



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 Ingeniera en
Electrónica e Instrumentación**

**HARDWARE IN THE LOOP PARA EL CONTROL AVANZADO MIMO
DE ROBOTS MANIPULADORES MÓVILES**

Autores:

Jorque Rea Byron Stalin

Mollocana Jiménez Jéssica Daniela

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D. *Tutor*





Mobile Manipulator Robot Control Through Virtual Hardware in the Loop

Byron S. Jorque^(✉), Jéssica D. Mollocana^(✉), Jessica S. Ortiz^(✉),
and Víctor H. Andaluz^(✉)

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
(bsjorque, jamollocana, jsortiz4, vhandaluz1)@espe.edu.ec

Abstract. This article focuses on the implementation of the Hardware-in-the-Loop technique to evaluate advanced control algorithms to a mobile manipulator robot that comprised of 3DOF anthropomorphic type robotic arm mounted on a unicycle type platform. The implementation of HIL includes the use of Unity 3D graphic engine for the development of a virtual environment that allows to visualize the execution of the movements of the robot through the implemented control algorithm. In addition, it is considered the kinematic model and dynamic model of the robot that represent the characteristics and restrictions of movement of the mobile manipulator robot. Finally, experimental results achieved through the implementation of the HIL technique are presented, in which the behavior of the robotic system and the evolution of control errors when executing locomotion and object manipulation tasks can be verified.

Keywords: HIL - Mobile Manipulator - Algorithm controller - Kinematic - Dynamic

1 Introduction

Robotics have evolved in the last decades to the point that it is essential in the industry for the automation of production lines. Autonomous robots execute repetitive tasks with great velocity and precision [1, 2]. However, the current challenge in robotics is to transcend from industrial robotics to service robotics, in which robots are specifically designed for the service of mankind [3]. Service robotics is a field that focuses on assisting humans outside the industrial environment. For instance, they can perform domestic, security, surveillance, and transportation tasks. Service robotics is additionally an active field of research due to its numerous personal and professional applications. For example, they can be used as servants, company robots, and nursing aid robots [6]. Other uses of service robots may use multiple actuators; for instance, the cooperative control of mobile manipulators [4], or human - robot collaboration [5]. Finally, there are robots specifically designed for a task. In this way, robots can be aerial, aquatic, and terrestrial, and they can move using wheels, legs, fins, and propellers [7].

There are complex tasks that require both locomotion and manipulation. That is why new kinds of robots are being developed, which combine both functionalities; they are

© The Author(s), under exclusive license to Springer Nature Switzerland AG 2021
Á. Rocha et al. (Eds.): WorldCIST 2021, AISC 1365, pp. 80–91, 2021.

https://doi.org/10.1007/978-3-030-72657-7_8



CrossMark

✓
Document is current

Any future updates will be listed below

Mobile Manipulator Robot Control Through Virtual Hardware in the Loop

Crossref DOI link: https://doi.org/10.1007/978-3-030-72657-7_8

Published: 2021

Update policy: https://doi.org/10.1007/SPRINGER_CROSSMARK_POLICY

Authors

Jorque, Byron S.
Mollocana, Jéssica D.
Ortiz, Jessica S.
Andaluz, Víctor H.

