



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Electrónica e Instrumentación**

**TELEOPERACIÓN BILATERAL DE UN SISTEMA ROBÓTICO CONFORMADO POR  
UN BRAZO ROBÓTICO SOBRE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO DE SEIS  
HÉLICES**

**Autor:**

Chanataxi Oña, Alex Rodrigo

Mgs. Ortiz Moreano, Jessica Sofía, *Directora*



### Teleoperation of an Aerial Manipulator Robot with a focus on Teaching – Learning Processes

Alex R. Chanataxi, and Jessica S. Ortiz

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

**Abstract.** This paper presents a bilateral teleoperation scheme for the aerial manipulator consisting of a 3DOF robotic arm on a six-propeller unmanned aerial vehicle (Matrix 600 Pro), which allows the operator to perform complex tasks in partially structured environments. The development of the controller is based on the kinematic model of the aerial manipulator, which allows precise control of its movements in relation to the use of a haptic device (Falcon Novint), which allows a feedback of forces from the operator environment. In addition, a teleoperation control scheme is proposed that performs actions in: *i) Locomotion mode*, this allows the manipulation and navigation of the robot's movement; *ii) Navigation mode*, which allows transmitting the desired movement of the UAV by means of speed signals; and *iii) Manipulation mode*, allows to transmit the desired movement of the robotic arm through positions. Tests were performed in a virtual reality environment, in order to test control algorithms and perform simulations that resemble the conditions of a real environment, in addition experimental tests of the proposed teleoperation scheme were performed, obtaining an optimal behavior of the aerial manipulator robot. Finally, simulation results will be presented to validate and test the teleoperation scheme.

**Keywords:** aerial manipulator, kinematics, bilateral teleoperation, haptic device, virtual reality.

#### 1 Introduction

Robotics is a discipline that has experienced growth in recent years and has gained great importance in different fields of application. This discipline presents sustainable solutions to solve problems in various areas such as industry, military, medicine and education [1] [2]. Therefore, Robotics and automation are important topics in modern industry in the development of technological advances, which allow robots to excel in industrial automation for quality improvement and increased production [3]. During the technological evolution robots leave industrial environments to perform activities in partially structured spaces taking the name of service robot. In general, service robots have the potential to improve the quality of life for humans by providing assistance with tasks that are difficult or impossible for them to perform on their own. As technology continues to advance, service robots are likely to become increasingly common in a variety of industries and applications [4]. In addition, there is a field that focuses on

#### Acceptance Letter - Future of Information and Communication Conference (FICC) 2024

Dear Alex Chanataxi, Jessica S. Ortiz,

Congratulations! Your paper "Teleoperation of an Aerial Manipulator Robot with a focus on Teaching - Learning Processes" has been accepted for oral presentation in the Future of Information and Communication Conference (FICC) 2024 to be held from 4-5 April 2024, Berlin, Germany.



#### Lecture Notes in Networks and Systems

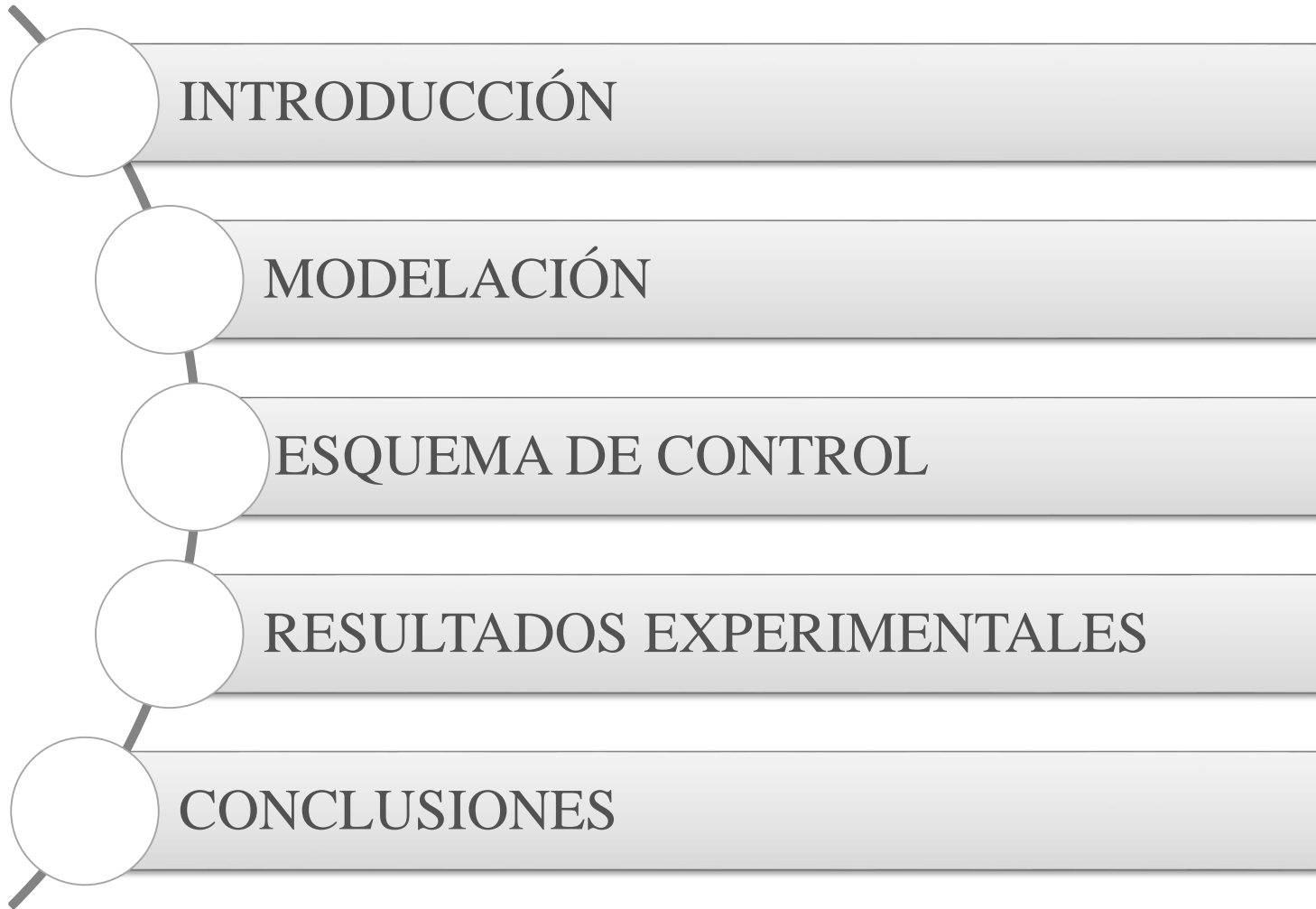
Q4

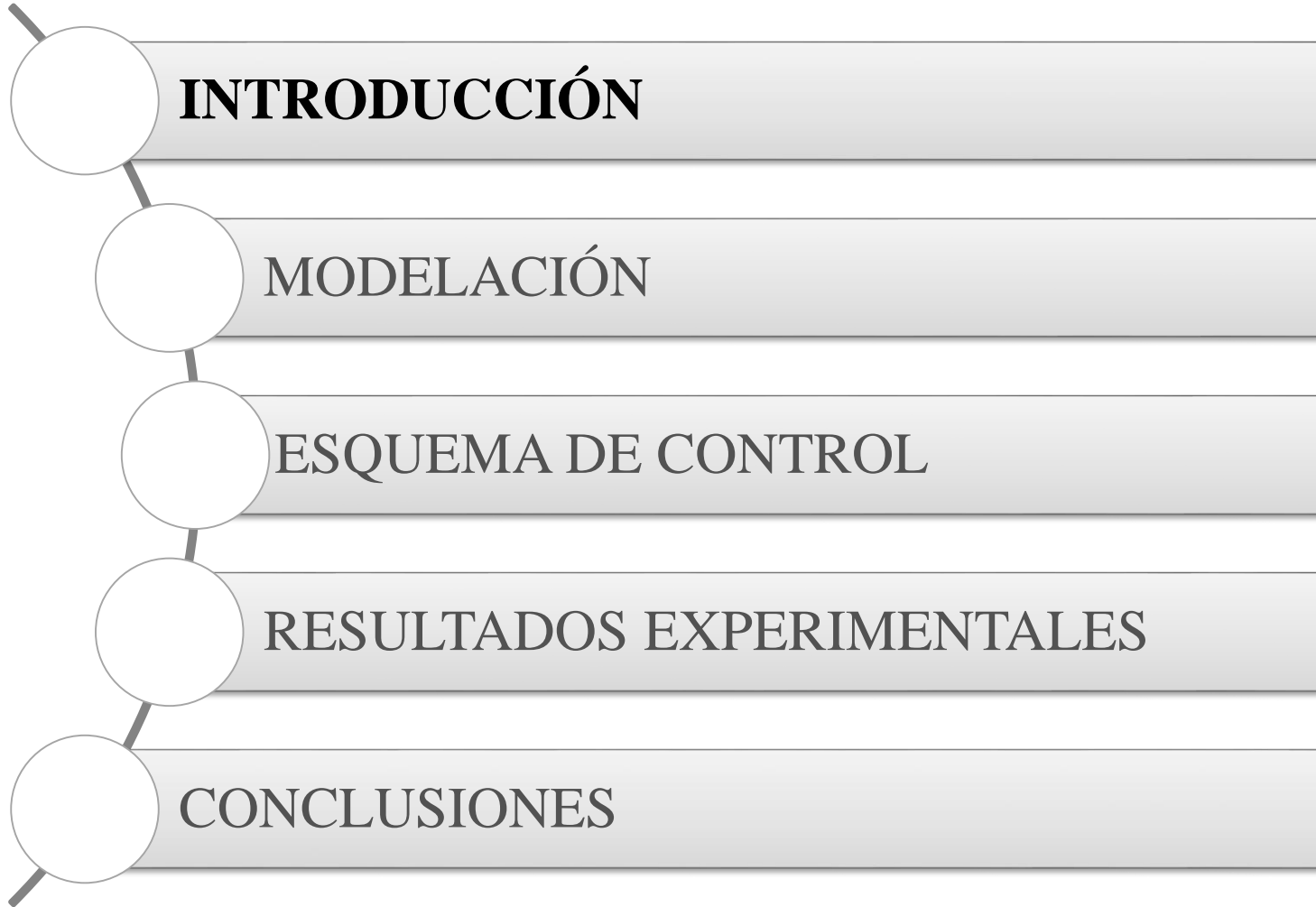
Computer Networks and Communications  
best quartile

