

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**

CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT UNICICLO PARA IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS AVANZADOS

Autores:

Guerrero Vásquez, Fidel Napoleón

Proaño Jarrin, Karen Abigail

Ing. Naranjo Hidalgo César Alfredo., MsC. *Tutor*

Ing. Andaluz Ortiz Víctor Hugo, Ph.D. *Cotutor*



ICITED 22

International Conference in
Information Technology & Education
July 14-16, Rio de Janeiro, Brazil



GUERRERO VASQUEZ, FIDEL NAPOLEON <fnguerrero@espe.edu.ec>

[ICITED 22] Your submission has been accepted!

ICITED 21 <info@icited.org>
Responder a: ICITED 21 <info@icited.org>
Para: fnguerrero@espe.edu.ec

4 de junio de 2022, 10:30

Dear Author,

On behalf of the ICITED'22 - The 2022 International Conference in Information Technology & Education, I am pleased to inform you that your submission, titled

Adaptive Control of a Mobile Robot for Cargo Transportation in Industrial Environments

has been accepted. Please confirm that you agree that your article will be published in Springer Book.

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

For papers written in English, please consider reviewers' comments and the rules of edition strictly of Springer
(<https://www.springer.com/us/authors-editors/conference-proceedings/conference-proceedings-guidelines>) to prepare the camera-ready version of the paper, saved in Word or LaTeX format and also in PDF format. These files must be accompanied by the Consent to Publish form

(https://38692822-50e9-428a-b6c4-40c12a49441.usf-files.com/ugd/38e66b_45d042170e4a422a866857a9d62976e5.docx) filled out, in a ZIP file, and uploaded until June 10 at <http://submissionicited.iaditi.org/openconf.php>

Additionally, you also need to make your conference registration (<http://payments.iaditi.org/web/icited22>) until June 10 in order your article be published and presented. The payment of registrations from countries outside the European Union must be done by debit or credit card, through our PayPal system.

Congratulations,
Program Committee, ICITED'22
icited.conf@gmail.com



Search Authors & Editors Log in



Book series

Smart Innovation, Systems and Technologies

[Editorial board](#)

About this book series

The Smart Innovation, Systems and Technologies book series encompasses the topics of knowledge, intelligence, innovation and sustainability. The aim of the series is to make available a platform for the publication of books on all aspects of single and multi-disciplinary research on these themes in order to make the latest results available in a readily-accessible form. Volumes on interdisciplinary research combining two or more of these areas is particularly sought. — [show all](#)

Electronic ISSN 2190-3026
Print ISSN 2190-3018

Series Editor
Robert Howlett, Lakhmi C. Jain

Publish with us

[Submission guidelines](#)

[Policies and ethics](#)

Contact the Publishing Editor

[Aninda Bose](#)

[Download book proposal form](#)

ICITED 22

International Conference in
Information Technology & Education
July 14-16, Rio de Janeiro, Brazil



Zoom Meeting | You are viewing Fidel Guerrero's screen | View Options

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

International Conference in
Information Technology and Education
July 14-16, Rio de Janeiro, Brazil

"Adaptive Control of a Mobile Robot for Cargo Transportation in Industrial Environments"

Authors:

- Guerrero Vásquez Fidel Napoleón: faguerrero@espe.edu.ec
- Proaño Jarrín Karen Abigail: kproaño@espe.edu.ec
- Andaluz Ortiz Victor Hugo: vhandaluz1@espe.edu.ec
- Naranjo Hidalgo César Alfredo: canaranjo@espe.edu.ec

Grid of video thumbnails for participants: Chair, Maria João Castro; Abigail Proaño; Fidel Guerrero; Lázaro Vinícius de Oliveira; Patricia Salvado...

INTRODUCCION

Industria 4.0

Aplicaciones

Robots Móviles

Hardware in the Loop

Grid of video thumbnails for participants: Chair, Maria João Castro; Abigail Proaño; Fidel Guerrero; Lázaro Vinícius de Oliveira; Patricia Salvado...

Zoom Meeting | You are viewing Fidel Guerrero's screen | View Options

ENTORNO VIRTUAL

Esta sección describe el desarrollo de un entorno virtual que permite observar el comportamiento de un robot unificado en un entorno industrial simulado.

arsis

Grid of video thumbnails for participants: Chair, Maria João Castro; Abigail Proaño; Fidel Guerrero; Lázaro Vinícius de Oliveira; Patricia Salvado...

Zoom Meeting grid showing participants in a virtual room:

- Jorge Mendonça
- Milagros Rosario...
- ICITED 22 ROOM 4
- (353) Adeline Ca...
- Karina López
- Miguel Cobos
- (342) Leidy Aldana
- Mario Celso Rocha
- (353) Adeline Castelo
- Karina López
- Daniela
- (396) Francisco Saravia
- Miguel Cobos
- (342) Leidy Aldana
- Mario Celso Rocha
- Karen Lizeth Contreras Espinoza
- Daniela

Zoom Meeting | You are viewing Fidel Guerrero's screen | View Options



This Certifies that

Fidel Guerrero, Karen Proaño, Cesar A. Naranjo, Victor H. Andaluz

participated with the paper Adaptive Control of a Mobile Robot for Cargo Transportation in Industrial Environments in the
International Conference In Information Technology & Education

July 14-16, Rio de Janeiro, Brazil

António João Vidal Carvalho

António João Vidal Carvalho

António José Abreu Silva

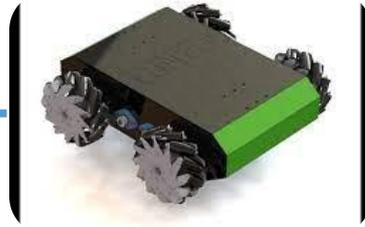
António José Abreu Silva

ICITED'22 General Chairs

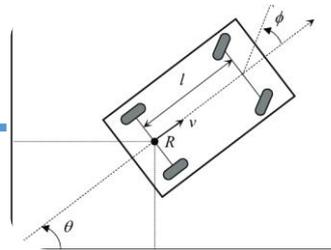








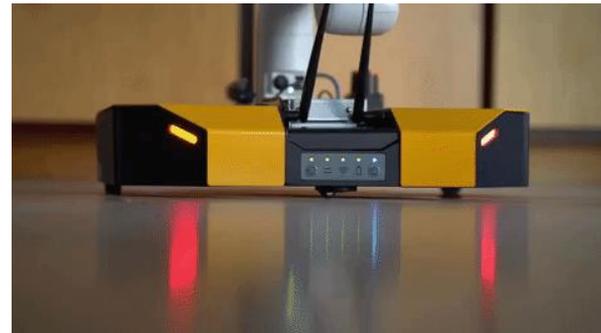
OMNIDIRECCIONAL



CAR LIKE



UNICICLO



CLASIFICACIÓN

REALIDAD AUMENTADA



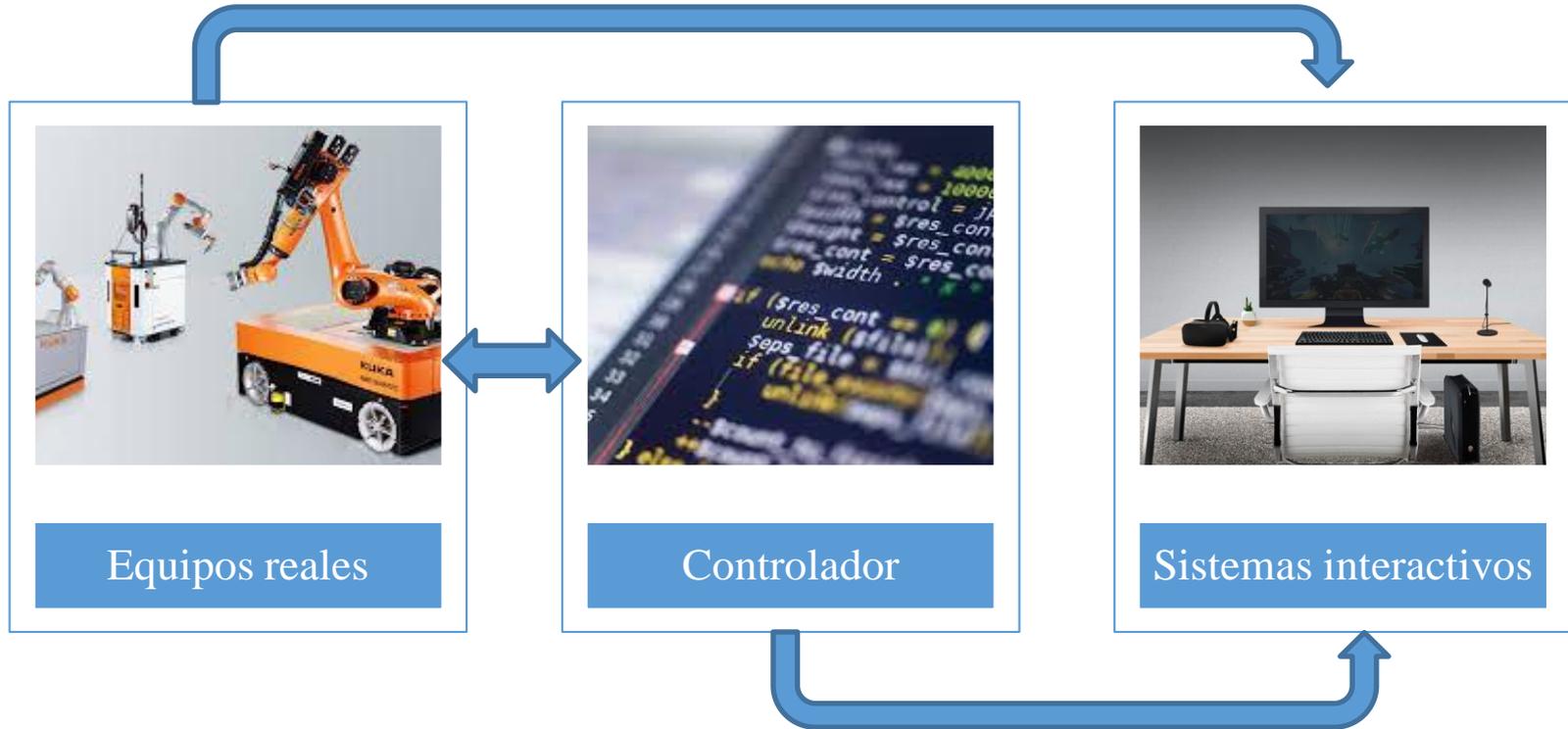
Visualizar parte del mundo real, a través de dispositivos electrónicos.

