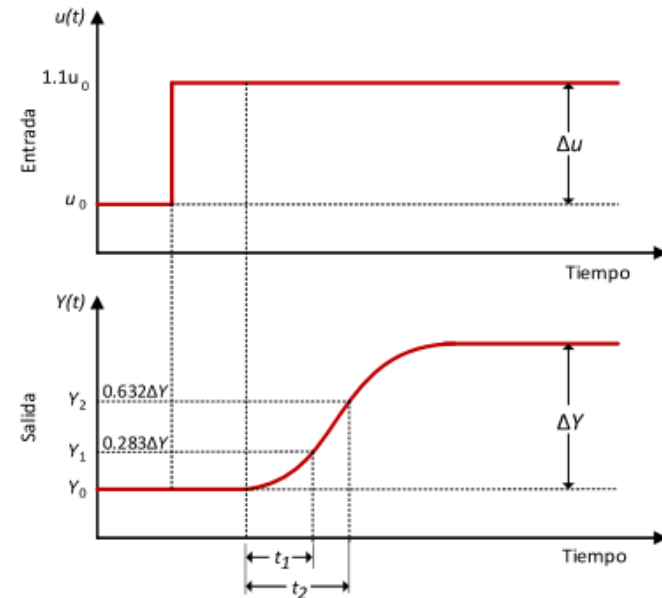
$$\tau = 1.5(t_2 - t_1)$$

$$t_0 = t_2 - \tau$$

$$K = \frac{\Delta Y}{\Delta u}$$

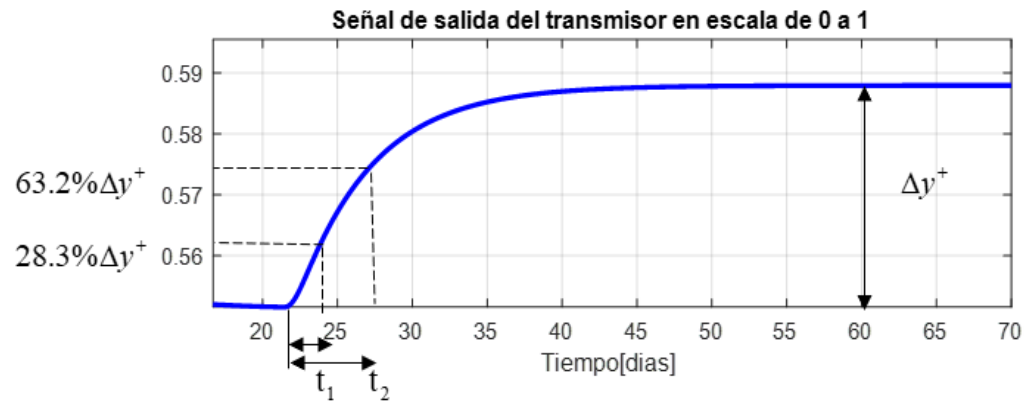
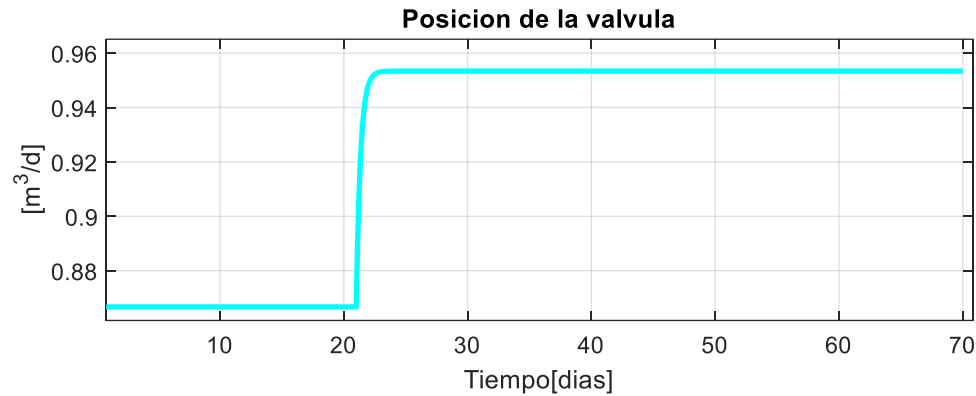
ΔY ▷ Variación de la salida

Δu ▷ Variación de la entrada



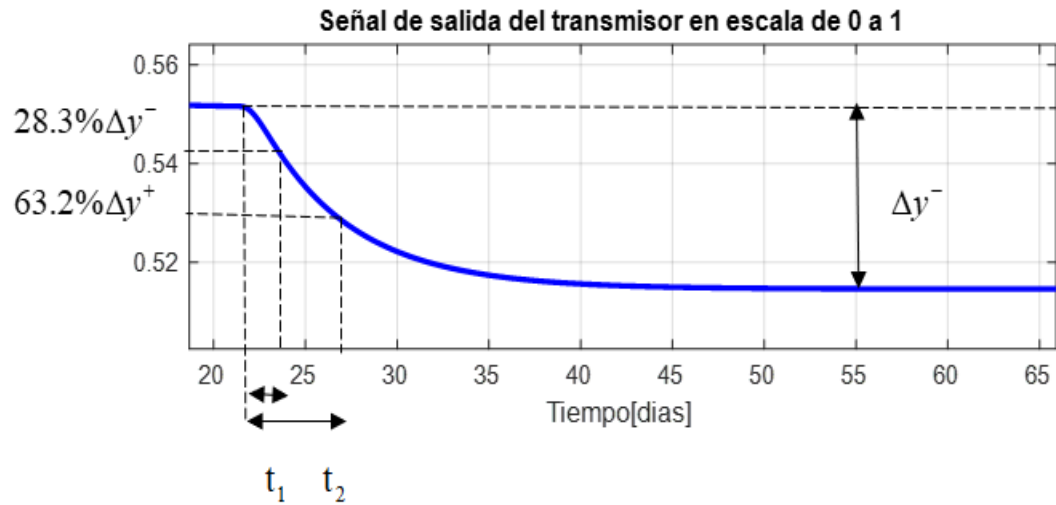
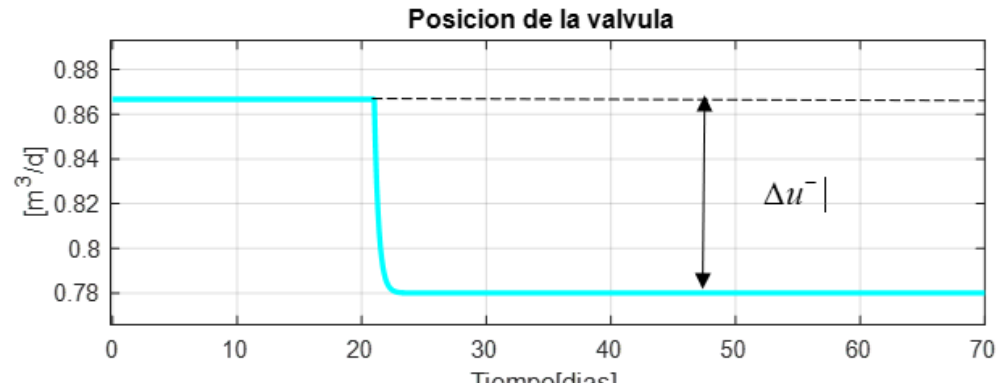
BIORREACTOR

