



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**Maestría en Electrónica y Automatización  
Mención Redes Industriales**

**Construcción de un Robot de Tracción Omnidireccional para la Implementación de Algoritmos de Control Autónomo Considerando Centros de Masa Desplazable para el Laboratorio de Investigación en Automatización Robótica y Sistemas Inteligentes**

**Autores:**

Ing. De La Cruz Vaca, Aída Liliana

Ing. Tapia Claudio, Edison Fernando

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





8<sup>TH</sup> INTERNATIONAL  
CONGRESS

ICICT 2023

20-23 February, 2023  
London / United Kingdom



## Virtual Training System for the Autonomous Navigation of an Omnidirectional Traction Robot

De La Cruz Aida, Tapia Edison and Andaluz Victor H.

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolqui, Ecuador

{alde2, eftapia2, vhandaluz1}@espe.edu.ec

Scopus®

SpringerLink

Google  
Scholar

zbMATH<sup>Open</sup>  
THE FIRST RESOURCE FOR MATHEMATICS

SJR

wti

**Abstract.** This paper presents the development of a virtual environment for the training of autonomous omnidirectional drive vehicle control. The virtual system considers the virtualization of structured and unstructured environments. Therefore, the virtual environment considers the kinematic and dynamic models of the omnidirectional robot in order to simulate more realistically the behavior and motion constraints of the robot. The implementation of the closed-loop control algorithms is considered in the MatLab software, for which a communication between the Unity3D graphic engine and MatLab is considered through the use of DLL libraries. For the validation of the control algorithms on the virtual training environment, the construction of an omnidirectional traction vehicle in four-wheel configuration type Mecanum is considered. In addition, the constructed prototype will be used for the identification and validation of the mathematical models that represent its behavior. Finally, a usability analysis of the developed training system is presented.

**Keywords:** Omnidirectional robot, Virtual training, autonomous control, dynamic modeling.

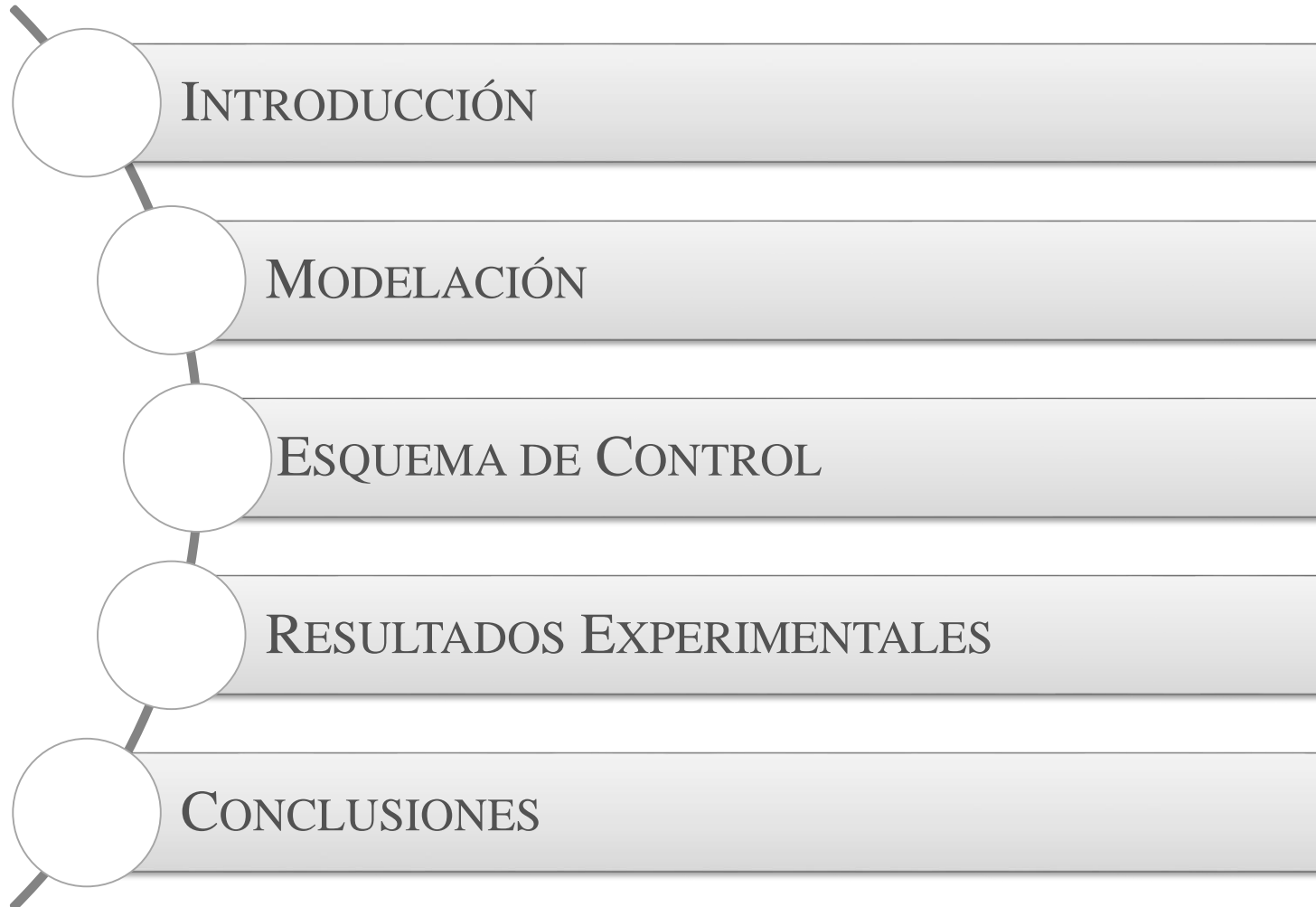
### 1 Introducción

Currently, technological development has allowed advances in the area of robotics to be focused not only on the industrial area [1,2]. The latest developments are oriented to non-industrial applications, for example, mining, agriculture, security, construction, health, among others. Among the most developed robots are land, aerial and aquatic mobile robots [3,4]. Different applications that are usually performed by humans are nowadays developed by robotic platforms, e.g., domestic cleaning, crop spraying, traffic surveillance, among others [5,6].

There are different types of terrestrial mobile robots that are characterized by the mechanism to move, among the main ones we can detail: *i) unicycle robots*, are formed by two wheels controlled independently by DC motors [7,8]; *ii) car-like robots*, are based on the Ackerman mobility system with its linear velocity and angle of rotation [9,10]; and *iii) omnidirectional robots*, consisting of wheels with rollers that allow frontal, lateral and angular displacement [11,12]. Due to their mobility, omnidirectional