REALIDAD VIRTUAL



Plataformas o entornos simulados donde los usuarios pueden realizar diferentes experiencias

Es una Técnica en la que las señales reales de un controlador



Están conectadas a un sistema de pruebas

Para aplicar un algoritmo de control en la área industrial existe algunos inconvenientes:

Adquisición
a altos costos



Poca accesibilidad

La solución es la técnica HIL

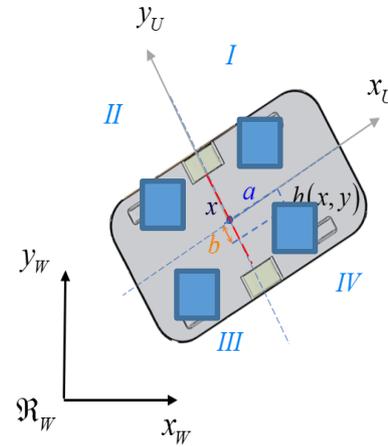
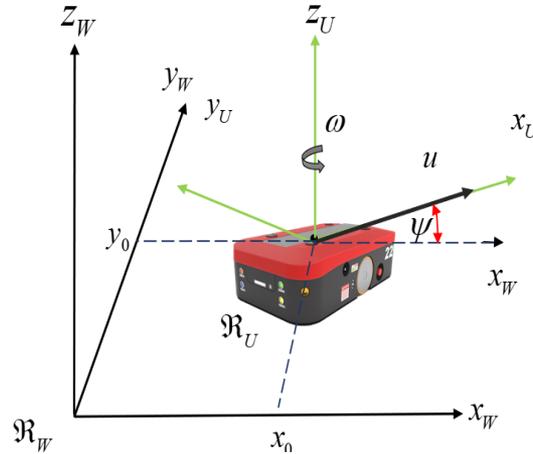


Proponer un **esquema de control en cascada basado en la modelación cinemático y dinámico de un robot tipo unicycle** que permita ejecutar tareas autónomas.

- **Investigar en las diferentes bases de datos científicas** acerca de la modelación de un robot móvil a fin de implementar tareas de control autónomo.
- **Construir un prototipo de un robot móvil tipo unicycle que considere la implementación de sensores propios propioceptivos**, con el propósito de sensor la posición y la velocidad real del robot móvil.
- **Determinar un modelo matemático que determine las características cinemáticas y dinámicas** de un robot móvil tipo unicycle, a fin de implementar algoritmos de control avanzado.
- **Validar experimentalmente los modelos matemáticos** obtenidos sobre el robot móvil construido.

- **Proponer un esquema de control en cascada** que permita resolver el problema de movimiento autónomo del robot y la **compensación dinámica adaptable** del sistema robótico. Además, se deberá **analizar la estabilidad de los algoritmos de control propuestos**.
- **Implementar la técnica de simulación Hardware-in-the-Loop, HIL**, la cual considere el desarrollo de un simulador 3D que permita evaluar el comportamiento de los modelos matemáticos que representa un sistema robótico, como a su vez implementar los algoritmos de control propuesto para tareas autónomas.
- **Realizar pruebas experimentales con el robot móvil construido y con la técnica de simulación HIL**, en los cuales se implementen el esquema de control propuesto para analizar y evaluar el comportamiento de los errores de control.





$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \mathcal{R}_W^U \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

La posición del robot unicycle es: $\mathbf{h} = [x \quad y \quad \psi]$

u : Velocidad lineal
 ω : Velocidad angular.
 $\mathcal{R}_W^U(\psi)$: Matriz Rotacional

Modelo cinemático como:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \cos(\psi) \\ u \sin(\psi) \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \mathcal{R}_W^U \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}$$

$$\dot{\psi} = \omega$$

Dónde:

$$\mathcal{R}_W^U(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) \end{bmatrix}$$

El método usado se basa en el equilibrio de energías.

$$L = E_c - E_p$$

Aplicando la formulación de Euler-Lagrange.

$$\tau = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}} \right) - \frac{\partial L}{\partial q}$$

Se obtiene.

$$\tau_d = \frac{k_a(v_d - k_b \omega_d)}{R_a}$$

$$\tau_i = \frac{k_a(v_i - k_b \omega_i)}{R_a}$$

$$\tau_l = \frac{k_a(v_l - k_b \omega_l)}{R_a}$$

τ : Torque de motores
 v : Voltaje de entrada
 R : Resistencia eléctrica
 k : Constantes de torque

Utilizando la ecuación dinámica de los motores.

$$I\dot{\omega}_d + B\omega_d = \tau_d - F_{rd}r$$

$$I\dot{\omega}_i + B\omega_i = \tau_i - F_{ri}r$$

I :Momento de inercia

B :Coeficiente de fricción

r :Radio del neumático

F_r :Fuerza longitudinal

Implementando controladores de velocidad.

$$v_u = k_{PT}(u_{ref} - u) - \dot{u}k_{DT}$$

$$v_\omega = k_{PR}(\omega_{ref} - \omega) - \dot{\omega}k_{DR}$$

$$u_{ref} = \left(\frac{2I}{r} + \frac{2k_a k_{DT}}{R_a} + rm \right) \ddot{u} - \frac{rmb_2}{2 \frac{k_a}{R_a}} \dot{\omega} + \left(\frac{2B}{r} + \frac{k_a k_b}{R_a r} + 2 \frac{k_a}{R_a} K_{PT} \right) u - \frac{rmb_1}{2 \frac{k_a}{R_a}} \omega^2$$

$$\omega_{ref} = - \left(\frac{rmb_2}{d} \right) \frac{\dot{u}}{\frac{k_a}{R_a} K_{PR}} + \left(\frac{Id}{r} + \frac{2k_a k_{DR}}{R_a} + \frac{2rmb_2^2}{d} + \frac{2rmb_1^2}{d} + \frac{2rI_z}{d} \right) \frac{\dot{\omega}}{2 \frac{2k_a}{R_a} k_{PR}} + \left(\frac{Bd}{r} + \frac{k_a k_d d}{2R_a r} + \frac{2k_a k_{PR}}{R_a} \right) \frac{\omega}{2 \frac{k_a}{R_a} k_{PR}} + \dots$$

$$\dots + \frac{rmb_1}{d} \frac{u\omega}{\frac{k_a}{R_a} k_{PR}}$$

El modelo dinámico del robot unidireccional obtenido está representado por

$$\begin{bmatrix} u_{ref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_1 & -\zeta_7 \\ -\zeta_8 & \zeta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_4 & -\zeta_3\omega \\ \zeta_5\omega & \zeta_6 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix}$$