SJR 2022  
0.15



powered by scimagojr.com

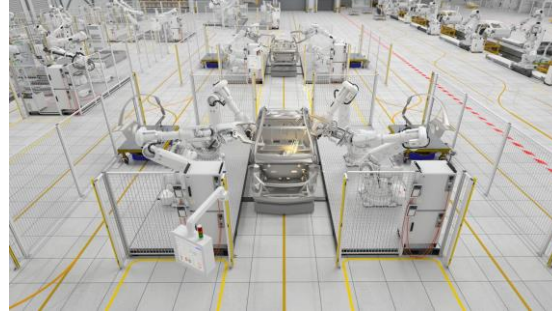




## Robótica Industrial



Robot de empaquetado y paletizado (KUKA)



Robots de ensamblaje (ABB)



Robot de pintura FANUC

## Robótica de Servicio



Robot Humanoide (Testa)



Robot Da Vinci



Multirotor Service Drone

## Robots Domésticos / Personales

### Robots Domésticos



### Robots Entretenimiento



### Robots Asistencia Ancianos / Discapacitados



## Robots Profesionales

### Robots de Campo



### Robots Sistema Logística



### Robots Rescate / Seguridad



## Inspección



## Agarre en vuelo



## Construcción de estructuras



## Ventajas

Mayor espacio de trabajo

Visibilidad completa

Difícil acceso

## Tareas

Autónoma

Tele-Operada

Semi-Autónoma

### Project Information

**AEROARMS**

Grant agreement ID: 644271

#### Total cost

€ 5 719 602,50

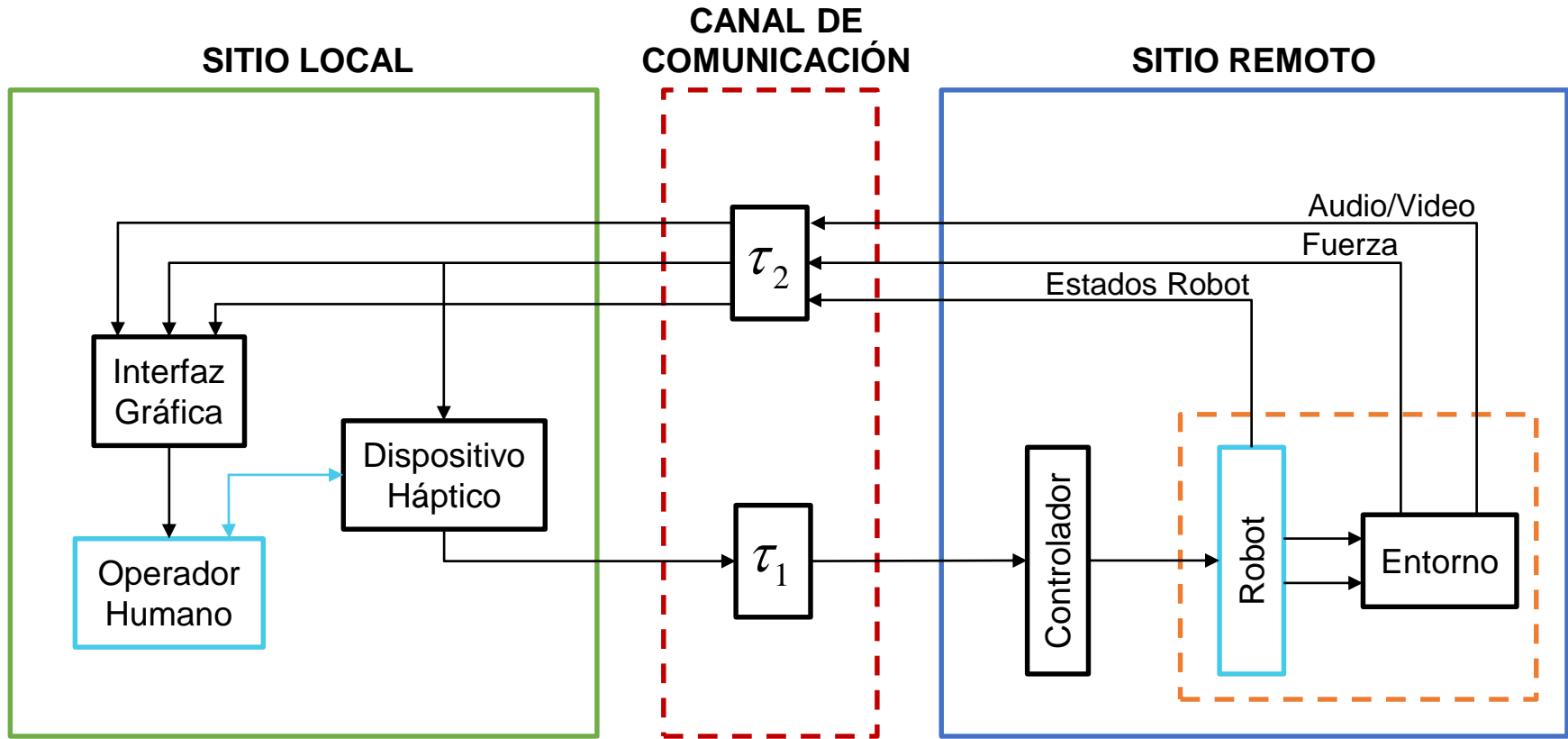
#### EU contribution

€ 4 722 852,00



Coordinated by  
UNIVERSIDAD DE SEVILLA

 Spain

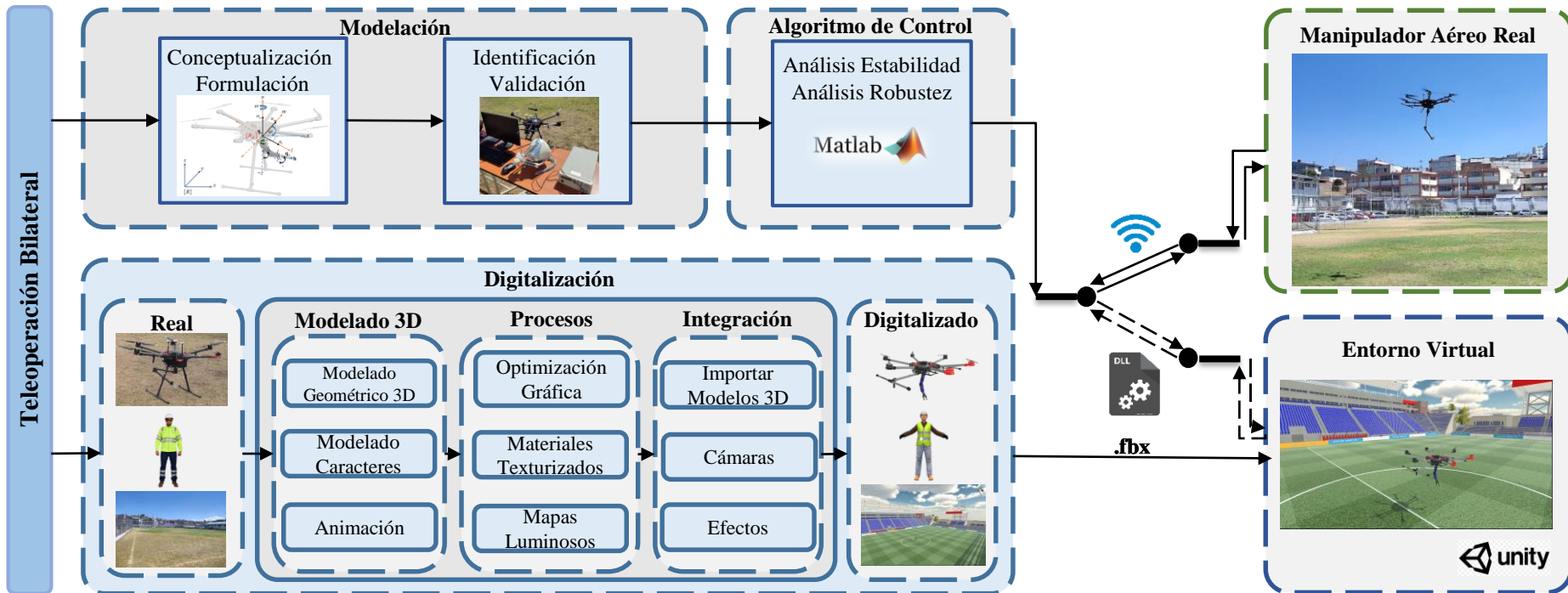




**Implementar un esquema de teleoperación bilateral de un robot manipulador aéreo, conformado por un vehículo aéreo no tripulado y un brazo robótico, a fin de ejecutar tareas de navegación y manipulación.**

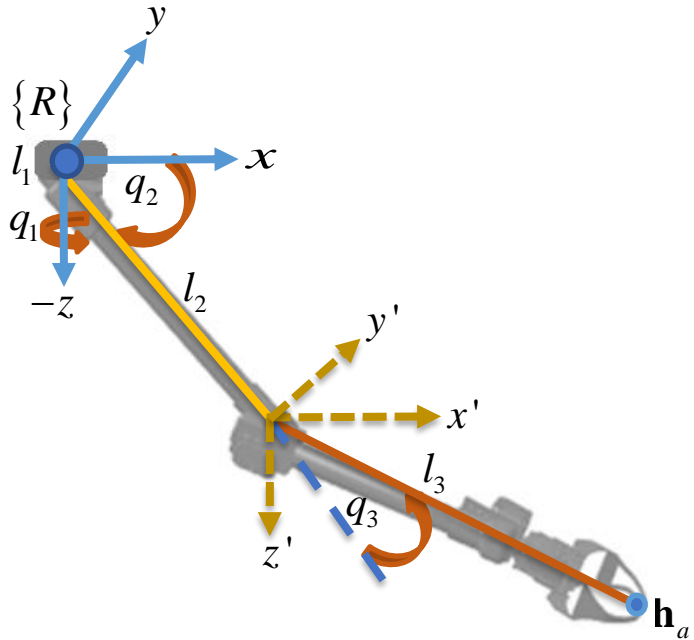
- **Investigar** en las diversas bases de datos científicas acerca de la **modelación y técnicas de control teleoperado** para un robot manipulador aéreo.