▷ Paso positivo



BIORREACTOR

▷ Paso Negativo



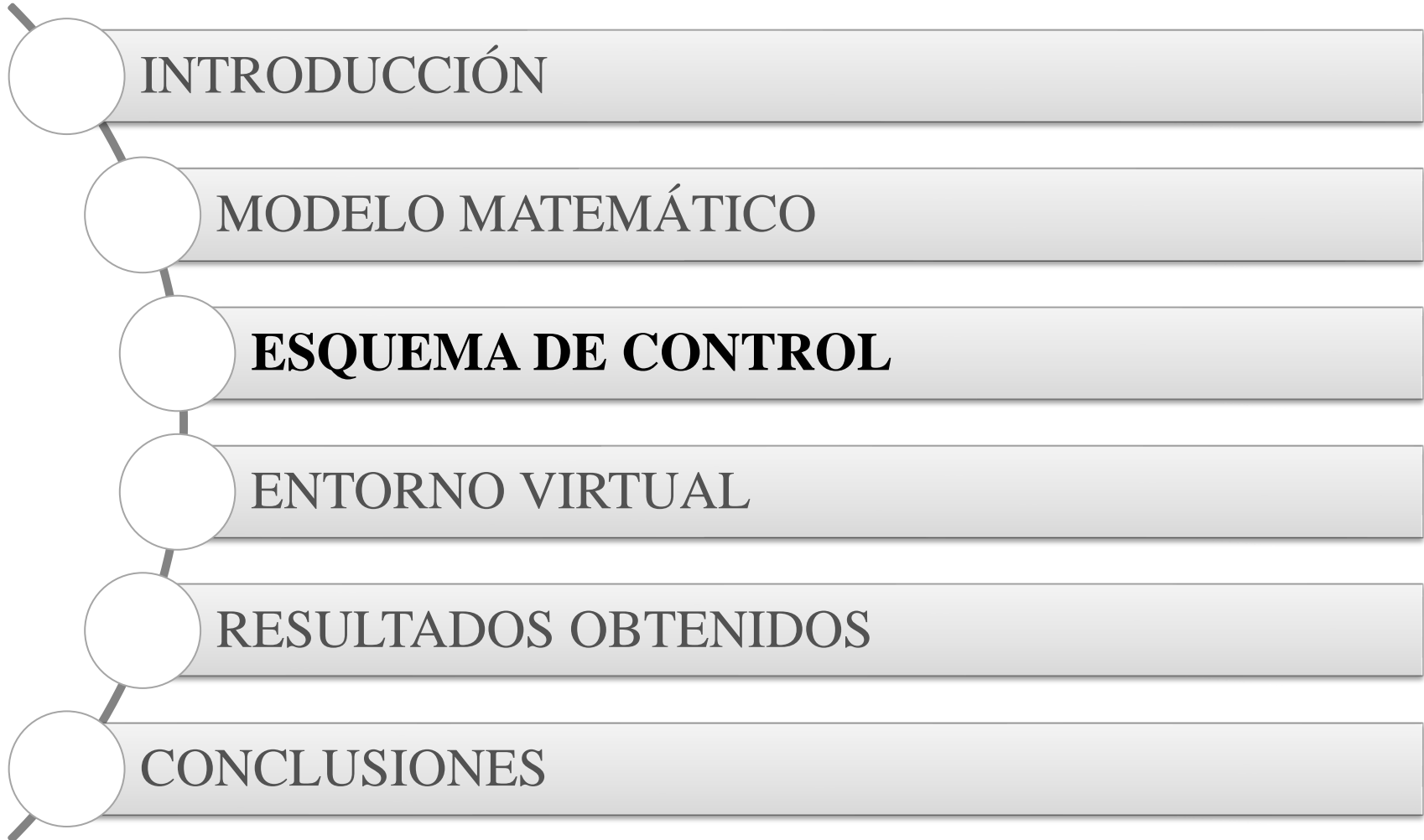
A partir de los parámetros calculados para las variaciones tipo paso positivo y negativo se obtiene el modelo promedio del biorreactor

