



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

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

**CONTROL COLABORATIVO DE ROBOTS MANIPULADORES MÓVILES A
TRAVÉS DE LA TÉCNICA HARDWARE IN THE LOOP**

Autores:

Santo Guanoluisa Luis Fernando
Tandalla Arequipa Richard Michael

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





6TH INTERNATIONAL
CONGRESS

ICICT 2021

February 25 - 26, 2021
London / United Kingdom



Collaborative Control of Mobile Manipulator Robots through the *Hardware in the Loop* Technique

Luis F. Santo, Richard M. Tandalla and
Victor H. Andaluz

Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Sangolquí, Ecuador
{lfsanto, rmtandalla, vhandaluz1}@espe.edu.ec

Abstract. This article aims at designing and implementing the "Hardware in the Loop" (HIL) technique, to evaluate the collaborative control algorithm of two mobile manipulator robots to carry out tasks of movement and manipulation of objects in an industrial environment. The developed control structure is made up of a centralized control algorithm, developed in Matlab mathematical software, which is linked to the HIL system, which contains both the kinematic model and the dynamic model of each robotic system programmed on the Raspberry Pi. To analyze the optimal functioning of the proposed control algorithm, an immersive virtual reality scenario is designed and implemented using the UNITY3D graphic engine, which facilitates interaction with the user.

Keywords: Collaborative Control, Hardware in the Loop, Mobile Manipulator, Virtual Environment



ICICT 2021

International Congress & Excellence Awards



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

1 INTRODUCCIÓN

2 MODELACIÓN

3 ESQUEMAS DE CONTROL

4 HARDWARE IN THE LOOP -VIRTUAL

5 RESULTADOS

6 CONCLUSIONES

1 INTRODUCCIÓN

2 MODELACIÓN

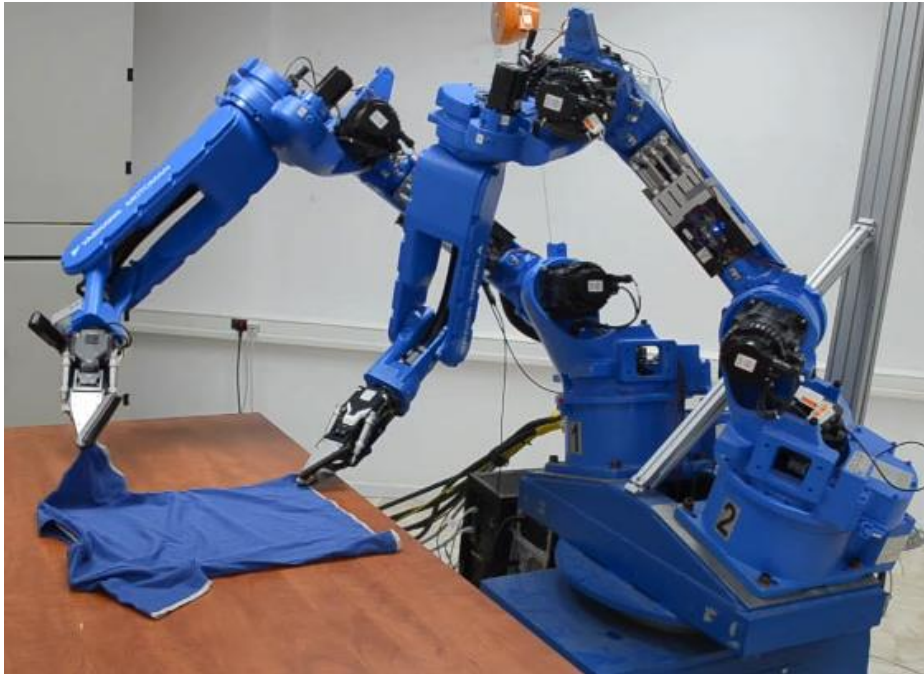
3 ESQUEMAS DE CONTROL

4 HARDWARE IN THE LOOP -VIRTUAL

5 RESULTADOS

6 CONCLUSIONES

Robótica de servicio



- Apoyo en tareas a los seres humanos.
- Trabajos de alto riesgo o repetitivos.
- Sistemas computarizados.

Control Colaborativo

- Comunicación entre dos o mas robots.
- Interacción entre ellos con algoritmos independientes

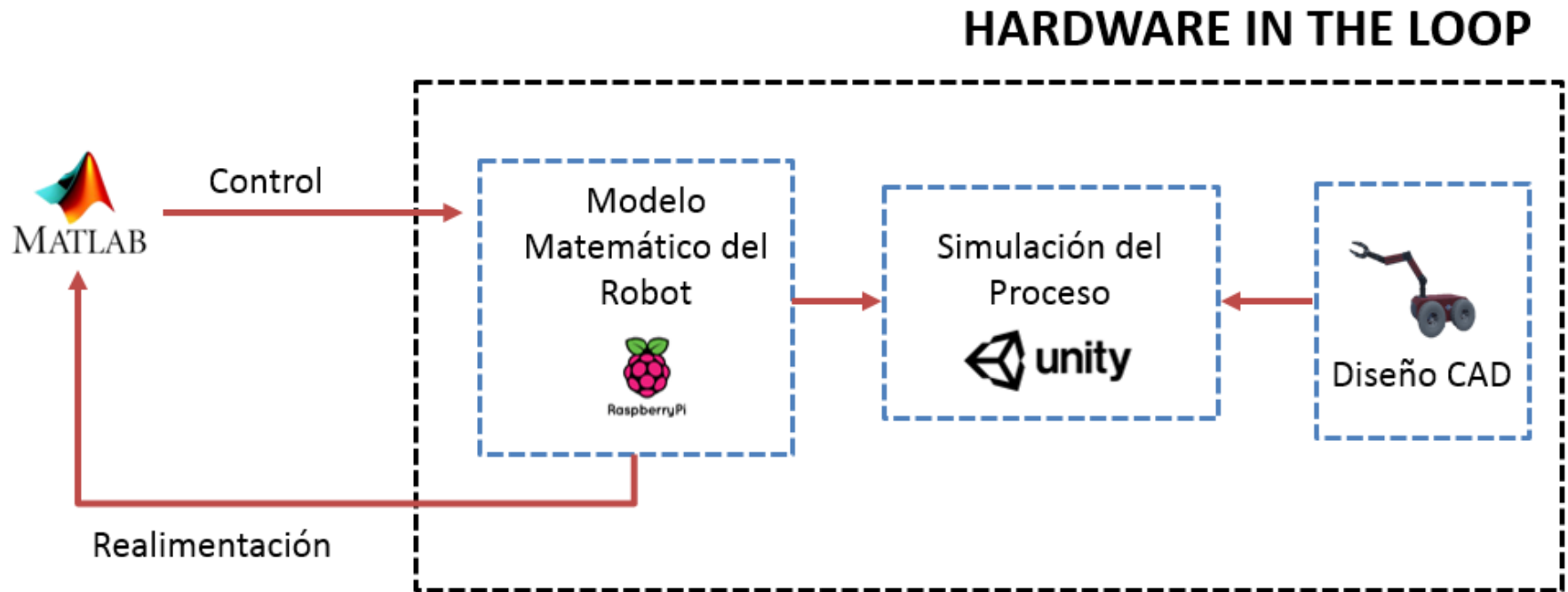


Problemática para la implementación de algoritmos de control colaborativo

- Disponibilidad de equipos.
- Altos costos al adquirir cada robot.