- Determinar las **características y restricciones del movimiento de un robot manipulador aéreo**, conformado por un vehículo aéreo no tripulado de seis hélices rotativas y un brazo robótico.
- Proponer un **esquema de teleoperación bilateral para un robot manipulador aéreo**, a fin de ejecutar tareas de navegación y manipulación.

- Desarrollar una **Interfaz Hombre Máquina** que permita **monitorear y controlar** de manera **remota** un robot manipulador aéreo, para lo cual se considerará un **dispositivo háptico de 3DOF**.
- **Desarrollar pruebas experimentales** con un robot manipulador aéreo, con el propósito de **evaluar el esquema de teleoperación** propuesto.





## Modelo Cinemático



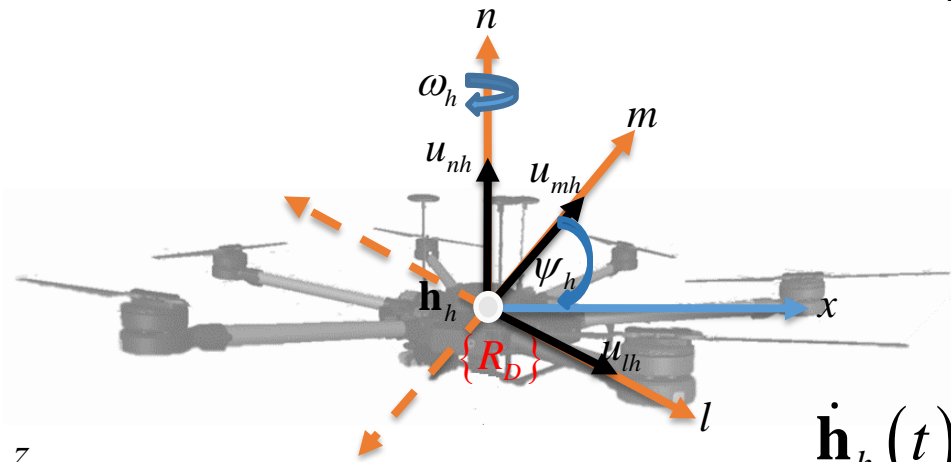
$$\dot{\mathbf{h}}_a(t) = \mathbf{J}_a(\mathbf{q}_a(t)) \dot{\mathbf{q}}_a(t) \quad (1)$$

$\dot{\mathbf{h}}_a(t)$  Vector de velocidades del efector final

$\mathbf{J}_a(\mathbf{q}_a(t))$  Matriz Jacobiana

$\dot{\mathbf{q}}_a(t)$  Vector de velocidades de maniobrabilidad

## Modelo Cinemático

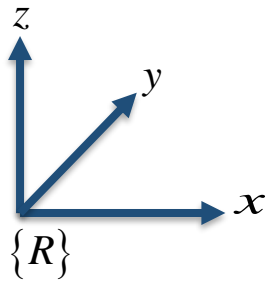


$$\dot{\mathbf{h}}_h(t) = \mathbf{J}_h(\psi_h(t)) \mathbf{u}_h(t) \quad (2)$$

$\dot{\mathbf{h}}_h(t)$  Vector de velocidades sobre  $\{R\}$

$\mathbf{J}_h(\psi_h(t))$  Matriz de transformación de velocidades

$\mathbf{u}_h(t)$  Vector de velocidades de control



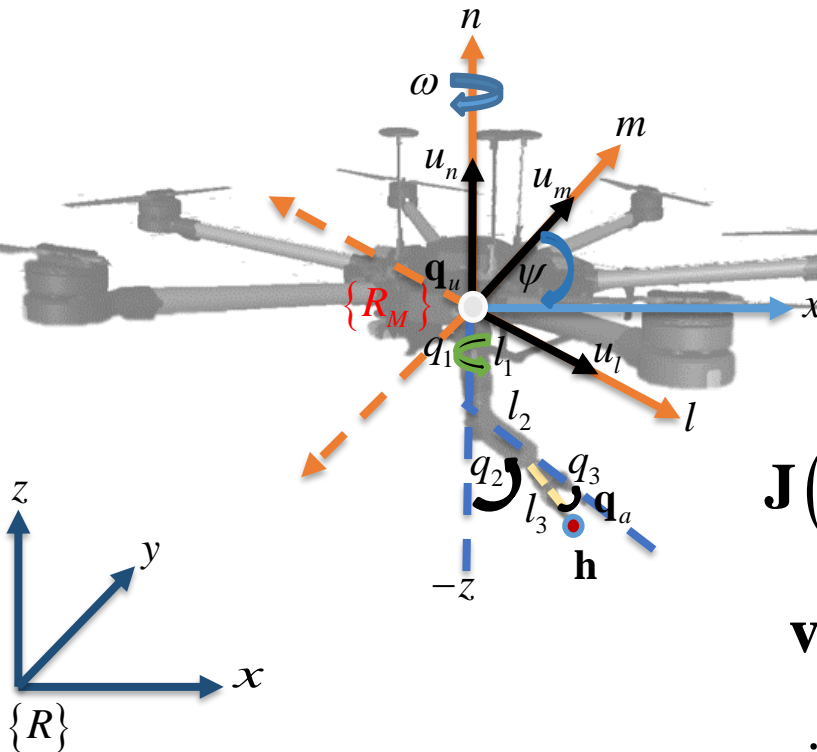
## Modelo Cinemático

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{J}(\mathbf{q}(t)) \mathbf{v}(t) \quad (3)$$