Grupo de Investigación  
Automatización  
Robotica  
Sistemas Inteligentes

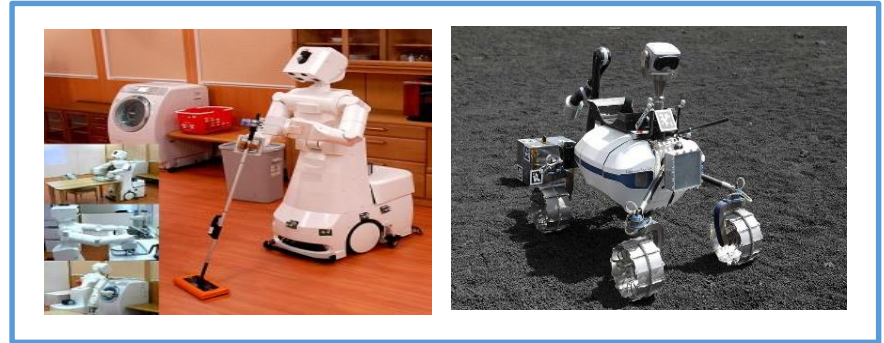




## INDUSTRIA



## SERVICIO



## ROBOTS MÓVILES





PRODUCTIVIDAD



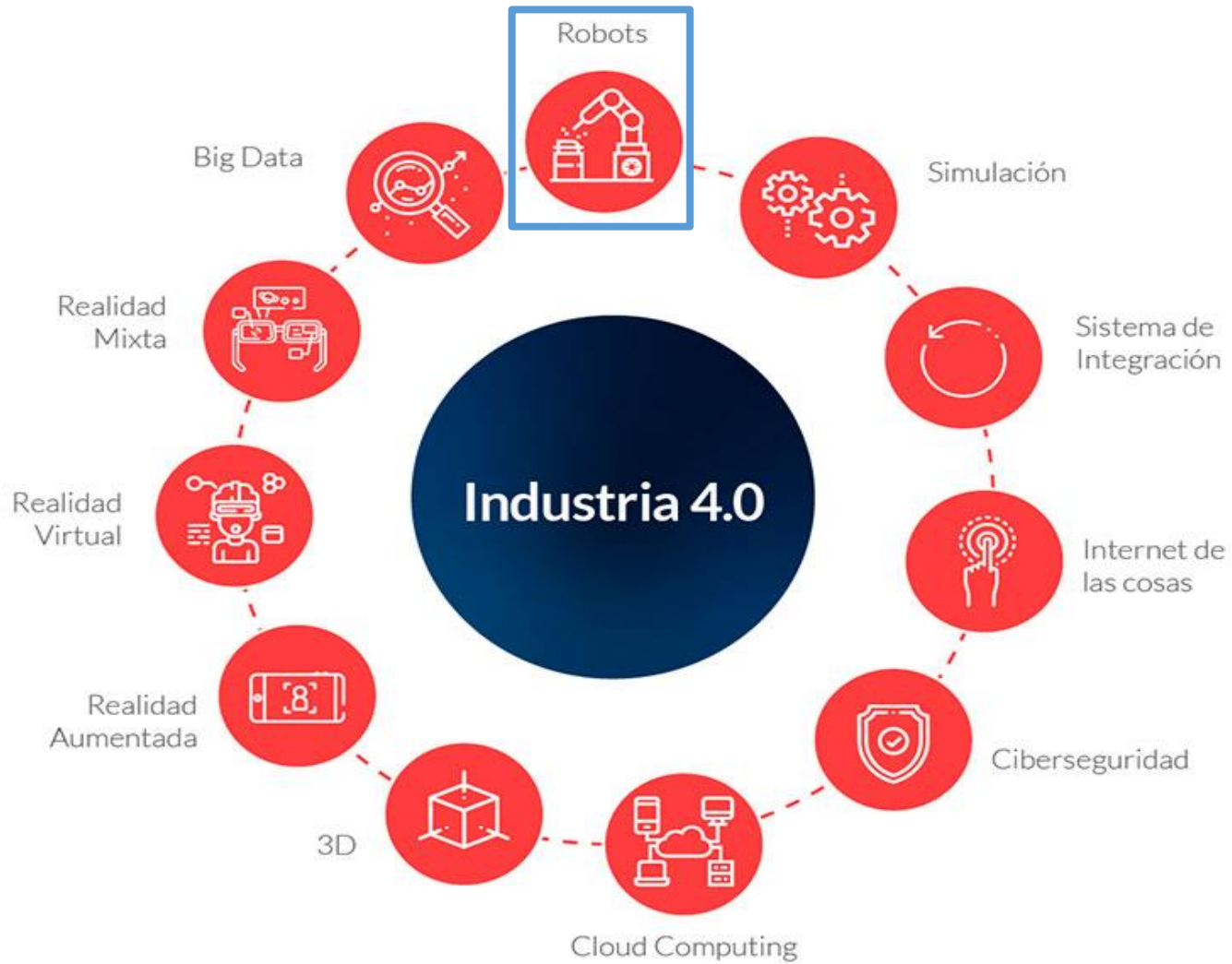
TIEMPO



CONEXIÓN



EQUIPOS



## Uniciclo



## Car-like



## Omnidireccional



- Traslacionales y rotacionales simultáneamente optimizando la trayectoria.

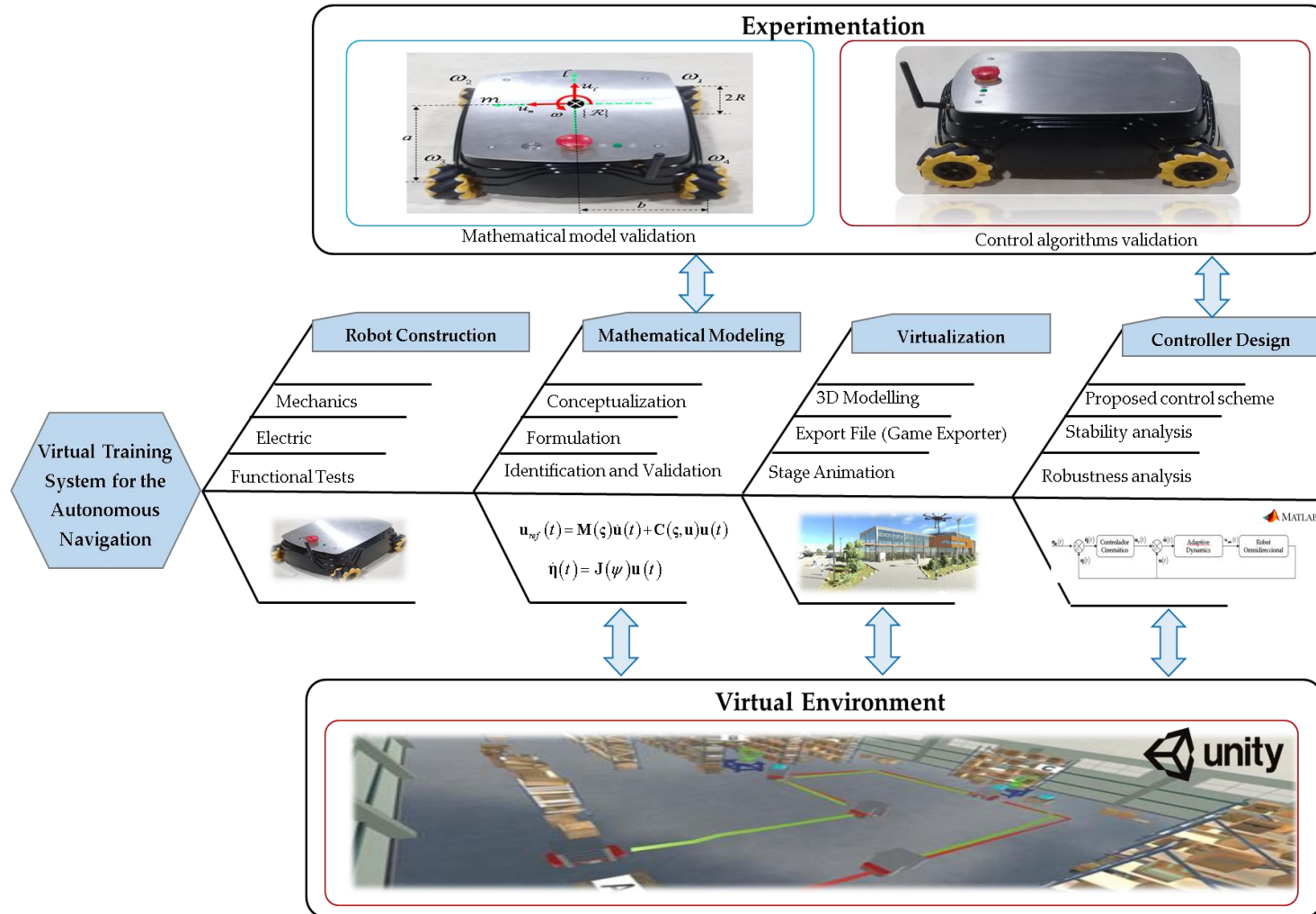




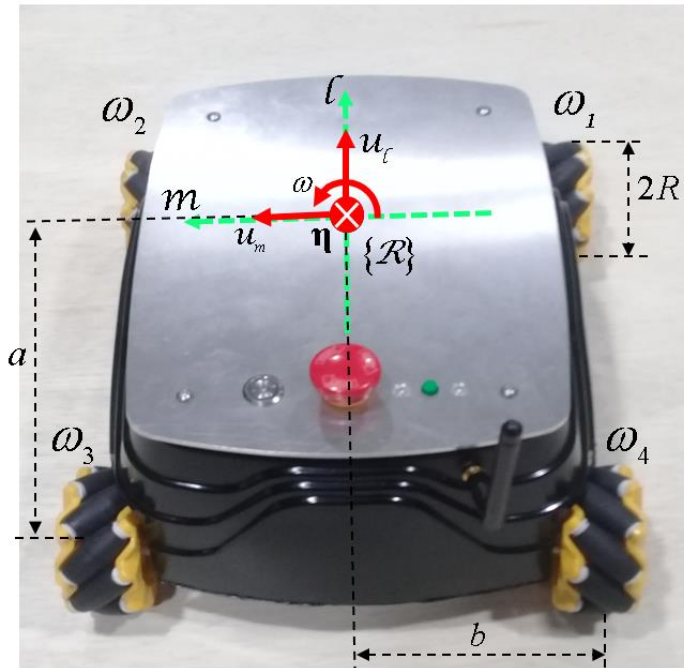
Proponer un esquema de **control para la ejecución de tareas autónomas sobre un robot móvil, para lo cual se construirá un robot móvil con tracción omnidireccional el mismo que considera como señales de control la velocidad lineal frontal, velocidad lineal lateral y velocidad angular con un centro de masa desplazado**

- **Investigar en las diferentes bases de datos científicos** acerca de la construcción, modelación y control de robots omnidireccionales, con el propósito de ejecutar tareas de control autónomo.
- **Construir un robot con tracción omnidireccional** considerando como señales de entrada la velocidad lineal frontal, velocidad lineal lateral y velocidad angular, con el propósito de implementar algoritmos de control en lazo cerrado para tareas autónomas.
- **Determinar el modelo cinemático del robot omnidireccional considerando que el punto de interés (punto de control) puede estar ubicado en diferentes posiciones sobre la plataforma robótica**, a fin de ser implementados en algoritmos de control avanzado que permita ejecutar tareas de forma autónoma.
- **Modelar el comportamiento dinámico del robot omnidireccional considerando un centro de masa desplazado lateralmente**. El modelo dinámico obtenido deberá tener una estructura matricial adecuada, incluyendo como señales de entrada la velocidad lineal frontal, velocidad lineal lateral y velocidad angular.