Propuesta



- Implementar la técnica **Hardware-in-the-Loop, HIL**, a fin de evaluar el comportamiento de **esquema de control colaborativo** para el traslado y manipulación de un objeto en común entre dos robots manipuladores móviles.

- **Investigar en las bases de datos científicas** acerca del **control colaborativo de robots**, de la modelación y control, colaborativo de múltiples robots, con el objetivo de proponer un esquema de control autónomo colaborativo, con el propósito de ejecutar tareas de colaboración autónomas.
- Definir las **características y restricciones de movimiento de un robot manipulador móvil** conformado por un brazo robótico de 3 GDL sobre una plataforma móvil tipo unicycle, con el propósito de implementar algoritmos de control avanzado.
- Determinar las **características dinámicas de un robot manipulador móvil** conformado por un brazo robótico de 3 GDL sobre una plataforma móvil tipo unicycle. El modelo matemático deberá considerar como **como señales de entrada la velocidad lineal y velocidad angular** para la plataforma móvil y tres velocidades angulares para el brazo robótico; además, el modelo deberá tener una estructura matricial adecuada, a finde que pueda ser utilizado en esquemas de control avanzado.
- Determinar la **transformación cinemática de la tarea colaborativa** a ser ejecutada por dos robots manipuladores móviles. La tarea colaborativa deberá considerar el movimiento del objeto en los ejes X-Y-Z y una orientación deseada, con respecto a sistema de referencia inercial.

- Desarrollar un **algoritmo de control centralizado**, basado en la técnica de deformación, que permita ejecutar tareas autónomas para el traslado y manipulación de un objeto entre dos robots manipuladores móviles.
- Proponer un **algoritmo de control descentralizado** que permita seguir los movimientos de cada uno de los robots manipuladores móviles, generados por el controlador colaborativo. El desarrollo de los algoritmos de control propuesto deberá considerar la redundancia de los sistemas robóticos, con el propósito de cumplir objetivos secundarios, por ejemplo, evitar puntos de singularidad.
- **Analizar matemáticamente la estabilidad del esquema de control propuesto**, a fin de evaluar el comportamiento de los errores de control.
- Implementar el esquema de **control propuesto** a través de la **técnica de Hardware in the Loop, HIL**, considerando los modelos cinemáticos y dinámicos obtenidos de cada uno de los manipuladores móviles.
- Desarrollar un **HMI** que permita **evaluar los errores de control**, como a su vez la recreación de la tarea colaborativa ejecutada por los robots manipuladores móviles.

1 INTRODUCCIÓN

2 MODELACIÓN

3 ESQUEMAS DE CONTROL

4 HARDWARE IN THE LOOP -VIRTUAL

5 RESULTADOS

6 CONCLUSIONES

La configuración del robot manipulador móvil definida por:

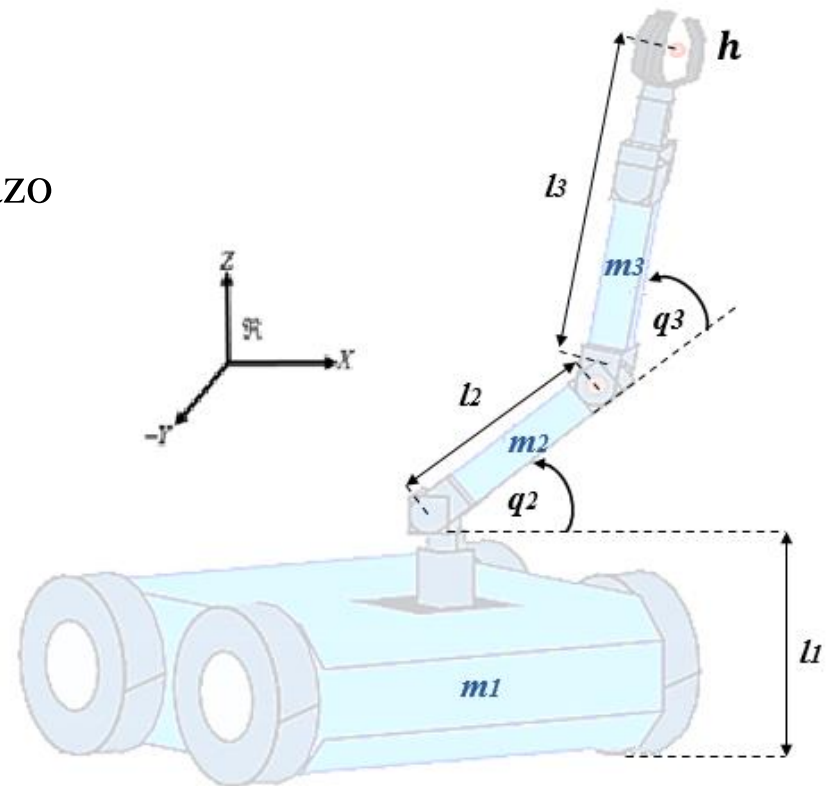
$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_a & q_p \end{bmatrix}$$

- q_a • Coordenadas generalizadas del brazo robótico.
- q_p • Coordenadas generalizadas de la plataforma móvil.

Ubicación del efector final \mathbf{h}

$$f : N_a \times M_p$$

$$(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_p) \rightarrow \mathbf{h} = f(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_p)$$



El modelo cinemático instantáneo

Proporciona la derivada de la ubicación de su efector final en función de las derivadas tanto de la configuración del brazo robótico como de la ubicación de la plataforma móvil,

$$\dot{\mathbf{h}}(t) = \frac{\partial f}{\partial \mathbf{q}}(\mathbf{q}_a, \mathbf{q}_p) \mathbf{v}(t)$$

$\dot{\mathbf{h}}$ • Vector velocidad del efector final

\mathbf{v} • Vector de control de la movilidad del manipulador móvil.