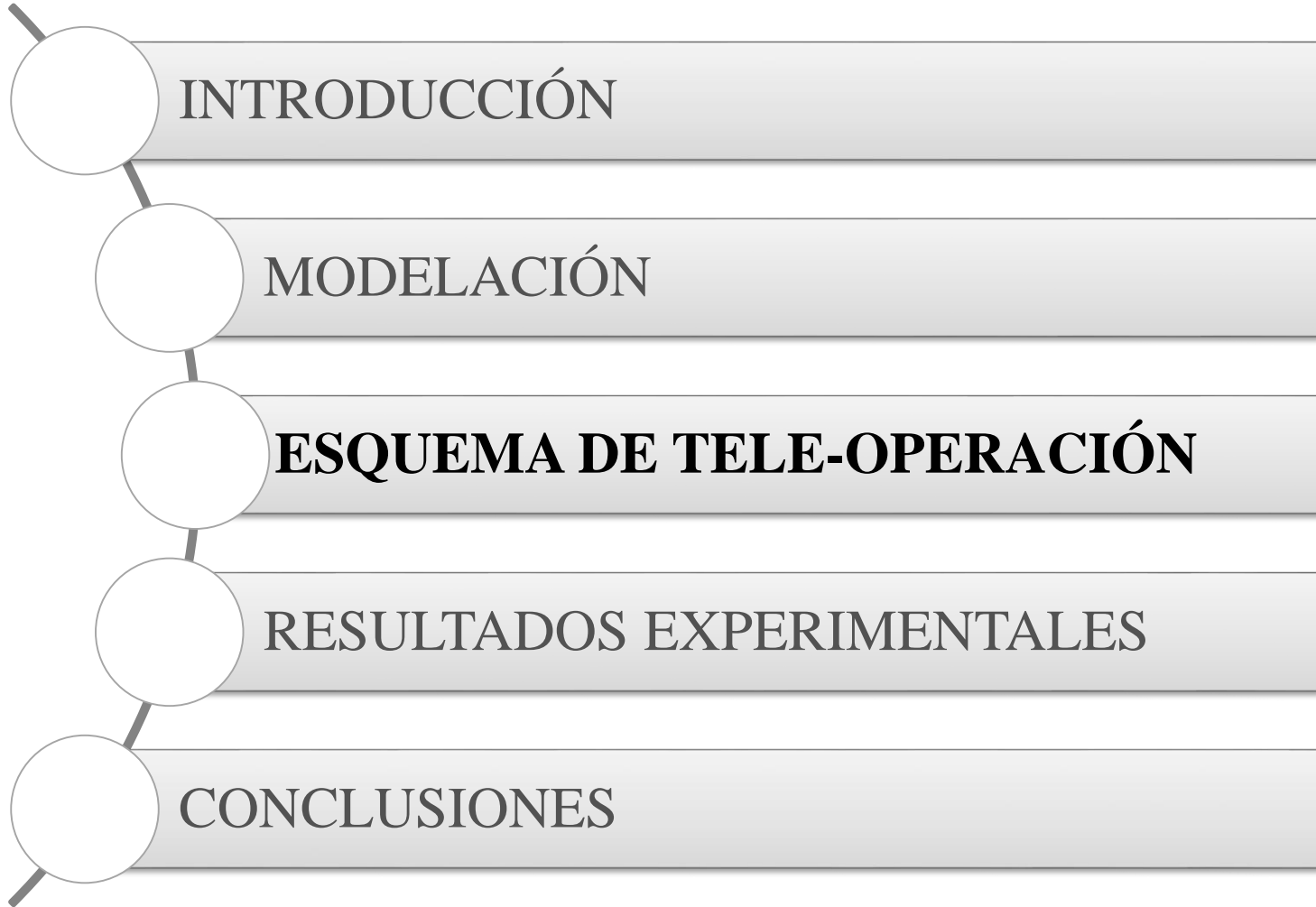
$\mathbf{J}(\mathbf{q}(t))$  Matriz Jacobiana mapeo lineal

$\mathbf{v}(t)$  Vector de velocidades de control

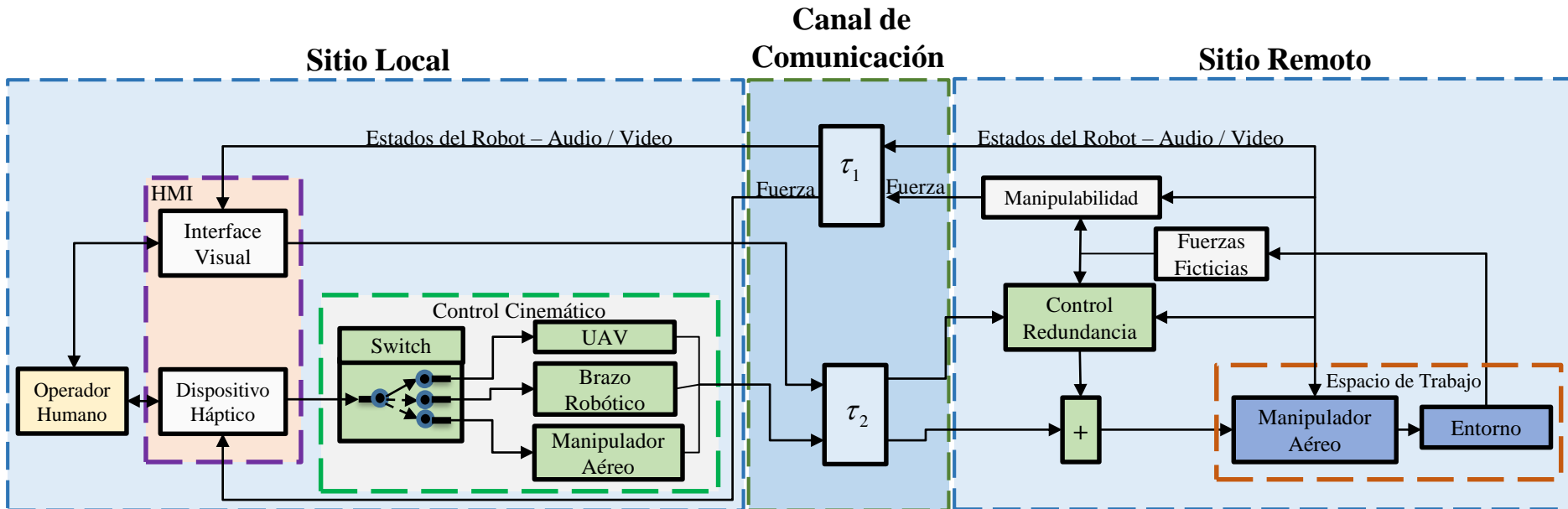
$\dot{\mathbf{h}}(t)$  Vector de velocidades del efector final



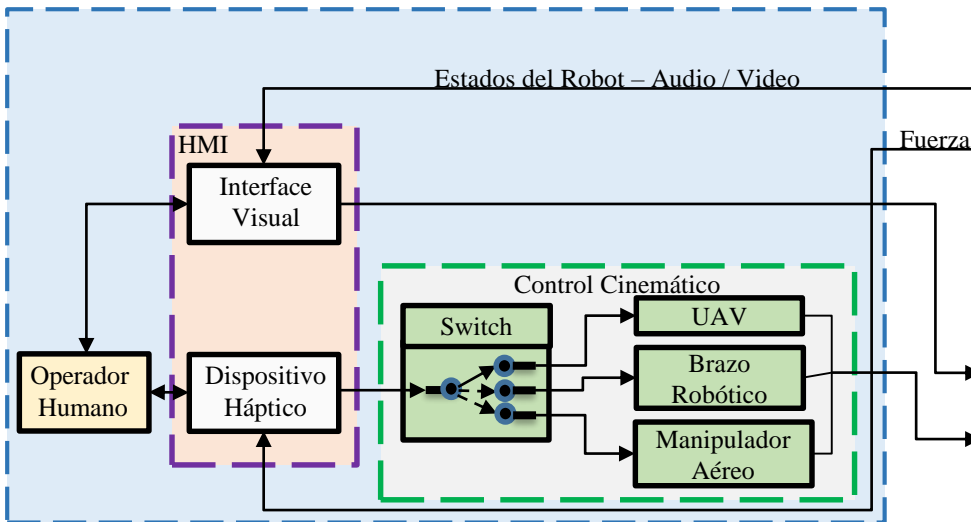




# ESQUEMA DE TELE-OPERACIÓN



## Sitio Local



Operador Humano

Recibe Realimentación Visual  
Percibe la Fuerza de Realimentación  
Genera las referencias

