



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**

**CONTROL DE FORMACIÓN DE ROBOTS MÓVILES TIPO UNICICLO EN ENTORNOS
*HARDWARE IN THE LOOP***

Autores:

Quispe Guanoluisa Manuel Andrés

Molina Caña Martha Cecilia

Ing. Víctor H., Andaluz, Ph.D. *Tutor*





Congreso Internacional de Tecnologías Aplicadas

ICAT 2020 : [Tecnologías aplicadas](#) págs. 430-443 | [Citar como](#)

Control de formación de robots móviles monociclo en *hardware* en entornos de bucle

Autores

[Autores y afiliaciones](#)

Manuel A. Quispe✉, Martha C. Molina✉, Jessica S. Ortiz✉, Víctor H. Andaluz✉

Documento de sesión

Primero en línea: 01 de abril de 2021

177

Descargas

Primero en línea
01 de abril de 2021

DOI

https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8_33

Nombre del editor
Springer, Cham

Imprimir ISBN
978-3-030-71502-1

ISBN en línea
978-3-030-71503-8

Paquetes de libros electrónicos

[Ciencias de la Computación](#)
[Ciencias de la Computación \(R0\)](#)

Unicycle Mobile Robot Formation Control in *Hardware in the Loop* Environments

Manuel A. Quispe✉, Martha C. Molina✉, Jessica S. Ortiz✉, and Víctor H. Andaluz✉

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
{maquispe2, mcmolina6, jsortiz4, vhandaluz1}@espe.edu.ec

Abstract. This work presents the development of a formation control algorithm for three unicycle-type robots, to solve the problem in the implementation of controllers oriented to collaborative functions and also subject to an excessive economic cost. This leads to the approximation of the simulation technique in environments *Hardware in the loop* (HIL), which allow clearly visualize with a real idea and a high percentage of approximation of the behavior of mobile robots unicycle type integrating different types of advanced controllers that will allow the execution of tasks of mobile robots unicycle type the same that are determined by the trajectories that control the position and thus raises the strategy of nonlinear control with a centralized and decentralized formation in the work area, acting as a command and control management system that will in turn be able to receive input signals, process the information and deliver control signals, which will later be displayed and analyzed to help verify the control theory.

Keywords: Formation control · Unicycle type robot · Mathematical modeling · Control theory and analysis

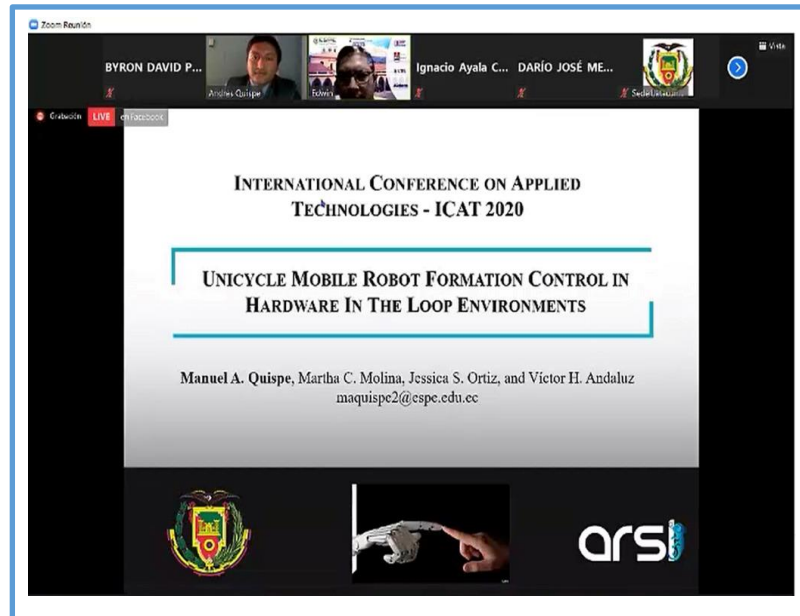
1 Introduction

Industrial robots have been considered the most popular robots; due to the importance they have maintained in the industrial sector as a key tool in modernizing [1]. However, in recent years the need has arisen to extend the scope of application of robotics outside the area of the purely industrial sector, thus trying to make the robots perform tasks like the demanded in service robotics [1, 2]. Thus, its use has evolved both in its characteristics and in its maneuverability in the execution of high-impact actions within society. Several definitions they have been imparted around a robot of service, it is so that the International Federation of Robotics (IFR, for their initials in English), organism that is in charge to coordinate the activities in this technological area it has defined it as: A robot that operates of automatic way or semiautomatic to carry out useful services to the well-being of the humans or to their equipment, excluding the operations of manufacture. The name arises for the restlessness of the scientific community of carrying out developments destined to be to the service of the society, trying that this one recognizes and endorses their results [3].

© Springer Nature Switzerland AG 2021
M. Botto-Tobar et al. (Eds.): ICAT 2020, CCIS 1388, pp. 1–14, 2021.
https://doi.org/10.1007/978-3-030-71503-8_33

Program – Thursday, December 3rd, 2020

14:00 – 16:00	Session 9: Machine Vision / e-Government and e-Participation https://cedia.zoom.us/j/89349396740
14:00 – 14:15	DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE TO REHABILITATE KNEE AND ANKLE INJURIES, USING A PARALLEL ROBOT WITH 6 DEGREES OF FREEDOM <u>Xavier Arias</u> , Sandro Balarezo, Javier Gavilanes, Miguel Aquino and Geovanny Novillo
14:15 – 14:30	VIRTUALIZATION OF A MULTISENSORY ENVIRONMENT FOR THE TREATMENT OF STRESS IN CHILDREN WITH AUTISM THROUGH INTERACTIVE SIMULATION Ricardo Plasencia, Gabriela Herrera, <u>Patricio Navas Moya</u> and Ximena López
14:30 – 14:45	Control scheme for a robotic platform with omnidirectional traction system, based on the kinematic and dynamic model <u>Luis Gallo</u> , Byron Paste, Jessica Ortiz and Víctor Andaluz
14:45 – 15:00	Autonomous Intelligent Navigation For Mobile Robots In Closed Environments <u>Steven Silva</u> , Dennys Paillacho, David Soque León, María Guerra Pintado and Jonathan Paillacho Corredores
15:00 – 15:15	Design and construction of a low-cost CNC milling machine for woodworking <u>Manuel Ignacio Ayala Chauvin</u> , Fernando Saá, Ricardo Rodríguez, Carles Domènech and Genís Riba
15:15 – 15:30	Formation Control of Mobile Unicycle-type Robots in Hardware Environments in the Loop <u>Manuel Andrés Quispe</u> , Martha Cecilia Molina, Jessica Sofía Ortiz and Victor Hugo Andaluz



Zoom Reunión

BYRON DAVID P...
Atiles Quispe

Ignacio Ayala C...
Edmundo

DARIO JOSÉ ME...
Cecilia Molina

INTERNATIONAL CONFERENCE ON APPLIED TECHNOLOGIES - ICAT 2020

UNICYCLE MOBILE ROBOT FORMATION CONTROL IN HARDWARE IN THE LOOP ENVIRONMENTS

Manuel A. Quispe, Martha C. Molina, Jessica S. Ortiz, and Victor H. Andaluz
maquispc2@espe.edu.ec