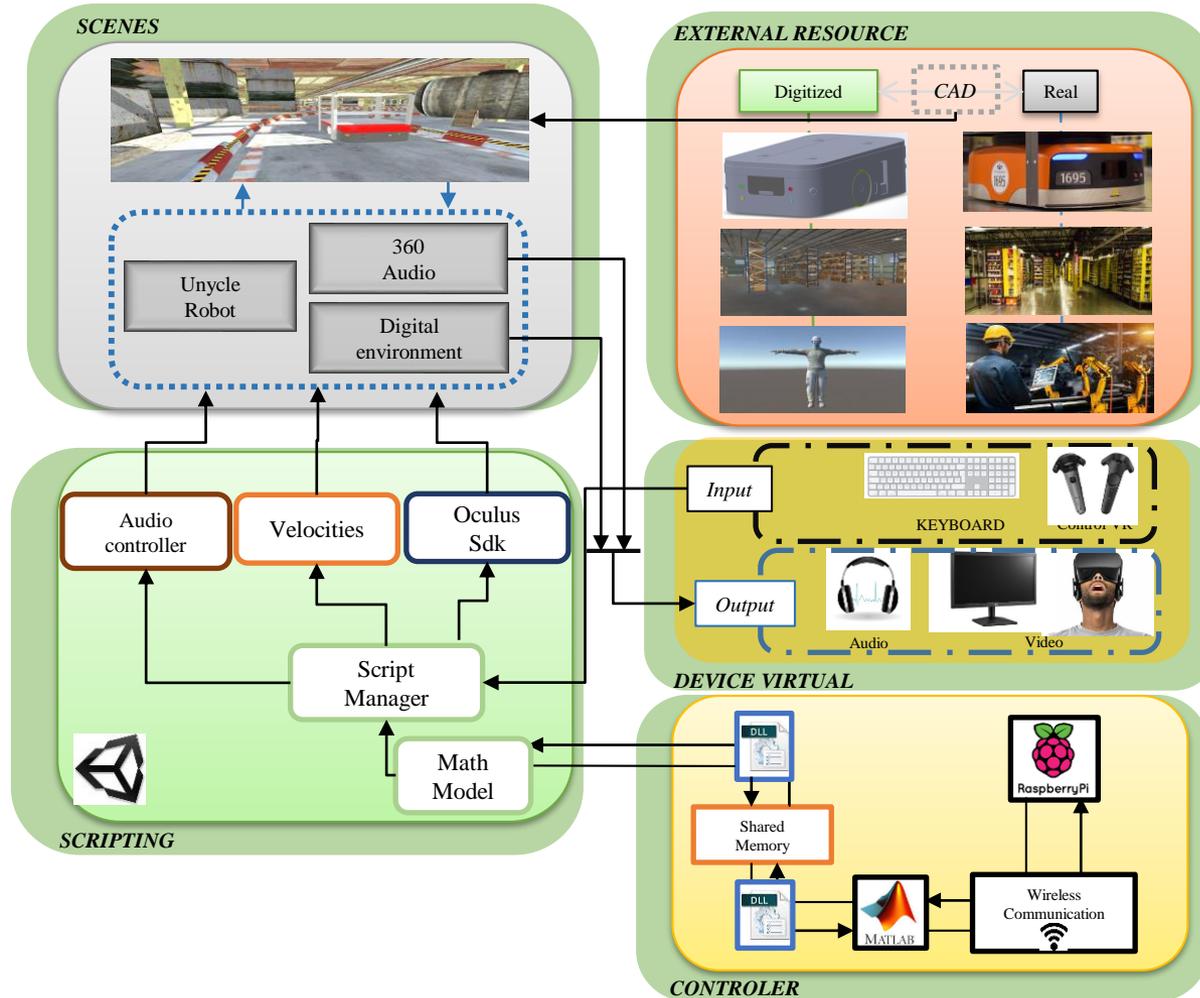
$$\mathbf{v}_{ref} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta}) \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{v}) \mathbf{v}$$

$\mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta})$: Representa la matriz de masa

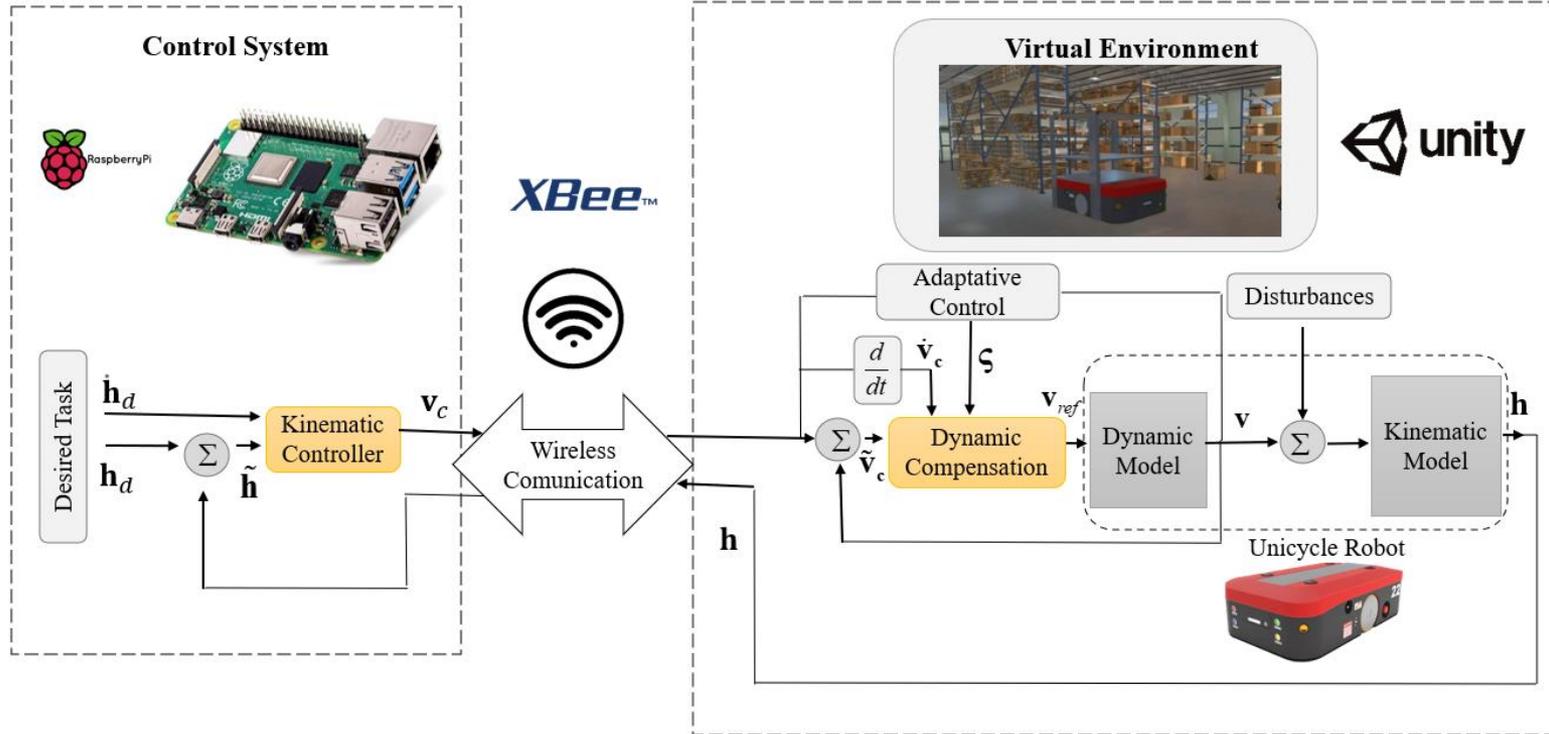
$\mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{v})$: Representa la matriz de fuerzas centrífugas