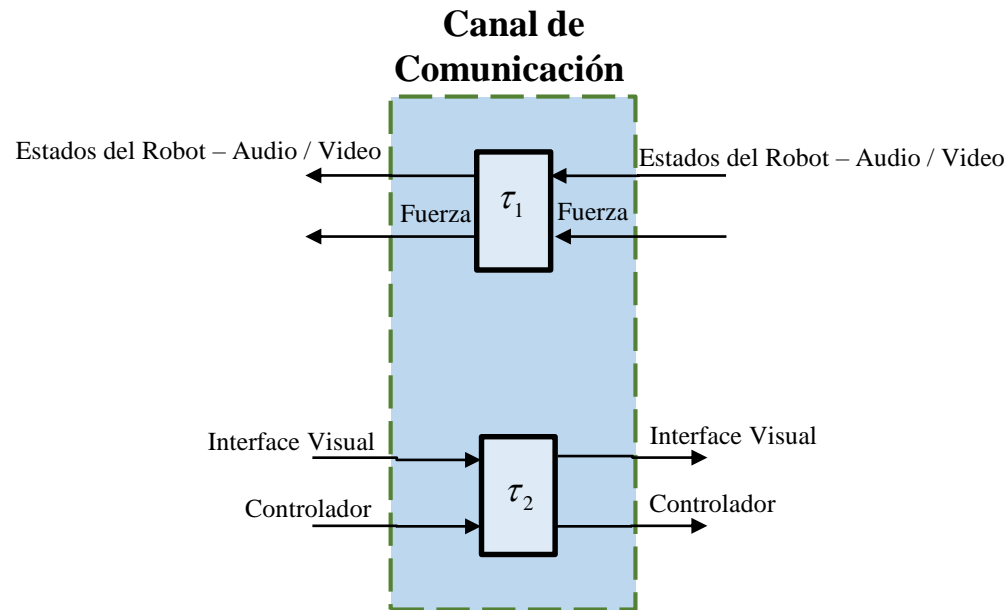
HMI

Interface Visual

Falcon Novint → Genera las Fuerzas al Operador  
Genera Velocidades  
Genera Posiciones

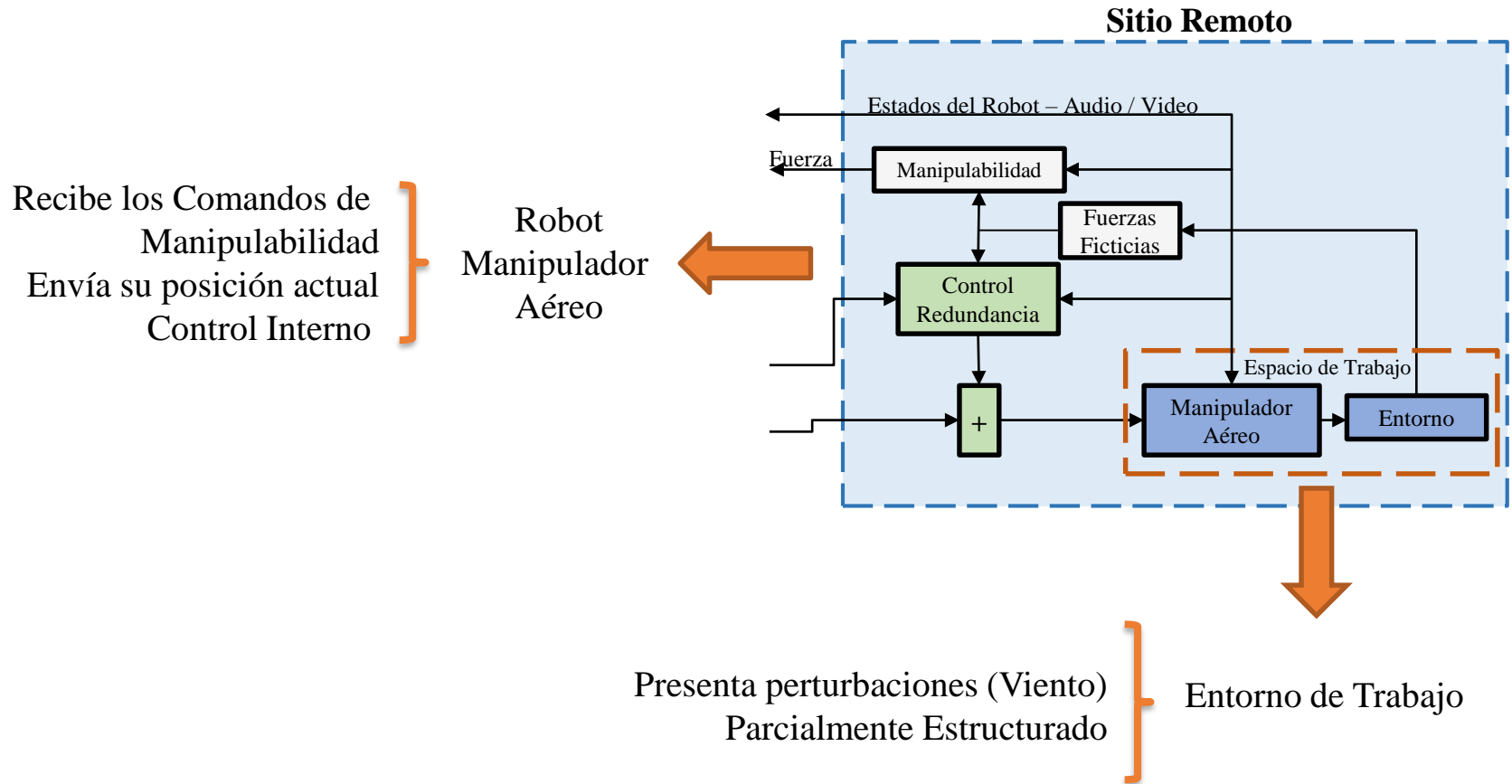
Control Cinemático

Controlador  
Genera las Referencias para el Manipulador aéreo



$\tau_1$ : Retardos de tiempo en la recepción

$\tau_2$ : Retardos de tiempo en la transmisión



## *Controlador Posición: Brazo Robótico*

$$\mathbf{u}_{ref\_a} = \mathbf{J}_a^{-1} \left( \mathbf{L}_K \tanh \left( \mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{K} \tilde{\mathbf{h}}_a \right) \right) \quad (4)$$

Donde:

$\mathbf{J}_a^{-1}$  Matriz inversa de  $\mathbf{J}_a$

$\tilde{\mathbf{h}}_a$  Vector de errores de control

$\mathbf{K}$  y  $\mathbf{L}_K$  Matrices diagonales  $\tilde{\mathbf{h}}_a$

$\tanh(\cdot)$  Saturación de los errores de control

## *Controlador de Seguimiento - UAV*

$$\mathbf{u}_{ref\_h} = \mathbf{J}_h^{-1} \left( \dot{\mathbf{h}}_{hd} + \mathbf{K}_h \tanh(\tilde{\mathbf{h}}_h) \right) \quad (5)$$

Donde:

- $\mathbf{J}_h^{-1}$  Matriz inversa de  $\mathbf{J}_h$
- $\dot{\mathbf{h}}_{hd}$  Vector de velocidades generado por el dispositivo háptico
- $\mathbf{K}_h$  Matriz diagonal positiva que pondera el error de control
- $\tilde{\mathbf{h}}_h$  Posición del error de control

## *Controlador de Seguimiento Manipulador Aéreo*

$$\mathbf{u}_{ref\_m} = \underbrace{\mathbf{J}^{\#} \dot{\mathbf{h}}_d}_{\text{Objetivo Primario}} + \underbrace{(\mathbf{I} - \mathbf{J}^{\#} \mathbf{J}) \mathbf{L} \tanh(\mathbf{L}^{-1} \mathbf{B} \Lambda)}_{\text{Objetivo Secundario}} \quad (6)$$

Donde:  $\mathbf{J}^{\#} = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T (\mathbf{J} \mathbf{W}^{-1} \mathbf{J}^T)^{-1}$