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

$\mathbf{\Gamma}(\mathbf{q})$ • Matriz jacobiana que define un mapeo lineal entre $\mathbf{v}(t)$ y $\dot{\mathbf{h}}(t)$

Se desarrolla a partir de la propuesta de Euler-Lagrange, con del balance de energías:

$$L = K - P$$

Aplicando
$$f_i(t) = \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\mathbf{q}}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial \mathbf{q}_i}$$

Agrupando, obtenemos el modelo matricial

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



- $\mathbf{f}(t)$ • Contiene las fuerzas producidas por el robot según el sistema de referencia.
- \mathbf{q} • Vector de coordenadas generalizadas
- \mathbf{v} • Vector de velocidad
- \mathbf{M} • Matriz simétrica de Inercia del sistema
- \mathbf{C} • Matriz de fuerzas centrífugas y centrípetas del sistema
- \mathbf{g} • Fuerzas gravitacionales

Teniendo como señales de control las velocidades de referencia del sistema, el modelo cinemático puede representarse como:

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

1 INTRODUCCIÓN

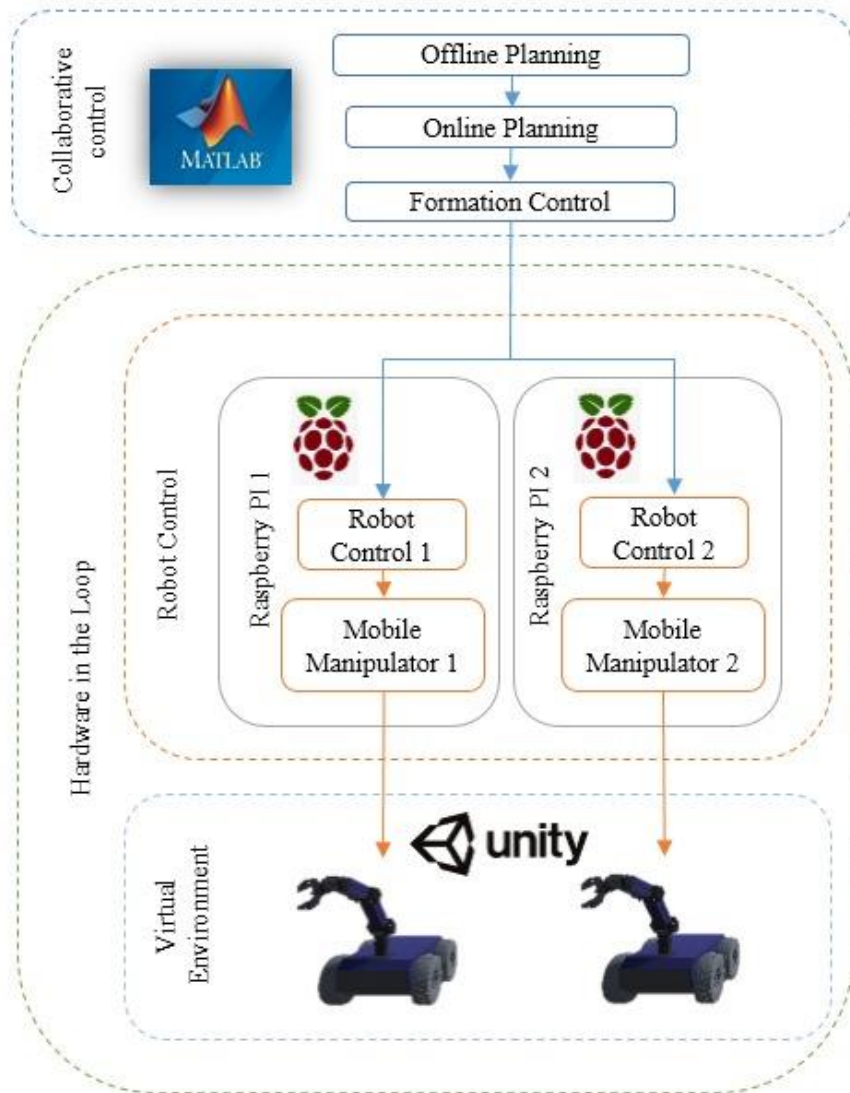
2 MODELACIÓN

3 ESQUEMAS DE CONTROL

4 HARDWARE IN THE LOOP -VIRTUAL

5 RESULTADOS

6 CONCLUSIONES



La capa de **planificación Off-line**

- Establece las condiciones iniciales
- Genera la trayectoria del objeto

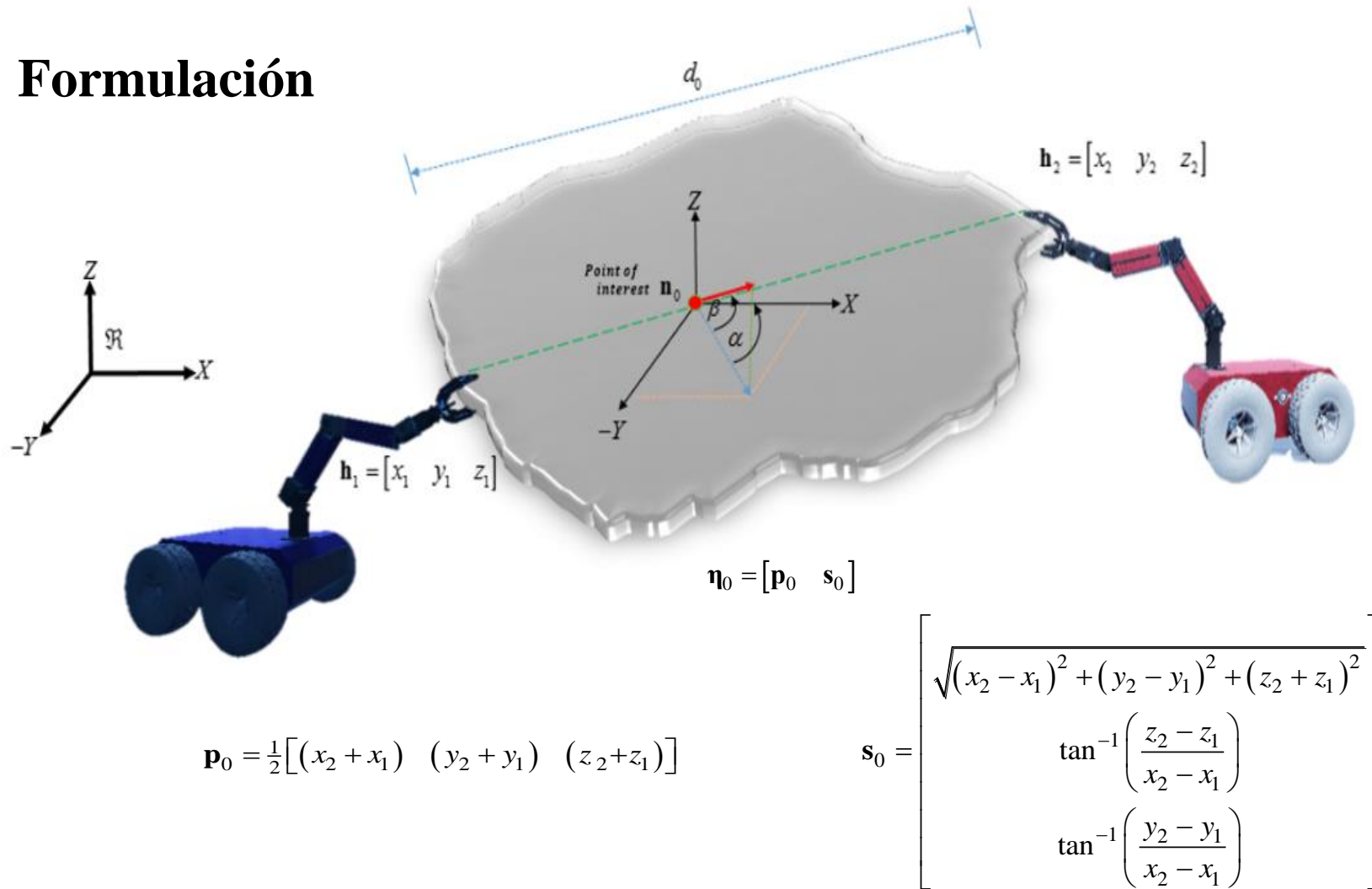
La capa de **Planificación On-line**

- Cambia las referencias para hacer que la formación reaccione al entorno

La capa de **Control de Formación**

- Genera las señales de control que se enviarán a los robots.
- Alcanza los valores deseados establecidos por las capas de planificación.

