



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**Ingeniería Electrónica**

## TRABAJO DE TITULACIÓN, MODALIDAD ARTÍCULO ACADÉMICO

# Coordinated and Cooperative Control of Heterogeneous Mobile Manipulators

*Autora: María Fernanda Molina Fernández*

*Directora: Mg. Jessica S. Ortiz.*

Departamento de Eléctrica y Electrónica, Carrera de  
Ingeniería Electrónica e Instrumentación.





**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

*“Ninguna investigación humana puede ser llamada ciencia real si no puede demostrarse matemáticamente”*

*Leonardo  
da Vinci*





## Coordinated and Cooperative Control of Heterogeneous Mobile Manipulators

María F. Molina<sup>(✉)</sup> and Jessica S. Ortiz<sup>(✉)</sup>

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

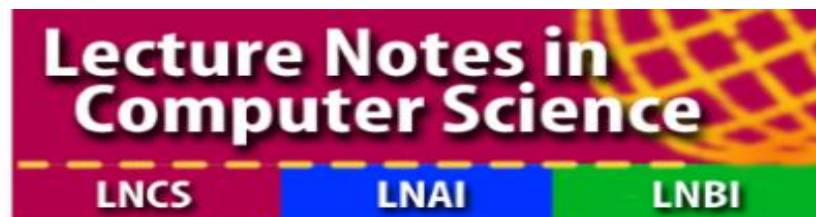
**Abstract.** This paper proposes a multilayer scheme for the cooperative control of  $n \geq 2$  heterogeneous mobile manipulators that allows to transport an object in common in a coordinated way; for which the kinematic modeling of each mobile manipulator robot is performed. Stability and robustness are demonstrated using the Lyapunov theory in order to obtain asymptotically stable control. Finally, the results are presented to evaluate the performance of the proposed control, which confirms the scope of the controller to solve different movement problems.

**Keywords:** Cooperative control · Kinematic modeling · Lyapunov method

### 1 Introduction

The robotics nowadays has reached a high level of importance, since robots perform common tasks that require locomotion and manipulation capabilities [1–3]. Traditionally, the robots are used in the automotive, electrical, metallurgical, chemical and food industries, as well as in tasks of daily life, such as sweeping, vacuuming or mowing grass [4, 5]. The tasks can be carried out individually or cooperatively in different areas, being of cooperative form more efficient in terms of manipulability, flexibility, accessibility and manoeuvrability, allowing greater efficiency in industrial processes [6].

The cooperative control of mobile autonomous robots is widely studied due to its importance in applications of sensor networks, mobile robots, flight of formation of spaceships and in other areas [7]. The multirobot systems have two approaches: centralized and decentralized. The first approach, the lead unit plans and controls, determining the behaviour of the other robots [8, 9]; while in the decentralised approach



# **CONTENIDO**

- **Introducción**
- **Modelación cinemática**
- **Control coordinado y cooperativo**
- **Resultados**
- **Conclusiones**

# CONTENIDO

- **Introducción**
- **Modelación cinemática**
- **Control coordinado y cooperativo**
- **Resultados**
- **Conclusiones**

# INTRODUCCIÓN

## Propuesta

El presente trabajo que se desarrolla un esquema multicapa para el control cooperativo de manipuladores heterogéneos móviles que permiten transportar un objeto en común de manera coordinada; Para lo cual habrá realizado el modelado cinemático de cada robot manipulador móvil. El diseño del controlador se basa en un control cinemático en cascada, basado en una estructura virtual formada entre los extremos operativos de los múltiples robots manipuladores heterogéneos móviles.



# INTRODUCCIÓN

## Planteamiento del Problema

Se ha previsto que la cooperación de manipuladores móviles en aplicaciones industriales sea una técnica importante para aumentar la eficiencia y mejorar la flexibilidad en la industria en el futuro, ya que un grupo coordinado de robots pueden realizar tareas con mayor eficiencia que un solo robot especializado.

# INTRODUCCIÓN

## OBJETIVO GENERAL

- Proponer un esquema de control para la coordinación y cooperación de  $n \geq 2$  robots móviles heterogéneos para tareas de locomoción y manipulación autónoma.