**W** Matriz definida positiva

$\dot{\mathbf{h}}_d$  Vector de velocidades deseadas

**L y B** Matrices diagonales definidas positivas que ponderan el vector  $\Lambda$

$\Lambda$  Vector arbitrario

**J** Matriz Jacobiana



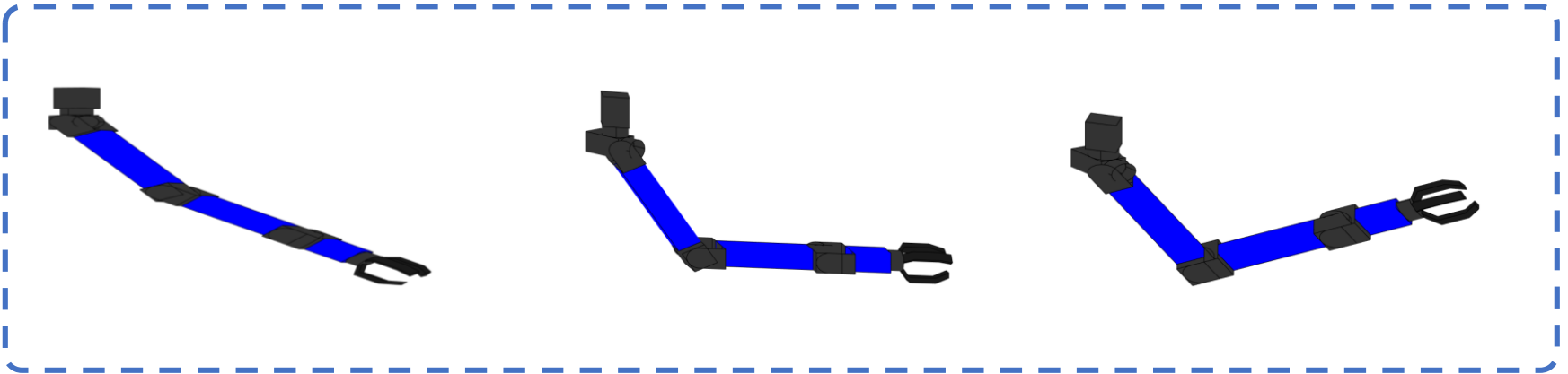
## *Objetivo secundario*

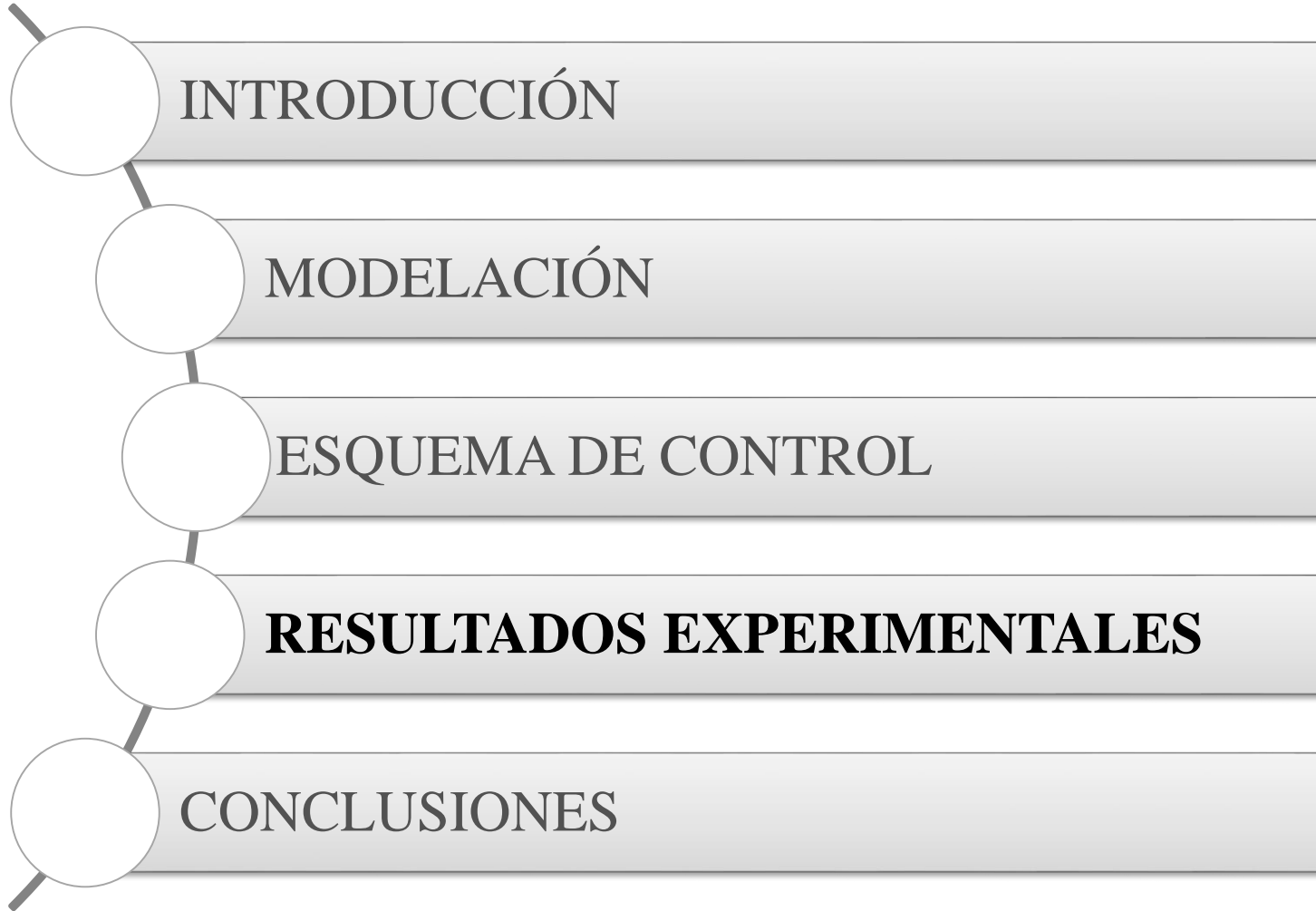
Configuración interna del brazo robótico.

$$\Lambda = [0 \quad 0 \quad 0 \quad \tilde{\mathbf{q}}_1 \quad \tilde{\mathbf{q}}_2 \quad \tilde{\mathbf{q}}_3] \quad (7)$$

Donde:

$$\tilde{\mathbf{q}}_i = \mathbf{q}_{di} - \mathbf{q}_i \quad \text{con } i = 1, 2, 3$$