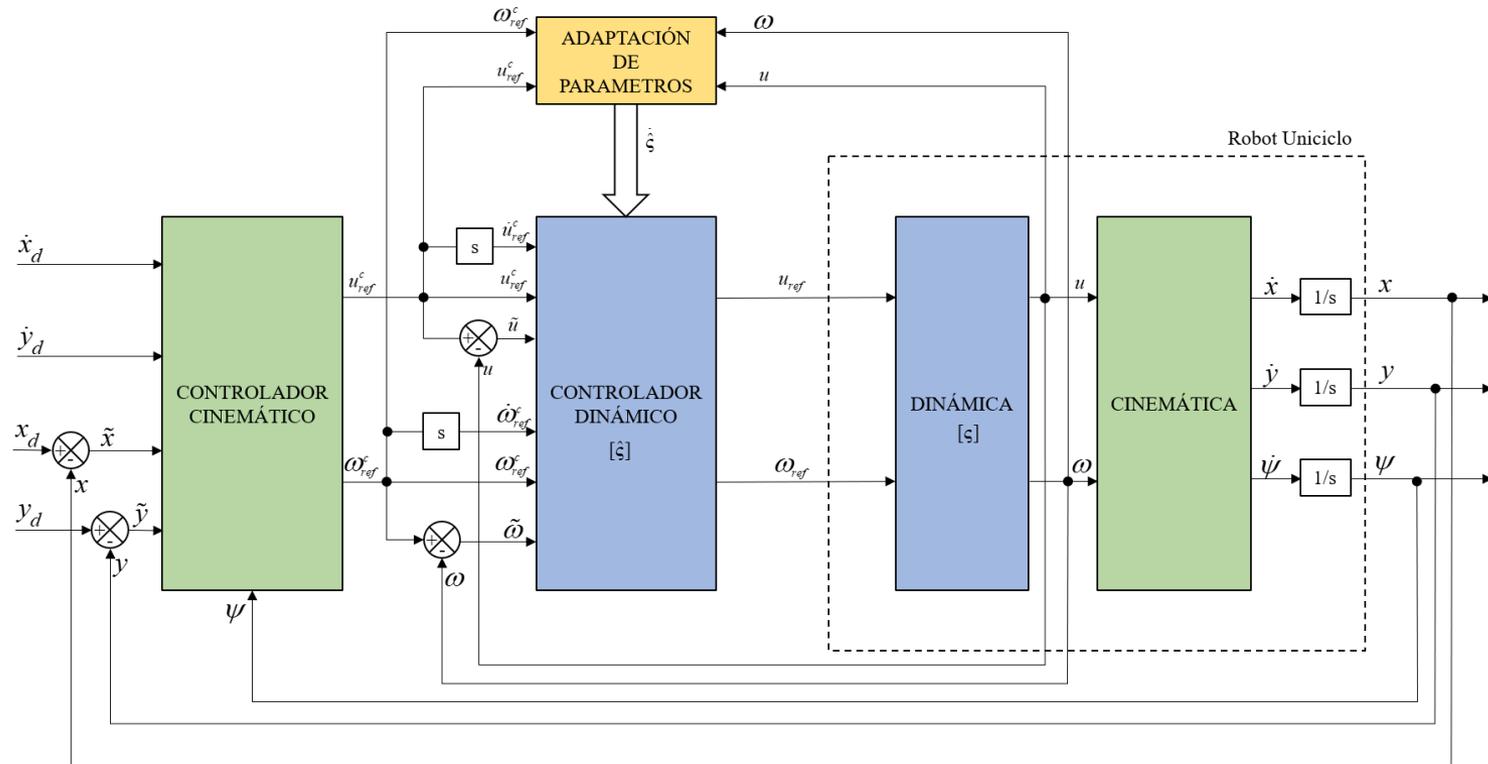
HARDWARE IN THE LOOP



HARDWARE IN THE LOOP



ESTRUCTURA COMPLETA DE CONTROL



Control cinemático

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{J}^{-1} \left(\dot{\mathbf{h}}_d + \boldsymbol{\kappa}_1 \tanh(\boldsymbol{\kappa}_2 \tilde{\mathbf{h}}) \right)$$

Dónde

\mathbf{J} : Matriz Jacobiana.

$\dot{\mathbf{h}}_d$: Matriz de velocidades deseadas.

$\boldsymbol{\kappa}_1 > 0$, $\boldsymbol{\kappa}_2 > 0$: Matriz de ganancias.

$\tilde{\mathbf{h}}$: Errores de posición.

Considerando:

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}}$$

Ley de control:

$$\mathbf{v}_c = \mathbf{J}^{-1} \left(\dot{\mathbf{h}}_d + \boldsymbol{\kappa}_{\tilde{\mathbf{h}}} \tanh(\boldsymbol{\kappa}_2 \tilde{\mathbf{h}}) \right)$$

Ecuación en lazo cerrado considerando

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = -\boldsymbol{\kappa}_{\tilde{\mathbf{h}}} \tanh(\boldsymbol{\kappa}_2 \tilde{\mathbf{h}})$$

Teoría de Lyapunov

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}} \quad \longrightarrow \quad \dot{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = -\tilde{\mathbf{h}}^T \boldsymbol{\kappa}_{\tilde{\mathbf{h}}} \tanh(\boldsymbol{\kappa}_2 \tilde{\mathbf{h}}) < 0$$

Por lo tanto:

Por lo tanto: $\boldsymbol{\kappa}_{\tilde{\mathbf{h}}} > 0, \boldsymbol{\kappa}_2 > 0$, garantizando así que: $\tilde{\mathbf{v}} \rightarrow 0$ en $t \rightarrow \infty$

Control dinámico adaptativo

$$\mathbf{v}_{ref} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\zeta}}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_1 \quad \sigma_2]^T$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \dot{\mathbf{v}}_c + \mathbf{k}\tilde{\mathbf{v}},$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & -\omega_c \omega & u_c & 0 & 0 & -\sigma_2 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 & 0 & u_c \omega & \omega_c & 0 & -\sigma_1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\eta} = \mathbf{C}\mathbf{v}$$

$\tilde{\boldsymbol{\zeta}}$: Errores de parametros.

Considerando:

$$\dot{\tilde{\mathbf{v}}} = \dot{\mathbf{v}}_c - \dot{\mathbf{v}} \quad (1)$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \dot{\mathbf{v}}_c - \mathbf{K}\tilde{\mathbf{v}} \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\sigma} - \dot{\mathbf{v}} = \dot{\tilde{\mathbf{v}}} - \mathbf{K}\tilde{\mathbf{v}} \quad (3)$$

Ley de control:

$$\mathbf{v}_{ref} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\zeta}}$$

Ecuación en lazo cerrado considerando

$$-\boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\zeta}} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\sigma} - \dot{\mathbf{v}}) \quad (4) \quad (3) \text{ En } (4)$$

Entonces:

$$\dot{\tilde{\mathbf{v}}} = -\mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\zeta}} - (\mathbf{K}\tilde{\mathbf{v}})$$

Teoría de Lyapunov

$$\mathbf{V} = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{v}}^T \mathbf{M} \dot{\tilde{\mathbf{v}}} + \frac{1}{2} \boldsymbol{\zeta}^T \boldsymbol{\rho} \tilde{\boldsymbol{\zeta}}$$

$$\boldsymbol{\rho} \in \mathcal{R}^{8 \times 8}$$

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\zeta}}} = \dot{\hat{\boldsymbol{\zeta}}} - \dot{\boldsymbol{\zeta}}$$

$$\dot{\mathbf{V}} = -\dot{\tilde{\mathbf{v}}}^T \mathbf{M} \mathbf{K} \dot{\tilde{\mathbf{v}}} - \dot{\tilde{\mathbf{v}}}^T \boldsymbol{\Omega} \tilde{\boldsymbol{\zeta}} + \boldsymbol{\zeta}^T \boldsymbol{\rho} \dot{\tilde{\boldsymbol{\zeta}}}$$

Considerando la ley de adaptación

$$\dot{\hat{\boldsymbol{\zeta}}} = \boldsymbol{\rho}^{-1} \boldsymbol{\Omega}^T \dot{\tilde{\mathbf{v}}}$$

Resultando en:

$$\dot{\mathbf{V}} = -\dot{\tilde{\mathbf{v}}}^T \mathbf{M} \mathbf{K} \dot{\tilde{\mathbf{v}}} \leq 0$$

Siendo: $\dot{\tilde{\boldsymbol{\zeta}}} = \dot{\hat{\boldsymbol{\zeta}}}$

$$\mathbf{V}(T) - \mathbf{V}(0) = \int_0^T \dot{\tilde{\mathbf{v}}}^T \mathbf{M} \mathbf{K} \dot{\tilde{\mathbf{v}}} dt$$

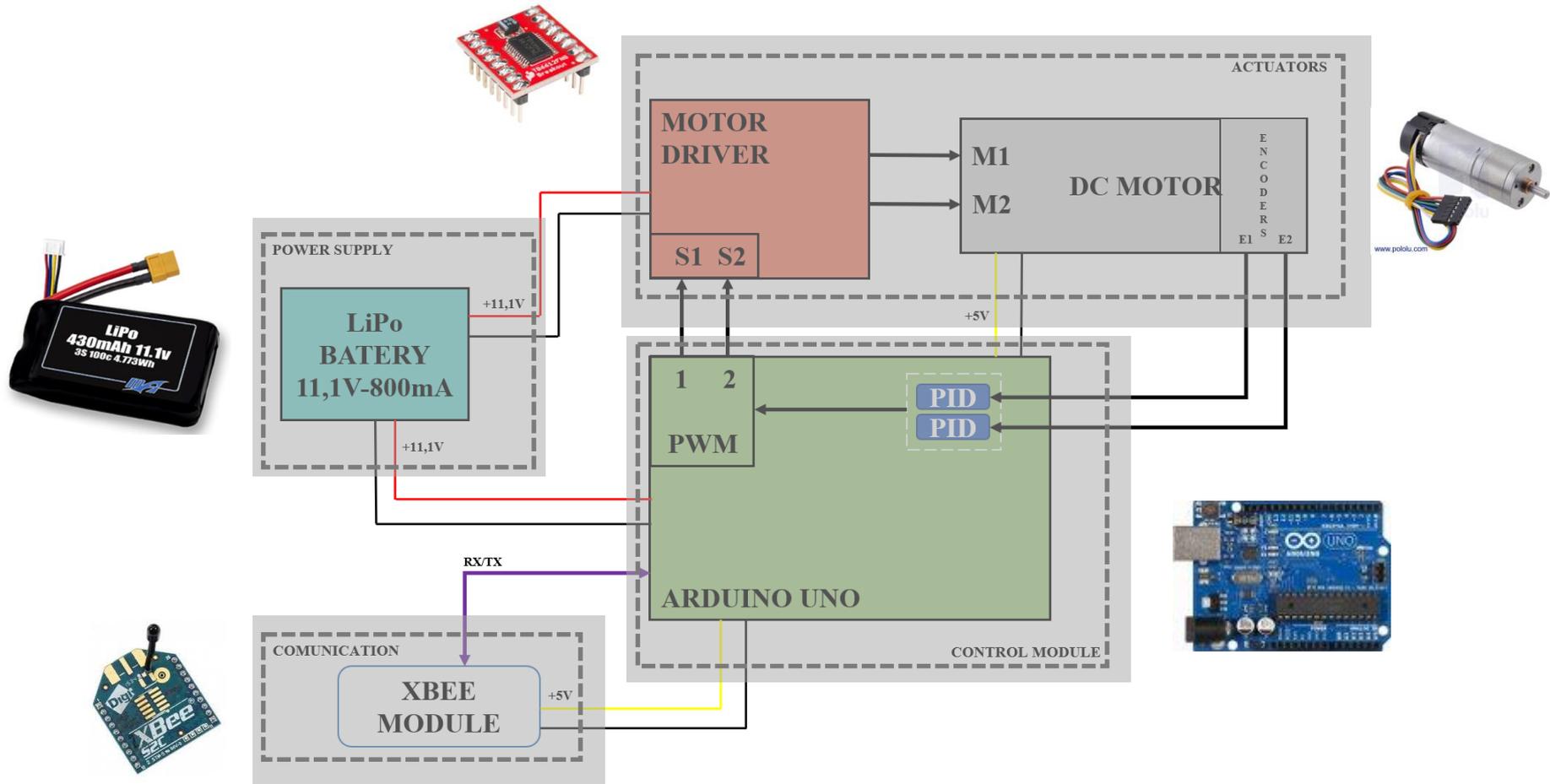
$$\mathbf{V}(0) \geq \int_0^T \dot{\tilde{\mathbf{v}}}^T \mathbf{M} \mathbf{K} \dot{\tilde{\mathbf{v}}} dt$$

$$\lambda_{\min}(\mathbf{M} \mathbf{K}) \|\dot{\tilde{\mathbf{v}}}\|^2 \leq \dot{\tilde{\mathbf{v}}}^T \mathbf{M} \mathbf{K} \dot{\tilde{\mathbf{v}}} \leq \lambda_{\max}(\mathbf{M} \mathbf{K}) \|\dot{\tilde{\mathbf{v}}}\|^2$$