ESPE

Hand holding robot

arsí





INDUSTRIA

SERVICIO



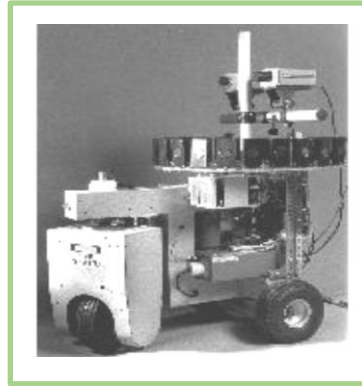
Aplicaciones de los robots de servicio



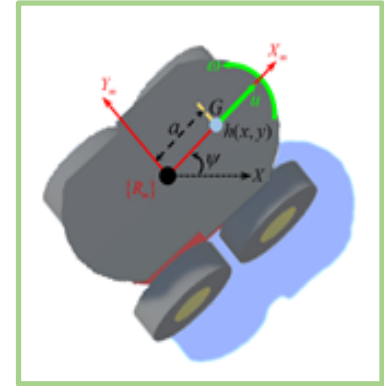
Cuadríciclo



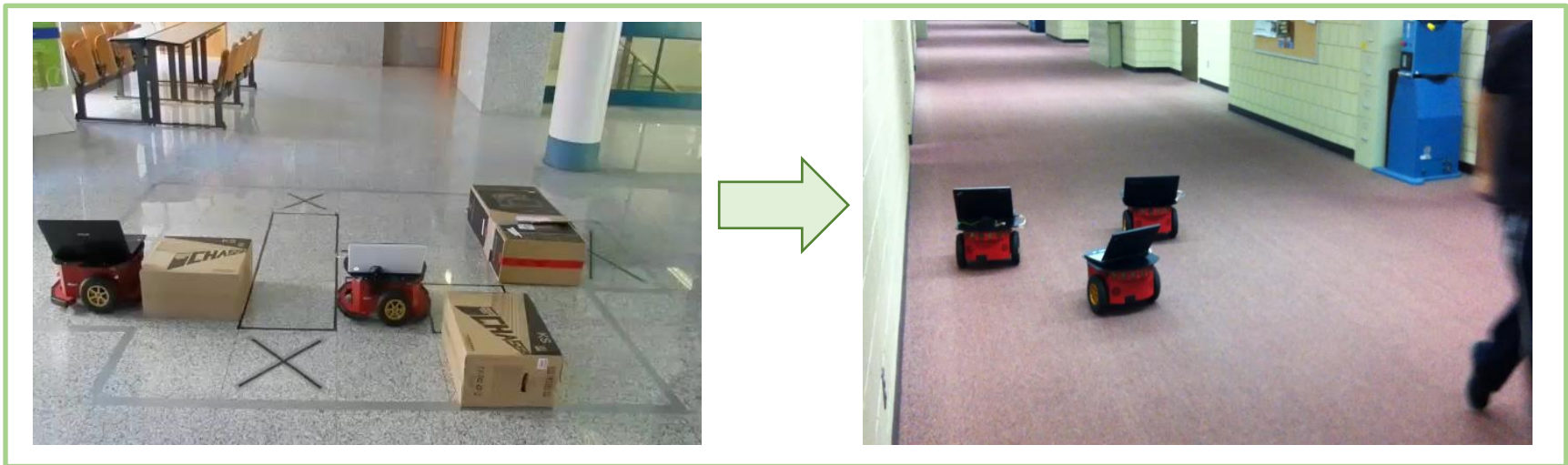
Triciclo



Uniciclo

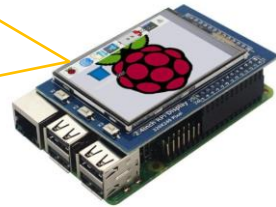


- Gran versatilidad y sencilla configuración



Una técnica en la que las señales reales de un controlador

```
17 # ser de control
18 vd = np.array([xmb(x), ymb(x), hmb(x)])
19 vd = np.transpose(vd)
20 vc = np.dot(np.linalg.inv(J),vd + np.dot(x,ha))
21
22 # Valores del controlador cinematico
23 vrc = vc[0]
24 vrc = float(vrc)
25 vlc = vc[1]
26 vlc = float(vlc)
27 vcl = vc[2]
28 vcl = float(vcl)
29
30 #Envío de valores del controlador cinematico a Matlab-Utity
31 cadena = str(vrc) + ',' + str(vlc) + ',' + str(vcl) + "\n"
32 print(cadena)
33 ser.write(cadena.encode('ASCII'))
34
35 #Recepción de los datos de los sensores
36 Valores = ser.readline().strip()
37 Velocidades = Valores.decode()
38 vel = Velocidades.split(',')
39
40 #Shell
41
42 -0.3825882545888655, -0.0489861987495718, 0.0
43 -0.3710445564214815, -0.0434376578747317, 0.0
```

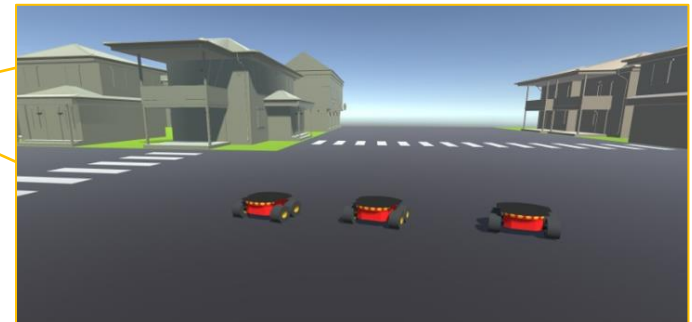
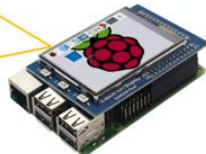


Son conectadas



Sistema de pruebas que simula la realidad

```
18 # ser de control
19 vd = np.array([xmb(x), ymb(x), hmb(x)])
20 vd = np.transpose(vd)
21 vc = np.dot(np.linalg.inv(J),vd + np.dot(x,ha))
22
23 # Valores del controlador cinematico
24 vrc = vc[0]
25 vrc = float(vrc)
26 vlc = vc[1]
27 vcl = vc[2]
28 vcl = float(vcl)
29
30 #Envío de valores del controlador cinematico a Matlab-Utity
31 cadena = str(vrc) + ',' + str(vlc) + ',' + str(vcl) + "\n"
32 print(cadena)
33 ser.write(cadena.encode('ASCII'))
34
35 #Recepción de los datos de los sensores
36 Valores = ser.readline().strip()
37 Velocidades = Valores.decode()
38 vel = Velocidades.split(',')
39
40 #Shell
41
42 -0.3825882545888655, -0.0489861987495718, 0.0
43 -0.3710445564214815, -0.0434376578747317, 0.0
```



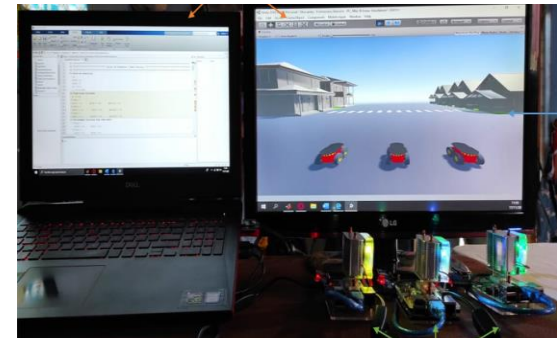
La implementación de algoritmos de control en tareas de formación tiene diferentes desventajas:



- Complejidad para el desarrollo de tareas
- Elevado costo económico



La solución es utilizar la técnica HIL



Implementar un esquema de control multivariable en un entorno **HARDWARE IN THE LOOP (con sus siglas en ingles **HIL**) a fin de evaluar algoritmos de control avanzado para la formación colaborativa de tres robots móviles de tipo unicycle.**