License Information

[Text and Data Mining](#) valid from 2021-01-01

[Version of Record](#) valid from 2021-01-01

More Information

Chapter History

First Online: 23 April 2021

Conference Information

Conference Acronym: WorldCIST

Conference Name: World Conference on Information Systems and Technologies

Conference City: Terceira Island

Conference Country: Portugal

Conference Year: 2021

Conference Start Date: 30 March 2021

Conference End Date: 2 April 2021

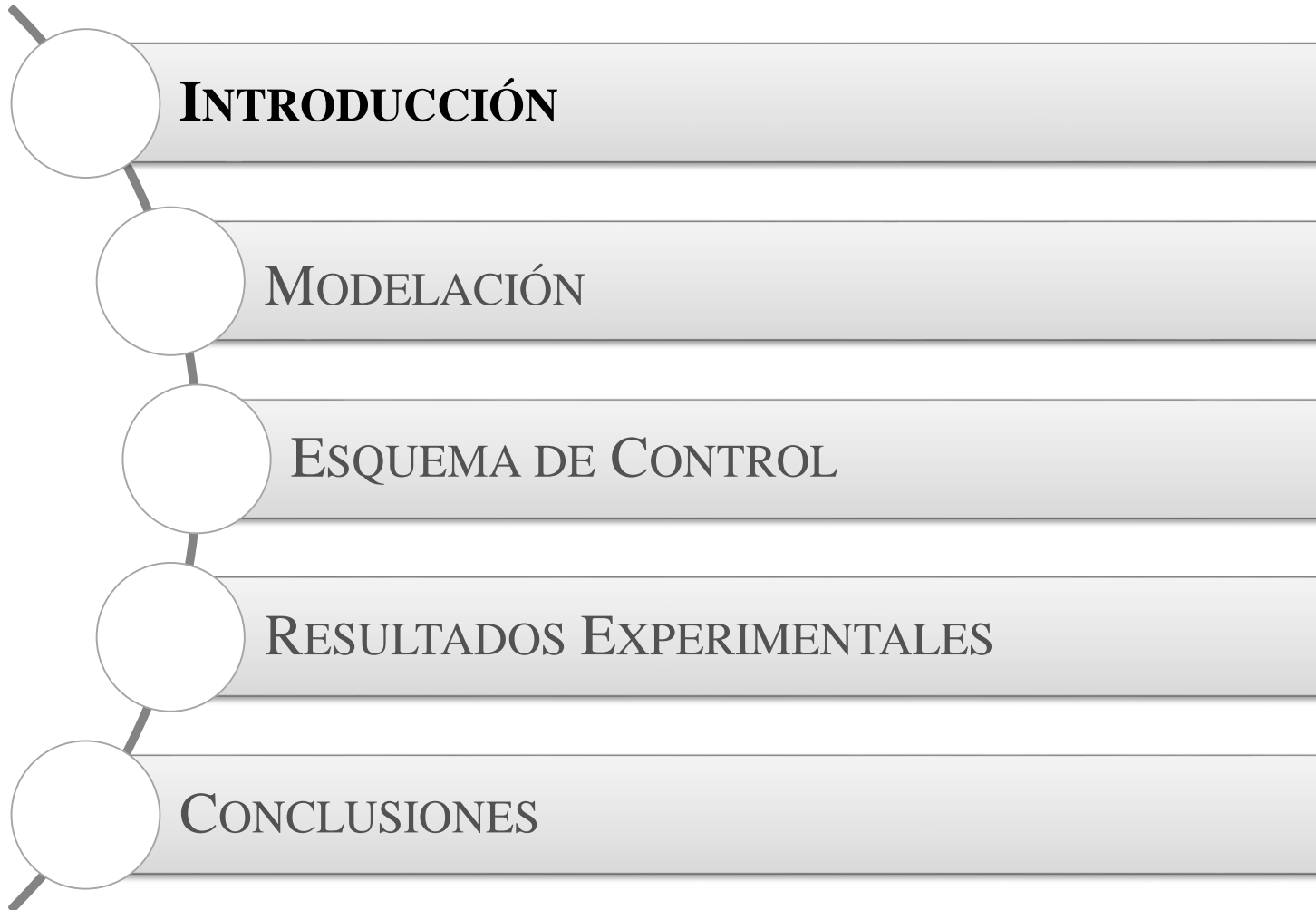
Conference Number: 9

Conference ID: worldcist2021

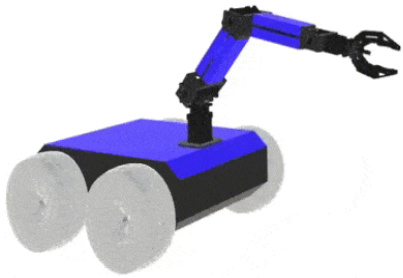
Conference URL: <http://worldcist.org/>

WORLD CIST'21 - 9TH WORLD CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES



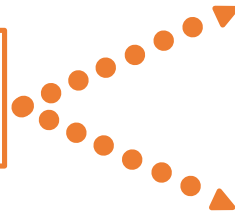


El actual reto de la Robótica es pasar de Robótica Industrial a Robótica de Servicio



Un Robot Manipulador Móvil es una estructura mecánica compuesta por un brazo robótico acoplado a un sistema de locomoción .