Por lo tanto:

$$\tilde{\mathbf{v}} \rightarrow 0 \text{ en } t \rightarrow \infty$$





Robot Uniciclo



- $V_m = 15V$ (Max)
- $I_{out} = (1.2 - 3.2) A$



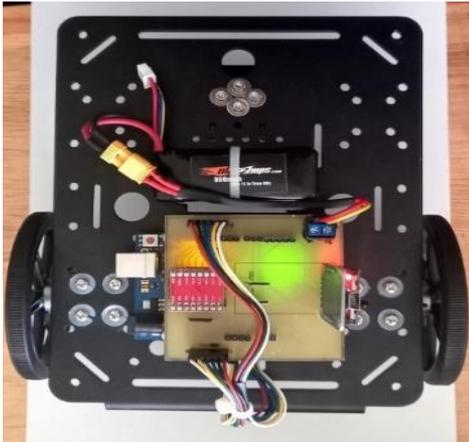
- $V = 2,7 - 3,6 [V]$
- Alcance
90 [m] - 3200 [m]
- IEE 802.15.4



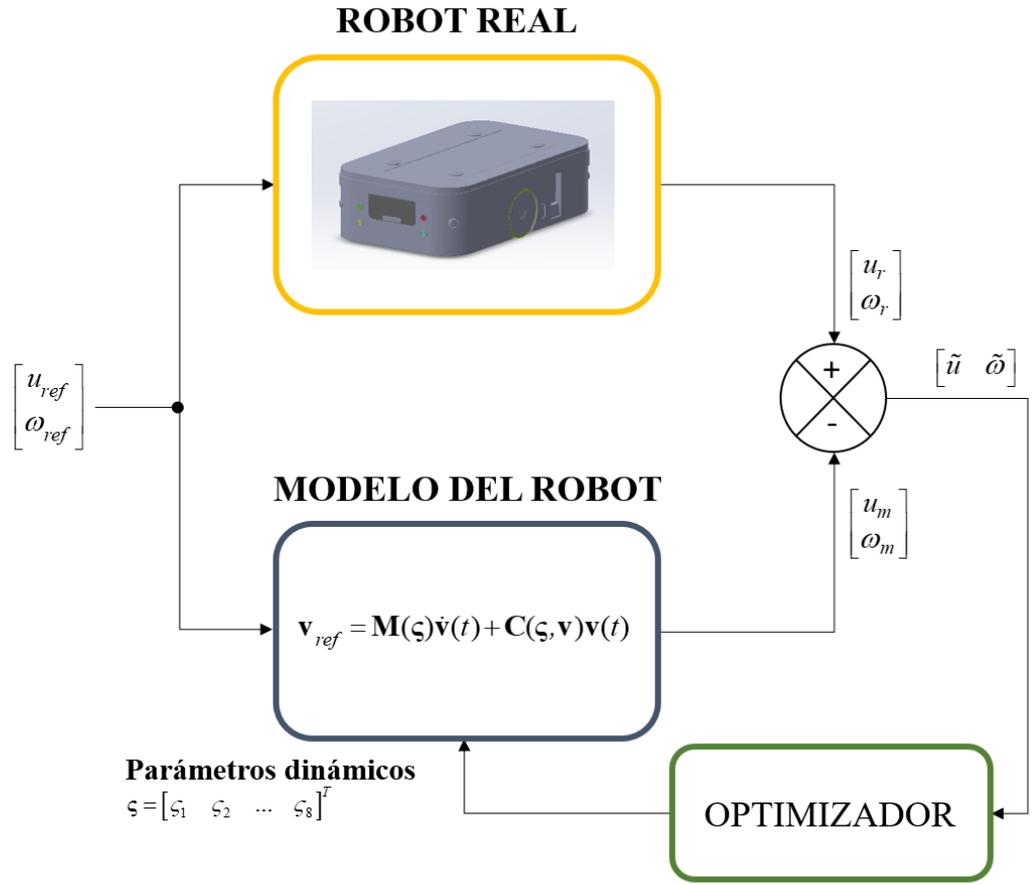
- $V = 12[V]$
- 230[RPM], 100mA
- 34:1

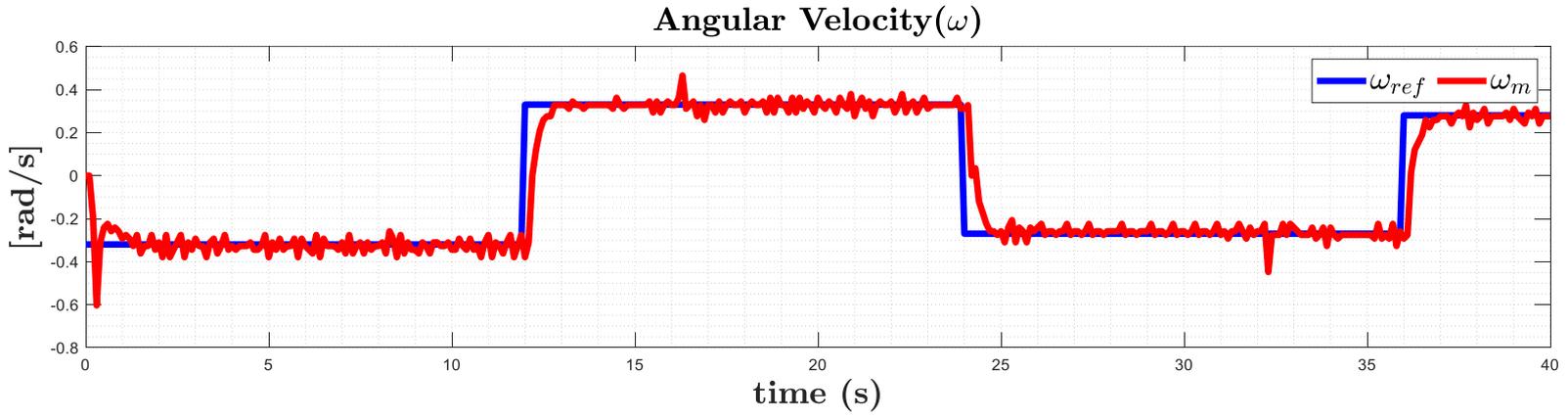
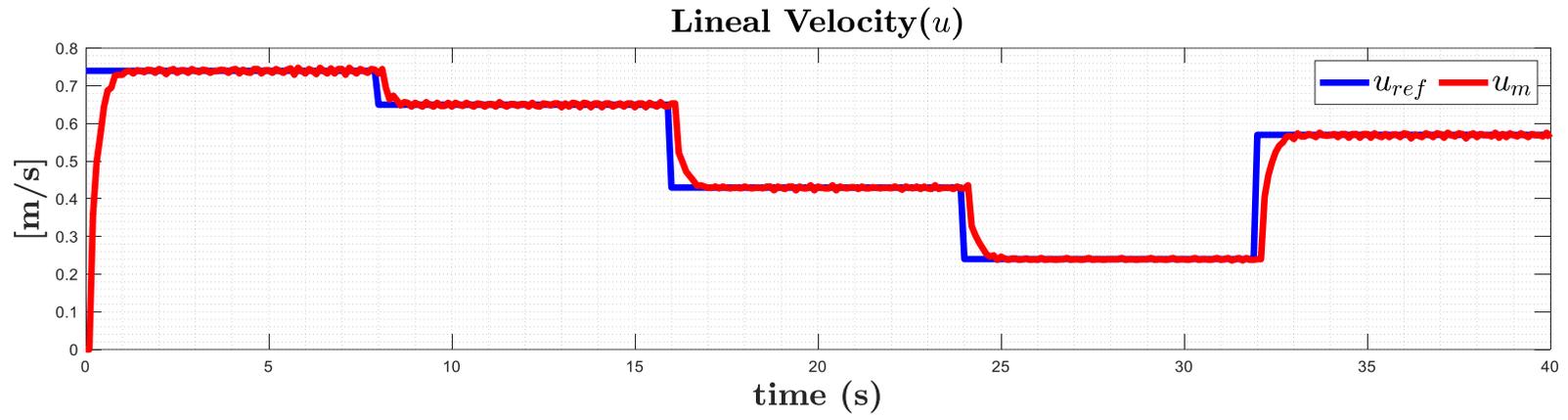