- **Investigar** en las diferentes bases de datos científicos acerca de la **modelación y control** de robots móviles de tipo unicycle, a fin de ejecutar **tareas de formación cooperativa** a ser implementados en entornos de hardware in the loop.
- **Modelar las características y restricciones del movimiento** de un robot tipo unicycle, con el propósito de implementar **algoritmos de control avanzados de formación**.
- **Obtener el modelo dinámico** de un robot móvil tipo unicycle con la finalidad de determinar las **características dinámicas**, es decir, masa, fuerzas internas, fuerzas externas que intervienen en el comportamiento del robot, entre otros aspectos dinámicos. **El modelo dinámico encontrado deberá tener una estructura adecuada para ser utilizados en algoritmos de control avanzado**

- **Validar los modelos matemáticos** que representan la cinemática y dinámica de un robot móvil tipo unicycle, **a través de pruebas experimentales con los robots móviles disponibles en el laboratorio de investigación en automatización, robótica y sistemas inteligentes.**
- **Proponer un esquema de control multivariable** para ejecutar tareas autónomas de formación de tres robots móviles de tipo unicycle. El esquema de control deberá estar **conformado por un sistema en cascada** que considere: **un control de formación centralizado y un control no lineal para cada uno de los robots móviles.**
- **Analizar la estabilidad** del esquema de control propuesto, con la finalidad de evaluar el comportamiento de los errores de control
- **Implementar un entorno hardware in the loop** a través de la utilización de **tarjetas de adquisición de datos** para el control de formación de robots móviles tipo unicycle



MODELO CINEMÁTICO

La posición del robot unicycle es: $\mathbf{h} = [x \ y \ \psi]^T$,
modelo cinemático como:

$$\begin{cases} \dot{x} = u \cos(\psi) - a\omega \sin(\psi) \\ \dot{y} = u \sin(\psi) + a\omega \cos(\psi) \\ \dot{\psi} = \omega \end{cases}$$

Donde las velocidades están dadas por:

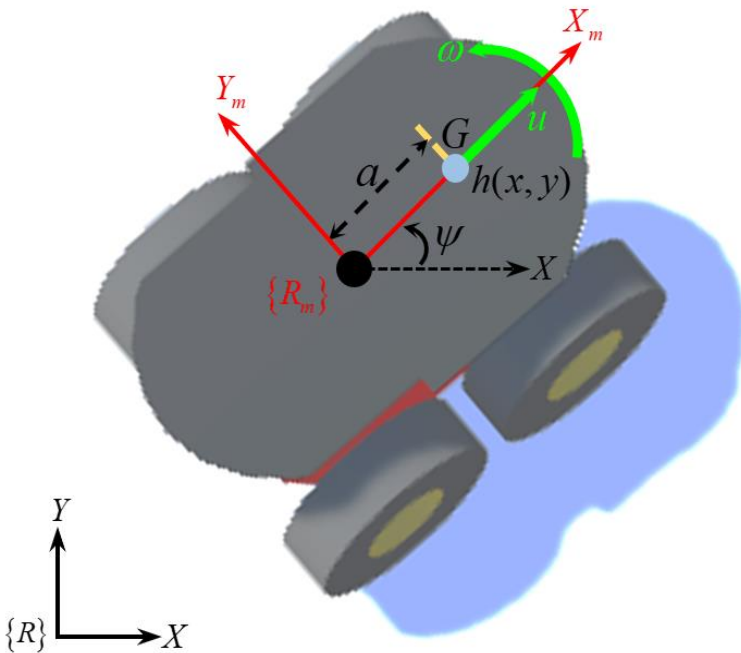
$$\mathbf{v} = [u \ \omega]^T$$

u Velocidad lineal

ω Velocidad angular

Forma compacta:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{h}} &= \mathbf{J}(\psi) \mathbf{v} \\ \dot{\psi} &= \omega \end{aligned} \quad (1)$$



MODELO DINÁMICO

El método utilizado se basa en el equilibrio de energías

$$L = E_C - E_P$$

Luego, con la formulación de Euler-Lagrange

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

Se obtiene

$$\mathbf{M}_{R2} \ddot{\boldsymbol{\xi}} + \mathbf{E}^T \dot{\mathbf{W}} = \boldsymbol{\tau}_i \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\tau}_i = \frac{k_{pa}}{R_{pa}} \left(v_i - k_{pb} \mathbf{W}_i \right), \quad \mathbf{v}_v = \mathbf{K}_P \left(\boldsymbol{\eta}_{ref} - \boldsymbol{\eta} \right) - \dot{\boldsymbol{\eta}} \mathbf{K}_D$$

MODELO DINÁMICO

El modelo dinámico del robot unicycle está representado por:

$$\mathbf{v}_{ref} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta}) \dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{v}) \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\mathbf{v} = [u \quad \omega]^T$$

Vector de velocidad del sistema

$$\mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{v}) = \begin{bmatrix} \zeta_4 & -\zeta_3 \omega \\ \zeta_5 \omega & \zeta_6 \end{bmatrix}$$

Componentes de las fuerzas centrípetas

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta}) = \begin{bmatrix} \zeta_1 & -\zeta_7 \\ -\zeta_8 & \zeta_2 \end{bmatrix}$$

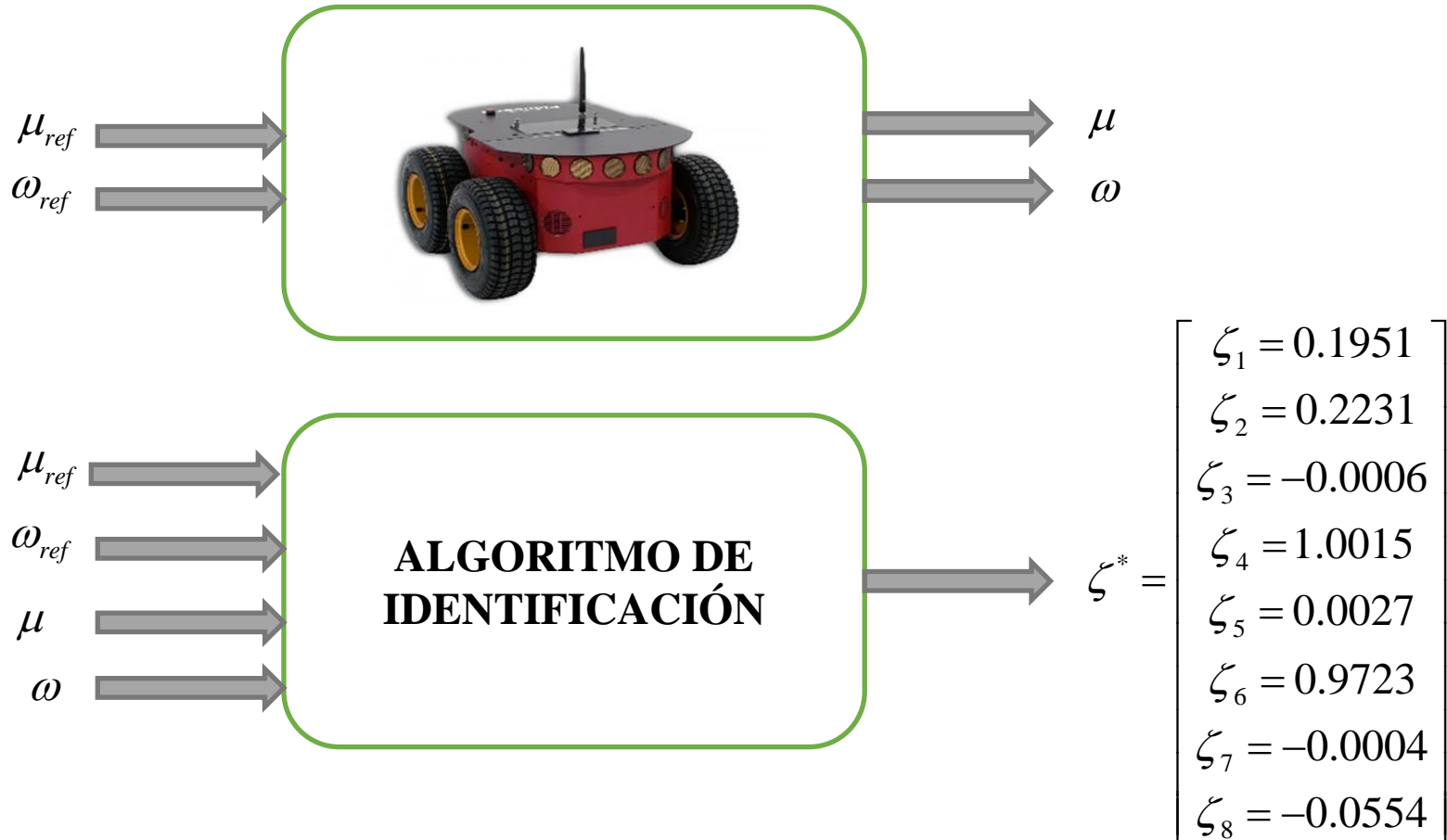
Representa la inercia del sistema robot-móvil