- **Implementar un algoritmo para la identificación de parámetros dinámicos** del robot omnidireccional, con el propósito de validar experimentalmente el modelo matemático obtenido con el robot omnidireccional construido.
- **Proponer un esquema de control en cascada conformado por un controlador cinemático que permite ejecutar tareas autónomas de seguimiento de trayectoria;** y un controlador adaptable que permita la compensación dinámica de un robot omnidireccional. Los controladores propuestos se basaran en los modelos cinemáticos y dinámicos del robot omnidireccional construido.
- **Desarrollar un simulador virtual que permita evaluar algoritmos de control avanzado de un robot omnidireccionales para tareas autónomas.** El simulador considerará los modelos matemáticos del robot, a fin de considerar las características de movimiento.
- **Evaluar experimentalmente el esquema de control propuesto,** con el propósito de analizar el comportamiento de los errores de control.
- **Redactar un artículo técnico-científico** con los resultados obtenidos en el Proyecto de Titulación, a fin de ser publicado en bases de datos indexadas.







La posición del robot omnidireccional :

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \eta_x & \eta_y & \eta_\psi \end{bmatrix}^T$$

Donde las velocidades son representadas por:

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} u_f & u_l & \omega \end{bmatrix}^T$$

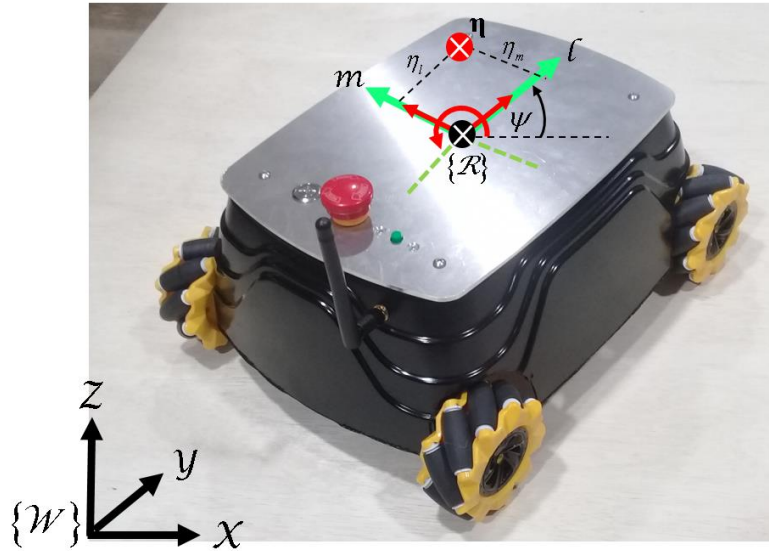
$u_f$  Velocidad lineal frontal

$u_l$  Velocidad lineal lateral

$\omega$  Velocidad angular



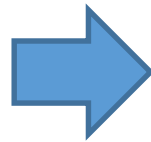
$$\begin{cases} \dot{x}_0 = u_f \cos(\psi) - u_l \sin(\psi) \\ \dot{y}_0 = u_f \sin(\psi) + u_l \cos(\psi) \\ \dot{\psi} = \omega \end{cases}$$



$$\begin{bmatrix} \eta_x \\ \eta_y \\ \eta_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ \psi \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_l \\ \eta_m \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathcal{R}_W^U(\psi) = \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{\eta}_x = u_f \cos(\psi) - u_l \sin(\psi) - \omega \eta_l \sin(\psi) - \omega \eta_m \cos(\psi) \\ \dot{\eta}_y = u_f \sin(\psi) + u_l \cos(\psi) + \omega \eta_l \cos(\psi) - \omega \eta_m \sin(\psi) \\ \dot{\eta}_\psi = \omega \end{cases}$$



$$\dot{\eta}(t) = \mathbf{J}(\psi) \mathbf{u}(t)$$

El método utilizado se basa en el equilibrio de energías

$$L = E_C - E_P$$

La energía cinética se compone de la parte rotacional y traslacional

$$\mathbf{E}_C = \dot{\mathbf{q}}^T \mathbf{M}_{R1} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{W}^T \mathbf{I}_R \mathbf{W}$$

Dónde,

$$\mathbf{M}_{R1} = \frac{1}{2} \text{diag}\{m_R, m_R, I_R\} \quad \text{y} \quad \mathbf{I}_R = \frac{1}{2} \text{diag}\{I_W, I_W, I_W, I_W\}$$

$m_R$  : Masa total de la plataforma robótica

$I_R$  : Inercia total de la plataforma robótica

$I_W$  : Inercia de las ruedas



## Formulación de Euler-Lagrange

$$\boldsymbol{\tau}_i = \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{\boldsymbol{\eta}}_j} \right) - \frac{\partial L}{\partial \boldsymbol{\eta}_j} \quad \text{con } j = x, y, \psi$$

Se obtiene

$$\mathbf{M}_{R2} \ddot{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{E}^T \mathbf{I}_2 \dot{\mathbf{W}} = \mathbf{E}^T \boldsymbol{\tau}_i$$

Considerando:

Motor DC

$$\boldsymbol{\tau}_i = \frac{k_{pa}}{R_{pa}} \left( v_i - k_{pb} \mathbf{W}_i \right), \quad \text{con } i = 1, 2, 3, 4$$

Controlador PID

$$\mathbf{v}_v = \mathbf{K}_P (\mathbf{u}_{\text{ref}} - \mathbf{u}) - \dot{\mathbf{u}} \mathbf{K}_D$$

El modelo dinámico del robot omnidireccional obtenido está representado por

$$\begin{bmatrix} u_{fref} \\ u_{lref} \\ \omega_{ref} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \zeta_1 & \zeta_2 & \zeta_3 \\ \zeta_2 & \zeta_4 & -\zeta_5 \\ -\zeta_6 & \zeta_7 & \zeta_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_f \\ \dot{u}_l \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \omega \zeta_9 + \zeta_{10} & -\omega \zeta_{11} & -2\omega \zeta_{12} \\ -\omega \zeta_{13} & -\omega \zeta_9 + \zeta_{14} & -2\omega \zeta_{15} \\ \omega \zeta_{12} & \omega \zeta_{15} & \zeta_{16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_l \\ \omega \end{bmatrix},$$

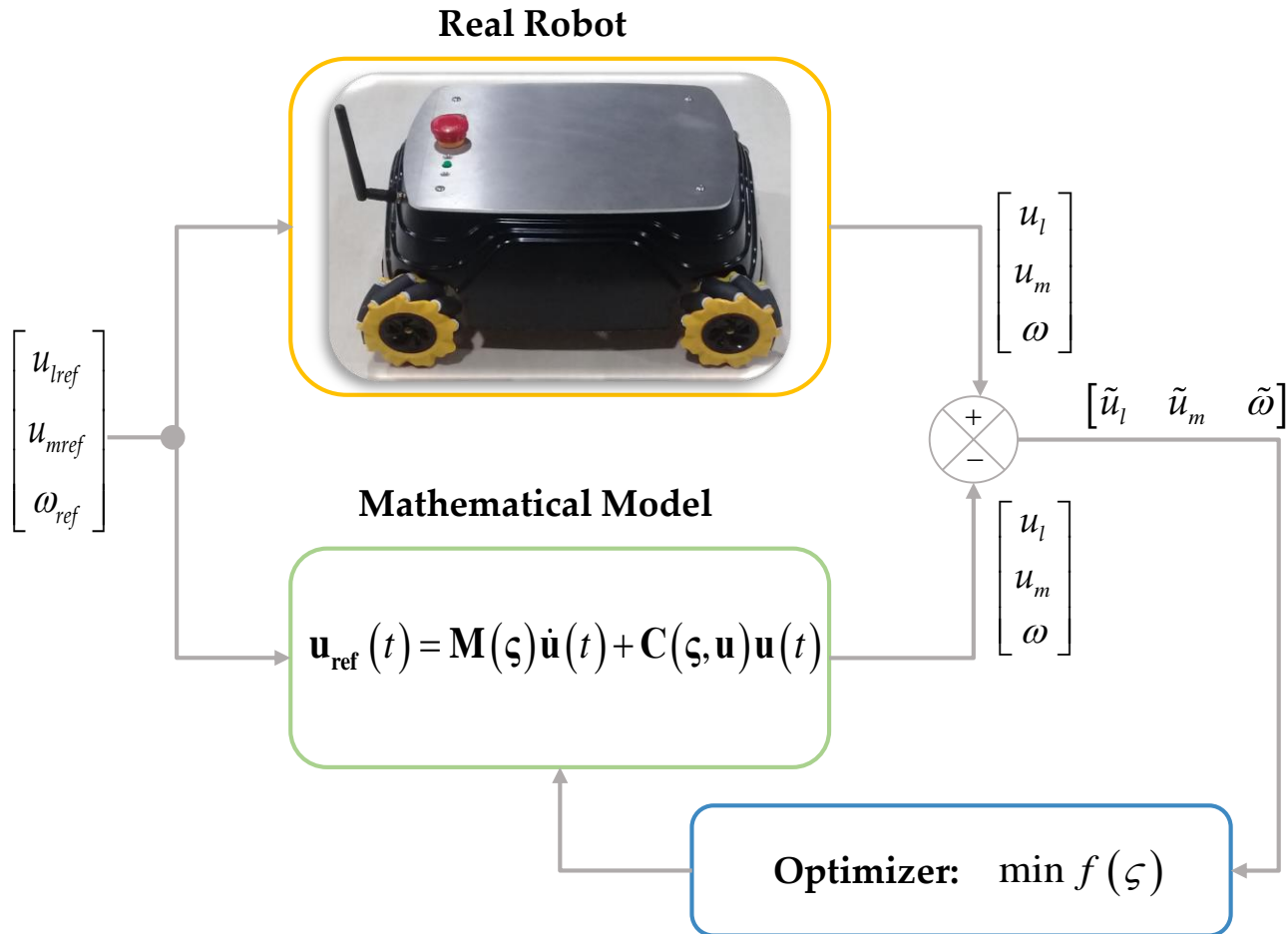
$$\mathbf{u}_{ref}(t) = \mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta}) \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}(\boldsymbol{\zeta}, \mathbf{u}) \mathbf{u}(t)$$