- $V = 11,1 [V]$
- $I = (800) [mA]$



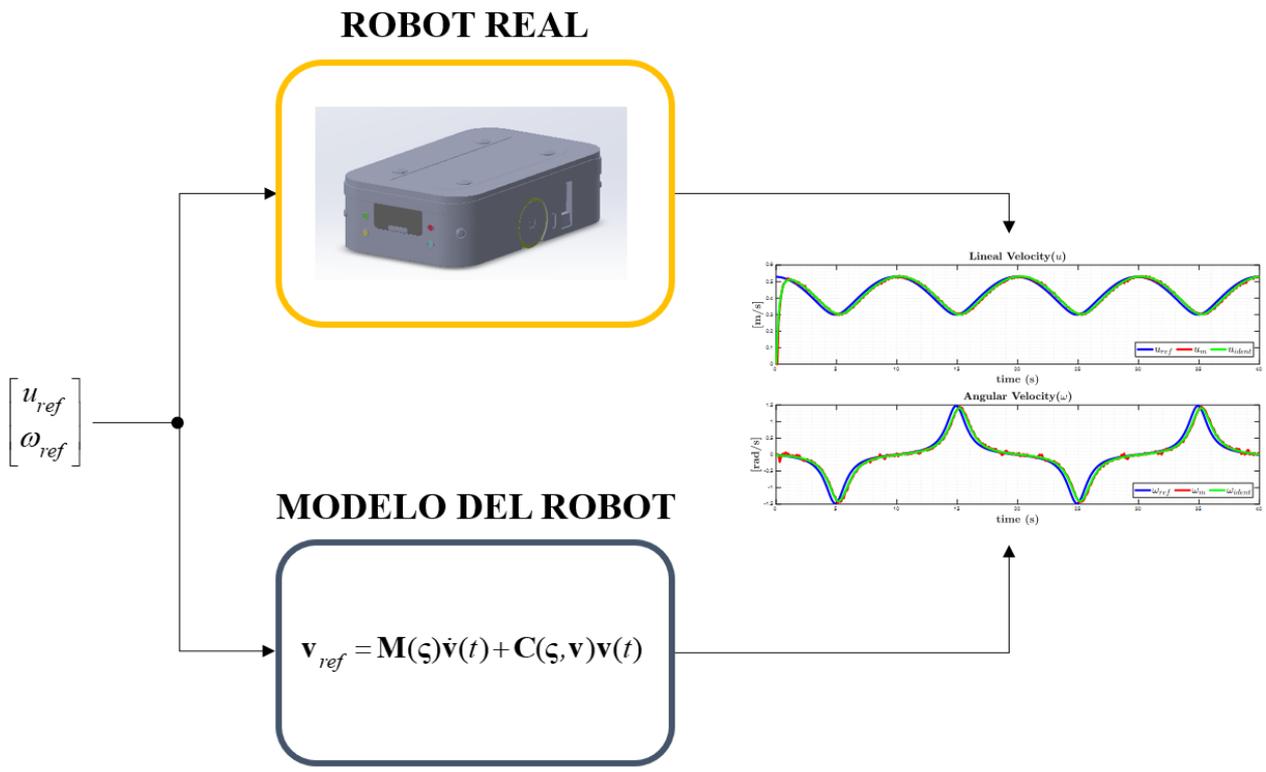
Identificación



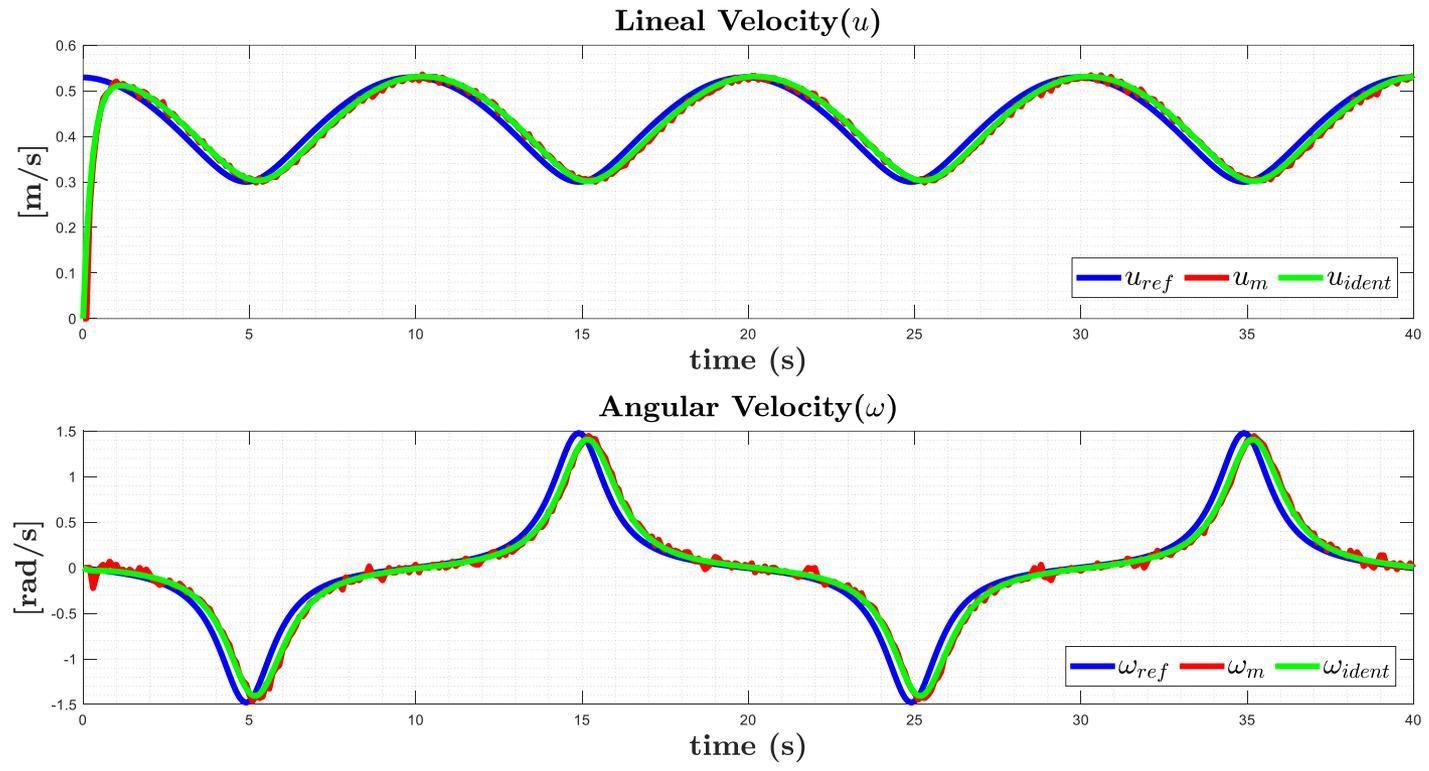


$$\zeta_1 = 0.3163 \quad \zeta_2 = 0.2978 \quad \zeta_3 = 0.0012 \quad \zeta_4 = 0.9949 \quad \zeta_5 = 0.0035 \quad \zeta_6 = 1.0033$$
$$\zeta_7 = 0.0020 \quad \zeta_8 = 0.0316$$