$$\mathbf{v}_{ref} = [u_{ref} \quad \omega_{ref}]^T$$

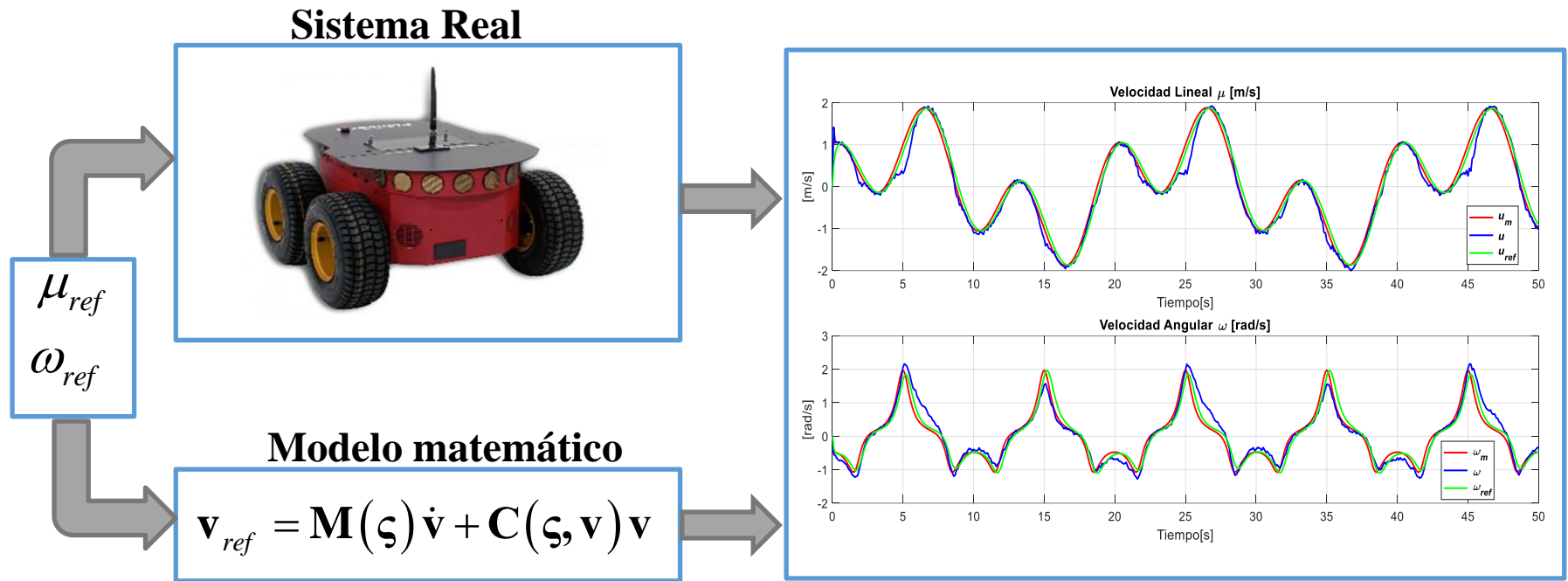
Señales de control de velocidad

$$\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1 \quad \zeta_2 \quad \dots \quad \zeta_l]^T \quad \text{Parámetros dinámicos del sistema}$$

IDENTIFICACIÓN



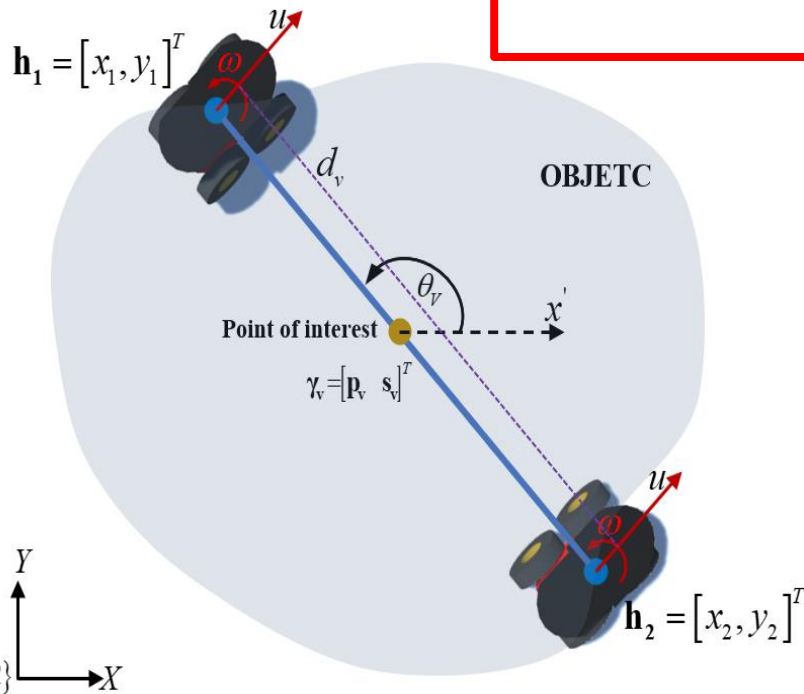
VALIDACIÓN



MODELO FORMACIÓN

El modelo de formación se desarrolla en base a las proyecciones entre un par de robots, dichas proyecciones se definen como:

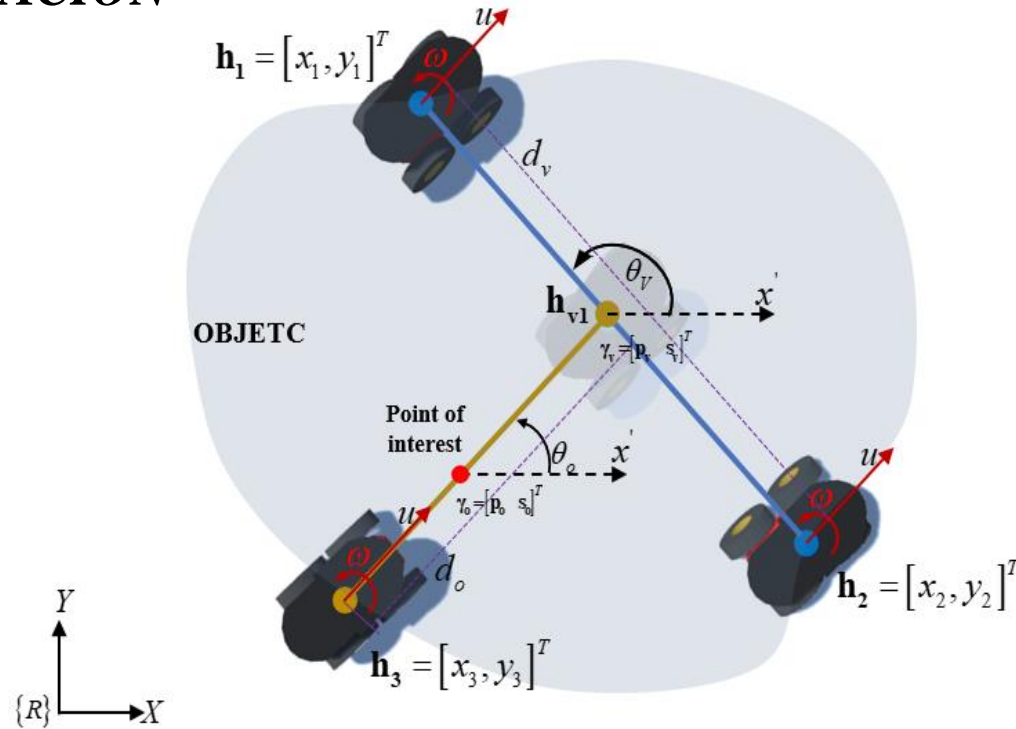
$$\gamma_v = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_v \\ \mathbf{s}_v \end{bmatrix}; \mathbf{p}_v = \begin{bmatrix} x_v \\ y_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(x_1 + x_2) \\ \frac{1}{2}(y_1 + y_2) \end{bmatrix}; \mathbf{s}_v = \begin{bmatrix} d_v \\ \theta_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2}\right) \end{bmatrix}$$



Considerando las derivadas de las proyecciones, podemos definir la relación compacta:

$$\dot{\gamma} = \mathbf{J}_F(\mathbf{h})\mathbf{h} \quad (3)$$

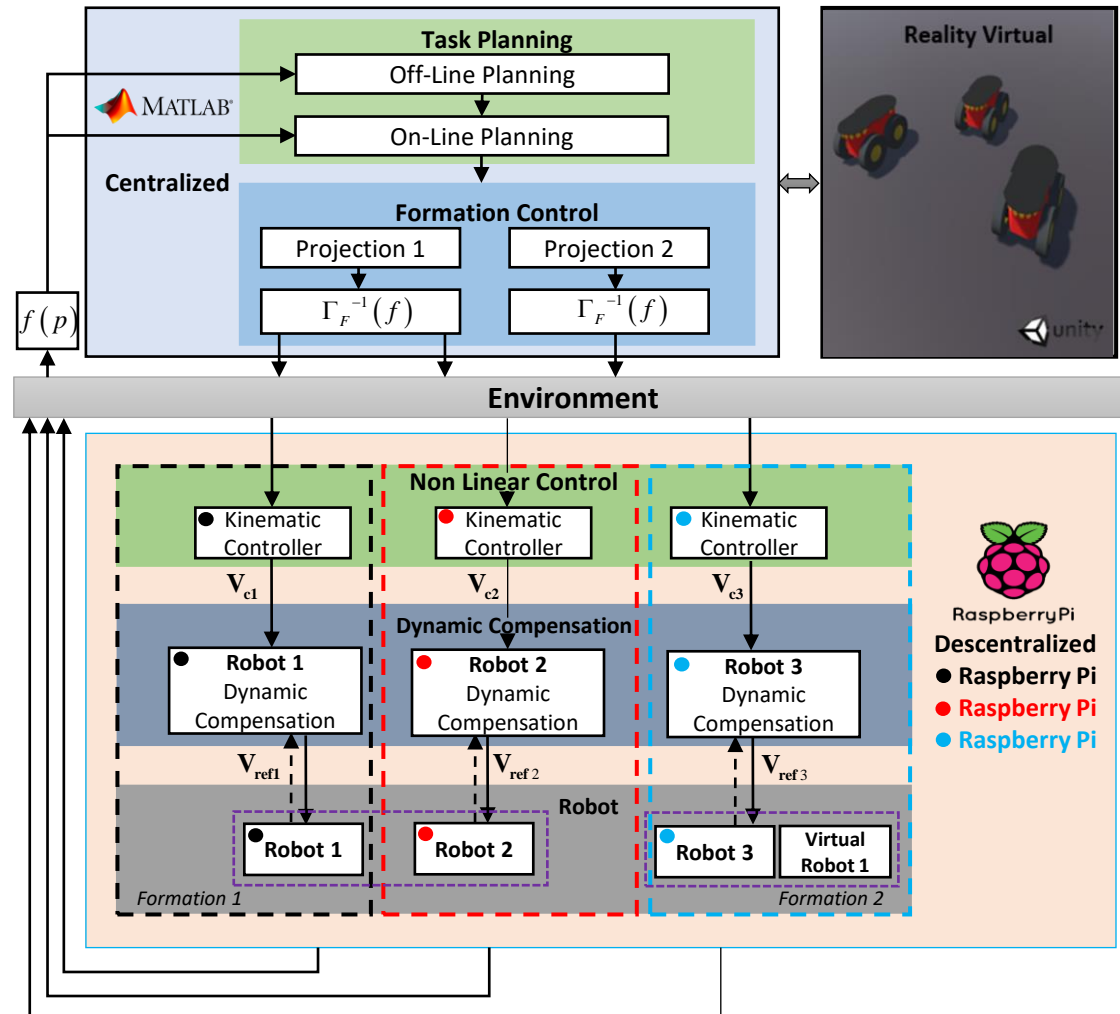
MODELO FORMACIÓN



$$\gamma_o = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_o \\ \mathbf{s}_o \end{bmatrix}; \mathbf{p}_o = \begin{bmatrix} x_o \\ y_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2}(x_v + x_3) \\ \frac{1}{2}(y_v + y_3) \end{bmatrix}; \mathbf{s}_o = \begin{bmatrix} d_o \\ \theta_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(x_v - x_3)^2 + (y_v - y_3)^2} \\ \tan^{-1}\left(\frac{y_v - y_3}{x_v - x_3}\right) \end{bmatrix}$$



Hardware In The Loop



CONTROLADOR DE FORMACIÓN

Esta destinado a lograr la formación del grupo de robots uniciclos, es por ello que se propone la siguiente ley de control:

$$\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) = \mathbf{J}_F^{-1}(\dot{\boldsymbol{\gamma}}_d + \mathbf{K}\tanh(\tilde{\boldsymbol{\gamma}}))$$

\mathbf{J}_F^{-1} Matriz jacobiana de formación

$\dot{\boldsymbol{\gamma}}_d$ Es la variación de la velocidad deseada

\mathbf{K} Es una matriz de ganancia diagonal

$\tilde{\boldsymbol{\gamma}}$ Es el error de formación

Considerando la candidata de Lyapunov de los errores cuadráticos y su derivada

$$\mathbf{V}(\tilde{\boldsymbol{\gamma}}) = \frac{1}{2} \tilde{\boldsymbol{\gamma}}^T \tilde{\boldsymbol{\gamma}} \quad \dot{\mathbf{V}}(\tilde{\boldsymbol{\gamma}}) = \tilde{\boldsymbol{\gamma}}^T \dot{\tilde{\boldsymbol{\gamma}}}$$

Ahora bien reemplazando $\dot{\boldsymbol{\gamma}} = \mathbf{J}_F(\mathbf{h})\mathbf{h}$ en $\dot{\mathbf{h}}(\mathbf{t}) = \mathbf{J}_F^{-1}(\dot{\boldsymbol{\gamma}}_d + \mathbf{K}\tanh(\tilde{\boldsymbol{\gamma}}))$ y considerando $\dot{\tilde{\boldsymbol{\gamma}}} = \dot{\boldsymbol{\gamma}}_d - \dot{\boldsymbol{\gamma}}$, se obtiene:

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\gamma}}} = \mathbf{K}\tanh(\tilde{\boldsymbol{\gamma}}) \quad (4)$$

Luego (4) Se reemplaza en la derivada de la candidata de Lyapunov y se tiene :

$$\dot{\mathbf{V}}(\tilde{\boldsymbol{\gamma}}) = -\tilde{\boldsymbol{\gamma}}^T \mathbf{K}\tanh(\tilde{\boldsymbol{\gamma}}) < 0$$

Por lo tanto: $\mathbf{K} > 0$, garantizando así que: $\tilde{\boldsymbol{\gamma}} \rightarrow 0$ en $t \rightarrow \infty$

CONTROLADOR CINEMÁTICO

El propósito del control cinemático es encontrar el vector de maniobrabilidad basado en el modelo; se propone la siguiente ley de control:

$$\mathbf{v} = \mathbf{J}^{-1} \left(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \right)$$

\mathbf{J}^{-1} Matriz jacobiana

$\dot{\mathbf{h}}_d$ Derivada de las posiciones deseadas

\mathbf{K} Es la matriz de ganancia

$\tilde{\mathbf{h}}$ Representa los errores de control

Considerando la candidata de Lyapunov de los errores cuadráticos y su derivada

$$\mathbf{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}} \quad \dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}) = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}}$$

Ahora bien reemplazando $\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{J}(\psi) \mathbf{v}$ en $\mathbf{v} = \mathbf{J}^{-1}(\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}))$ y considerando $\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}}$, se obtiene:

$$\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = -\mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \quad (5)$$

Luego (5) Se reemplaza en la derivada de la candidata de Lyapunov y se tiene :

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

Por lo tanto: $\mathbf{K} > 0$, garantizando así que: $\tilde{\mathbf{h}} \rightarrow 0$ en $t \rightarrow \infty$

COMPENSACIÓN DINÁMICA

Dado que el seguimiento de la velocidad en el controlador cinemático no es perfecto, se plantea el diseño de un controlador de compensación dinámica que se basa en el modelo dinámico del robot y se define como

$$\mathbf{v}_{\text{ref}} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta}) \left(\dot{\mathbf{v}}_c + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{v}}) \right) + \mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{v}) \mathbf{v}$$

- $\dot{\mathbf{v}}_c$ Representar las aceleraciones de control cinemático
- $\tilde{\mathbf{v}}$ Es el vector el error de velocidad
- \mathbf{K} Es la matriz de ganancia
- \mathbf{v} Velocidades de la plataforma robótica

Considerando la candidata de Lyapunov de los errores cuadráticos y su derivada

$$\mathbf{V}(\tilde{\mathbf{v}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{v}}^T \tilde{\mathbf{v}} \quad \dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{v}}) = \tilde{\mathbf{v}}^T \dot{\tilde{\mathbf{v}}}$$

Ahora bien reemplazando $\mathbf{v}_{ref} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta})\dot{\mathbf{v}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{v})\mathbf{v}$ en $\mathbf{v}_{ref} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta})(\dot{\mathbf{v}}_c + \mathbf{K}\tanh(\tilde{\mathbf{v}})) + \mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{v})\mathbf{v}$

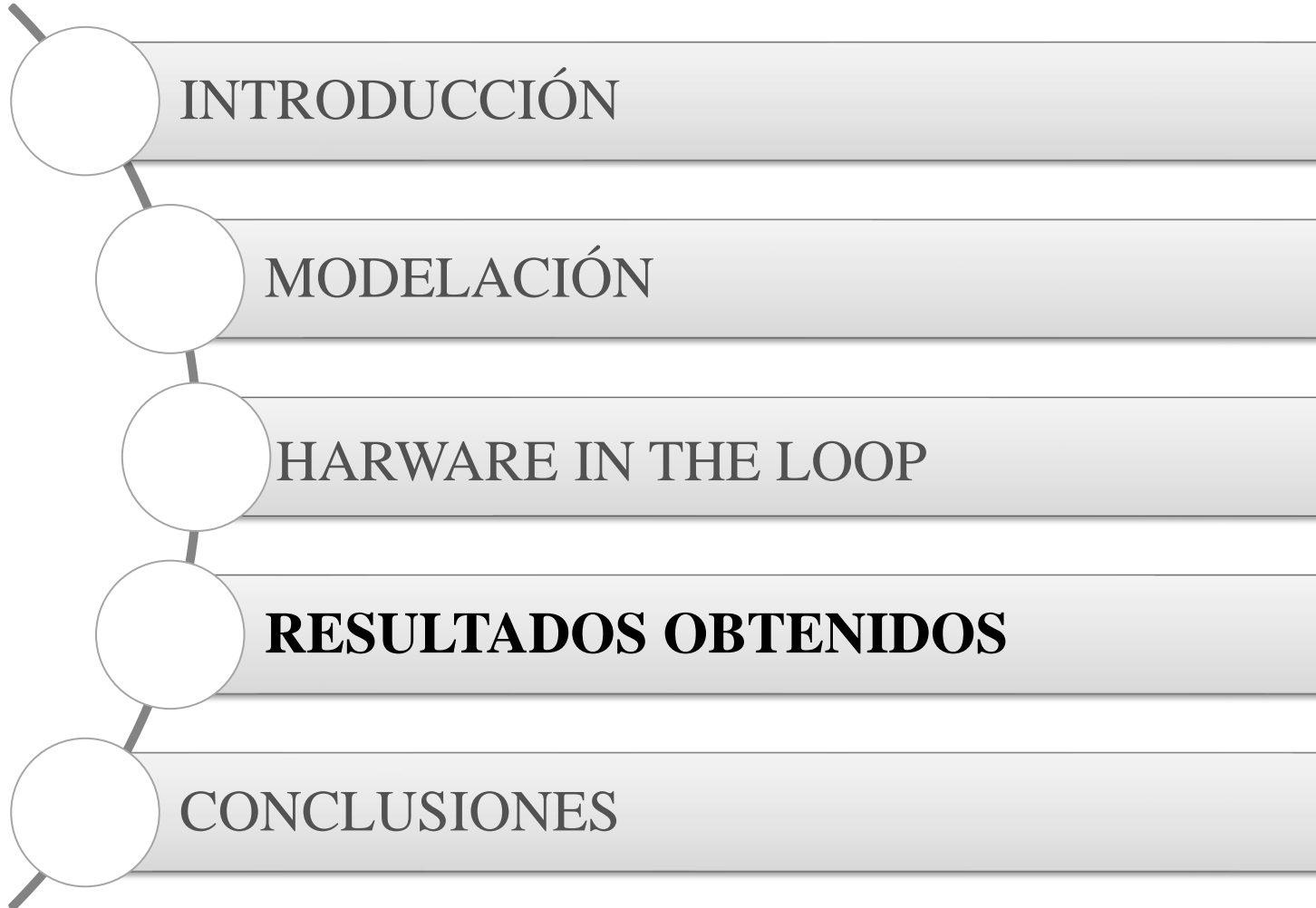
y considerando $\dot{\tilde{\mathbf{v}}} = \dot{\mathbf{v}}_d - \dot{\mathbf{v}}$, se obtiene:

$$\dot{\tilde{\mathbf{v}}} = \mathbf{K}\tanh(\tilde{\mathbf{v}}) \quad (6)$$

Luego (6) Se reemplaza en la derivada de la candidata de Lyapunov y se tiene :