## Esquema de Tele-Operación

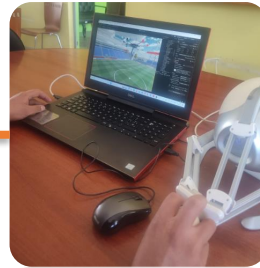
**Simulador**

**Pruebas Experimentales**

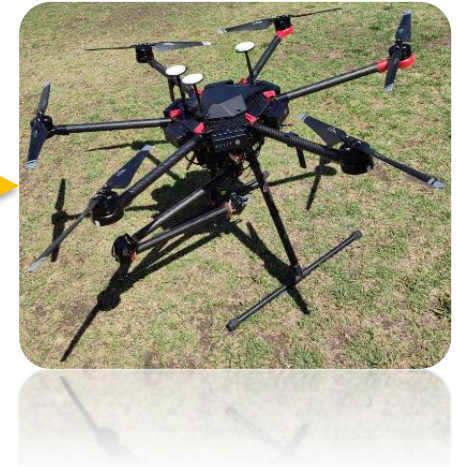
Entorno Virtual Unity 3D



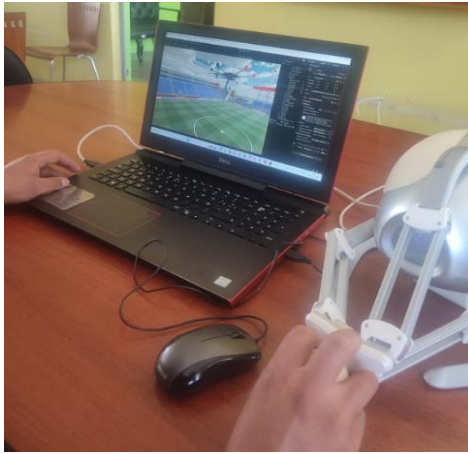
Novint Falcon



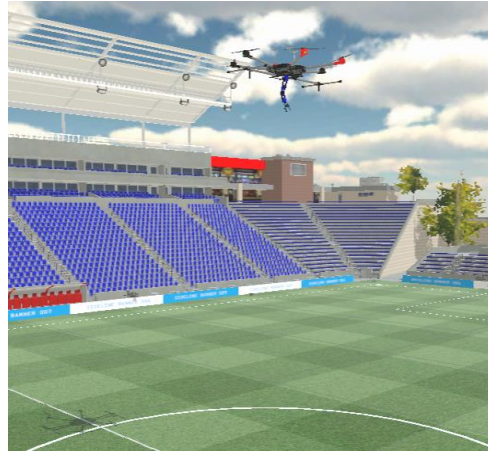
DJI Matrix 600PRO



## Sitio Local

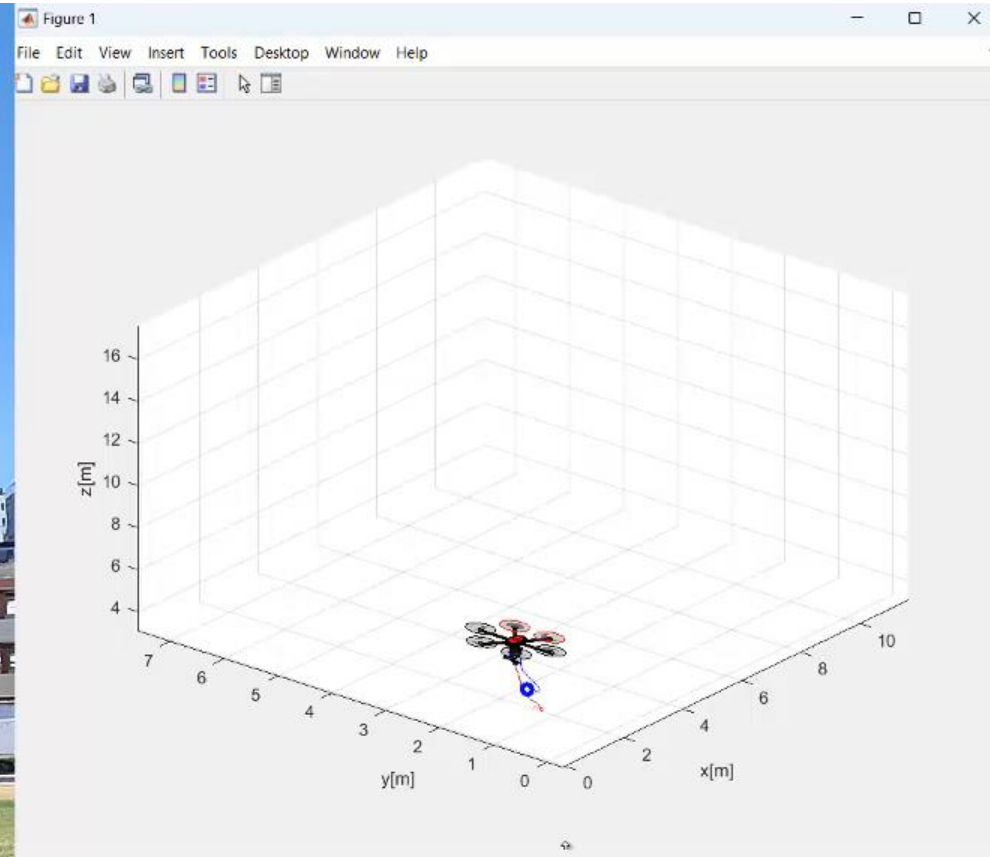


## Sitio Remoto



- Operador Humano
- Dispositivo Háptico

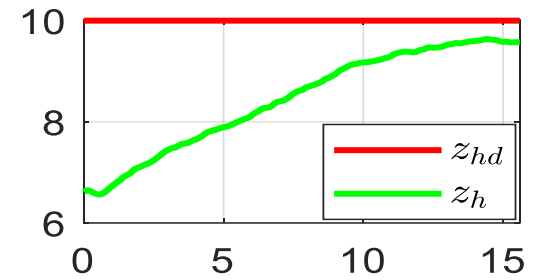
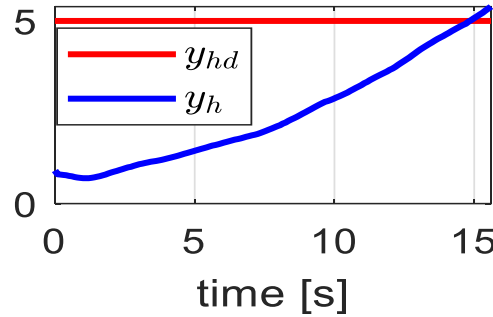
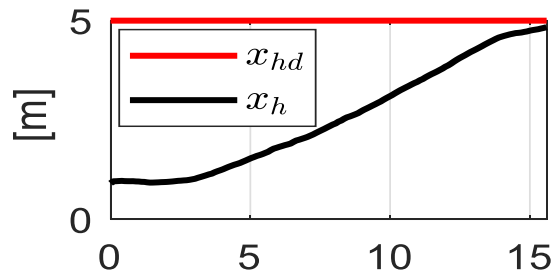
- Ejecutar tareas:
- Manipulación
  - Navegación



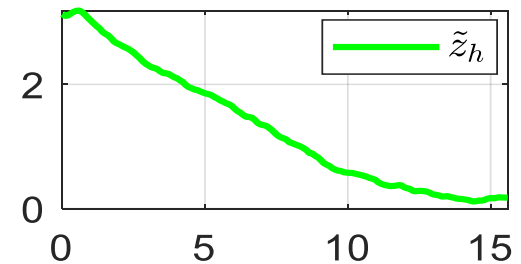
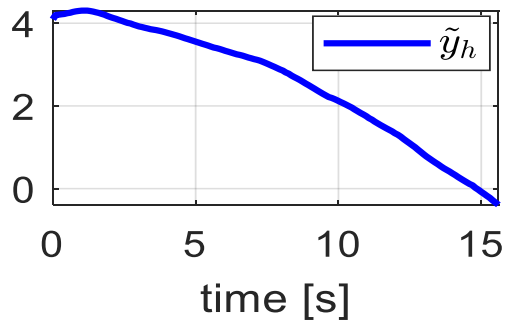
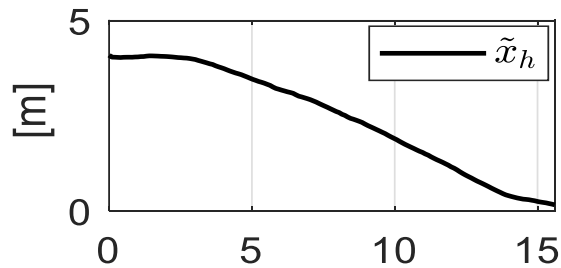
**TELE-OPERACIÓN BILATERAL ROBOT  
MANIPULADOR AÉREO**