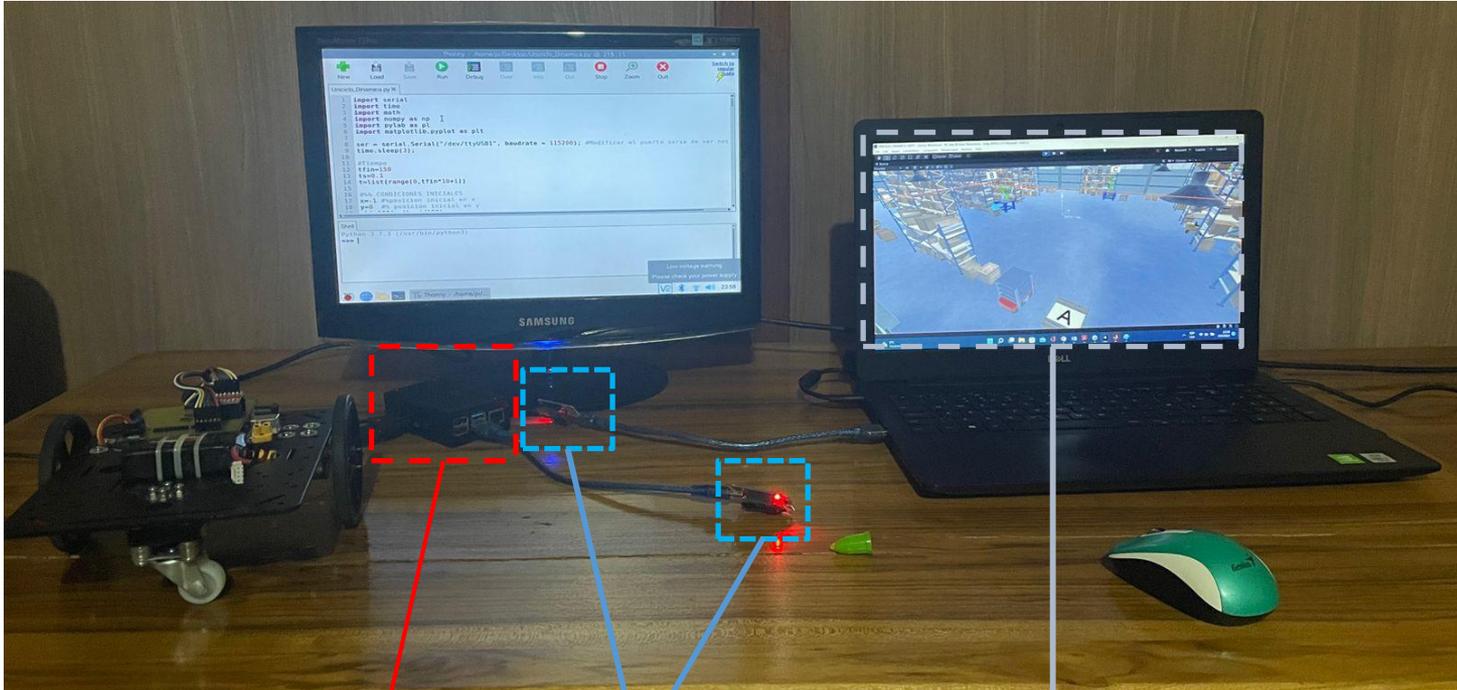
Validación



Validación



HARDWARE IN THE LOOP

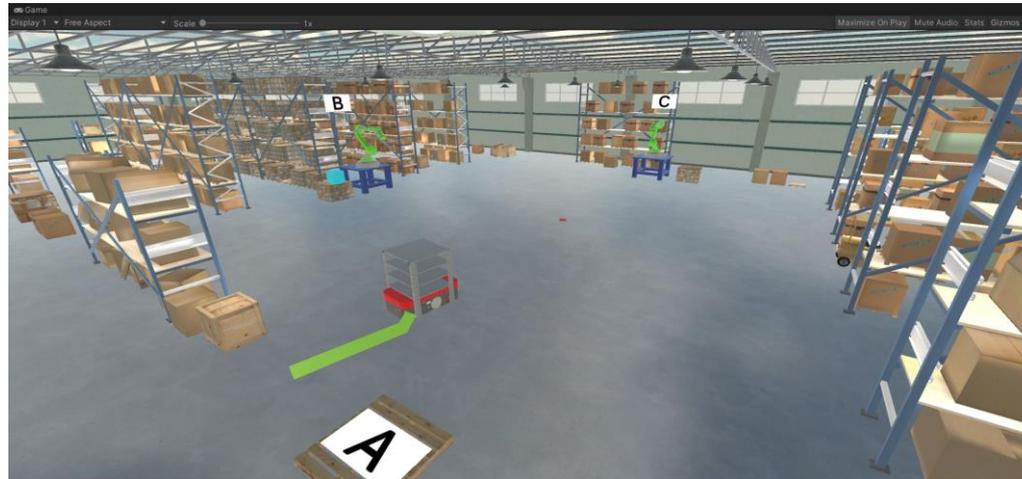
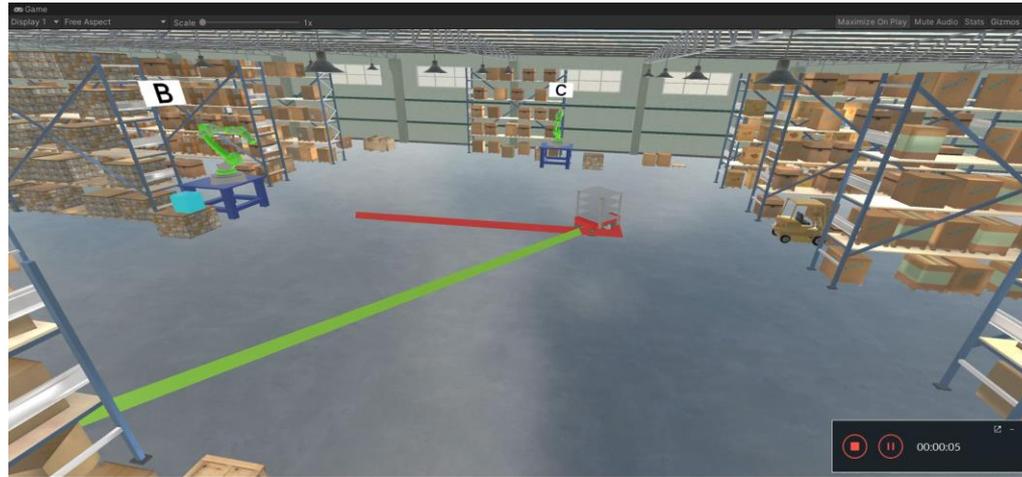


RASPBERRY
PI 4

XBEE'S

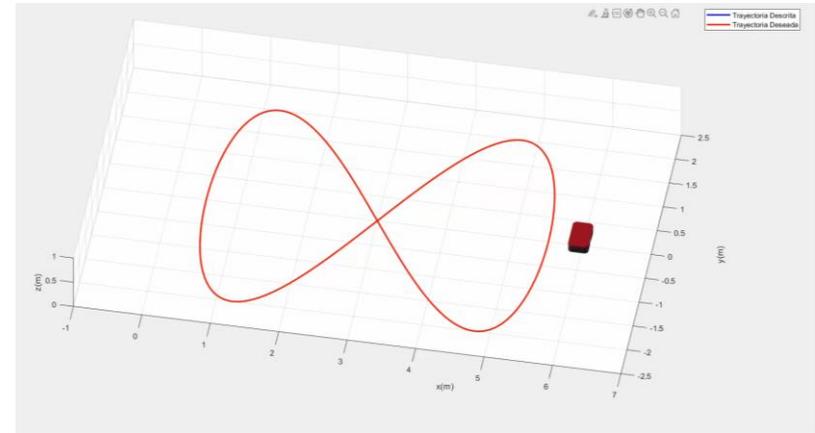
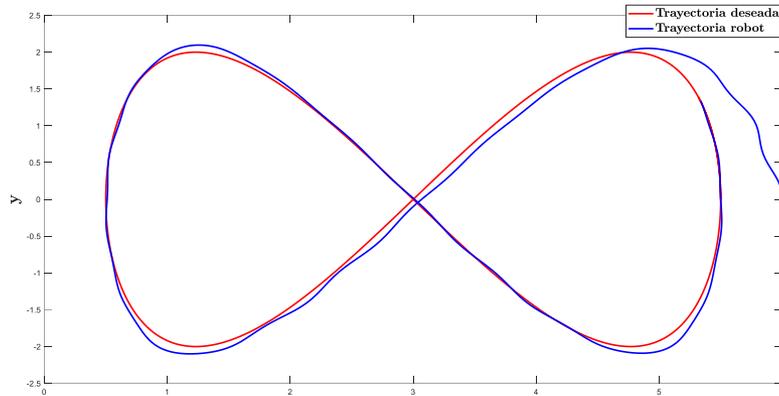
VIRTUAL
ENVIROMENT

HARDWARE IN THE LOOP

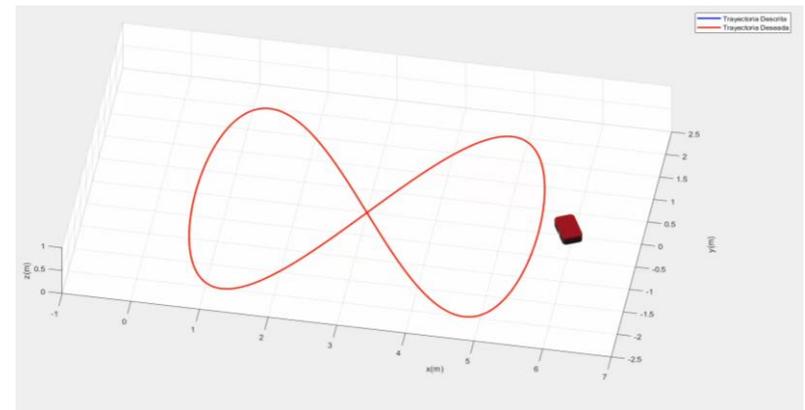
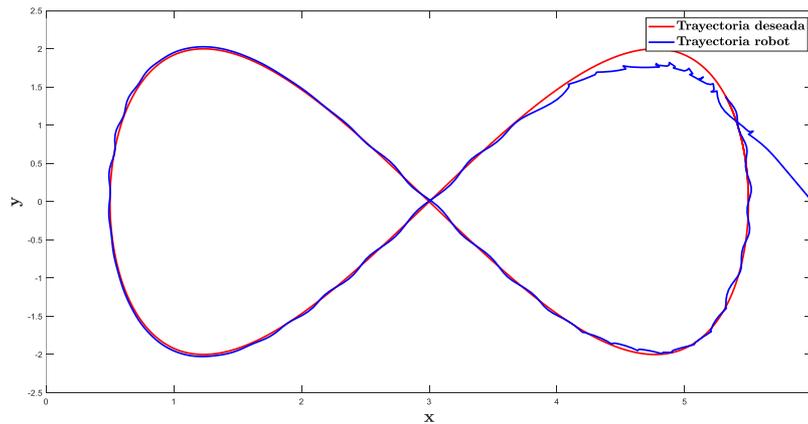