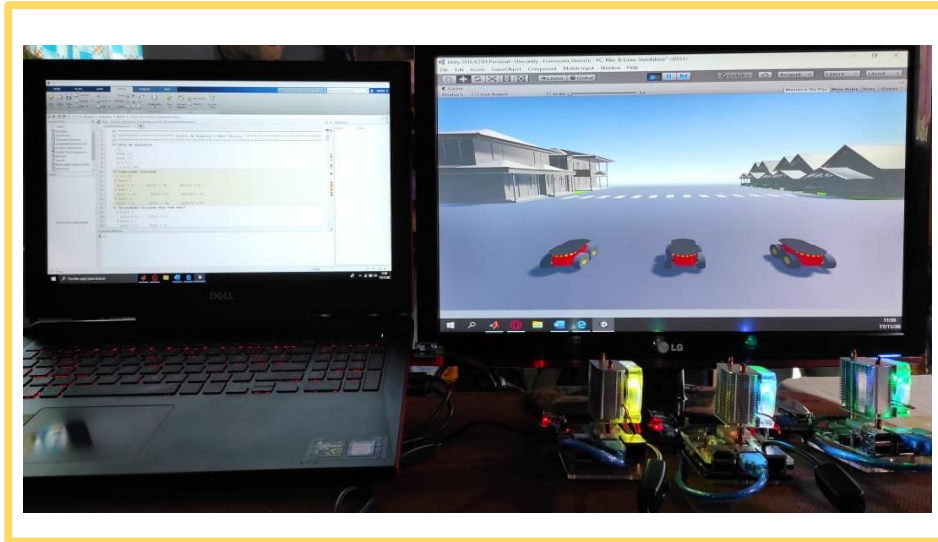
$$\dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{v}}) = -\tilde{\mathbf{v}}^T \mathbf{K}\tanh(\tilde{\mathbf{v}}) < 0$$

Por lo tanto: $\mathbf{K} > 0$, garantizando así que: $\tilde{\mathbf{v}} \rightarrow 0$ en $t \rightarrow \infty$