# INTRODUCCIÓN

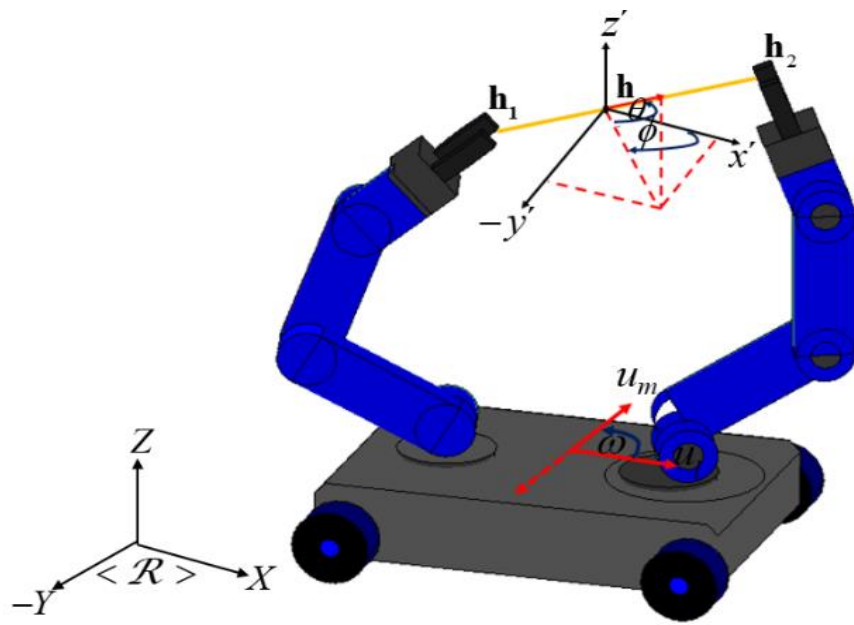
## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- **Investigar los tipos de control** a través de la recopilación de información de fuentes científicas aplicado a robots manipuladores móviles.
- **Modelar las características cinemáticas de manipuladores móviles** conformados por uno o dos brazos robóticos montados sobre una plataforma móvil tipo omnidireccional o unicycle.
- **Proponer un esquema multicapas** para el **control cooperativo para  $n \geq 2$  manipuladores móviles** que ejecuten tareas de locomoción y manipulación de manera coordinada. El equipo de robots estarán conformados por manipuladores móviles heterogéneos.
- **Analizar** de manera formal **la estabilidad y robustez de los diferentes algoritmos de control** propuestos en el esquema de multicapas a fin de garantizar que los errores de control tiendan a cero..
- **Evaluar** el desempeño del **esquema de control multicapas** propuesto, a **través de diferentes simulaciones** ejecutadas sobre una **aplicación 3D desarrollada en Matlab** con el propósito de comprobar que los errores de control tienden a cero.

# CONTENIDO

- Introducción
- **Modelación cinemática**
- Control coordinado y cooperativo
- Resultados
- Conclusiones

# MODELACIÓN CINEMÁTICA



$$\mathbf{h} = [h_x, h_y, h_z, d, \alpha, \beta]^T$$

$$\mathbf{P}_F = \frac{1}{2} [(h_{x1} + h_{x2}) \quad (h_{y1} + h_{y2}) \quad (h_{z1} + h_{z2})]$$

$$\mathbf{S}_F = \left[ \sqrt{(h_{x2} - h_{x1})^2 + (h_{y2} - h_{y1})^2 + (h_{z2} - h_{z1})^2} \right.$$

$$\left. \arctan\left(\frac{h_{y2} - h_{y1}}{h_{x2} - h_{x1}}\right) \quad \arctan\left(\frac{h_{y2} - h_{y1}}{h_{x2} - h_{x1}}\right) \right]$$