Desempeño de control

Control sin compensador dinámico

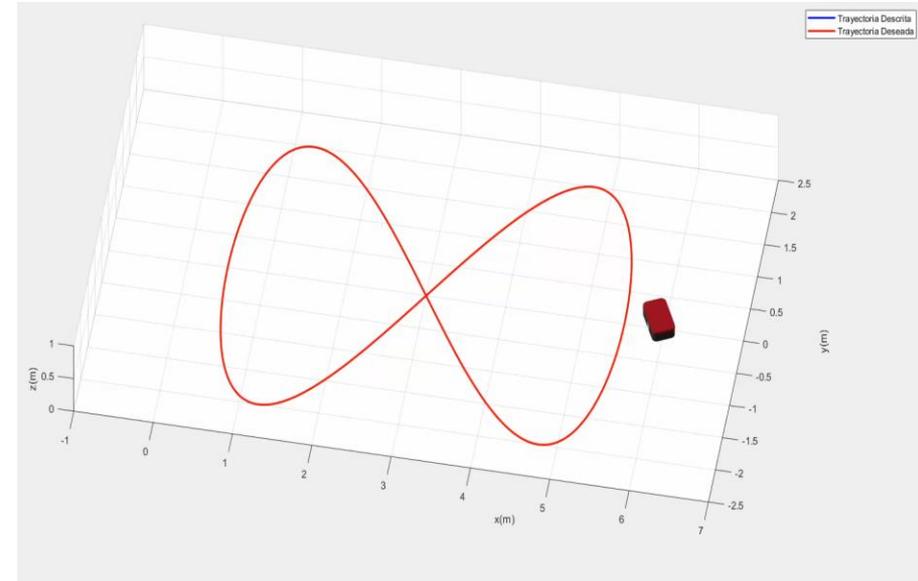
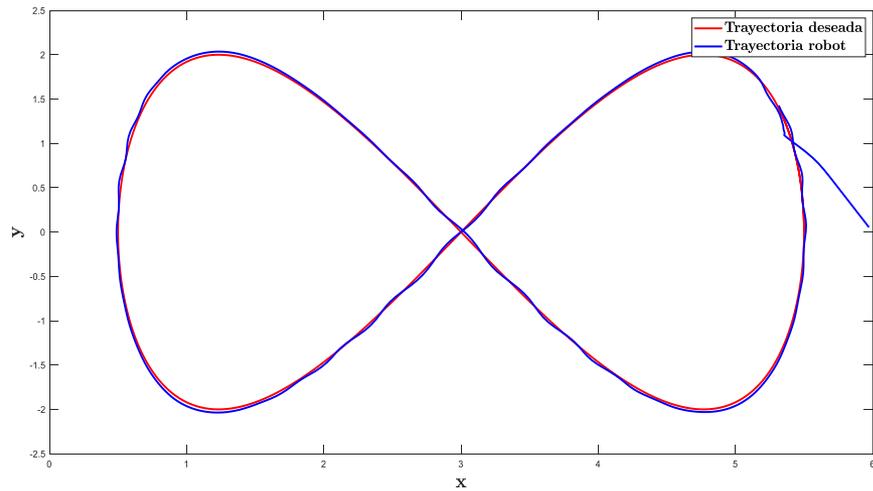


Control con compensador dinámico



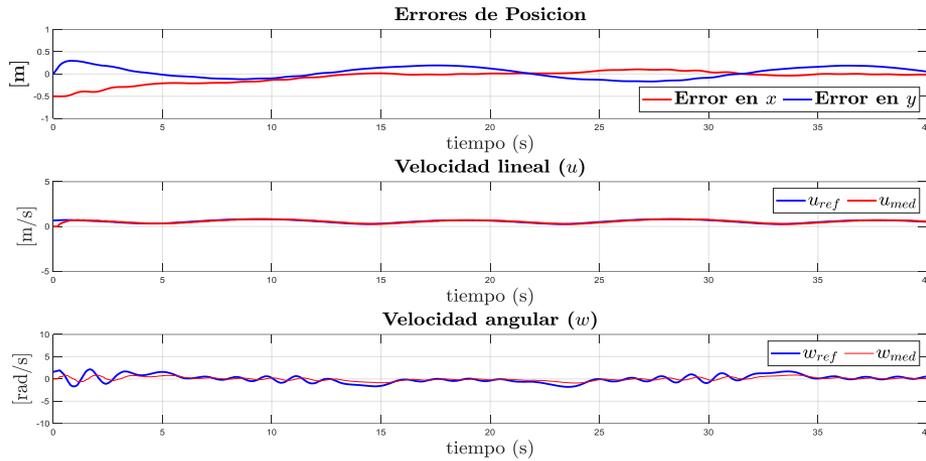
Desempeño de control

Control con compensador dinámico adaptable

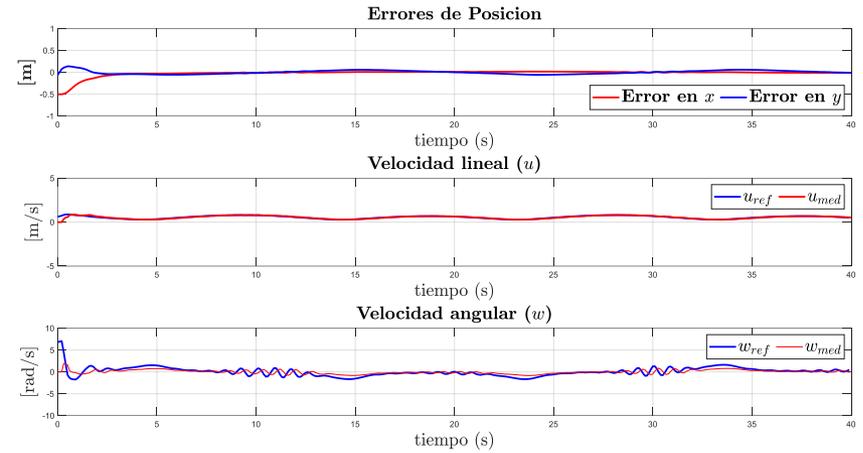


Desempeño de control

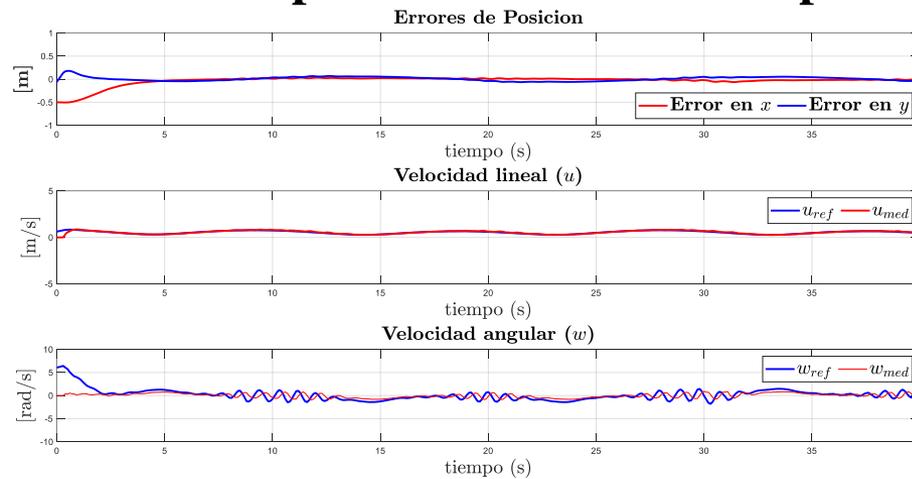
Control sin compensador dinámico



Control con compensador dinámico



Control con compensador dinámico adaptable







CONCLUSIONES

- ✓ El comportamiento del **modelo matemático obtenido** tuvo una mayor precisión con respecto al sistema físico para implementar y evaluar algoritmos de control avanzados.
- ✓ La **técnica HIL** proporciona una forma para implementar algoritmos de control en situaciones en que el dispositivo real no se encuentra disponible, ya que el comportamiento del mismo se puede imitar de forma viable.
- ✓ Mediante el **análisis de estabilidad** del compensador dinámico adaptativo del sistema de lazo cerrado los errores de control convergen a valores acotados, lo que resultó de la experimentación en el buen desempeño del controlador.
- ✓ El **compensador dinámico adaptativo** permite identificar parámetros dinámicos del robot si estos no fueron correctamente identificados o a su vez estos pueden variar de una tarea a otra.

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**

CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT UNICICLO PARA IMPLEMENTACIÓN DE ALGORITMOS AVANZADOS

Autores:

Guerrero Vásquez, Fidel Napoleón

Proaño Jarrin, Karen Abigail

Ing. Naranjo Hidalgo César Alfredo., MsC. *Tutor*

Ing. Andaluz Ortiz Víctor Hugo, Ph.D. *Cotutor*