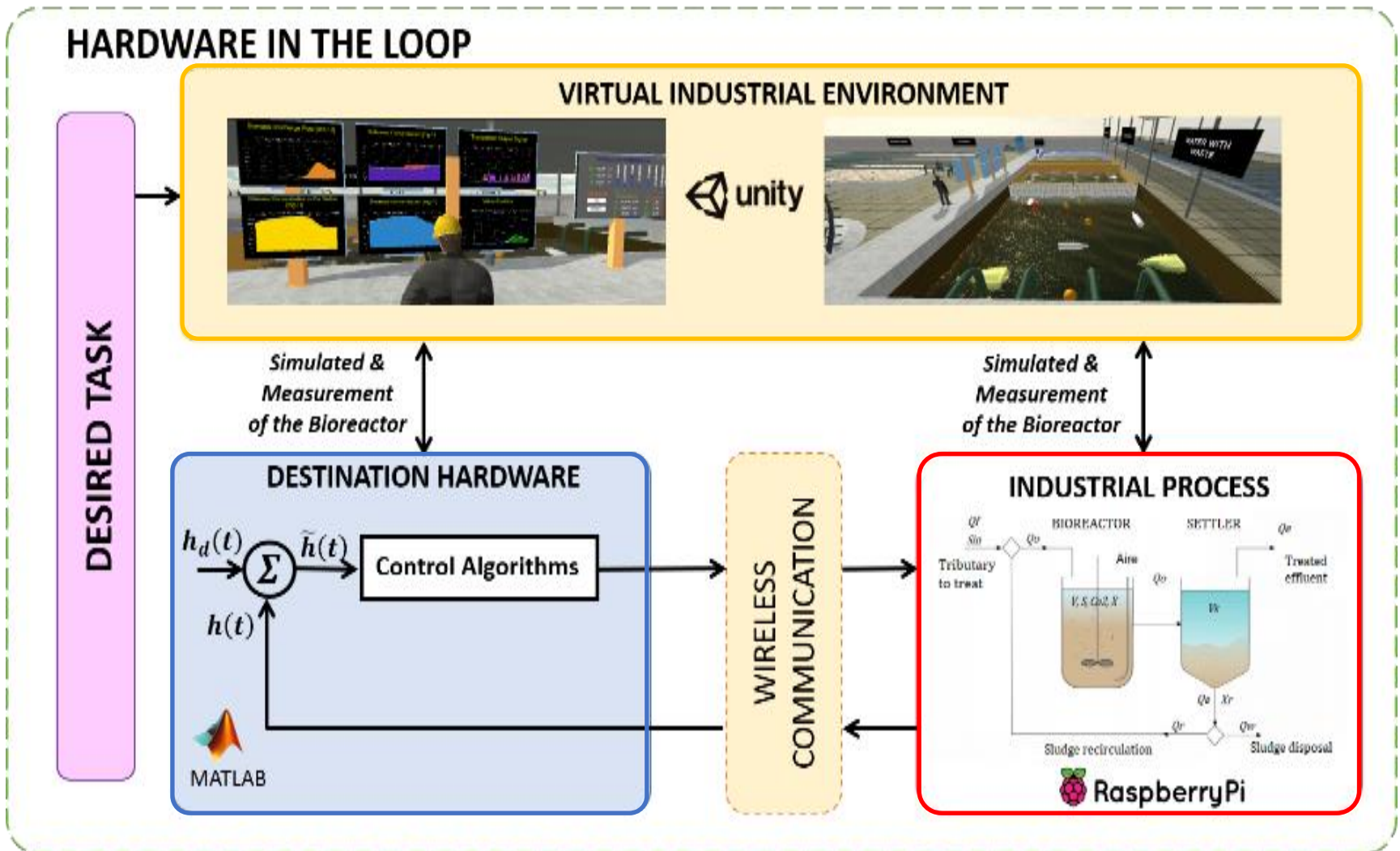
$$\tau = \frac{\tau^+ + \tau^-}{2} = \frac{4.947947475 + 4.948566767}{2} = 4.95325712$$

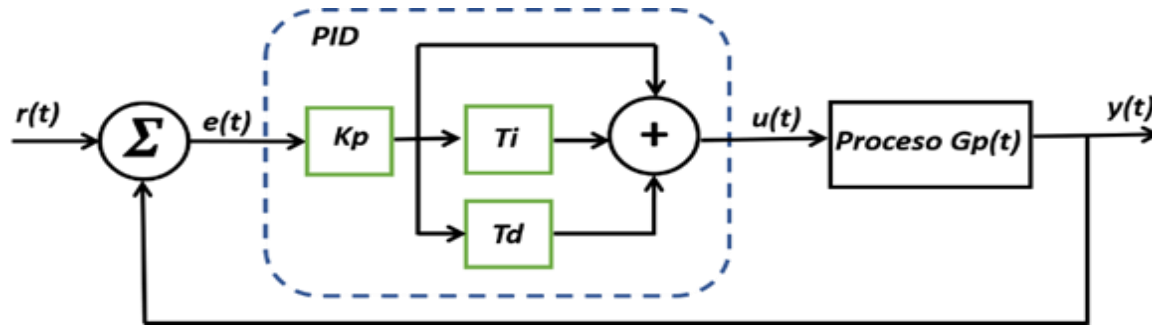
$$t_o = \frac{t_o^+ + t_o^-}{2} = \frac{1.161217504 + 1.154766343}{2} = 1.157991924$$

$$K = \frac{K^+ + K^-}{2} = \frac{0.4190608054 + 0.4265605159}{2} = 0.4228106607$$

$$\frac{Y(s)}{u(s)} = \frac{Ke^{-t_o s}}{\tau s + 1} = \frac{0.4228106607e^{-1.157991924s}}{4.95325712s + 1}$$







Las ecuaciones para el control PID se muestran en su forma de Aproximación Rectangular para su implementación en el software Matlab.