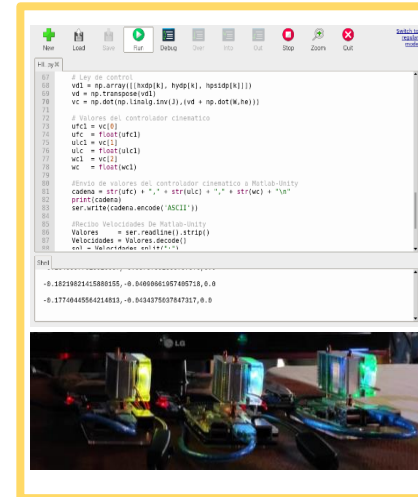


HARDWARE IN THE LOOP

Implementación de la técnica HIL

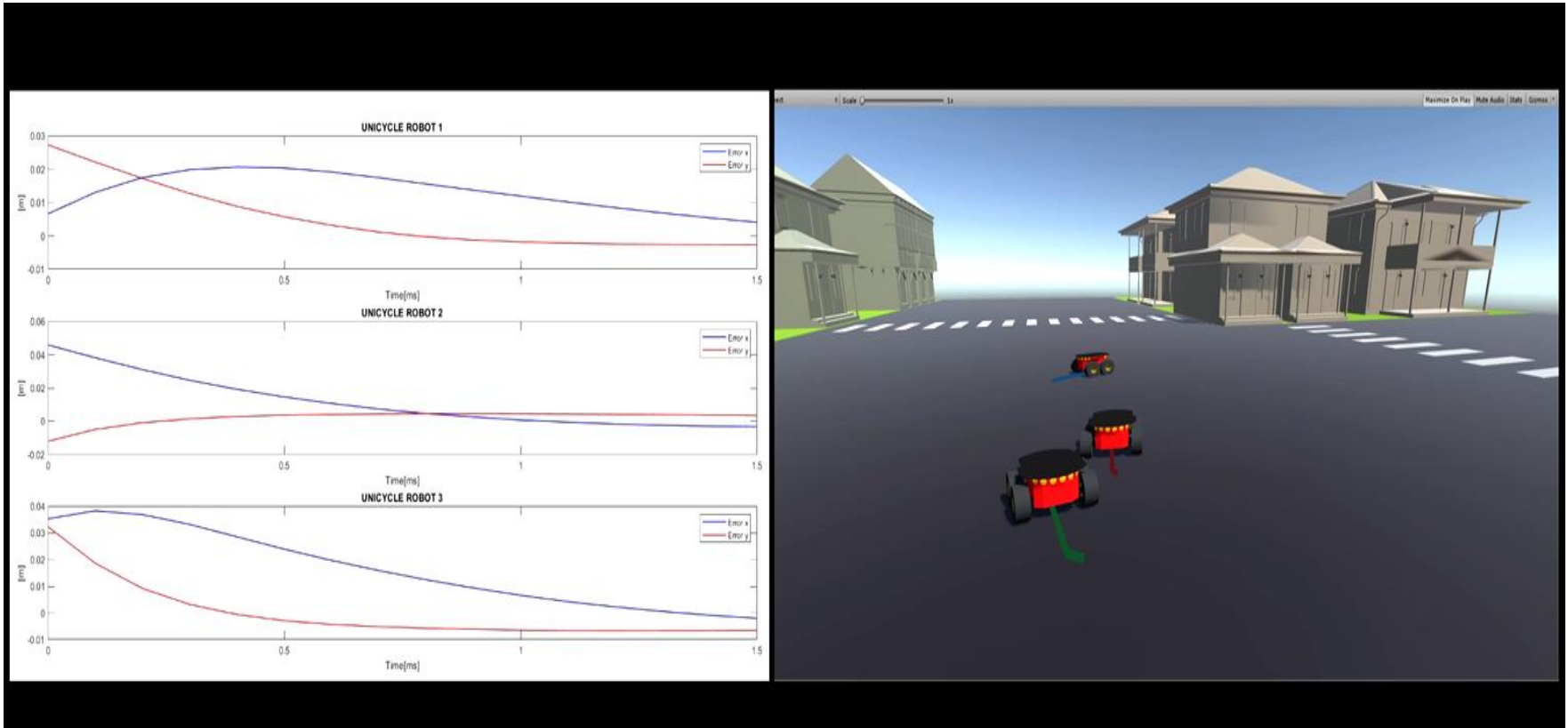


Entorno Virtual



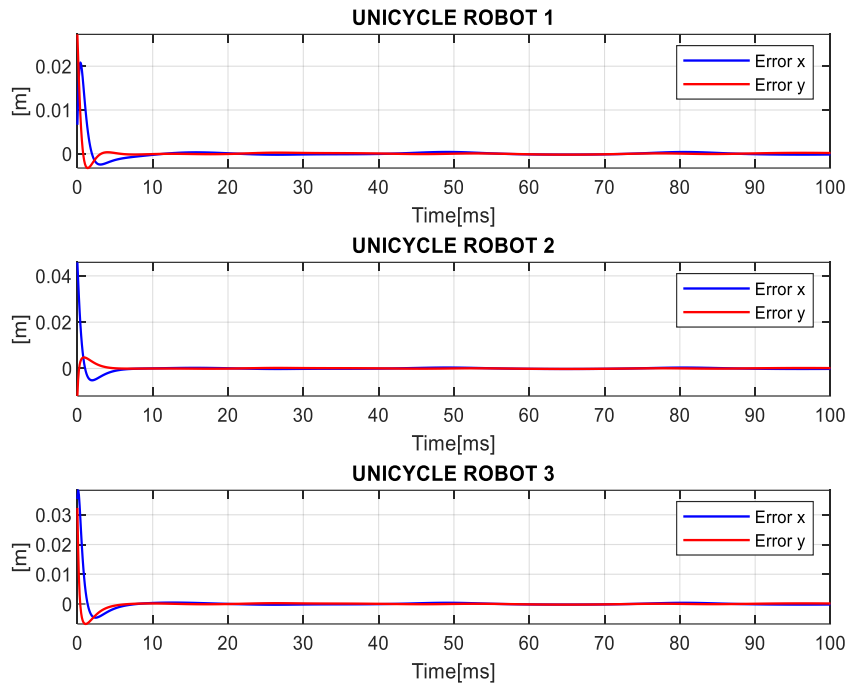
Sistema de control



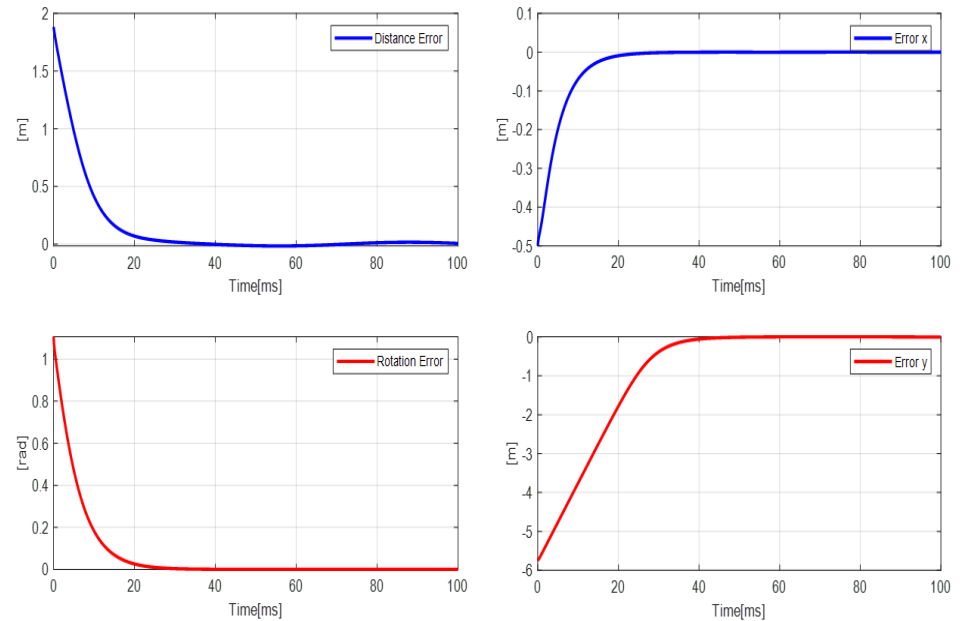


SIN PERTURBACIÓN

ERRORES DE CADA ROBOT

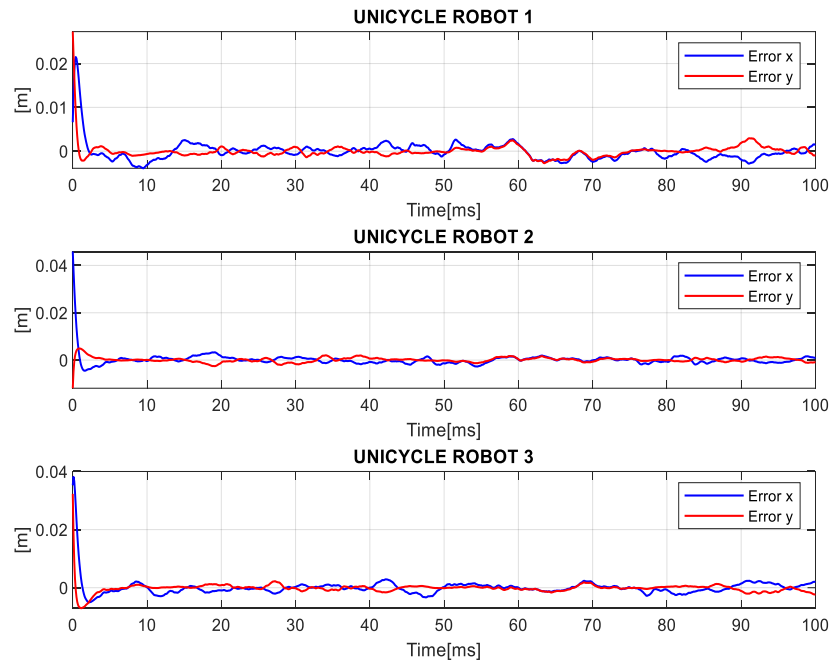


ERRORES DE POSICIÓN Y ORIENTACIÓN

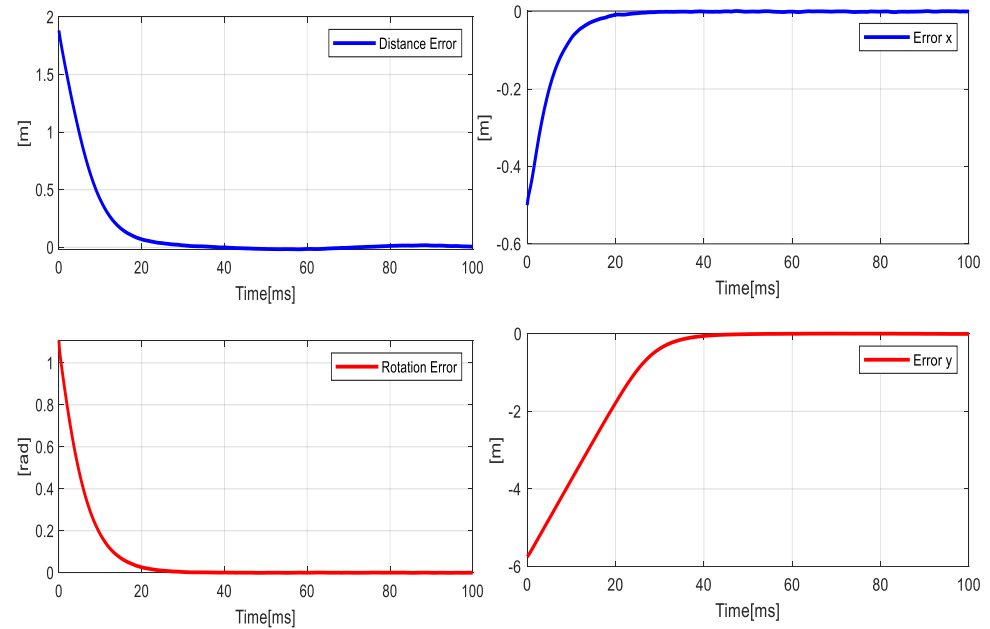


CON PERTURBACIÓN

ERRORES DE CADA ROBOT



ERRORES DE POSICIÓN Y ORIENTACIÓN





- El robot de tipo unicycle tiene un sistema de locomoción cumpliendo con la restricción no holonómica, la cual menciona que su movimiento es perpendicular al eje de las ruedas.
- El modelo dinámico representa de una manera más real las características de movimiento esto se da relacionando las fuerzas internas y externas y también las energías que actúan sobre el robot móvil.
- Los modelos tanto cinemático como dinámico muestran un comportamiento similar a los robots existentes en el laboratorio de investigación en automatización, robótica y sistemas inteligentes, todo esto gracias a técnicas de identificación de parámetros dinámicos implementados en el mismo laboratorio.

- En la implementación del control de formación a través de entornos HIL se evidencio la simplicidad y bajo costo.
- Los resultados de las pruebas experimentales han demostrado la capacidad del controlador para realizar tareas de formación en entornos hostiles además presentando un comportamiento asintótico.



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**

**CONTROL DE FORMACIÓN DE ROBOTS MÓVILES TIPO UNICICLO EN ENTORNOS
*HARDWARE IN THE LOOP***

Autores:

Quispe Guanoluisa Manuel Andrés

Molina Caña Martha Cecilia

Ing. Víctor H., Andaluz, Ph.D. *Tutor*