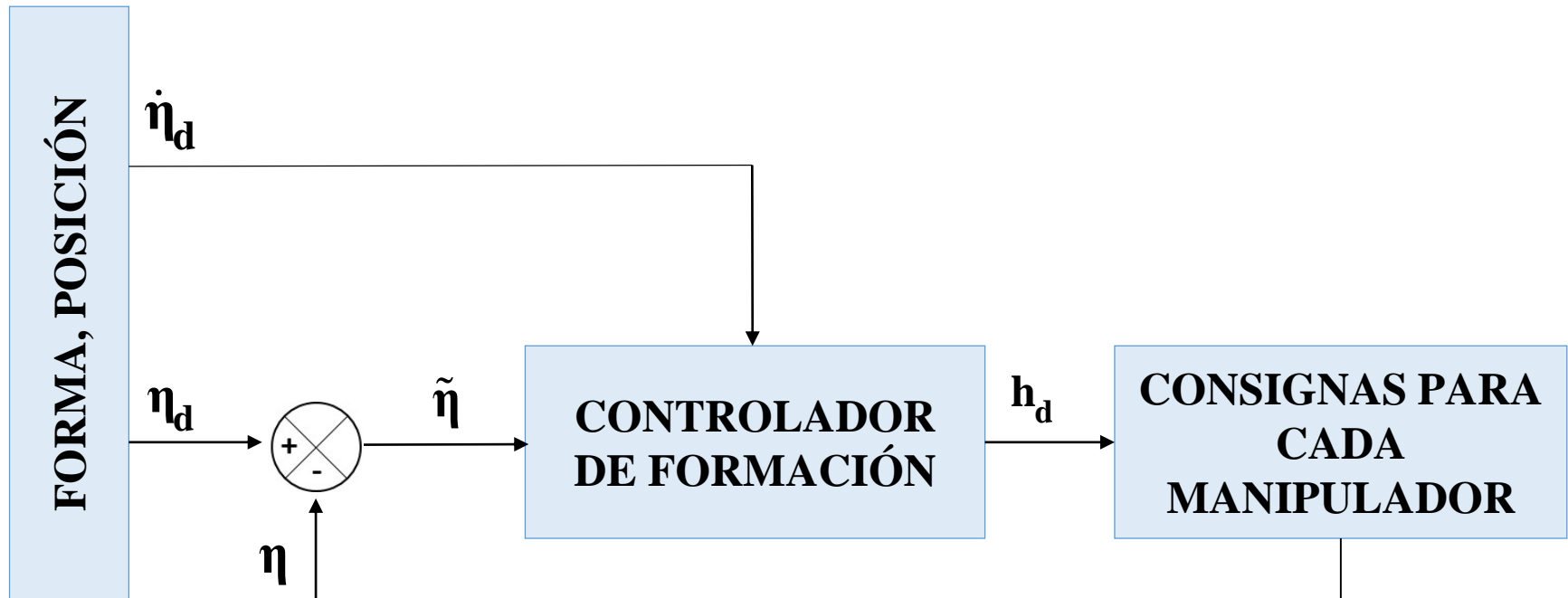
Formulación



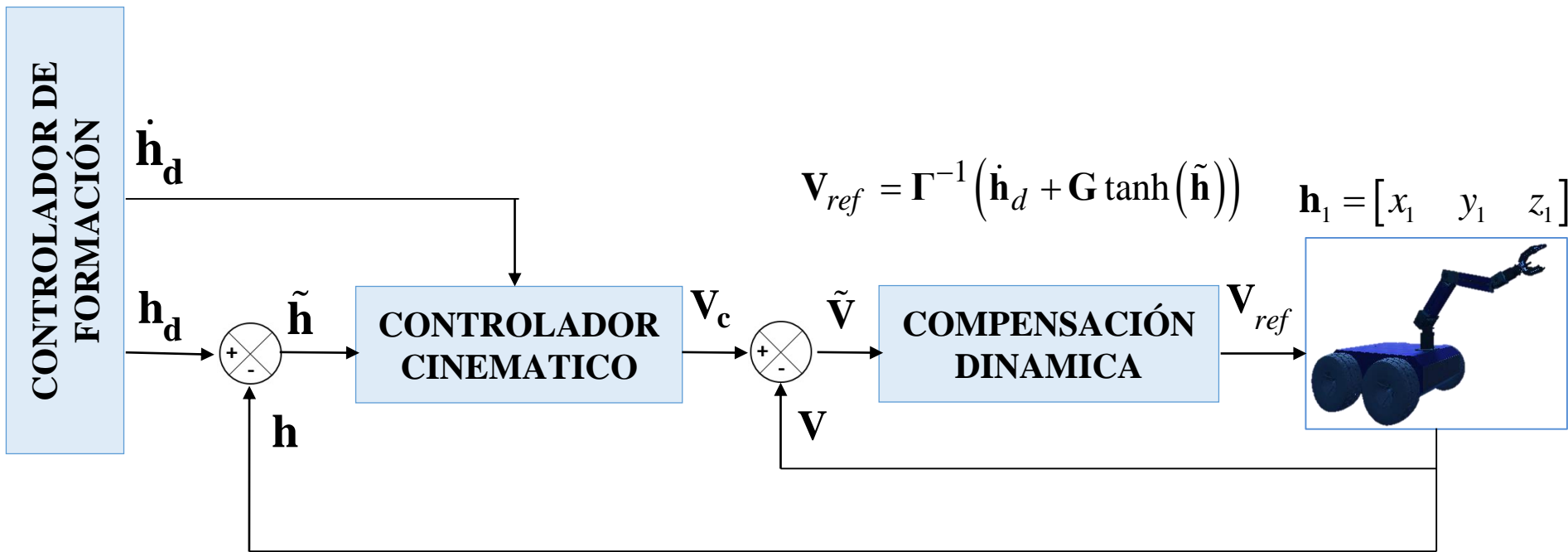
Control Deslizante

CONTROLADOR

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



Control del Manipulador



Con las posiciones deseadas obtenidas a partir de las velocidades emitidas por el controlador centralizado

$$\mathbf{h}_d = \begin{bmatrix} h_{xd} & h_{yd} & h_{zd} \end{bmatrix}$$

Y sus variaciones deseadas $\dot{\mathbf{h}}_d = \begin{bmatrix} \dot{h}_{xd} & \dot{h}_{yd} & \dot{h}_{zd} \end{bmatrix}$

De forma que el error queda definido $\tilde{\mathbf{h}}(t) = \mathbf{h}_d(t) - \mathbf{h}(t)$

Teniendo en cuenta la derivación se define como $\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}}$

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

$$\mathbf{V}(\tilde{\mathbf{h}}) = \frac{1}{2} \tilde{\mathbf{h}}^T \tilde{\mathbf{h}} > 0$$

Teniendo en cuenta la primera derivada y sustituyendo $\dot{\tilde{\mathbf{h}}} = \dot{\mathbf{h}}_d - \dot{\mathbf{h}}$

Considerando que $\dot{\mathbf{h}} = \mathbf{\Gamma} \mathbf{v}$

Así, la ley de control para el i-ésimo manipulador móvil se define como,

$$\mathbf{v} = \mathbf{\Gamma}^{-1} (\dot{\mathbf{h}}_d + \mathbf{G} \tanh(\tilde{\mathbf{h}}))$$

Derivando la ecuación.

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

Lo que lleva a decir que el punto de equilibrio es asintóticamente estable, por lo tanto el error de posición $\tilde{\mathbf{h}}(t) \rightarrow 0$ el punto de interés