Aplicaciones de los Robots Manipuladores Móviles

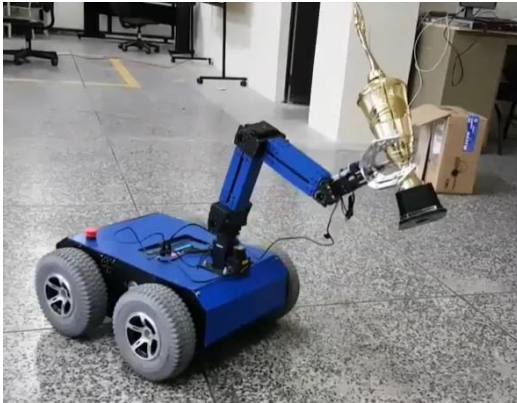


Robots de Servicio

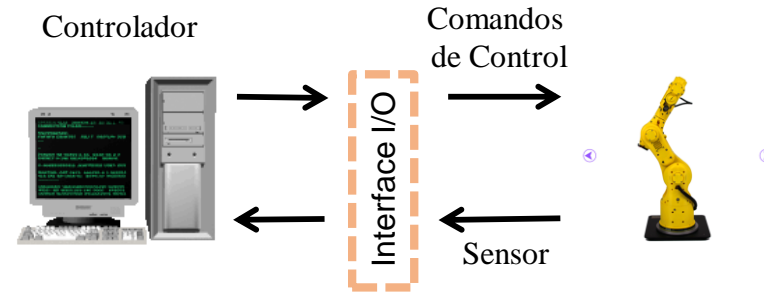
Campo Militar y de Seguridad



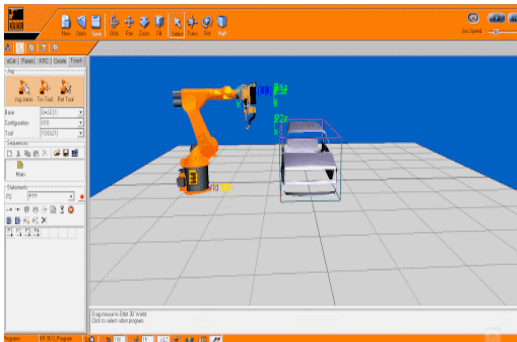
Construcción



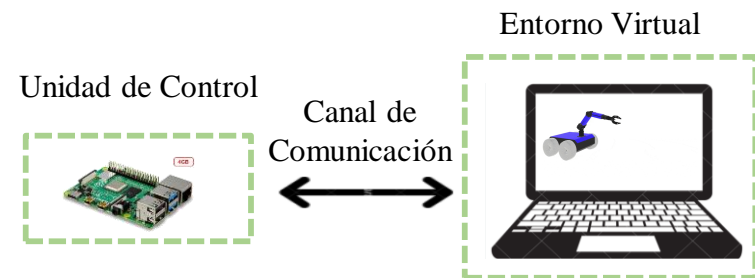
RCP



Simulación



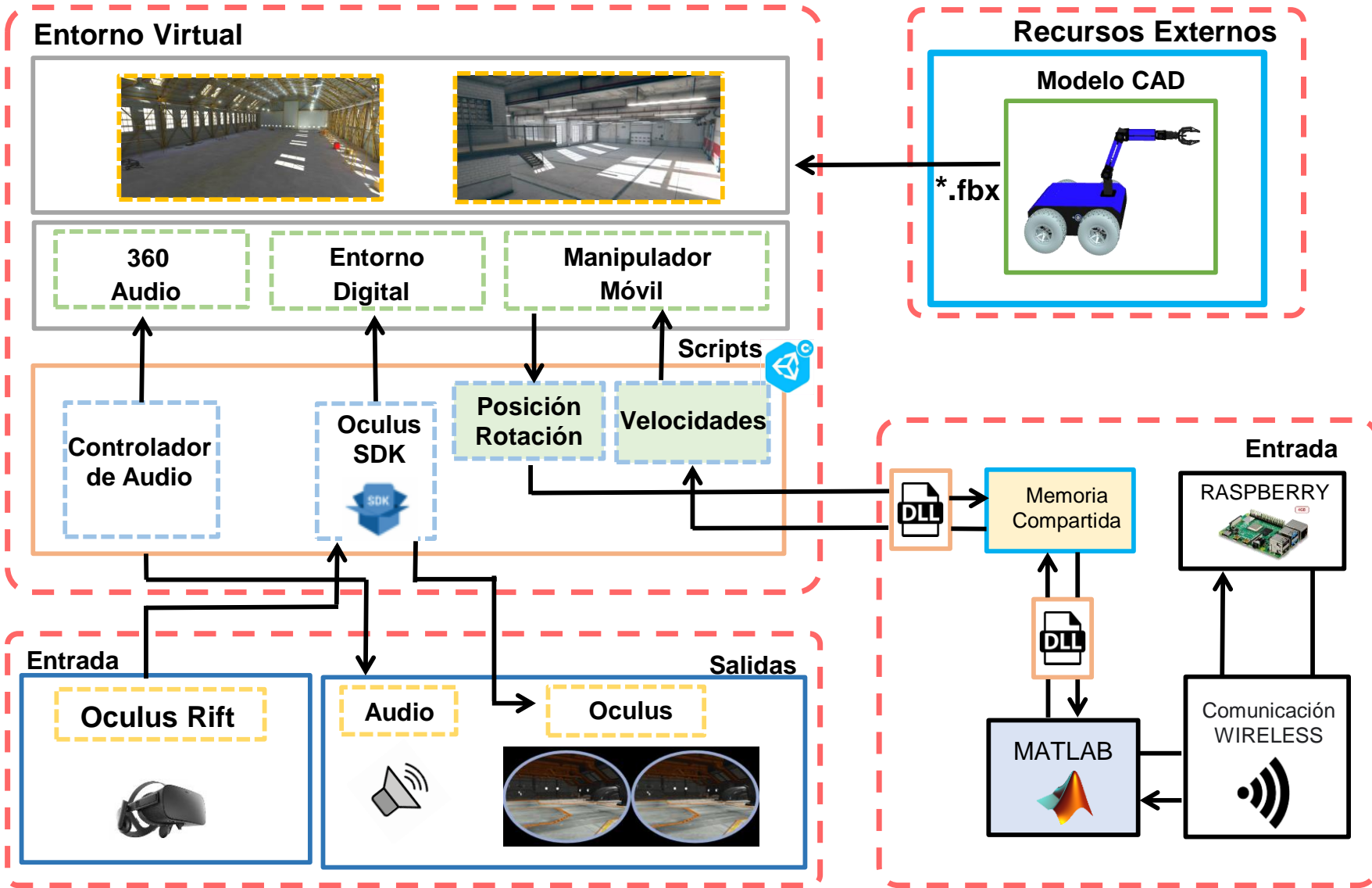
HIL



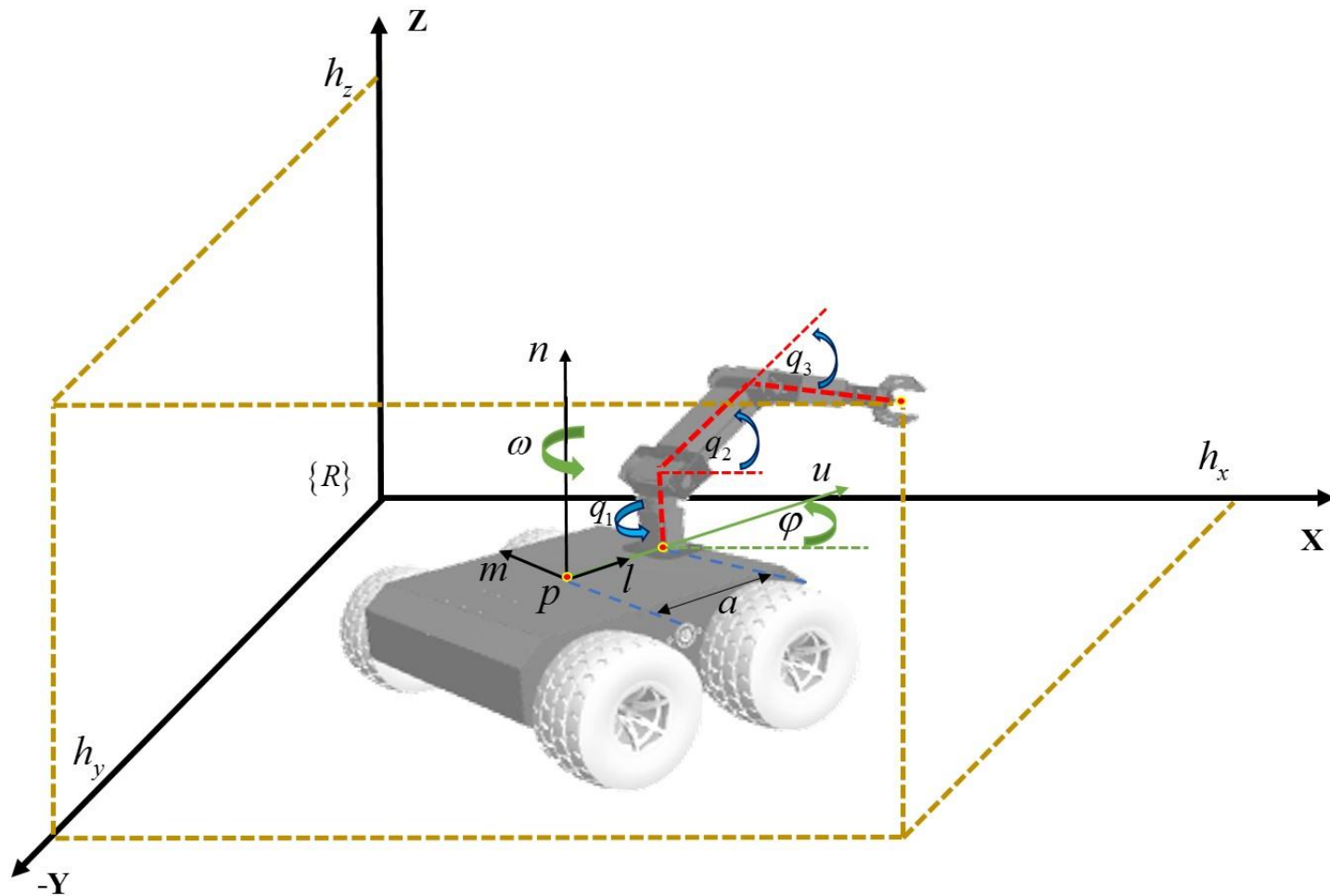
Desarrollar un **entorno Hardware in the Loop (HIL)** a fin de evaluar **algoritmos de control** avanzado MIMO (Múltiple-input Múltiple-output) en robots manipuladores móviles.

- ✓ **Investigar acerca de los sistemas de simulación Hardware in the Loop** para implementar algoritmos de control MIMO en lazo cerrado.
- ✓ Determinar las **características y restricciones de movimiento de un robot manipulador móvil**, conformado por un brazo robótico de 3DOF sobre una plataforma móvil tipo unicycle.
- ✓ Determinar las **ecuaciones dinámicas del robot** manipulador móvil a través de las ecuaciones de **Euler-Lagrange**, con el propósito de proponer algoritmos de control avanzado.
- ✓ **Proponer un algoritmo de control en lazo cerrado** basado en las características de movimiento y en las ecuaciones dinámicas de un robot manipulador móvil, a fin de ejecutar tareas autónomas de locomoción y manipulación.
- ✓ Analizar la **estabilidad y robustez del algoritmo de control** propuesto, con el propósito de evaluar el comportamiento de los errores de control.
- ✓ Desarrollar un **entorno Hardware in the Loop** para el control autónomo de robots manipuladores móvil a través de la utilización de tarjetas de adquisición de datos.