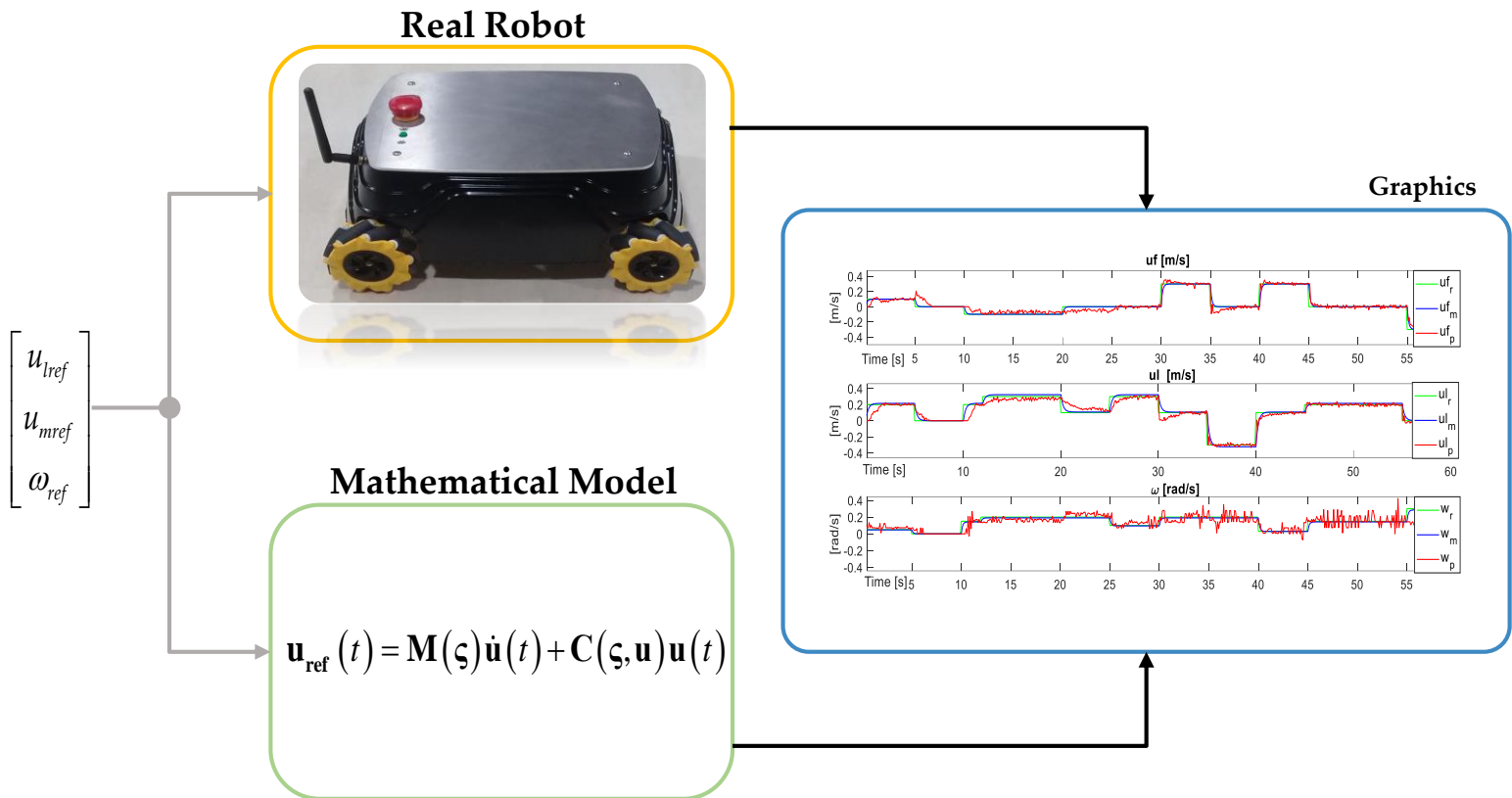
Dónde,

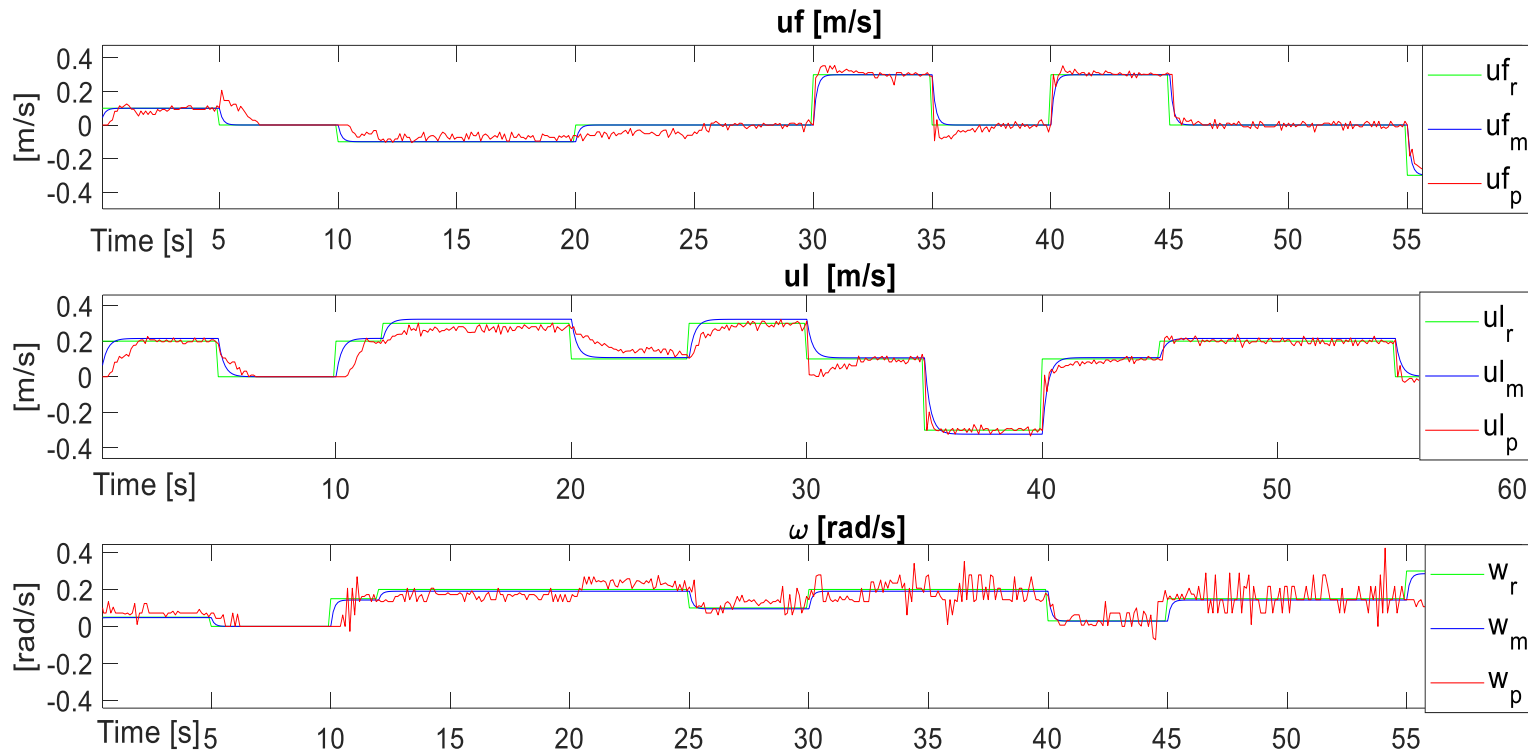
$\mathbf{M}(\boldsymbol{\zeta})$  Representa la matriz de masa

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

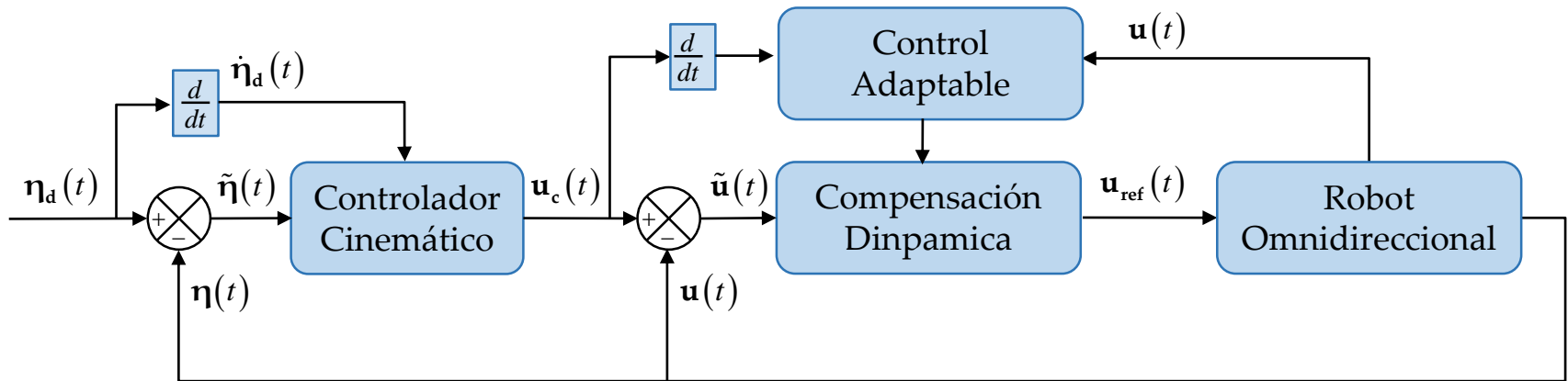
$\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1 \ \zeta_2 \ \dots \ \zeta_{16}]^T$  Parámetros dinámicos del robot