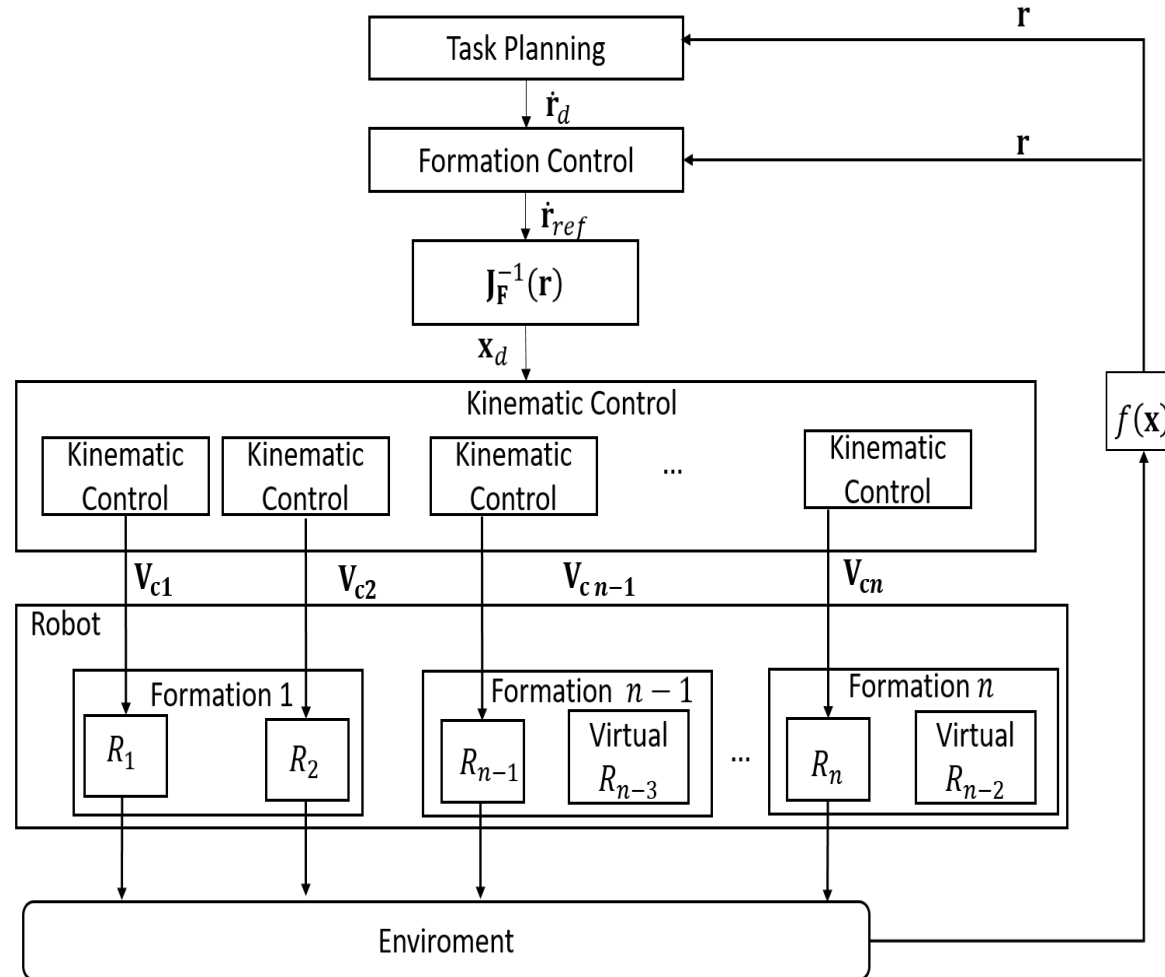


# CONTENIDO

- Introducción
- Modelación cinemática
- **Control coordinado y cooperativo**
- Resultados
- Conclusiones