K_p es la constante proporcional

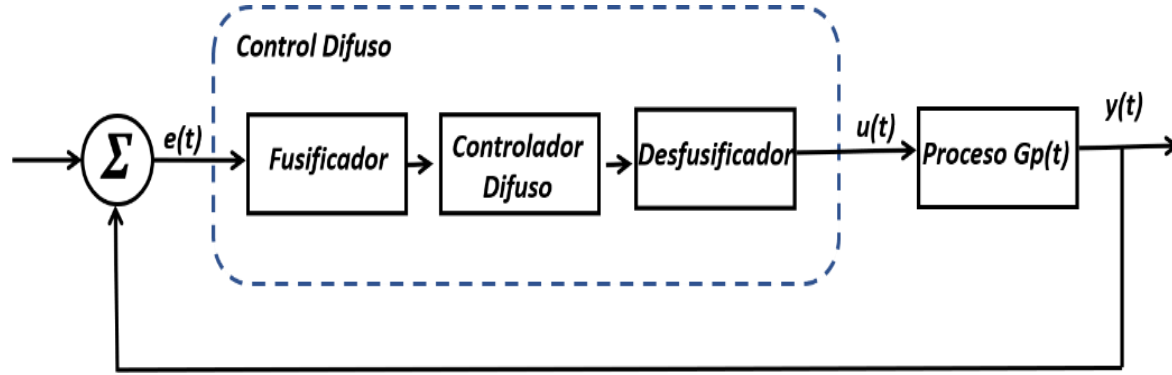
T_i es la constante integral

T_d es la constante derivativa

$e(t)$ es la señal de error del proceso de flujo

$$u(n) = K_p e(n) + K_i T \sum_i e_i + K_d [e(n) - e(n-1)] / T$$

Controlador Fuzzy



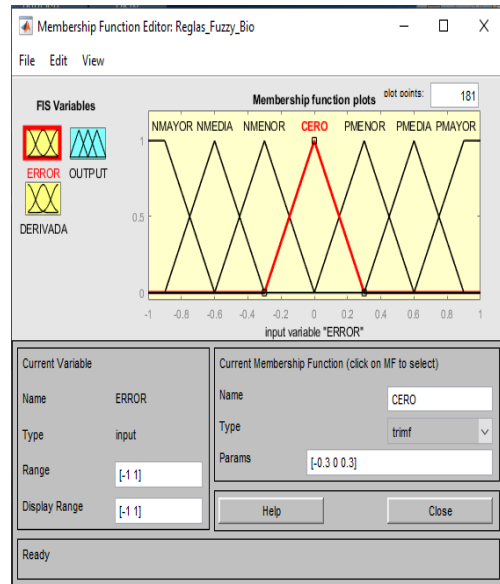
Fuzzy Logic Designer: Reglas_Fuzzy_Bio

File Edit View

FIS Name: Reglas_Fuzzy_Bio FIS Type: mamdani

And method: min
Or method: max
Implication: min
Aggregation: max
Defuzzification: centroid

Current Variable: OUTPUT, Type: output, Range: [-1 1]



Rule Editor: Reglas_Fuzzy_Bio

File Edit View Options

- If (ERROR is NMAYOR) and (DERIVADA is NMAYOR) then (OUTPUT is NGG) (1)
- If (ERROR is NMAYOR) and (DERIVADA is NMEDIA) then (OUTPUT is NGG) (1)
- If (ERROR is NMAYOR) and (DERIVADA is NMENOR) then (OUTPUT is NGG) (1)
- If (ERROR is NMAYOR) and (DERIVADA is CERO) then (OUTPUT is NMAYOR) (1)
- If (ERROR is NMAYOR) and (DERIVADA is PMENOR) then (OUTPUT is NMEDIA) (1)
- If (ERROR is NMAYOR) and (DERIVADA is PMEDIA) then (OUTPUT is NMENOR) (1)
- If (ERROR is NMAYOR) and (DERIVADA is PMAYOR) then (OUTPUT is CERO) (1)
- If (ERROR is NMEDIA) and (DERIVADA is NMAYOR) then (OUTPUT is NGG) (1)
- If (ERROR is NMEDIA) and (DERIVADA is NMEDIA) then (OUTPUT is NGG) (1)
- If (ERROR is NMEDIA) and (DERIVADA is NMENOR) then (OUTPUT is NMAYOR) (1)

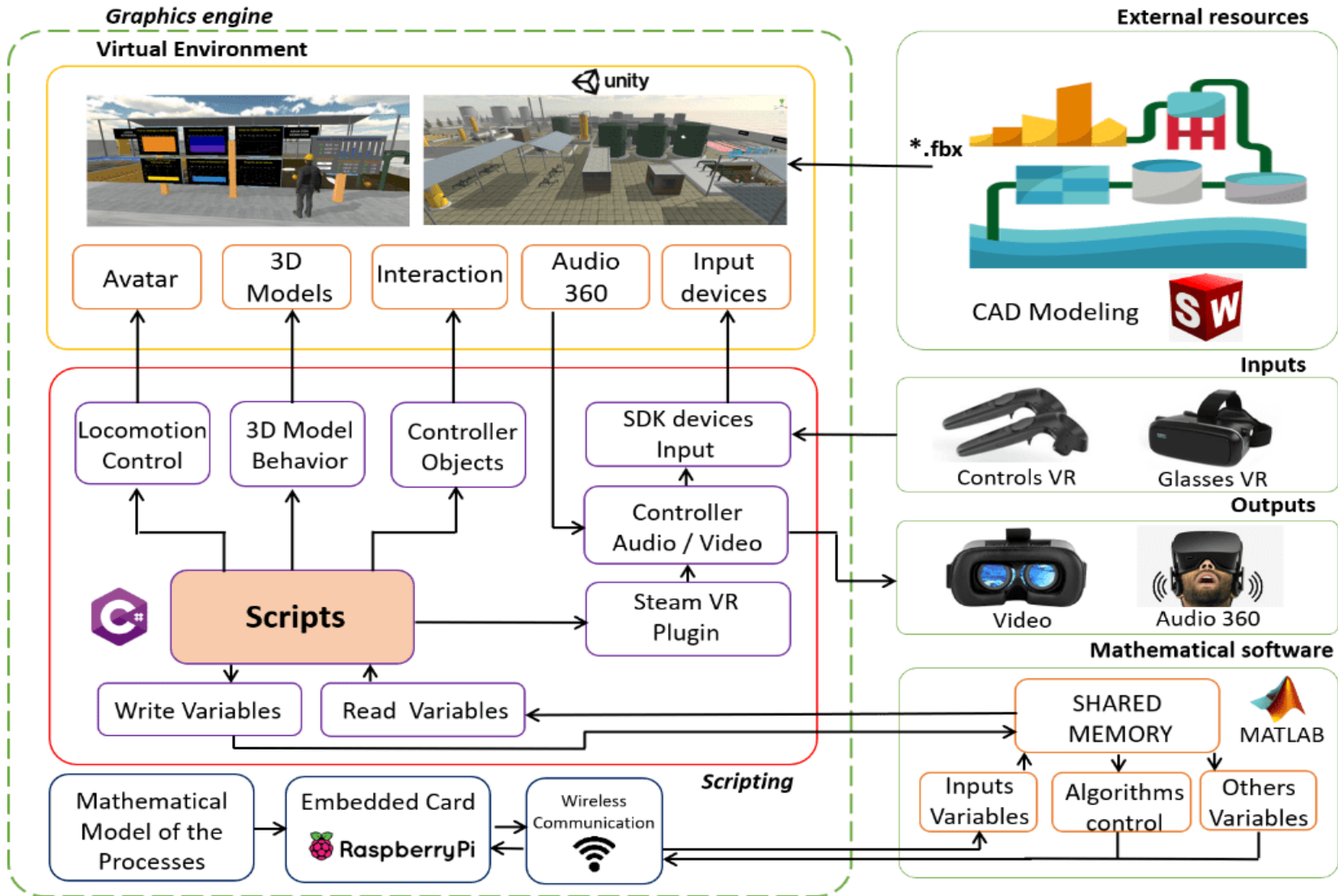
If: NMENOR, CERO, PMEDIA, PMAYOR, NMAYOR
and: NMAYOR
DERIVADA is: NMAYOR, NMEDIA, NMENOR, CERO, PMENOR, PMEDIA
Then: NGG, NMAYOR, NMEDIA, NMENOR, CERO, PMENOR