Ley de control propuesta

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{J}^{-1} \left( \dot{\boldsymbol{\eta}}_d + \boldsymbol{\Gamma} \tanh(\alpha \tilde{\boldsymbol{\eta}}) \right)$$

Donde,

$\mathbf{J}$  = Matriz Jacobiana

$\dot{\boldsymbol{\eta}}_d$  = Derivada de las posiciones deseadas

$\boldsymbol{\Gamma}$  = Matriz de ganancia

$\tilde{\boldsymbol{\eta}}$  = Errores de posición con  $\tilde{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{\eta}_d - \boldsymbol{\eta}$

$\alpha \in R^+$



## *Análisis de Estabilidad*

Ley de control:

$$\mathbf{u}_c = \mathbf{J}^{-1} \left( \dot{\mathbf{q}}_d + \mathbf{\Gamma} \tanh(\alpha \tilde{\mathbf{q}}) \right)$$

Considerando la evolución de los errores:

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

Ecuación en lazo cerrado considerando

$$\dot{\tilde{\mathbf{q}}} = -\mathbf{\Gamma} \tanh(\alpha \tilde{\mathbf{q}})$$

Teoría de Lyapunov

$$\dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}) = \frac{1}{2} \dot{\tilde{\mathbf{q}}}^T \tilde{\mathbf{q}} \quad \longrightarrow \quad \dot{V}(\tilde{\mathbf{q}}) = -\tilde{\mathbf{q}}^T \mathbf{\Gamma} \tanh(\alpha \tilde{\mathbf{q}}) < 0$$

Por lo tanto sí:  $\mathbf{\Gamma} = \text{diag}(\Gamma_x, \Gamma_y, \Gamma_\psi) > 0$

$$\longrightarrow \boxed{\tilde{\mathbf{q}} \rightarrow 0 \text{ en } t \rightarrow \infty}$$

## Ley de control propuesta

$$\mathbf{u}_{\text{ref}} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\chi} + \boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\zeta}}$$

Matriz de inercia del Robot

$$\boldsymbol{\sigma} = \dot{\mathbf{u}}_c + \mathbf{K}_u (\mathbf{u}_c - \mathbf{u}) \quad \text{con} \quad \tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u}_c - \mathbf{u}$$

$$\boldsymbol{\chi} = \mathbf{C}\mathbf{u} = \begin{bmatrix} \omega\zeta_9 + \zeta_{10} & -\omega\zeta_{11} & -2\omega\zeta_{12} \\ -\omega\zeta_{13} & -\omega\zeta_9 + \zeta_{14} & -2\omega\zeta_{15} \\ \omega\zeta_{12} & \omega\zeta_{15} & \zeta_{16} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_f \\ u_l \\ \omega \end{bmatrix},$$

$$\boldsymbol{\Omega} = \begin{bmatrix} \dot{u}_f & \dot{u}_l & \dot{\omega} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega u_f & u_f & -\omega u_l & -2\omega^2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{u}_f & 0 & \dot{u}_l & -\dot{\omega} & 0 & 0 & 0 & -\omega u_l & 0 & 0 & 0 & -\omega u_f & u_l & -2\omega^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\dot{u}_f & \dot{u}_l & \dot{\omega} & 0 & 0 & 0 & \omega u_f & 0 & 0 & \omega u_l & \omega \end{bmatrix}$$

Parámetros Dinámicos  $\boldsymbol{\zeta} = [\zeta_1 \ \zeta_2 \ \dots \ \zeta_{16}]^T \in \mathbb{R}^{16}$

## *Análisis de Estabilidad*

Modelo Dinámico:

$$\mathbf{u}_{\text{ref}} = \mathbf{M}\dot{\mathbf{u}} + \boldsymbol{\chi}$$

Ley de control:

$$\mathbf{u}_{\text{ref}} = \mathbf{M}\boldsymbol{\sigma} + \boldsymbol{\chi} + \boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\zeta}}$$

Considerando:

$$\begin{aligned}\tilde{\dot{\mathbf{u}}} &= \dot{\mathbf{u}}_c - \dot{\mathbf{u}} \\ \boldsymbol{\sigma} - \dot{\mathbf{u}} &= \tilde{\dot{\mathbf{u}}} - \mathbf{K}_u \tilde{\mathbf{u}}\end{aligned}$$

Ecuación en lazo cerrado considerando

$$-\boldsymbol{\Omega}\tilde{\boldsymbol{\zeta}} = \mathbf{M}(\boldsymbol{\sigma} - \dot{\mathbf{u}})$$

Entonces:

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

Teoría de Lyapunov

$$\mathbf{V}(\tilde{\mathbf{u}}) = \frac{1}{2}\tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{M}\tilde{\mathbf{u}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\zeta}^T \boldsymbol{\rho}\tilde{\boldsymbol{\zeta}} \quad \text{con } \boldsymbol{\rho} \in \mathbb{R}^{16 \times 16}, \text{ y siendo: } \dot{\tilde{\boldsymbol{\zeta}}} = \dot{\boldsymbol{\zeta}} - \dot{\boldsymbol{\zeta}}$$

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

Considerando la ley de adaptación


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

Resultando en:

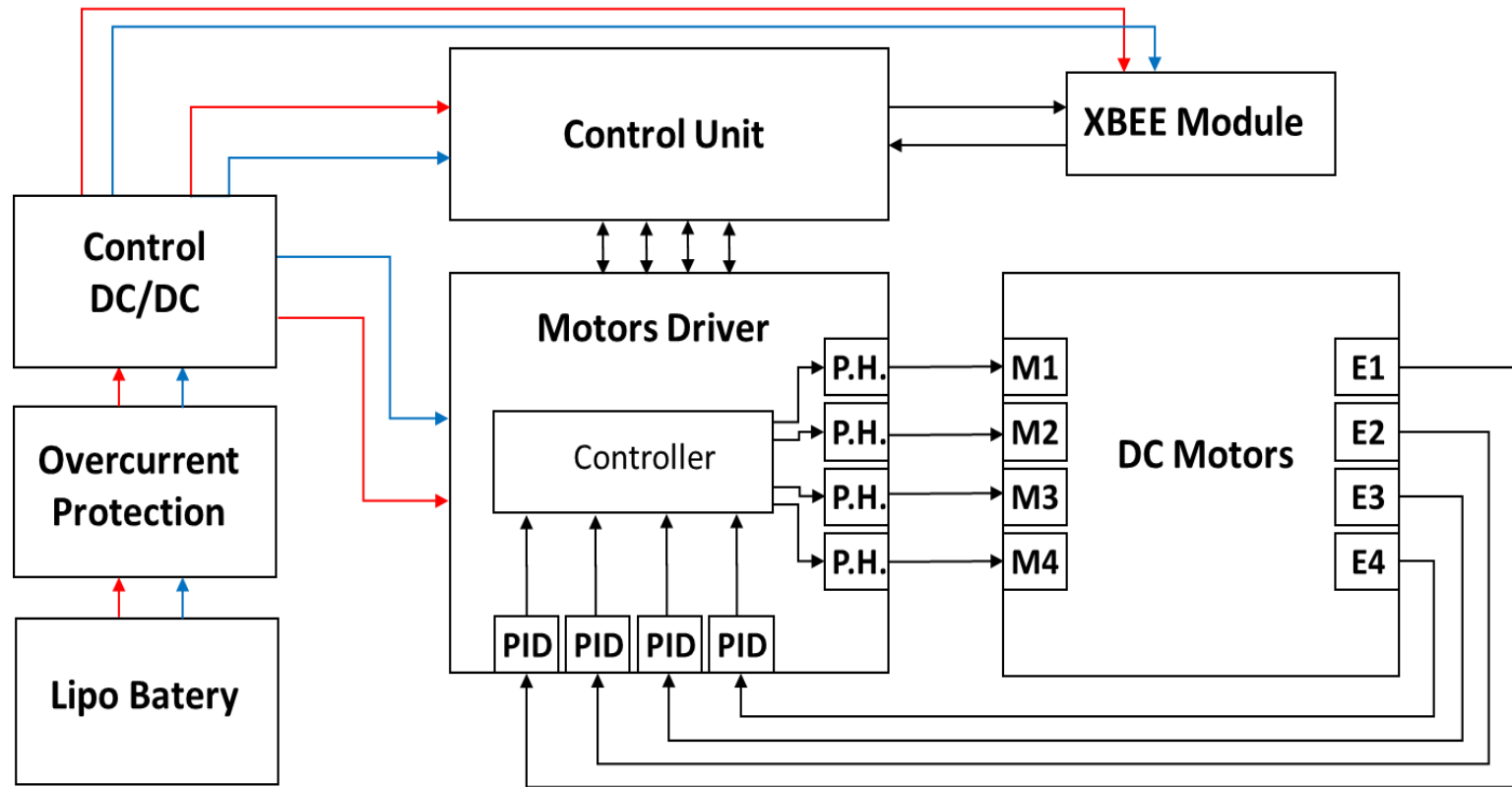
$$\dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{u}}) = -\tilde{\mathbf{u}}^T \mathbf{M}\mathbf{K}\dot{\tilde{\mathbf{u}}} \leq 0 \quad \text{Siendo: } \dot{\tilde{\boldsymbol{\zeta}}} = \dot{\boldsymbol{\zeta}}$$