1 INTRODUCCIÓN

2 MODELACIÓN

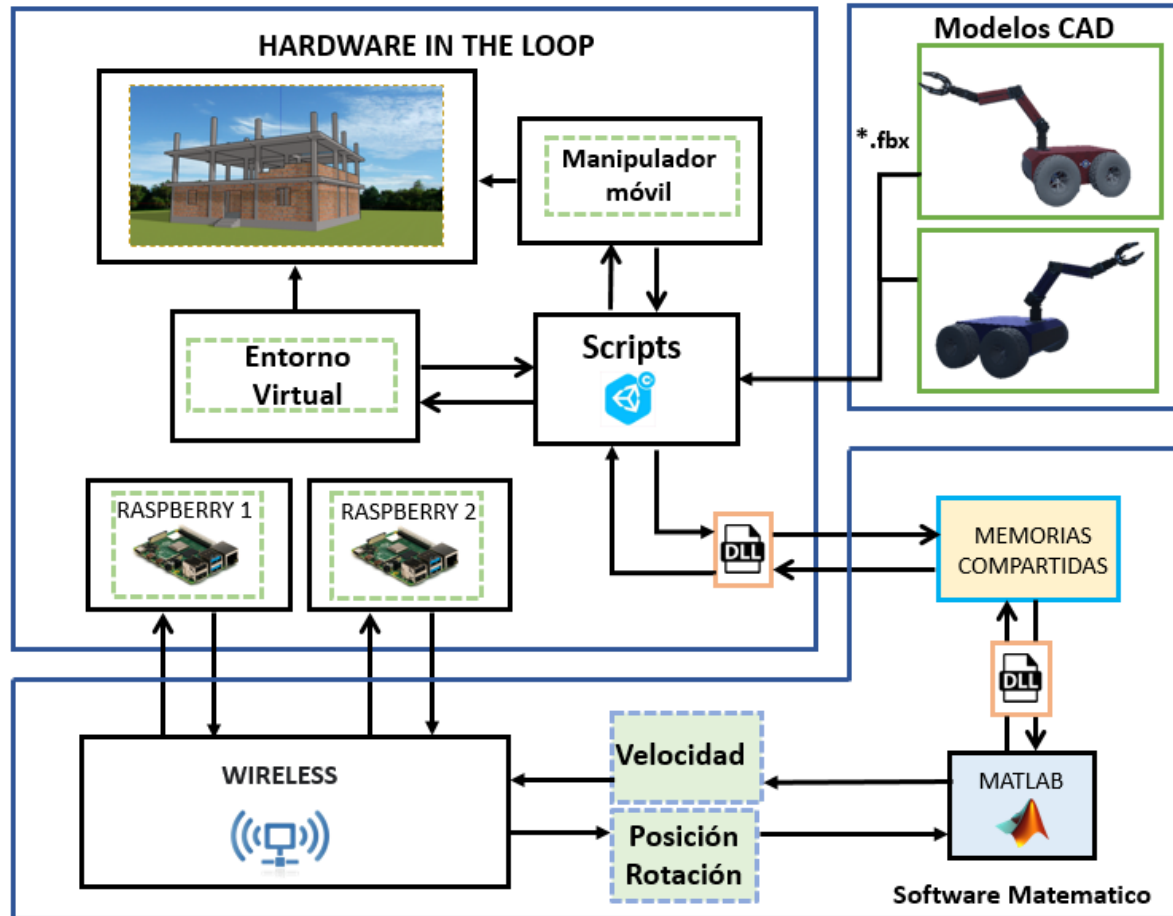
3 ESQUEMAS DE CONTROL

4 **HARDWARE IN THE LOOP - VIRTUAL**

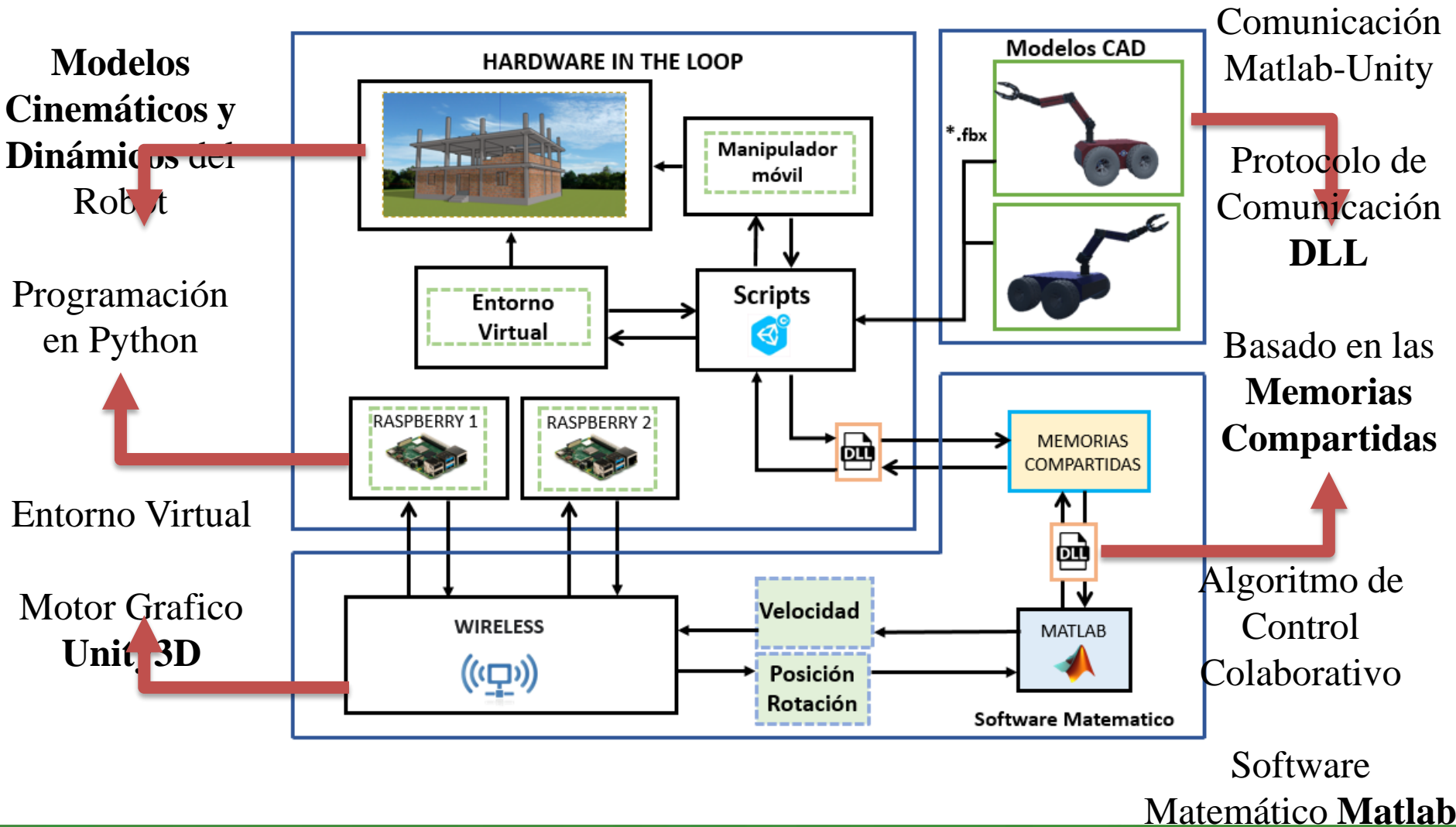
5 RESULTADOS

6 CONCLUSIONES

ESTRUCTURA VIRTUAL DEL SISTEMA



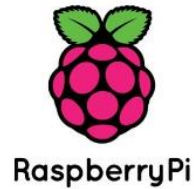
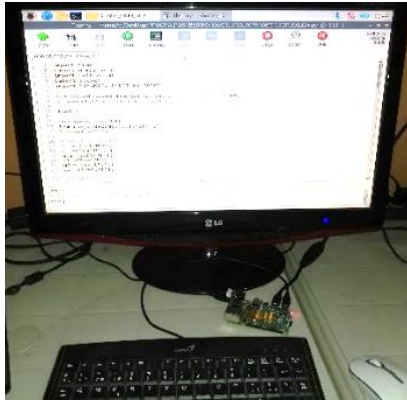
ESTRUCTURA VIRTUAL DEL SISTEMA



INDUSTRIAL SIMULADO (CONSTRUCCIÓN)