Connection: and, Weight: 1

FIS Name: Reglas_Fuzzy_Bio

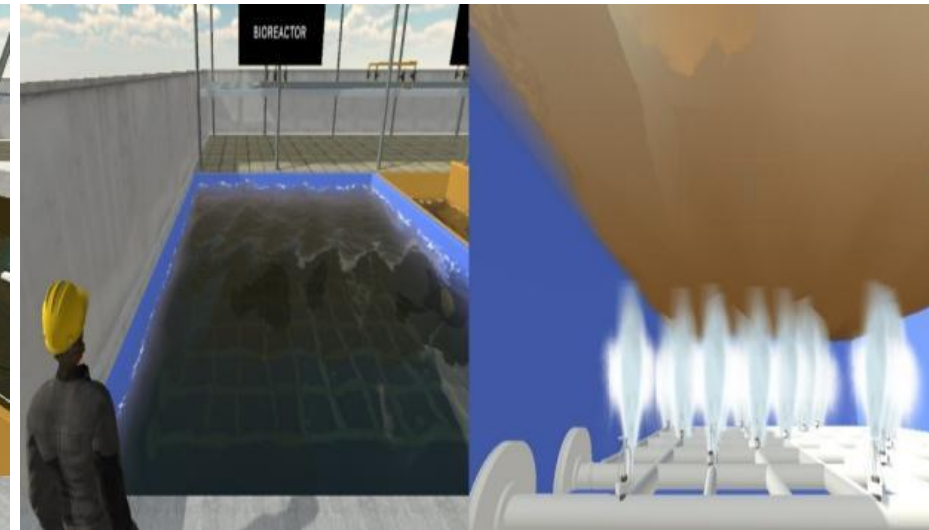
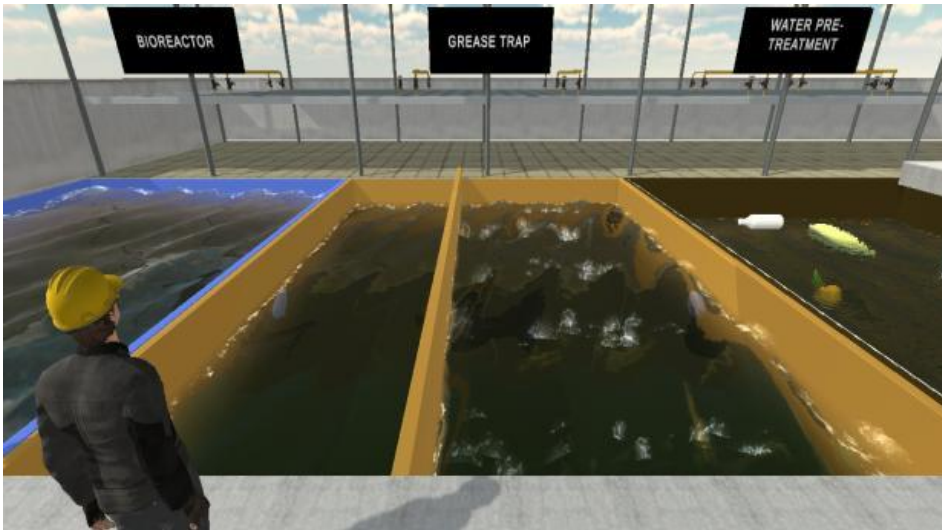