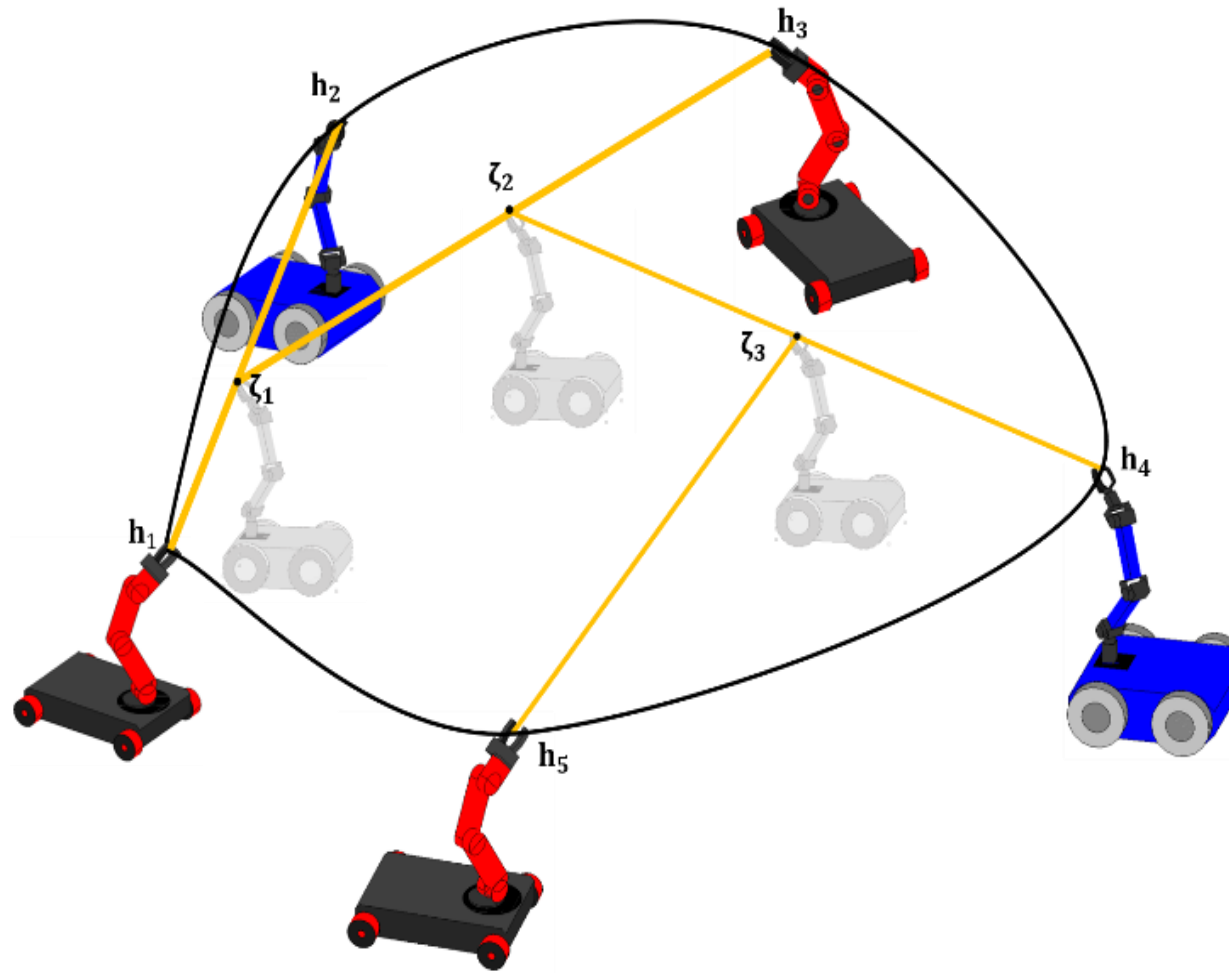
# CONTROL COORDINADO Y COOPERATIVO

Esquema de control multicapa.



# CONTROL COORDINADO Y COOPERATIVO

Escalabilidad para el control cooperativo.



# CONTROL COORDINADO Y COOPERATIVO

## Estrategia de control

Ley de control propuesta

$$v = \boldsymbol{\mu}^{-1} \left( \dot{\boldsymbol{\xi}}_d + \mathbf{M} \tanh(\tilde{\boldsymbol{\xi}}) \right)$$

Formación de control

$$\dot{x}_d = \mathbf{J}_F^{-1} \left( \dot{\boldsymbol{\zeta}}_d + \mathbf{K}_1 \tanh(\mathbf{K}_2 \tilde{\boldsymbol{\zeta}}) \right)$$