ESTRUCTURA DEL SISTEMA







MODELACIÓN CINEMÁTICA

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

Donde:

$$\dot{\mathbf{h}} = [\dot{h}_x \quad \dot{h}_y \quad \dot{h}_z]^T$$

$\mathbf{J}(\mathbf{q})$

$$\mathbf{v} = [\mu \quad \omega \quad \dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dot{q}_3]^T$$

Representa el vector de velocidad del efector final
es la matriz Jacobiana
es el vector de velocidad del robot

Modelo Cinemático

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{h}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_\theta & -aS_\theta - (l_2C_2 + l_3C_{23})S_{1\theta} & (-l_2C_2 - l_3C_{23})S_{1\theta} & (-l_2S_2 - l_3S_{23})C_{1\theta} & -l_3S_{23}C_{1\theta} \\ S_\theta & aC_\theta + (l_2C_2 + l_3C_{23})C_{1\theta} & (l_2C_2 + l_3C_{23})C_{1\theta} & (-l_2S_2 - l_3S_{23})C_{1\theta} & -l_3S_{23}S_{1\theta} \\ 0 & 0 & 0 & l_2C_2 + l_3C_{23} & l_3C_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix}$$

MODELACIÓN DINÁMICA

Euler-Lagrange

$$L = K - P$$

Donde:

K

Representa la energía cinética

P

es la energía potencial

Vector Torque

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

$$\mathbf{M}(\mathbf{q})\dot{\mathbf{v}}(t) + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})\mathbf{v}(t) + \mathbf{g}(\mathbf{q}) = \mathbf{v}_{ref}(t)$$

Donde:

$\mathbf{M}(\mathbf{q})$

Representa la matriz Inercial

$\mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$

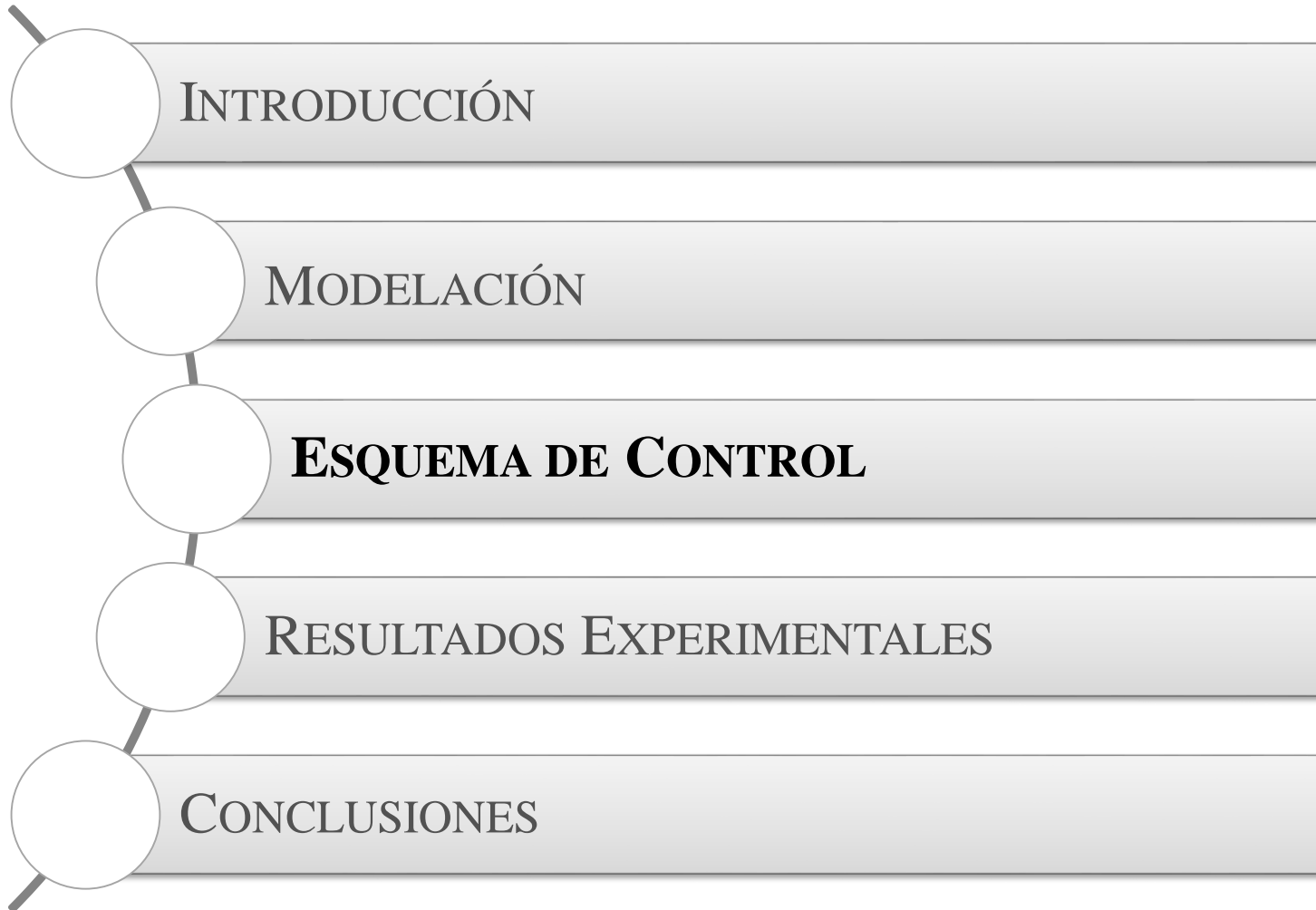
es la matriz de la fuerza centrípeta y Coriolis