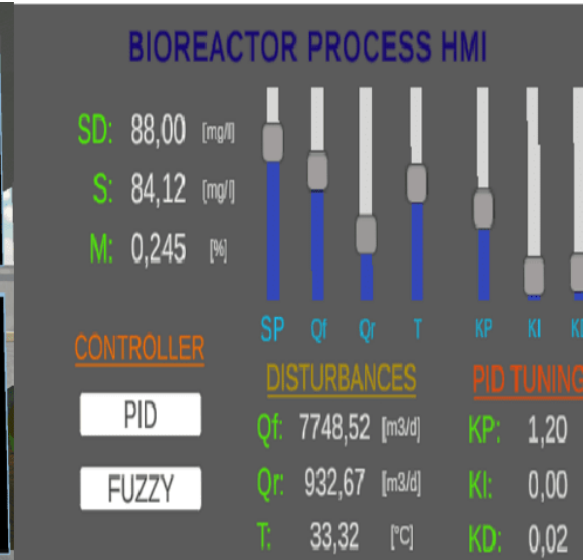
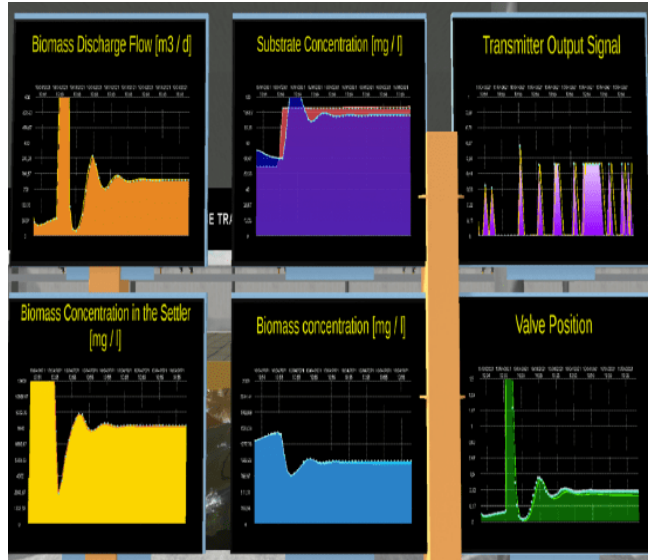
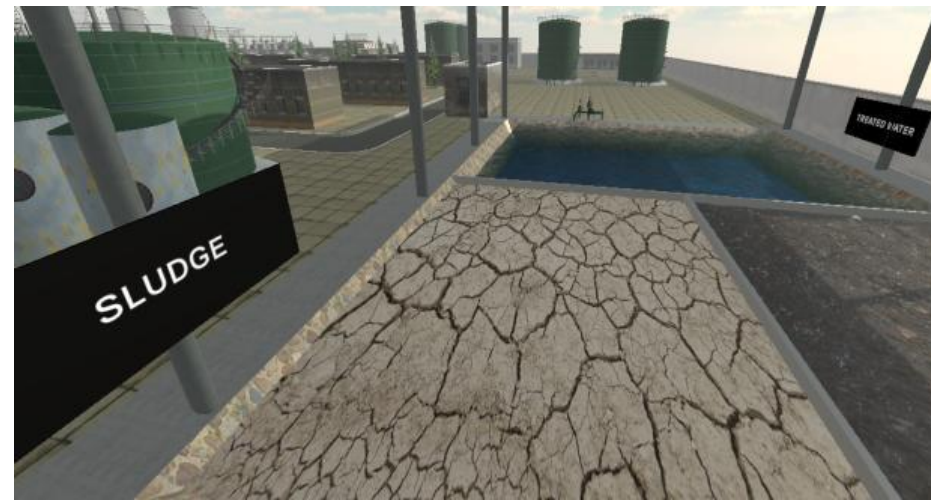
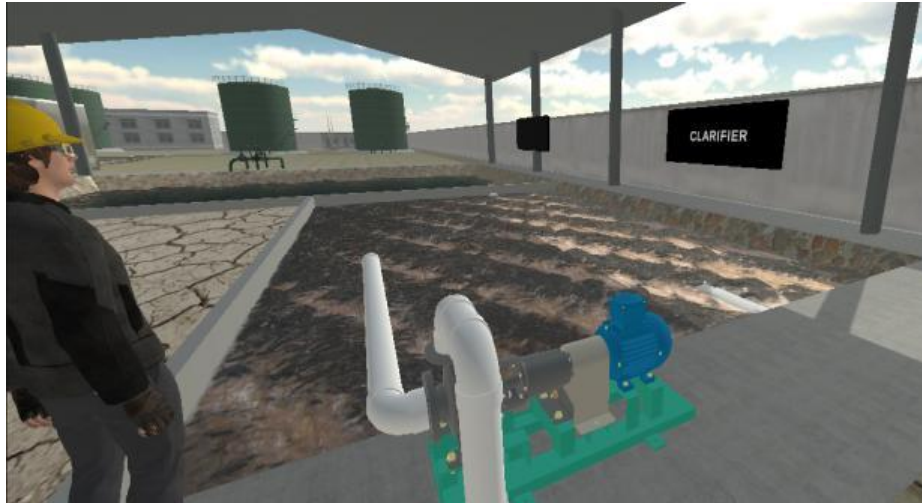
Explicación del Entorno Virtual



Permite al usuario estar inmerso en el proceso a través de las diferentes etapas que corresponden al biorreactor donde se visualizará el comportamiento de las diferentes variables