Control cinemático

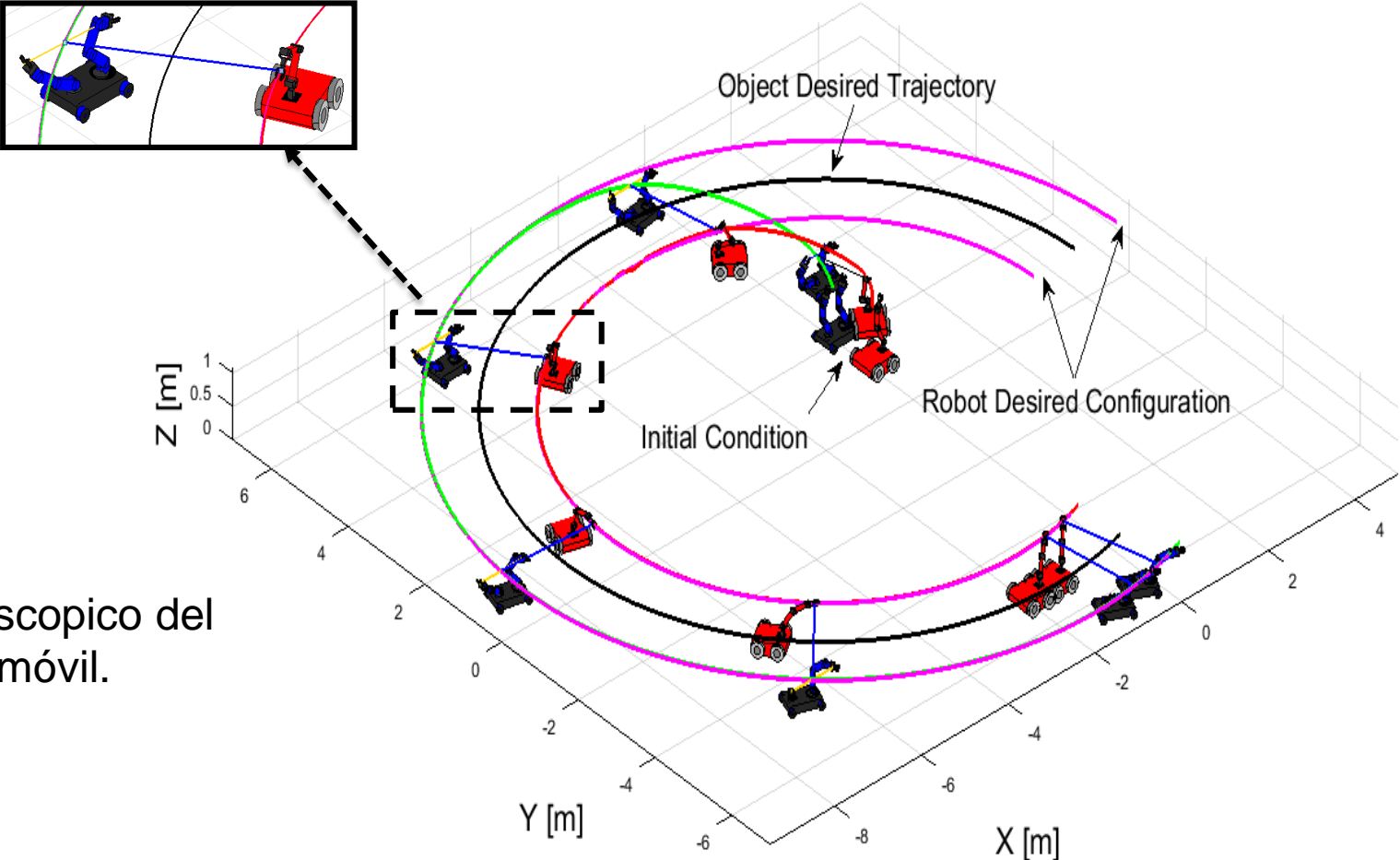
$$\mathbf{v}_n = \mathbf{J}_n^\# \left( \mathbf{h}_{dn} + \mathbf{K}_n \tanh(\mathbf{K}_n \tilde{\mathbf{h}}_n) \right)$$

# CONTENIDO

- Introducción
- Modelación cinemática
- Control coordinado y cooperativo
- **Resultados**
- Conclusiones