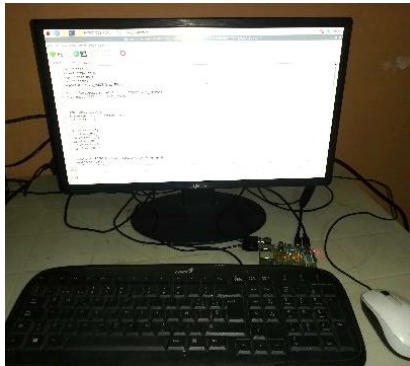


ROBOT 1



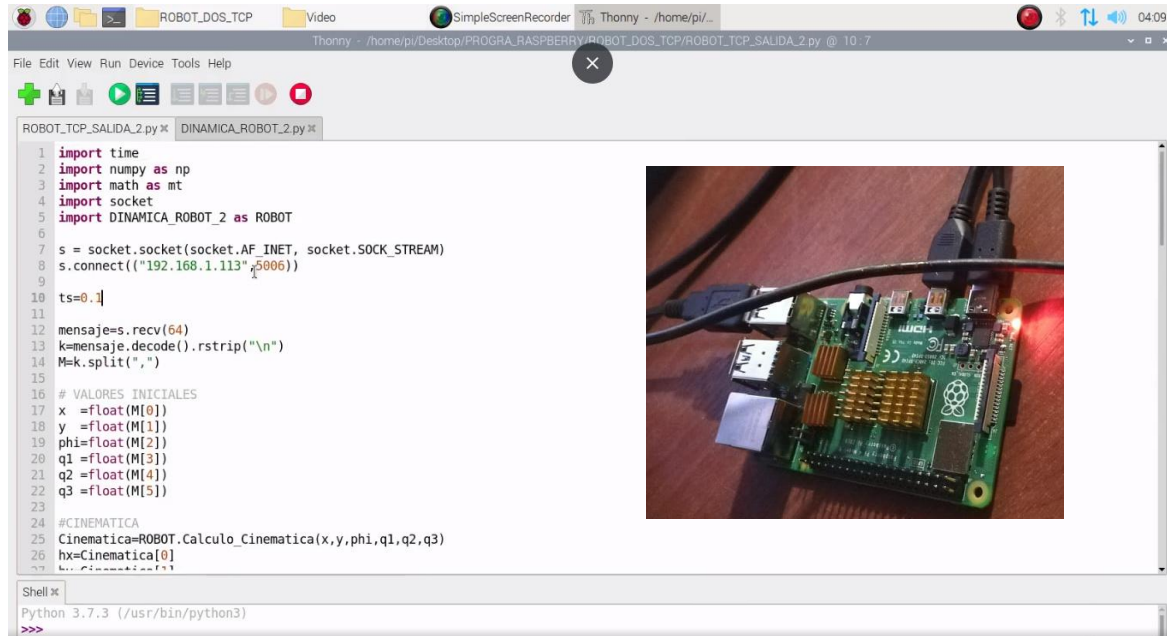
RaspberryPi

ROBOT 2



python

Programación en Python de los modelos matemáticos



```
ROBOT_TCP_SALIDA_2.py x  DINAMICA_ROBOT_2.py x
1 import time
2 import numpy as np
3 import math as mt
4 import socket
5 import DINAMICA_ROBOT_2 as ROBOT
6
7 s = socket.socket(socket.AF_INET, socket.SOCK_STREAM)
8 s.connect(("192.168.1.113",5006))
9
10 ts=0.1
11
12 mensaje=s.recv(64)
13 k=mensaje.decode().rstrip("\n")
14 M=k.split(",")
15
16 # VALORES INICIALES
17 x =float(M[0])
18 y =float(M[1])
19 phi=float(M[2])
20 q1 =float(M[3])
21 q2 =float(M[4])
22 q3 =float(M[5])
23
24 #CINEMATICA
25 Cinematica=ROBOT.Calculo_Cinematica(x,y,phi,q1,q2,q3)
26 hx=Cinematica[0]
27
Shell x
Python 3.7.3 (/usr/bin/python3)
>>>
```