$\mathbf{g}(\mathbf{q})$

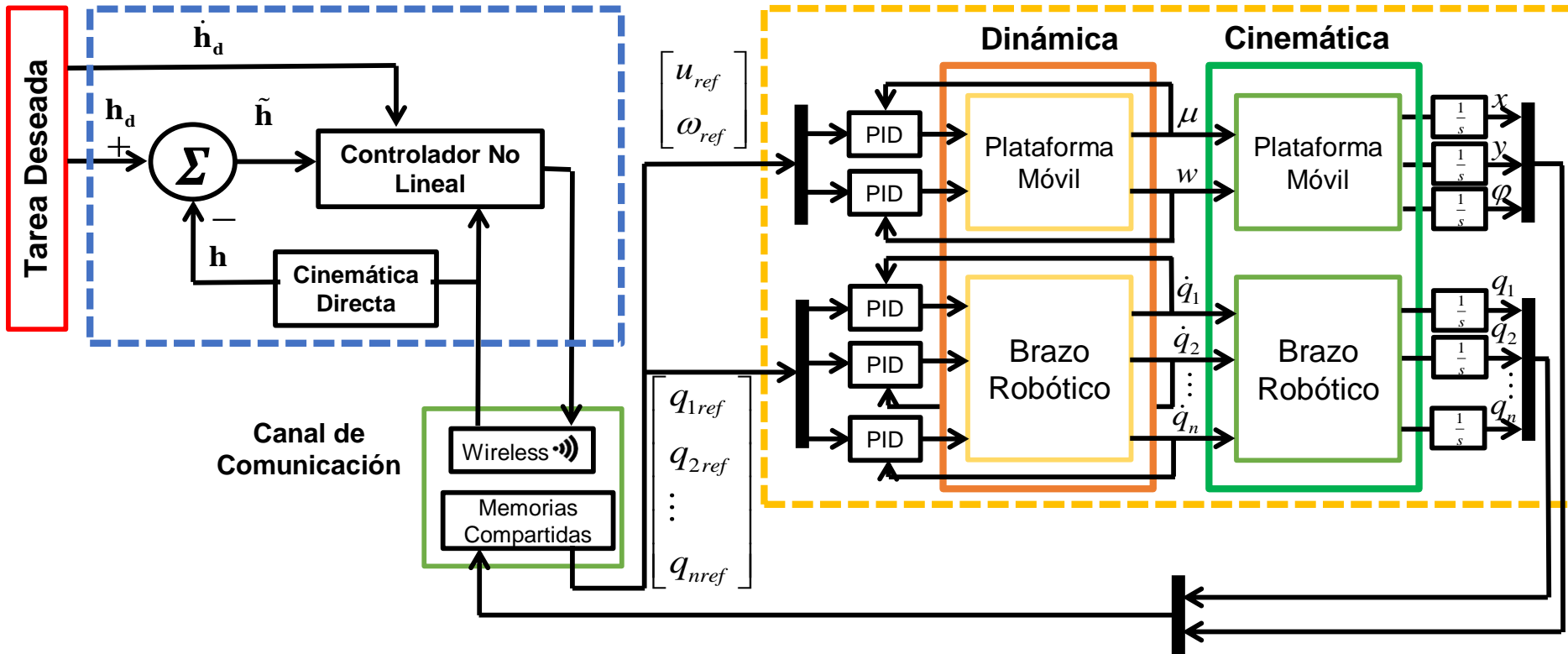
es el vector gravitacional

$\mathbf{v}_{ref}(t)$


es el vector de velocidad de control




ESQUEMA DE CONTROL



$$\mathbf{v}_c = \underbrace{\mathbf{J}^\# (\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}))}_{\mathbf{T}_1} + \underbrace{(\mathbf{I} - \mathbf{J}^\# \mathbf{J}) \mathbf{D} \tanh(\boldsymbol{\eta})}_{\mathbf{T}_2}$$



Controlador



Sistema Redundante

donde:

\mathbf{h}_d	Vector de posiciones deseadas
$\dot{\mathbf{h}}_d$	Vector de velocidad deseado
$\tilde{\mathbf{h}} = \mathbf{h}_d - \mathbf{h}$	Error de control
\mathbf{K} and \mathbf{D}	Matrices de ganancia
$\boldsymbol{\eta}$	Vector de error de posición del brazo robótico

Considerando un seguimiento de velocidad perfecto:

$$\mathbf{v} \equiv \mathbf{v}_c$$

se obtiene la siguiente expresión:

$$\tilde{\mathbf{h}} + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) = \mathbf{0}$$

Para el análisis de estabilidad se considera la siguiente función candidata Lyapunov:

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

donde su primera derivada se define como $\dot{\mathbf{V}}(\tilde{\mathbf{h}}) = \tilde{\mathbf{h}}^T \dot{\tilde{\mathbf{h}}}$ y reemplazando se obtiene:

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

lo que implica que: $\tilde{\mathbf{h}}(t) \rightarrow \mathbf{0}$ cuando $t \rightarrow \infty$

El bloque de compensación dinámica tiene como objetivo reducir el error de seguimiento de velocidad del robot compensando la dinámica del mismo.

$$\mathbf{V}_{ref} = \mathbf{M}(\mathbf{q})\left(\dot{\mathbf{v}}_c + \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{v}})\right) + \mathbf{C}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \mathbf{v}_c + \mathbf{g}(\mathbf{q})$$

donde:

$$\mathbf{v}_{ref} = \left[u_{ref} \quad \omega_{ref} \quad \dot{q}_{1ref} \quad \dot{q}_{2ref} \quad \dot{q}_{3ref} \right]^T$$

Acciones de Control

$$\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{v}_c - \mathbf{v}$$

Error de velocidad

$$\dot{\mathbf{v}}_c$$

Vector de aceleración

El análisis de robustez es una parte fundamental del controlador implementado.. Así, tenemos que:

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

La condición para que $\dot{V}(\tilde{\mathbf{h}})$ sea negativo es:

$$\left| \tilde{\mathbf{h}}^T \mathbf{K} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}) \right| > \left| \tilde{\mathbf{h}}^T \delta_{\tilde{\mathbf{h}}} \right|$$

Para un $\tilde{\mathbf{h}}$ con valores altos, \dot{V} será negativo si se cumple:

$$\|\mathbf{K}\| > \|\delta_{\tilde{\mathbf{h}}}\|$$

Para $\tilde{\mathbf{h}}$ con valores pequeños, \dot{V} será negativo si:

$$\|\tilde{\mathbf{h}}\| > \frac{\|\delta_{\tilde{\mathbf{h}}}\|}{\lambda_{\min}(\mathbf{K})}$$

Implicando que el error $\tilde{\mathbf{h}}$ se limita por:

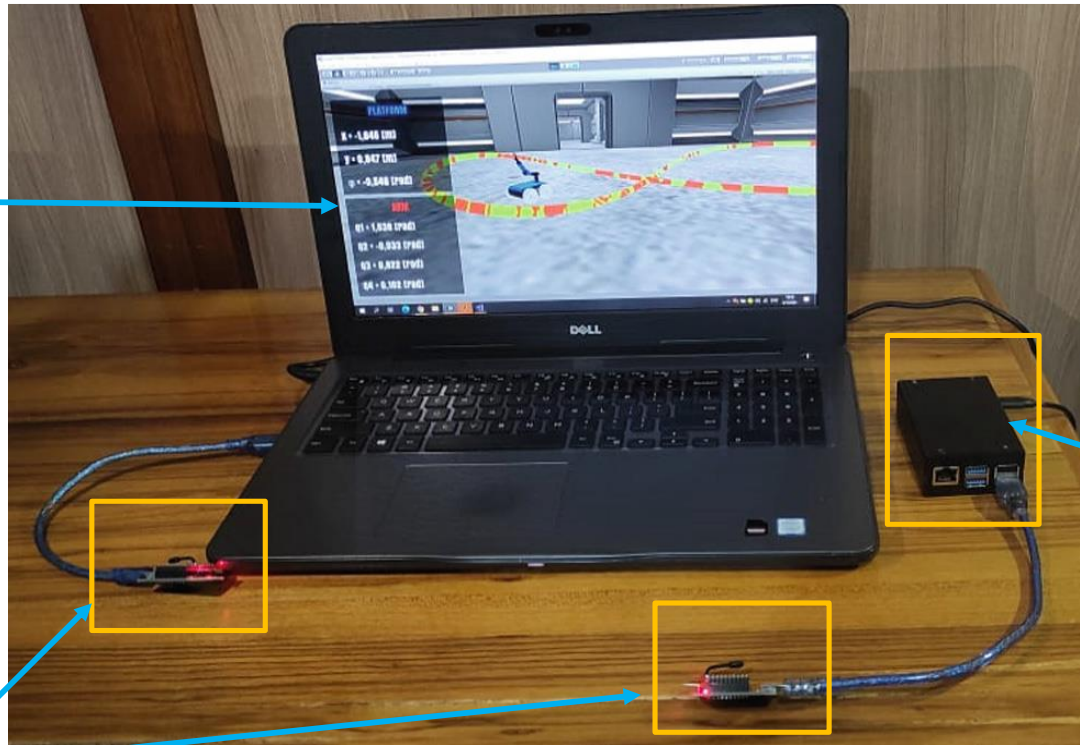
$$\|\tilde{\mathbf{h}}\| \leq \frac{\|\delta_{\tilde{\mathbf{h}}}\|}{\lambda_{\min}(\mathbf{K})} \quad \text{con } \delta_{\tilde{\mathbf{h}}} \neq 0$$