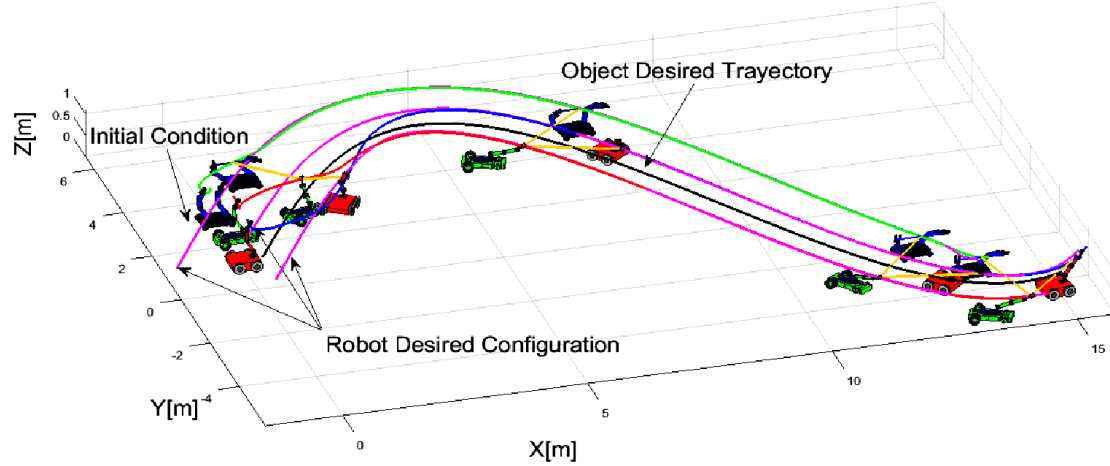


# RESULTADOS



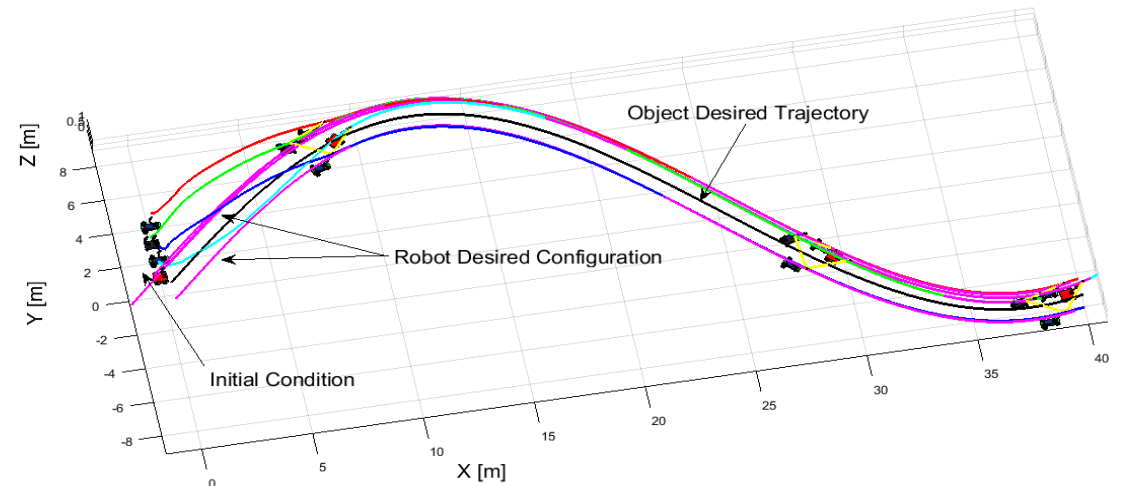
Movimiento Stroboscopico del manipulador móvil.

# RESULTADOS



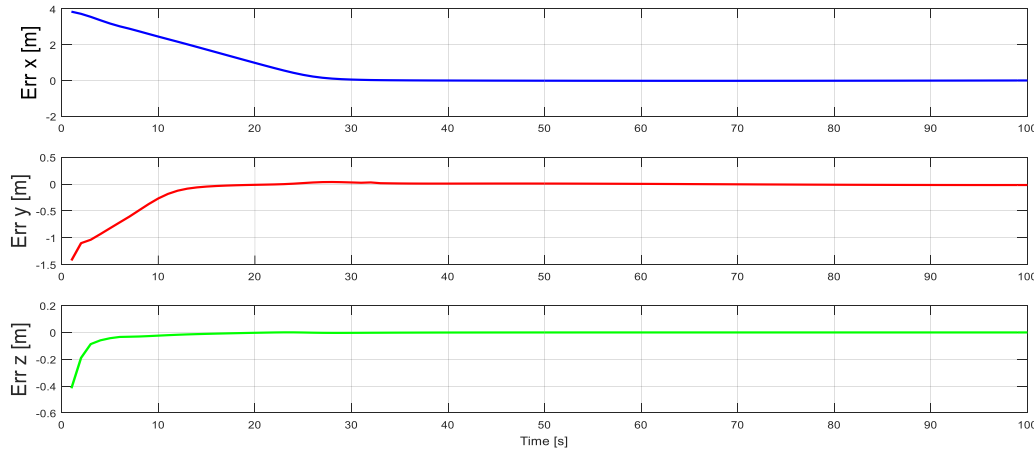
Control cooperativo coordinado de cuatro manipuladores móviles.