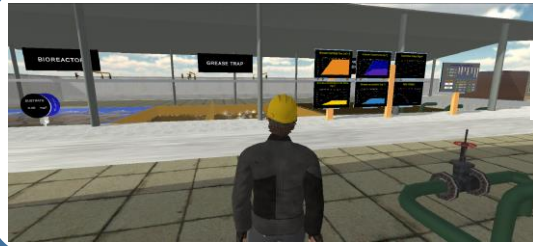






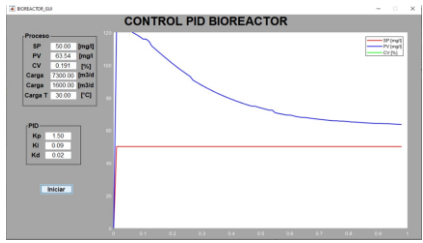


Resultados Obtenidos

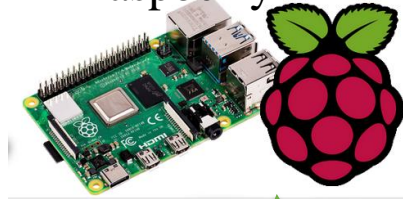


PC

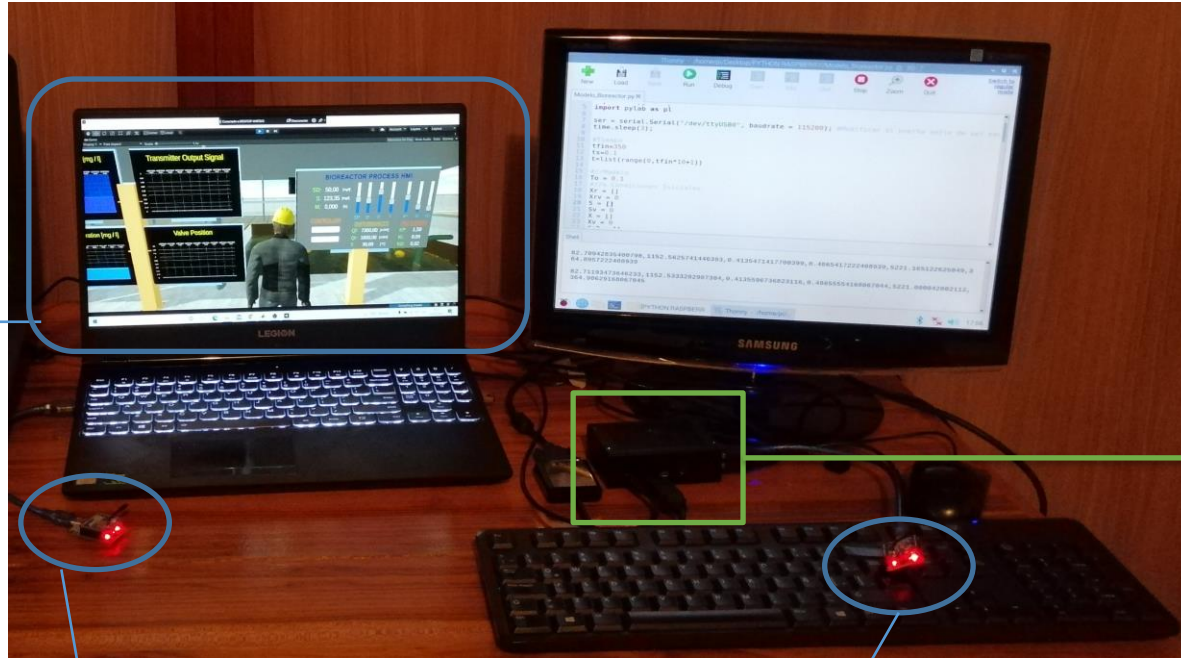


Raspberry Pi



Entorno virtual



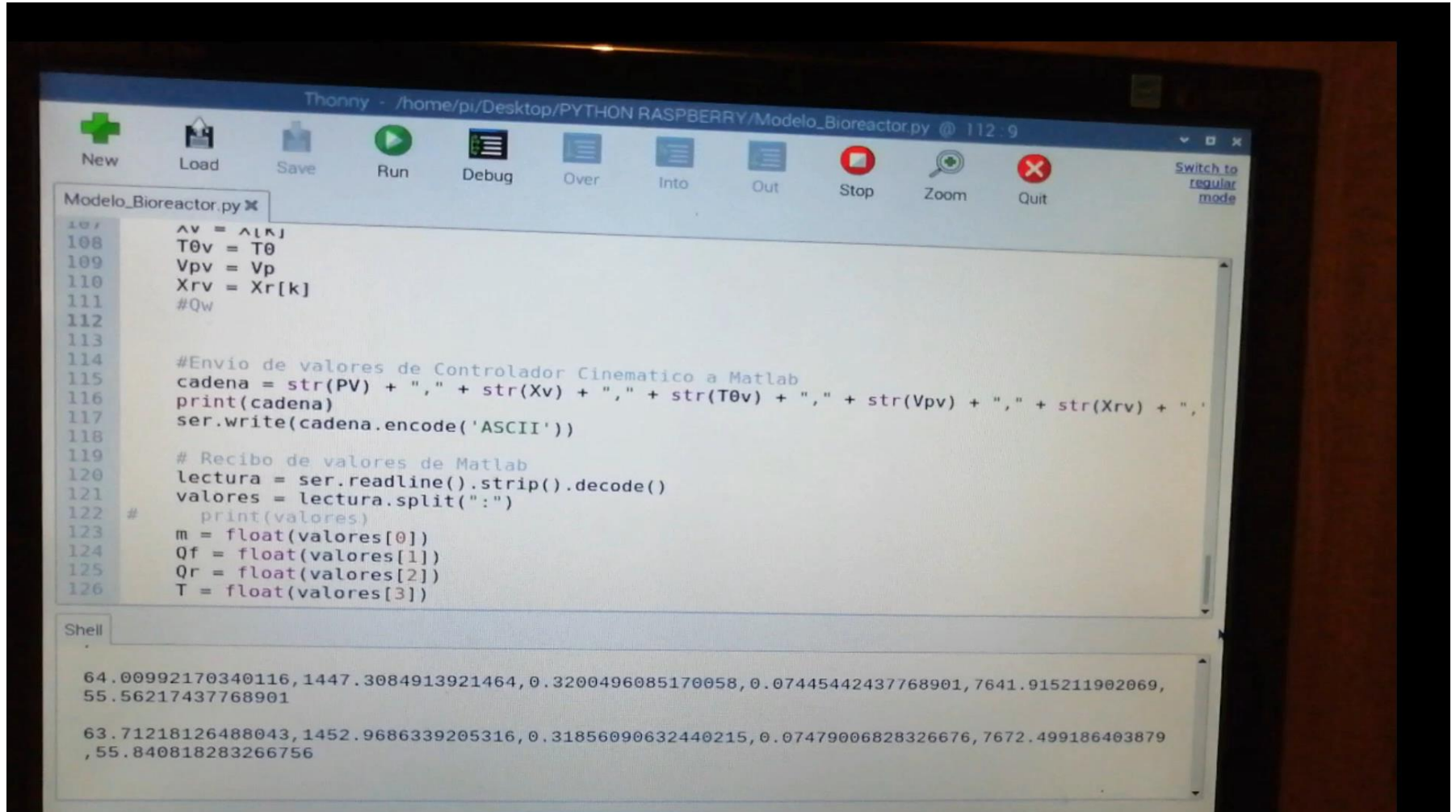
Xbee 1



Xbee 2



Resultados Obtenidos



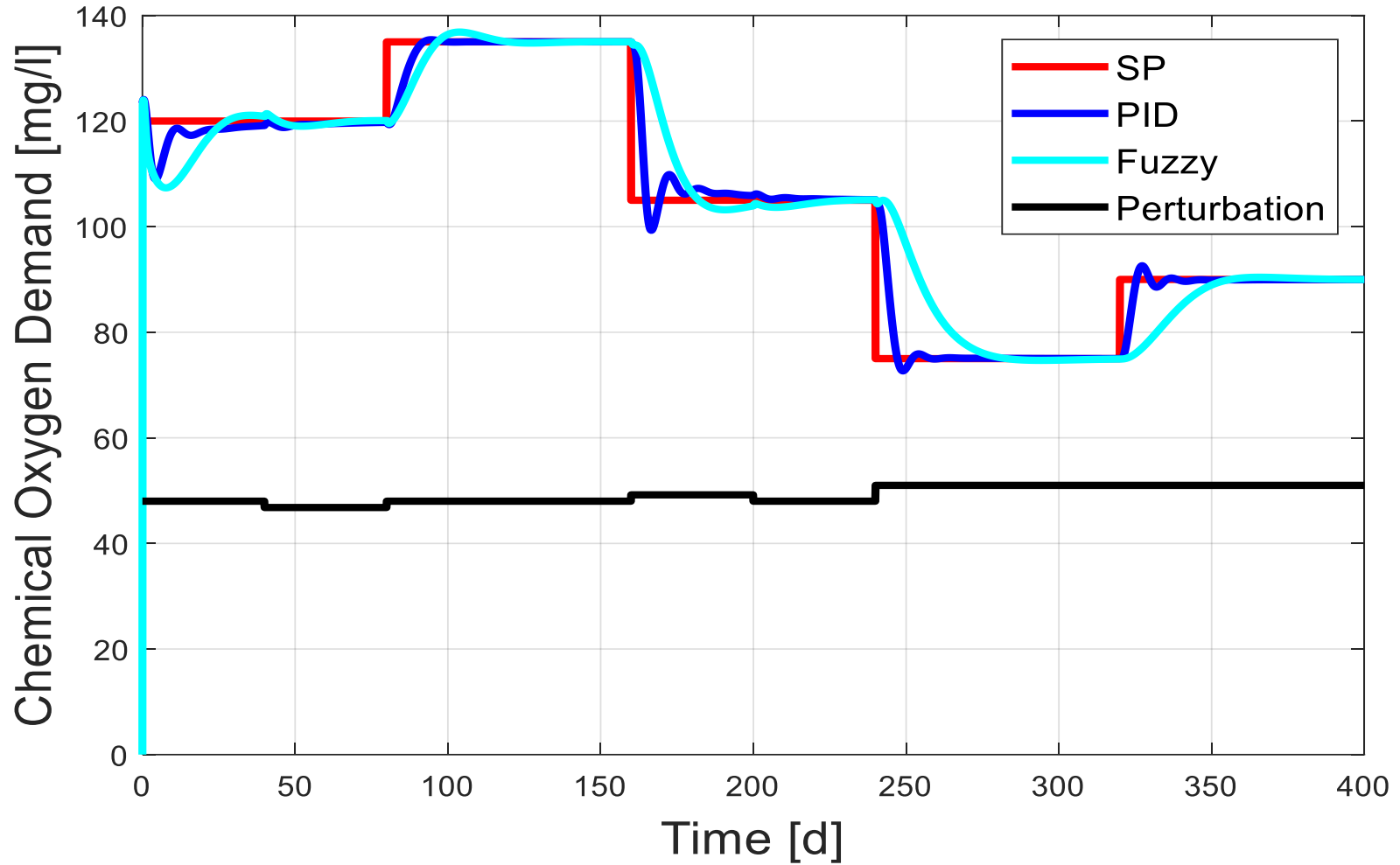
```
Thonny - /home/pi/Desktop/PYTHON RASPBERRY/Modelo_Bioreactor.py @ 112.9
New Load Save Run Debug Over Into Out Stop Zoom Quit Switch to regular mode

Modelo_Bioreactor.py x
107     ^v = ^{k}
108     T0v = T0
109     Vpv = Vp
110     Xrv = Xr[k]
111     #Qw
112
113
114     #Envio de valores de Controlador Cinematico a Matlab
115     cadena = str(PV) + "," + str(Xv) + "," + str(T0v) + "," + str(Vpv) + "," + str(Xrv) + ","
116     print(cadena)
117     ser.write(cadena.encode('ASCII'))
118
119     # Recibo de valores de Matlab
120     lectura = ser.readline().strip().decode()
121     valores = lectura.split(":")
122     #
123     print(valores)
123     m = float(valores[0])
124     Qf = float(valores[1])
125     Qr = float(valores[2])
126     T = float(valores[3])

Shell
.

64.00992170340116, 1447.3084913921464, 0.3200496085170058, 0.07445442437768901, 7641.915211902069,
55.56217437768901

63.71218126488043, 1452.9686339205316, 0.31856090632440215, 0.07479006828326676, 7672.499186403879