PC

↓

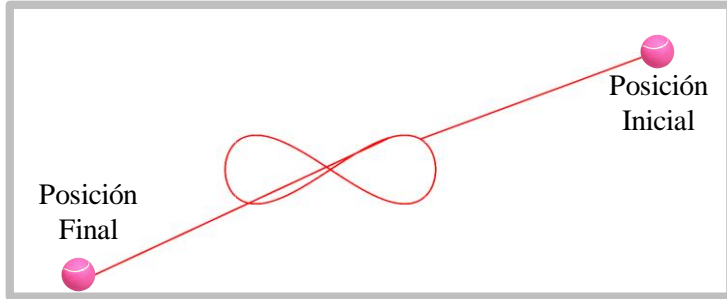
VIRTUAL ENVIRONMENT



RASPBERRY PI 4

XBEE'S

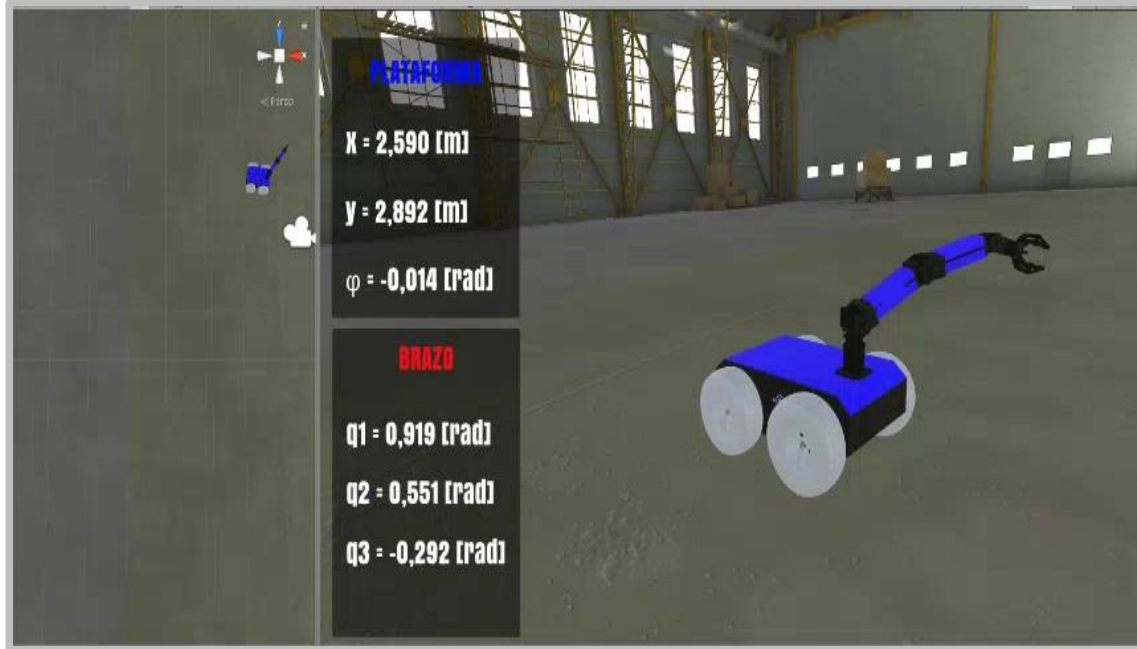
TAREA DESEADA



CONTROLADOR

```
Manejador Movil.py *K
1 import serial
2 import time
3 import math
4 import numpy as np
5 import pylab as pl
6 import matplotlib.pyplot as plt
7 ser = serial.Serial("/dev/ttyUSB0", baudrate = 115200); #Modificar el puerto serie de ser nec
8 time.sleep(3);
9
10 #Tiempo
11 tfin=150
12 ts=0.1
13 t=List(range(0,tfin*10+1))
14
15 #%% POSICIONES INICIALES
16 q1=0*(math.pi/180) #%% cero
17 q2=45*(math.pi/180) #%% positivo
18 q3=-30*(math.pi/180) #%% negativo
19
20
Shell
Python 3.7.3 (/usr/bin/python3)
>>>
```