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

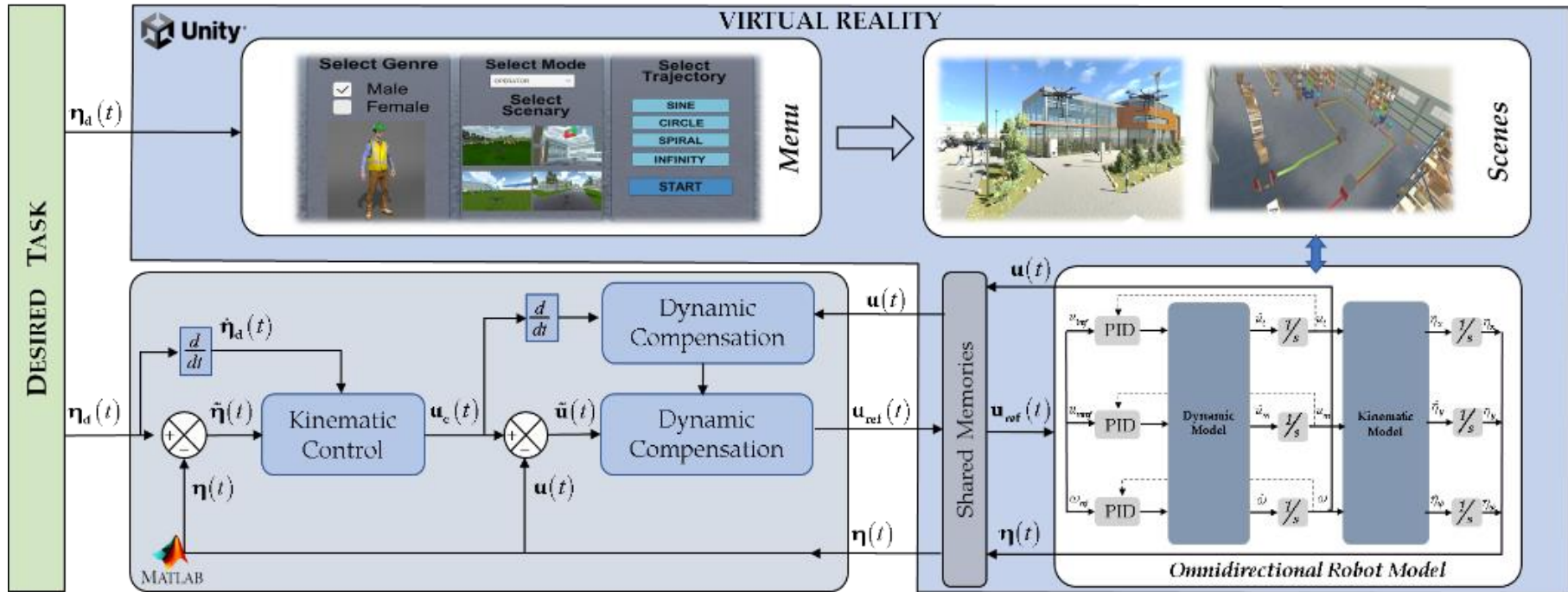
Por lo tanto:


$$\tilde{\mathbf{u}}(t) \rightarrow 0 \quad \text{en } t \rightarrow \infty$$





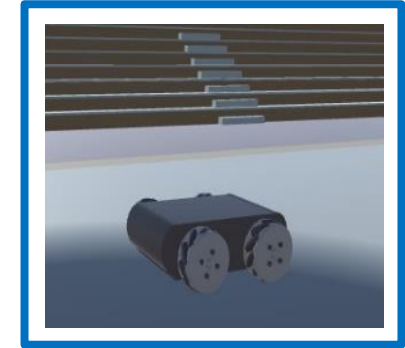
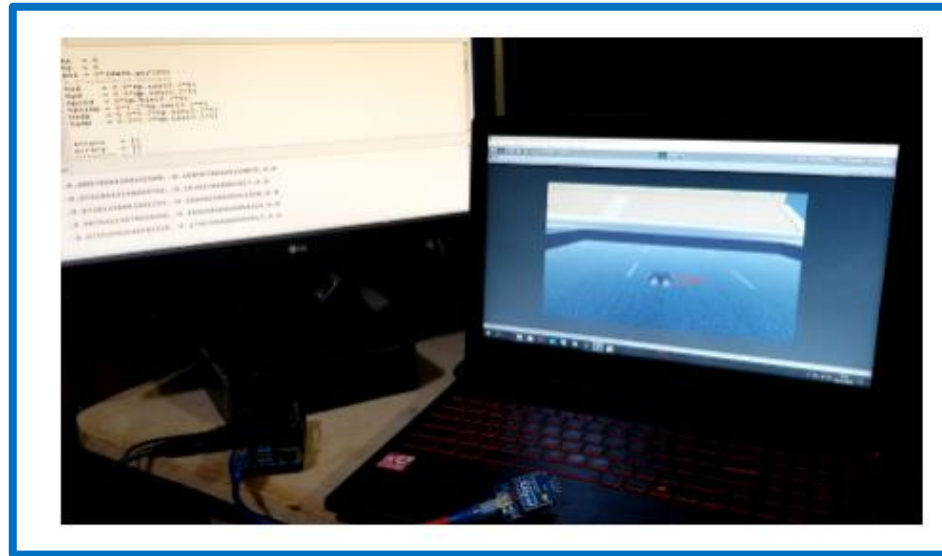








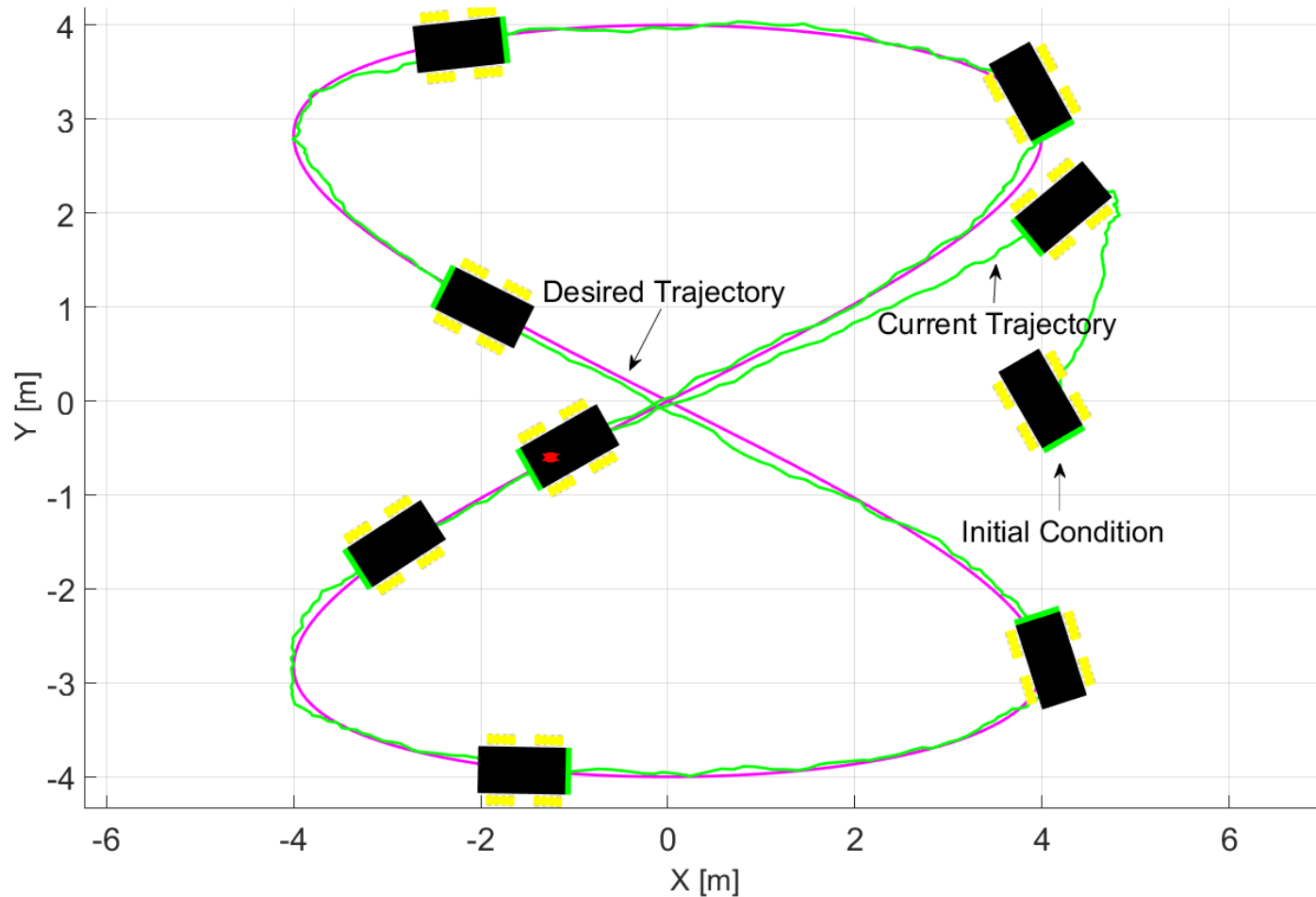
```
1 %*****CONTROL OPTIMO*****  
2 %***** Robot Móvil Omnidireccional *****  
3 %*****  
4 %*****  
5 clear all; clc; close all; warning off;  
6 disp('Control por Optimización del Robot Móvil Omnidireccional')  
7  
8 %a) Condiciones de simulación  
9 tfin = 40; % Tiempo de simulación en [s]  
10 To = 0.1; % Periodo de muestreo en [s]  
11 t = (0:To:tfin); % Representa la evolución en cada To  
12  
13 %b) Condiciones iniciales del Robot Móvil Omnidireccional  
14 x = 1; % Posición inicial en el eje X en [m] respecto a <math>O_B</math>  
15 y = 0; % Posición inicial en el eje Y en [m] respecto a <math>O_B</math>  
16 psi = pi/4; % Orientación inicial en el eje psi en [rad] respecto a <math>O_B</math>  
17  
18 %c) Condiciones iniciales de velocidad del Robot Móvil Omnidireccional
```