1 INTRODUCCIÓN

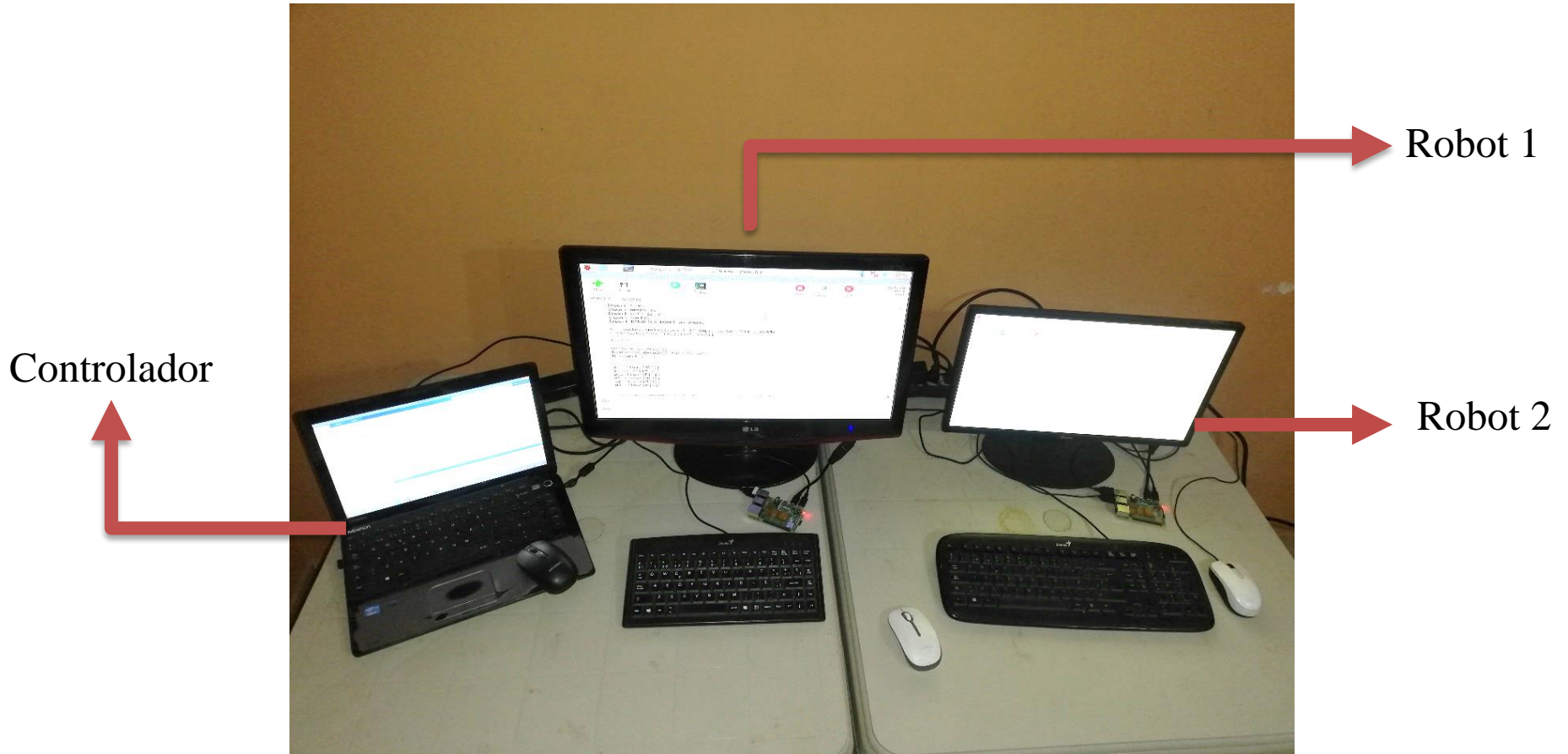
2 MODELACIÓN

3 ESQUEMAS DE CONTROL

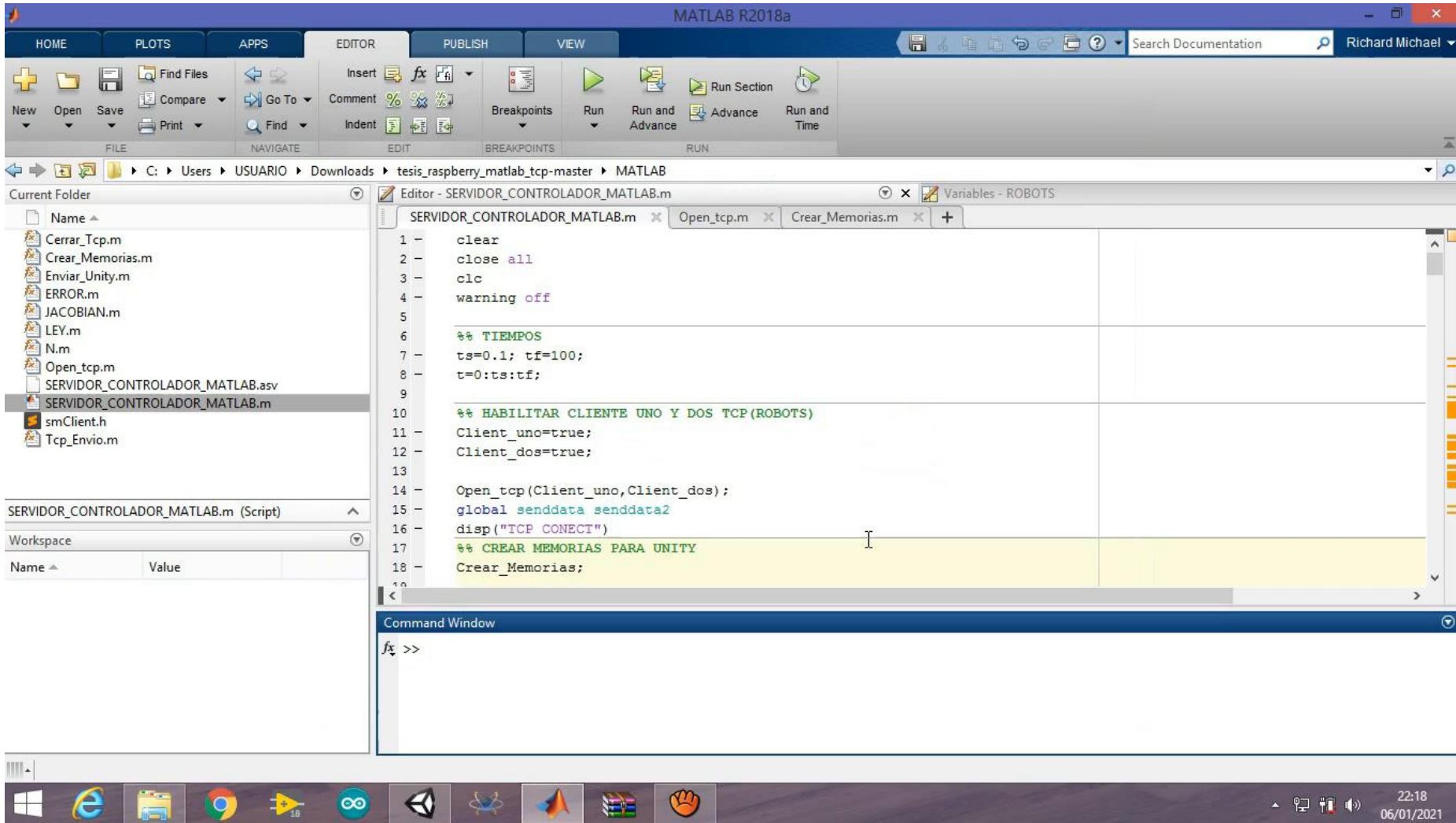
4 HARDWARE IN THE LOOP -VIRTUAL

5 RESULTADOS

6 CONCLUSIONES