ENTORNO VIRTUAL



A

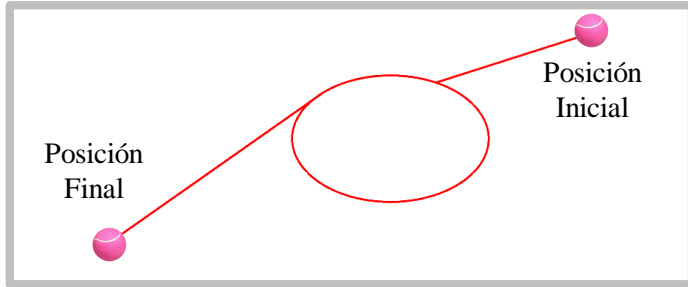


B

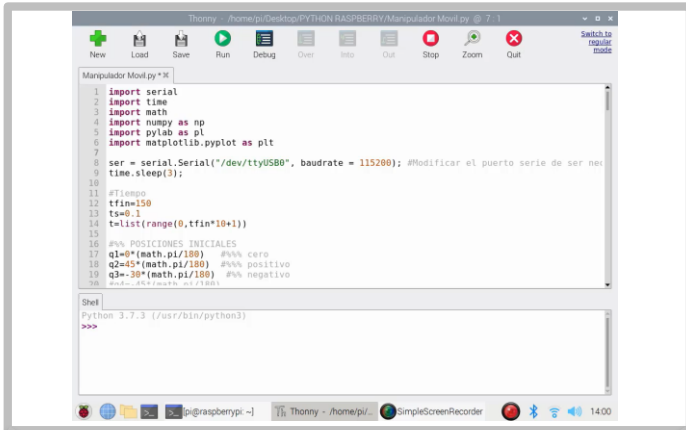


PRUEBA DE ROBUSTEZ

TAREA DESEADA



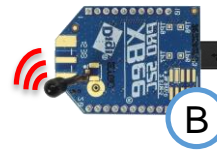
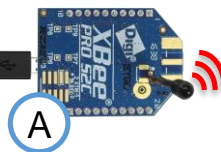
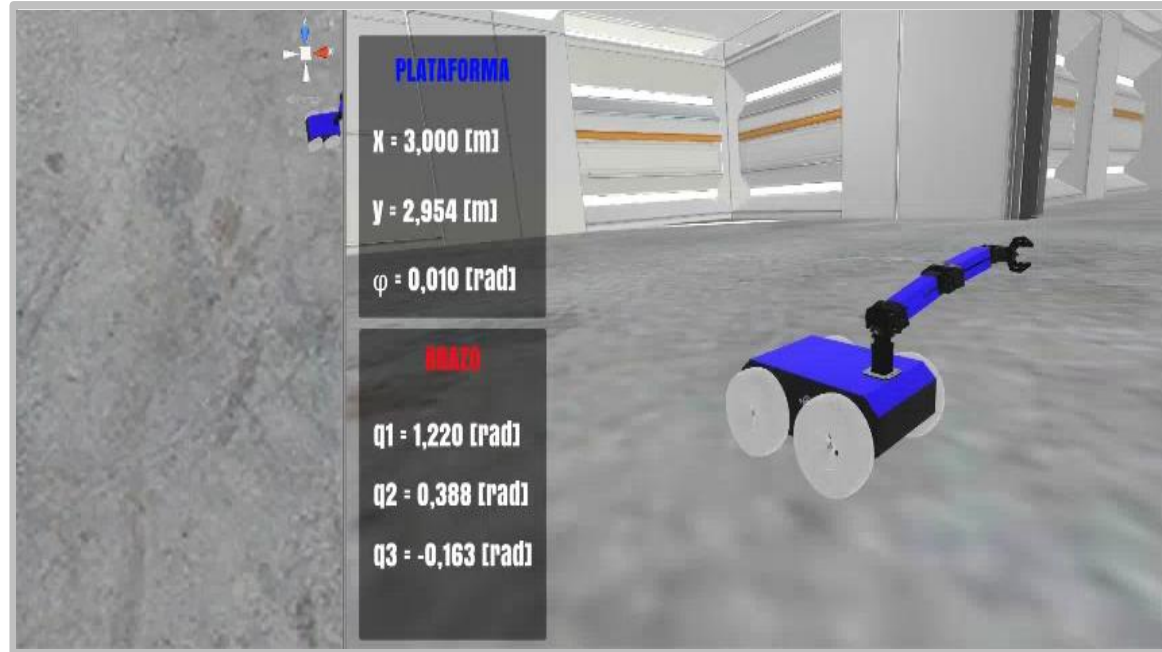
CONTROLADOR



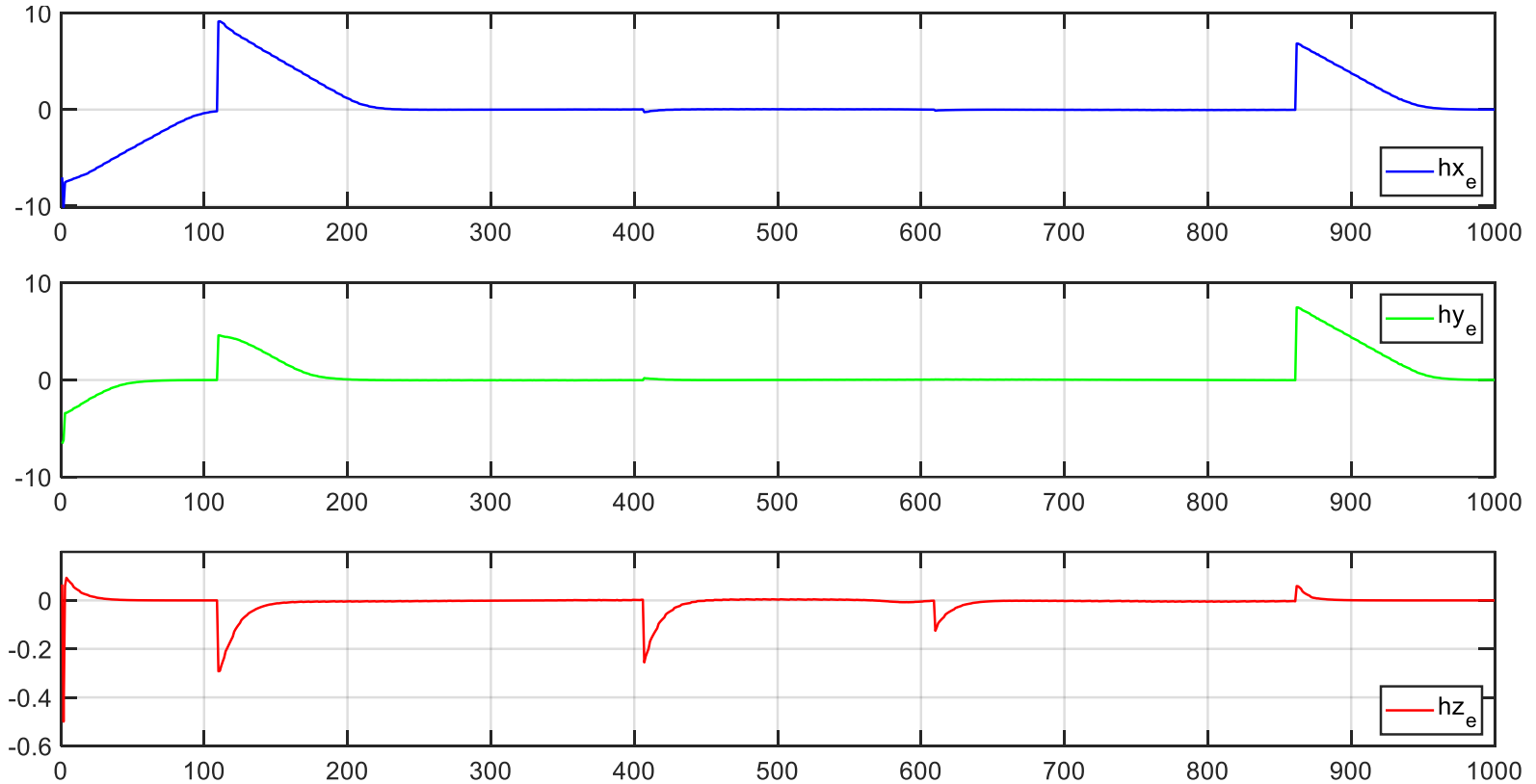
```
Manipulador Movil.py *K
1 import serial
2 import time
3 import math
4 import numpy as np
5 import pylab as pl
6 import matplotlib.pyplot as plt
7
8 ser = serial.Serial("/dev/ttyUSB0", baudrate = 115200) #Modificar el puerto serie de ser nes
9 time.sleep(3);
10
11 #Tiempo
12 tfin=150
13 ts=0.1
14 telist(range(0,tfin*10+1))
15
16 %% POSICIONES INICIALES
17 q1=0*(math.pi/180)  #%% cero
18 q2=45*(math.pi/180)  #%% positivo
19 q3=-30*(math.pi/180)  #%% negativo
20 end %% POSICIONES INICIALES
```