Control cooperativo coordinado de tres manipuladores móviles.



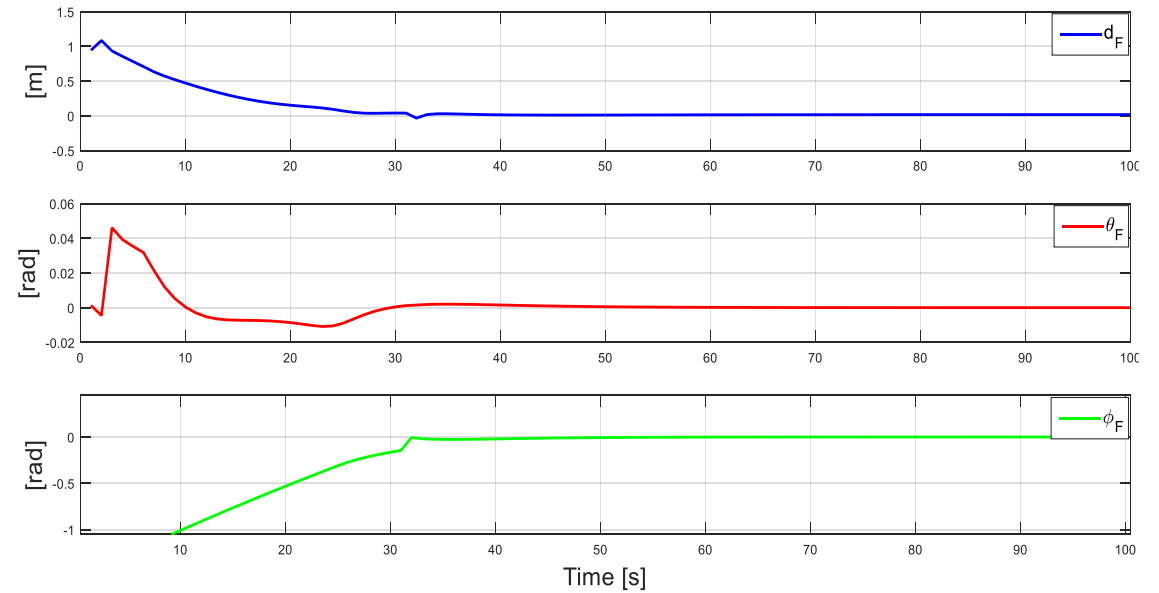
**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

# RESULTADOS



Errores de posición del punto de interés o punto medio de los extremos operativos.

Errores de forma del objeto a transportar.



# CONTENIDO

- Introducción
- Modelación cinemática
- Control coordinado y cooperativo
- Resultados
- **Conclusiones**

# CONCLUSIONES

En este trabajo, se presentó el diseño de un esquema multicapa para el control cooperativo coordinado de  $n \geq 2$  manipuladores móviles heterogéneos para el seguimiento de la trayectoria que permite transportar un objeto en común. En el diseño del controlador se emplea un control cinemático en cascada implementado en una estructura virtual formada entre los extremos operativos de múltiples robots manipuladores móviles heterogéneos. La estabilidad y la robustez se verifican con el método Lyapunov. Los experimentos de simulación que utilizan una estructura virtual permiten determinar el rendimiento del esquema de control propuesto, validando la eficiencia del controlador para resolver diferentes problemas de movimiento a través de una selección de referencias de control.



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Artículo Académico Internacional**

# Coordinated and Cooperative Control of Heterogeneous Mobile Manipulators

# **GRACIAS**

**Autora:** *María Fernanda Molina Fernández*

**Directora:** *Mg. Jessica S. Ortiz*