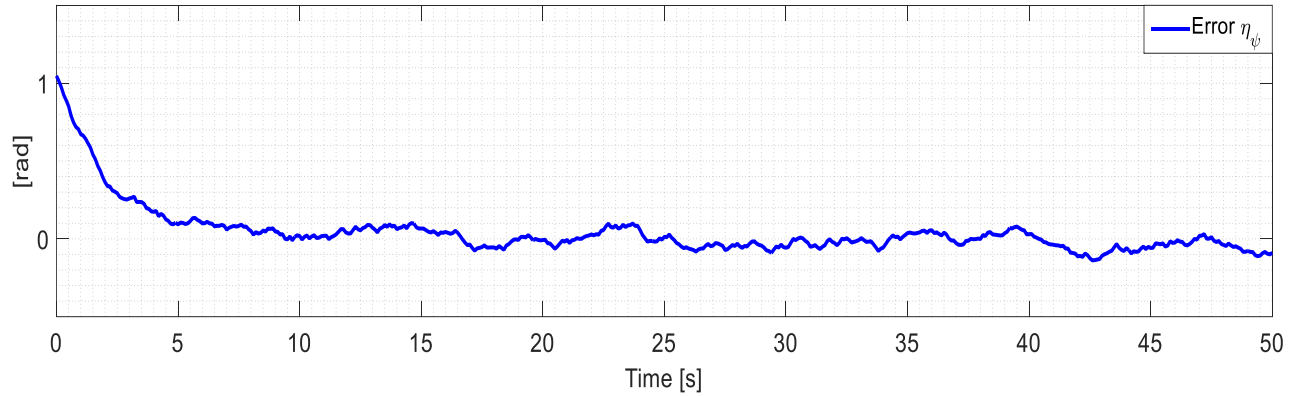
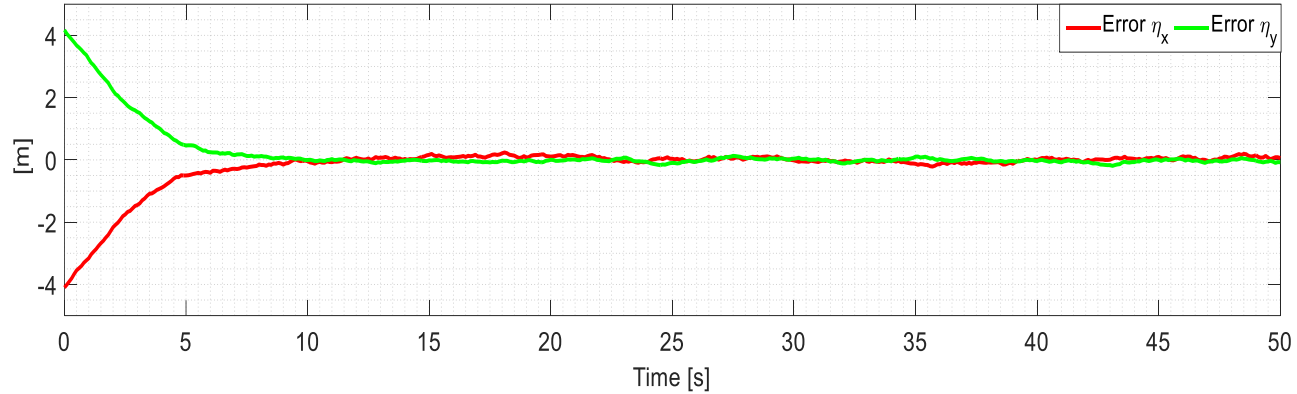
Sistema de control