Shell
Python 3.7.3 (/usr/bin/python3)
>>>

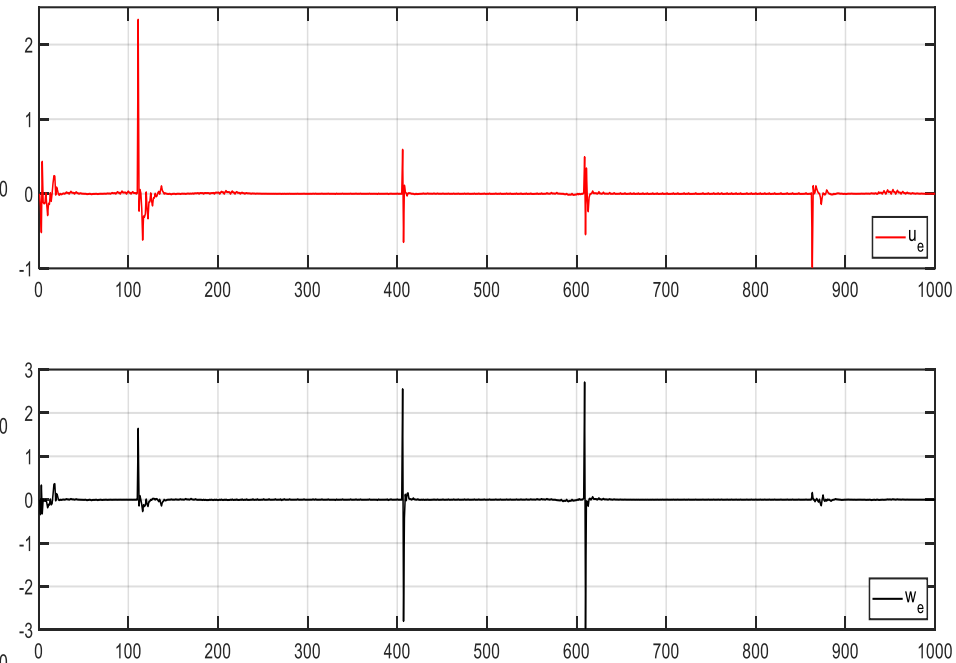
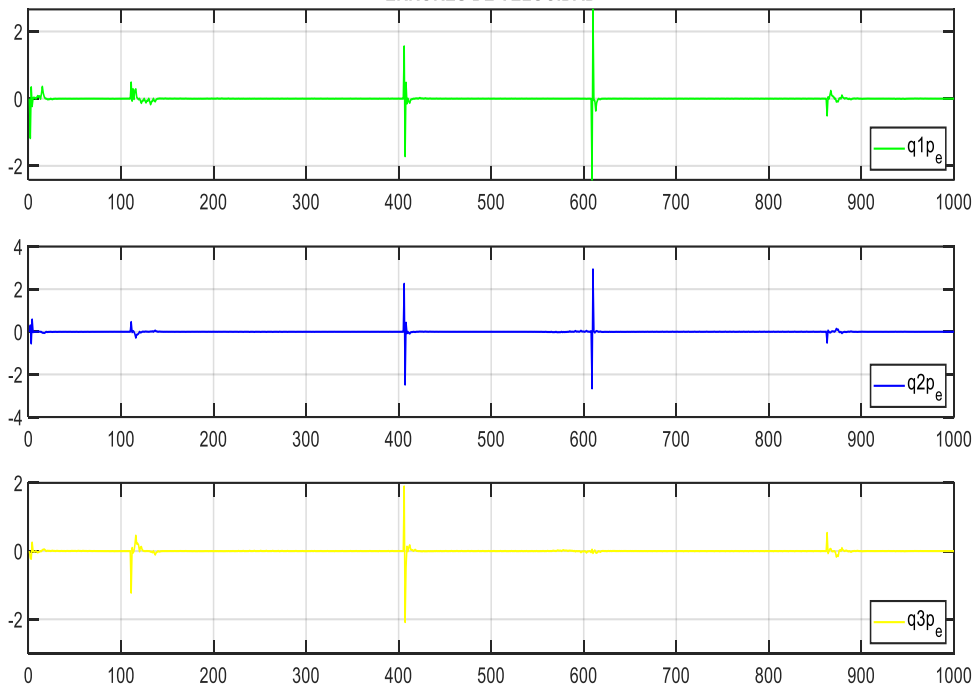
ENTORNO VIRTUAL



ERRORES DE CONTROL DEL MANIPULADOR MÓVIL



ERROR DE VELOCIDAD DEL MANIPULADOR MÓVIL





- ✓ El modelo cinemático permite determinar la ubicación del robot manipulador móvil en su espacio de trabajo, las relaciones entre sus parámetros geométricos y las características y restricciones de movimiento del mismo; contribuyendo al desarrollo del controlador cinemático. Mientras que el modelo dinámico del robot permite determinar su movimiento considerando todas las fuerzas físicas que actúan sobre él; para ser utilizado en el desarrollo del bloque de compensación dinámica
- ✓ El controlador cinemático comprende un sistema redundante que permite al robot realizar la tarea deseada. Mientras que el controlador dinámico reduce el error de seguimiento de la velocidad del robot compensando la dinámica del sistema.
- ✓ En el análisis de estabilidad y robustez del sistema robótico se consideró la teoría de Lyapunov, demostrando que los errores de control y el error cuadrático de velocidades tienden a cero asintóticamente cuando el tiempo tiende a infinito.
- ✓ Los resultados obtenidos, en cuanto a la realización de tareas autónomas por parte del robot, validan la eficacia de la técnica de Hardware in the Loop, así como el rendimiento de la ley de control. Los errores en estado estacionario en estas pruebas tendieron a cero, tal y como se diseñó.



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 Ingeniera en
Electrónica e Instrumentación**

**HARDWARE IN THE LOOP PARA EL CONTROL AVANZADO MIMO
DE ROBOTS MANIPULADORES MÓVILES**

Autores:

Jorque Rea Byron Stalin

Mollocana Jiménez Jéssica Daniela

Ing. Víctor H. Andaluz, Ph.D. *Tutor*