, 55.840818283266756
```





- ✓ La **realidad virtual** es una herramienta tecnológica que permite interactuar con el medio de una forma diferente, simulando procesos industriales lo cual contribuye en la enseñanza-aprendizaje logrando desarrollar habilidades para un aprendizaje rápido.
- ✓ El **modelo matemático del biorreactor** permite visualizar el comportamiento del mismo mediante una ecuación de primer orden, para así poder evaluar algoritmos de control
- ✓ El comportamiento de los **algoritmos de control** verifican el rendimiento óptimo que tienen los procesos ante cambios de referencia o perturbaciones, permitiendo así observar los puntos óptimos de las variables y cómo evoluciona.
- ✓ La **técnica HIL** junto con el entorno virtual son alternativas de menor costo que permite simular plantas en tiempo real, evitando generar situaciones de riesgo y facilitando a la enseñanza-aprendizaje sobre la evaluación de algoritmos de control.



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 DE UN BIORREACTOR PARA EL TRATAMIENTO DE
AGUAS RESIDUALES EN UN ENTORNO VIRTUAL APLICANDO
LA TECNICA HARDWARE IN THE LOOP"**

Autores:

Kevin Joseph Gutiérrez Pilicita

Jimmy Javier Pilicita Lagla

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D. *Tutor*

Ing. César A. Naranjo, Mg. *Cotutor*