Entorno Virtual

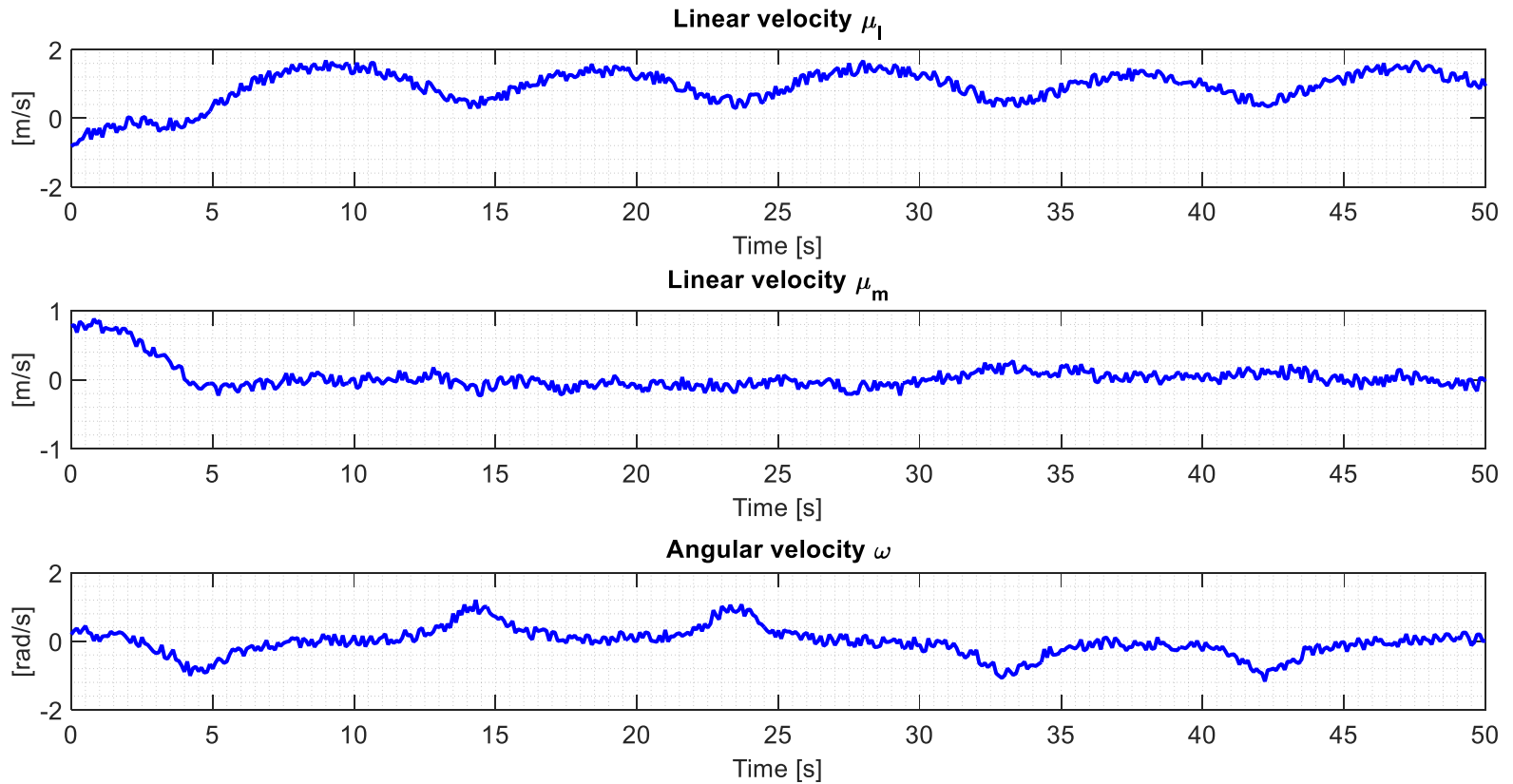
Implementación Entorno Virtual



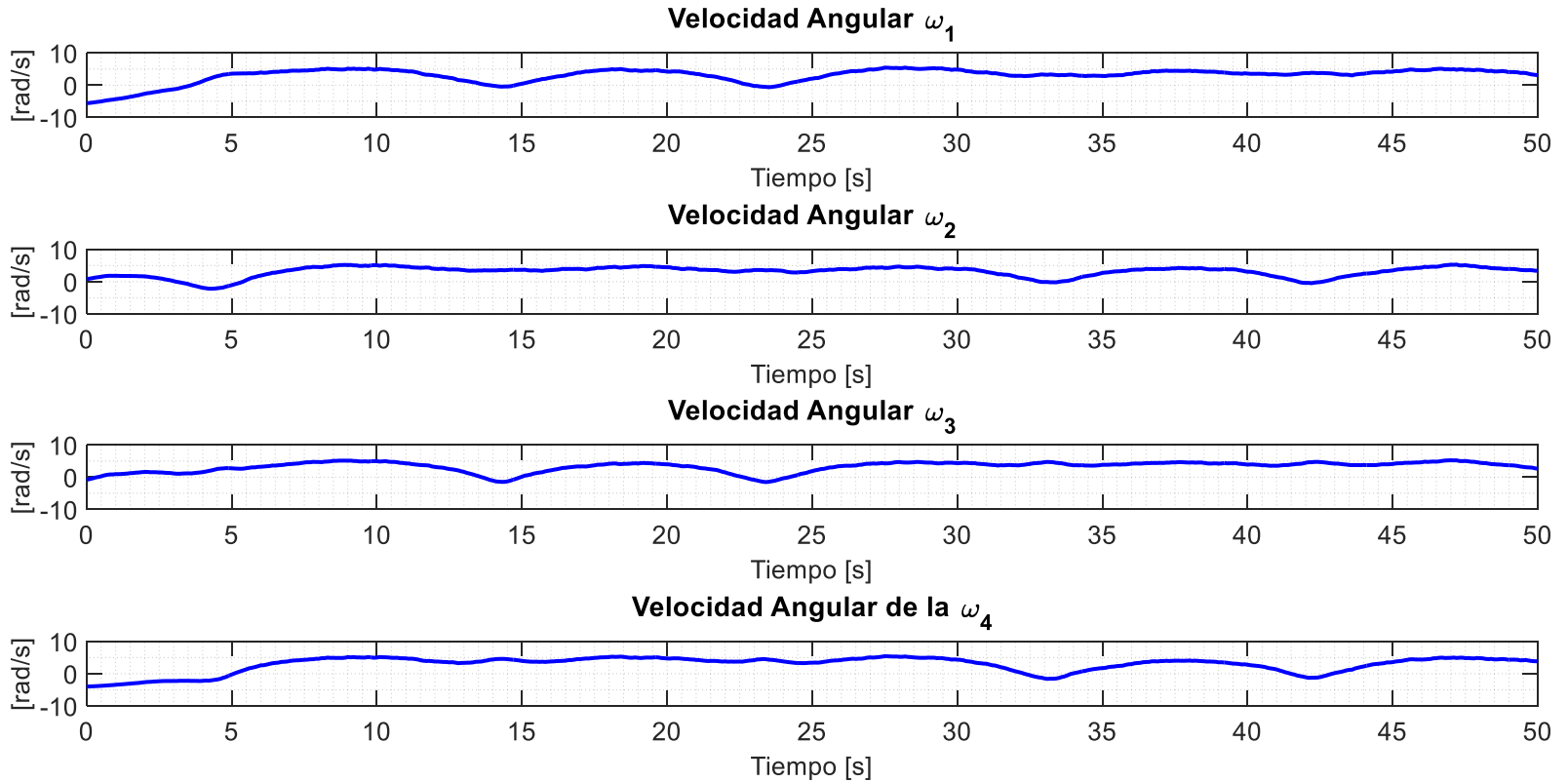
Movimiento stroboscópico - basado en datos experimentales



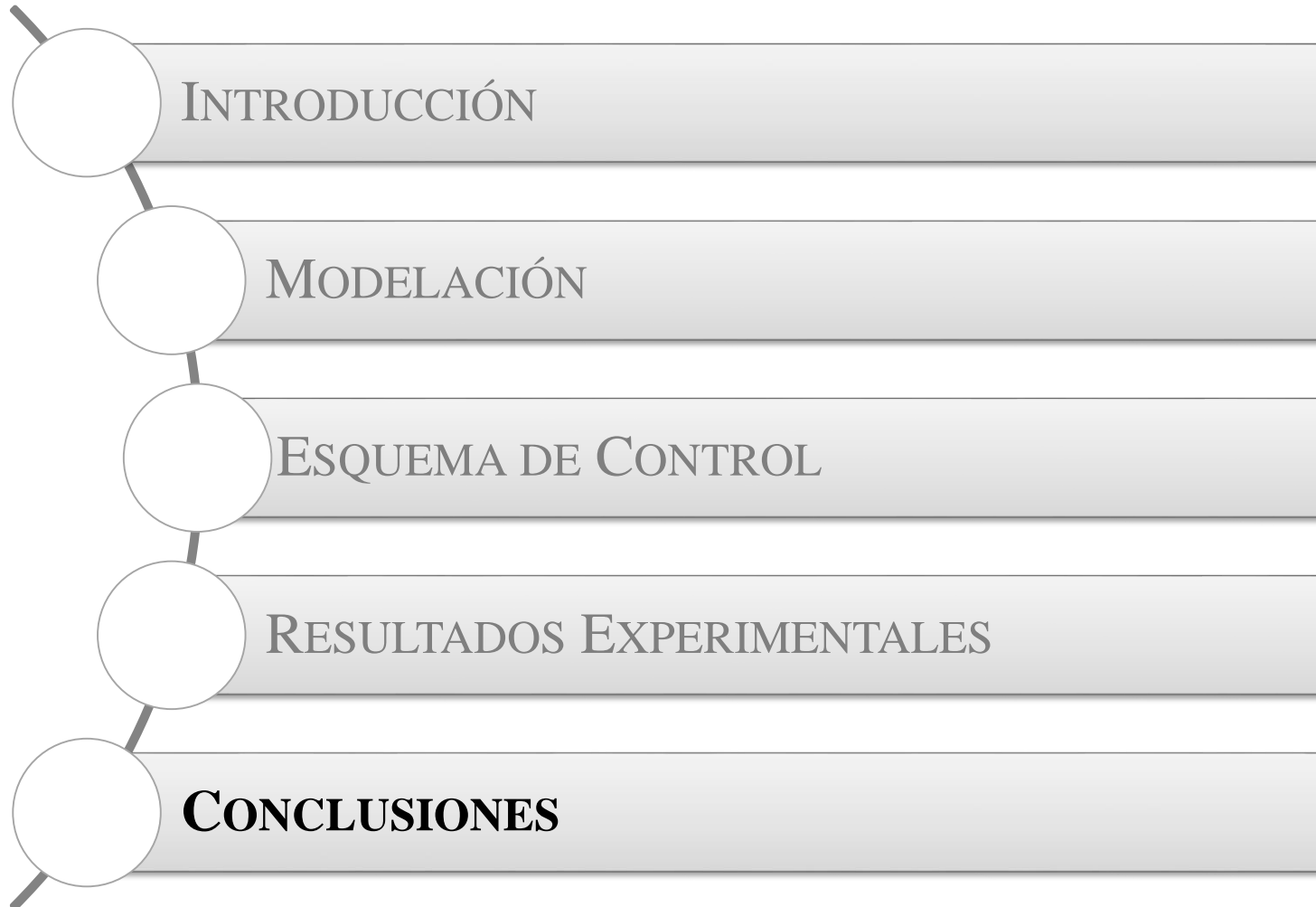
Evolución de los errores de control



Velocidades de maniobrabilidad del robot omnidireccional



Velocidades de cada rueda del robot



- **La robótica de servicio permite el desarrollo de nuevos sistemas robóticos orientados a asistir y ejecutar tareas de la vida diaria** de las personas. Específicamente, el robot con tracción omnidireccional es utilizado para tareas de monitoreo y transporte de cargas en espacio de trabajo parcialmente estructurados.
- **El modelo cinemático permite determinar la ubicación del punto de control del robot móvil** en su espacio de trabajo, considerando las características y sus restricciones de movimiento. Mientras que, el **modelo dinámico permite determinar la dinámica de movimiento** del robot considerando todas las fuerzas físicas que actúan sobre el robot.
- **La identificación y validación de los parámetros dinámicos del robot móvil, es parte fundamental en el proceso de modelamiento;** ya que a través de pruebas experimentales y un algoritmo de identificación es posible determinar los parámetros dinámicos del robot.

- El **esquema de control propuesto** considera dos subsistemas en **cascada**: un controlador cinemático que permite ejecutar la tareas deseada; y un controlador de dinámica adaptable que compensa las velocidades del controlador cinemático, a través de la adaptación de los parámetros dinámicos del robot.
- Los resultados obtenidos, **permitieron evaluar el esquema de control propuesto y analizar el comportamiento de los errores de control**, tanto del control cinemático y del controlador de dinámica adaptables.
- La realidad virtual permite **desarrollar entornos virtuales para simular la navegación autónoma de robots móviles**, a fin de evaluar algoritmos de control avanzado





# UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE

## DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

### **Maestría en Electrónica y Automatización** **Mención Redes Industriales**

**Construcción de un Robot de Tracción Omnidireccional para la Implementación de Algoritmos de Control Autónomo Considerando Centros de Masa Desplazable para el Laboratorio de Investigación en Automatización Robótica y Sistemas Inteligentes**

#### **Autores:**

Ing. De La Cruz Vaca, Aída Liliana

Ing. Tapia Claudio, Edison Fernando

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