## Control UAV

### a) Evolución

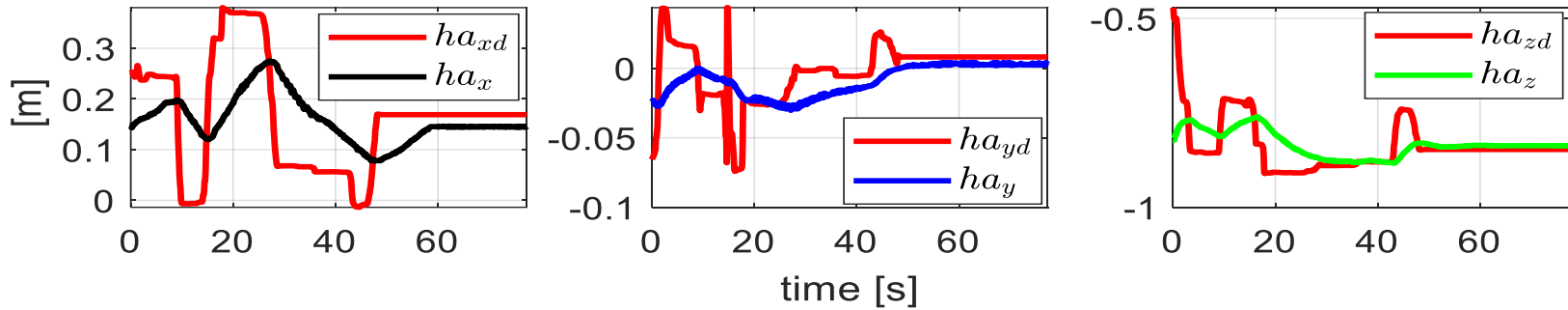


### b) Errores de control

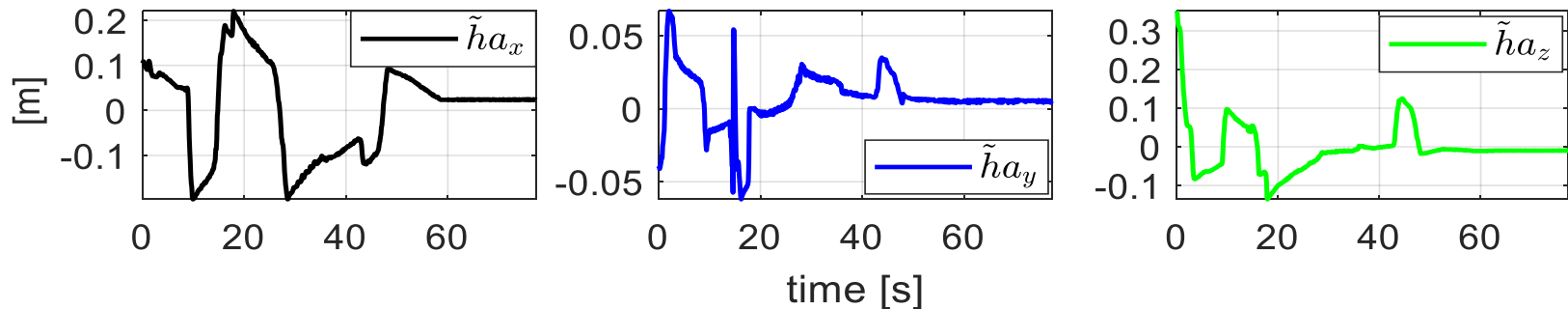


## Control Brazo Robótico

a) Posición deseada que genera el operador y la evolución de la posición

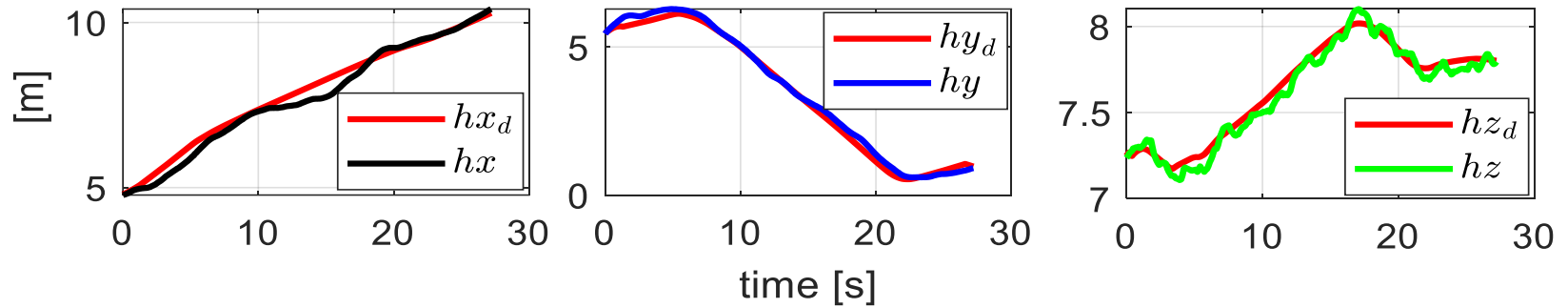


b) Errores de control

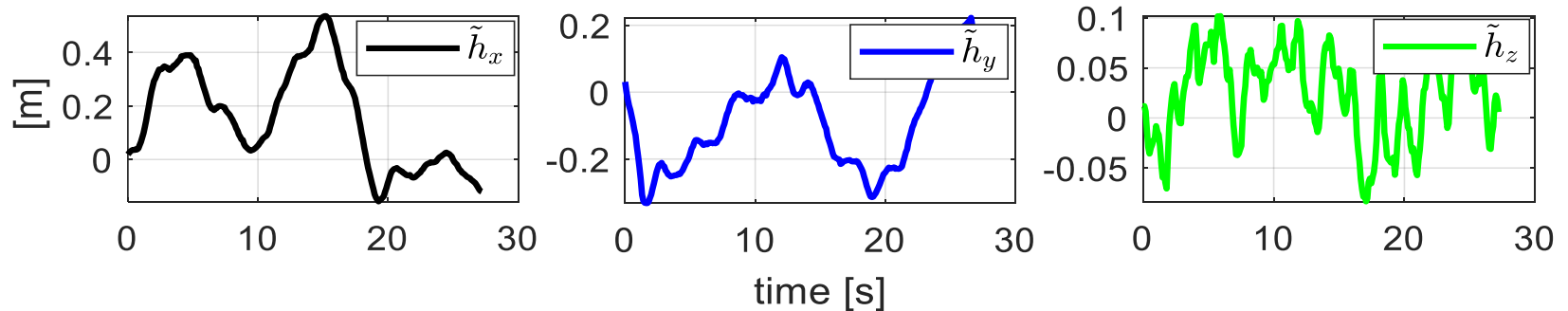


## Control Manipulador Aéreo

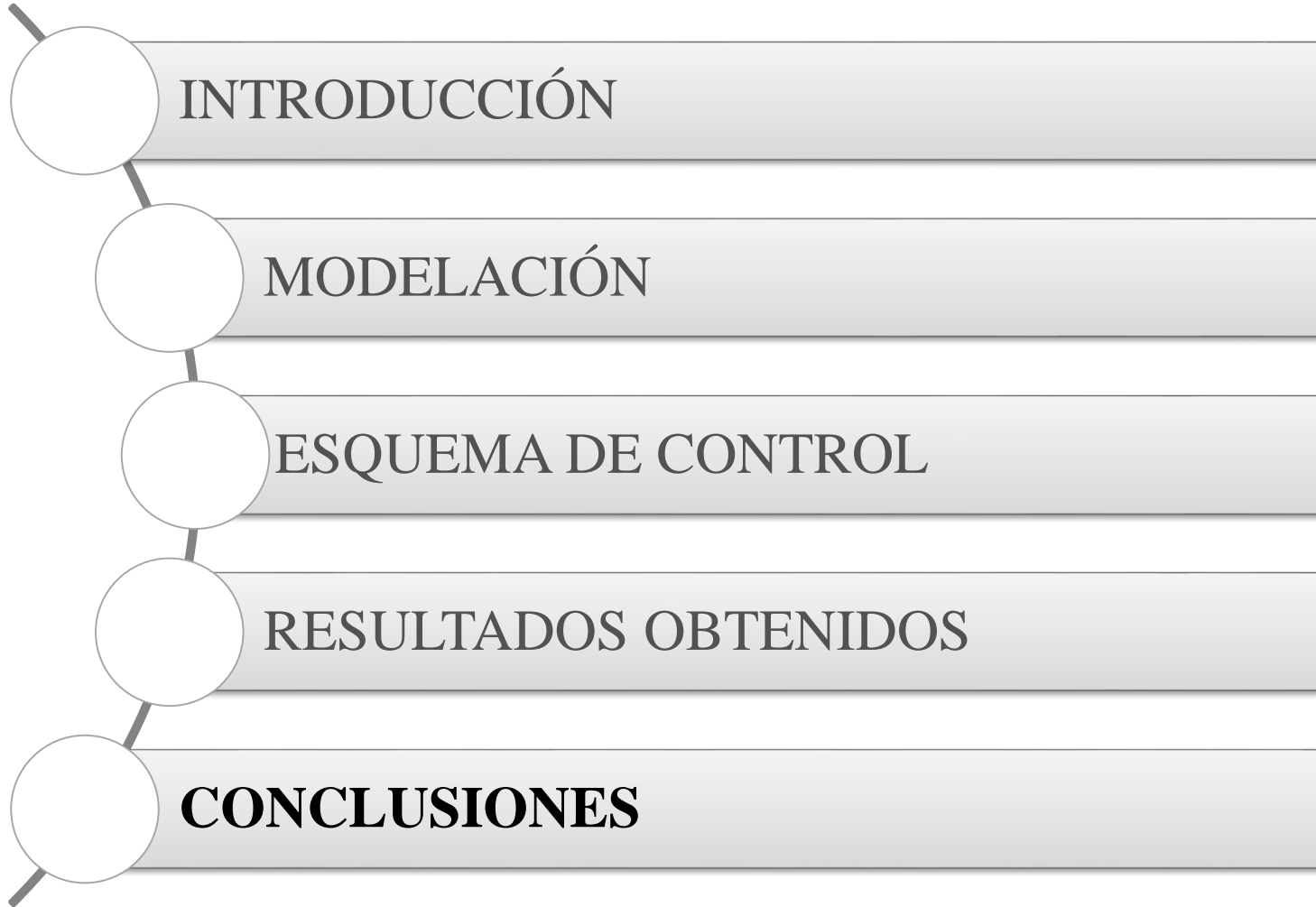
a) Posición deseada que genera el operador y la evolución del extremo operativo



b) Errores de control







- El **modelo matemático del UAV, brazo robótico y manipulador aéreo**, permiten **representar la cinemática** con sus características y restricciones de movilidad. Por lo tanto, el **modelo cinemático** permite comprender el comportamiento de movilidad y posicionamiento del sistema.
- El **simulador** desarrollado en el **entorno virtual se integra** de gran manera con **Matlab**, permitiendo **enviar comandos de control**. Mediante la integración del entorno virtual con el controlador se puede **evaluar el esquema de tele-operación de forma simulada**, permitiendo **ajustar las ganancias de los controladores**.
- El **esquema de teleoperación bilateral** propuesto **permitió controlar por separado** el UAV y el brazo robótico, con objetivo de **realizar tareas con mayor precisión**.
- Mediante los resultados experimentales se demuestra el **funcionamiento del esquema de tele-operación** propuesto. Y finalmente, se **evaluó el control teleoperado** del extremo operativo del robot de forma conjunta..



**UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE**

**DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN**

**Artículo Académico Previo a la Obtención del Título de Ingeniero en  
Electrónica e Instrumentación**

**TELEOPERACIÓN BILATERAL DE UN SISTEMA ROBÓTICO CONFORMADO POR  
UN BRAZO ROBÓTICO SOBRE UN VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO DE SEIS  
HÉLICES**

**Autor:**

Chanataxi Oña, Alex Rodrigo

Mgs. Ortiz Moreano, Jessica Sofía, *Directora*