VIDEO DEL FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

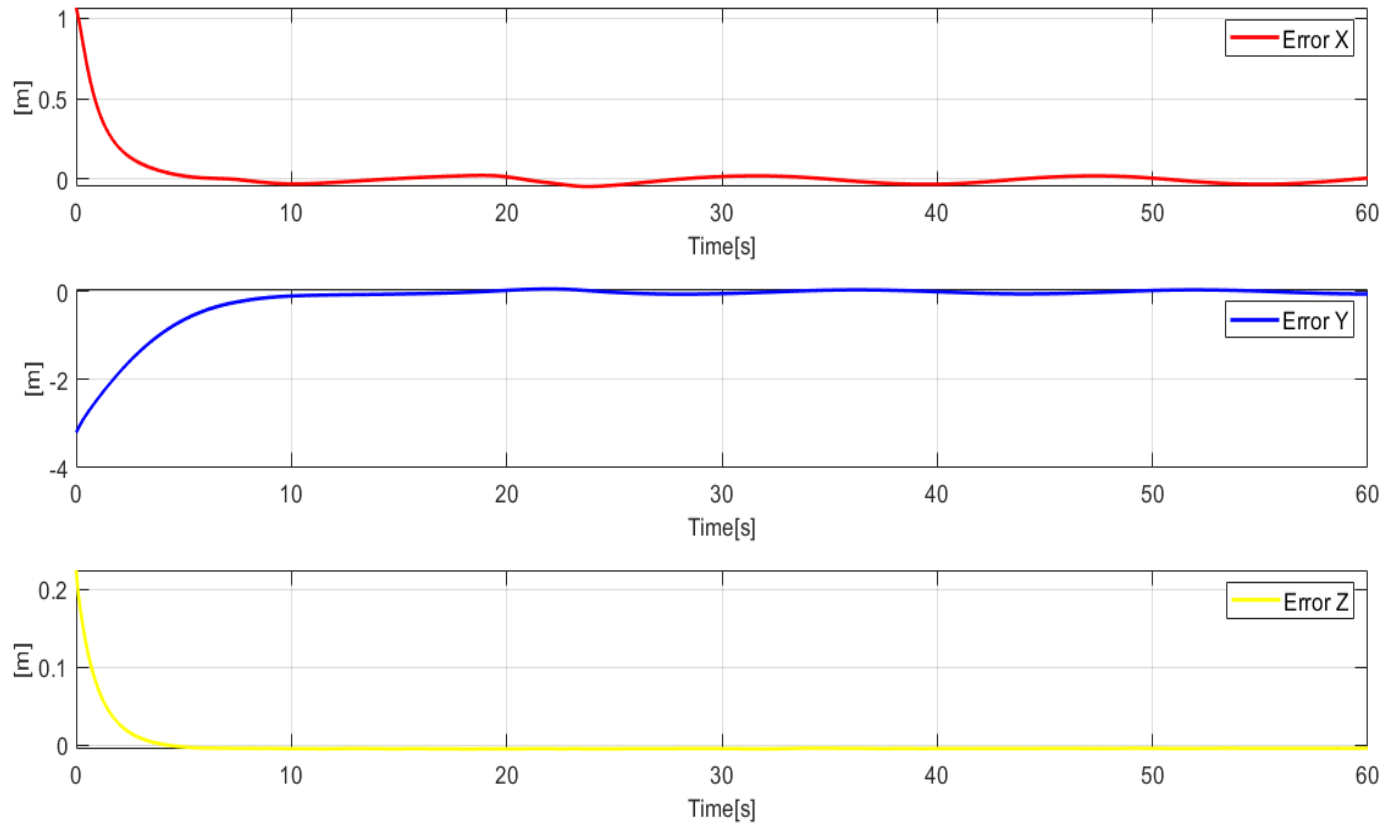


The image displays the MATLAB R2018a software interface. The main window shows a script editor with the following code:

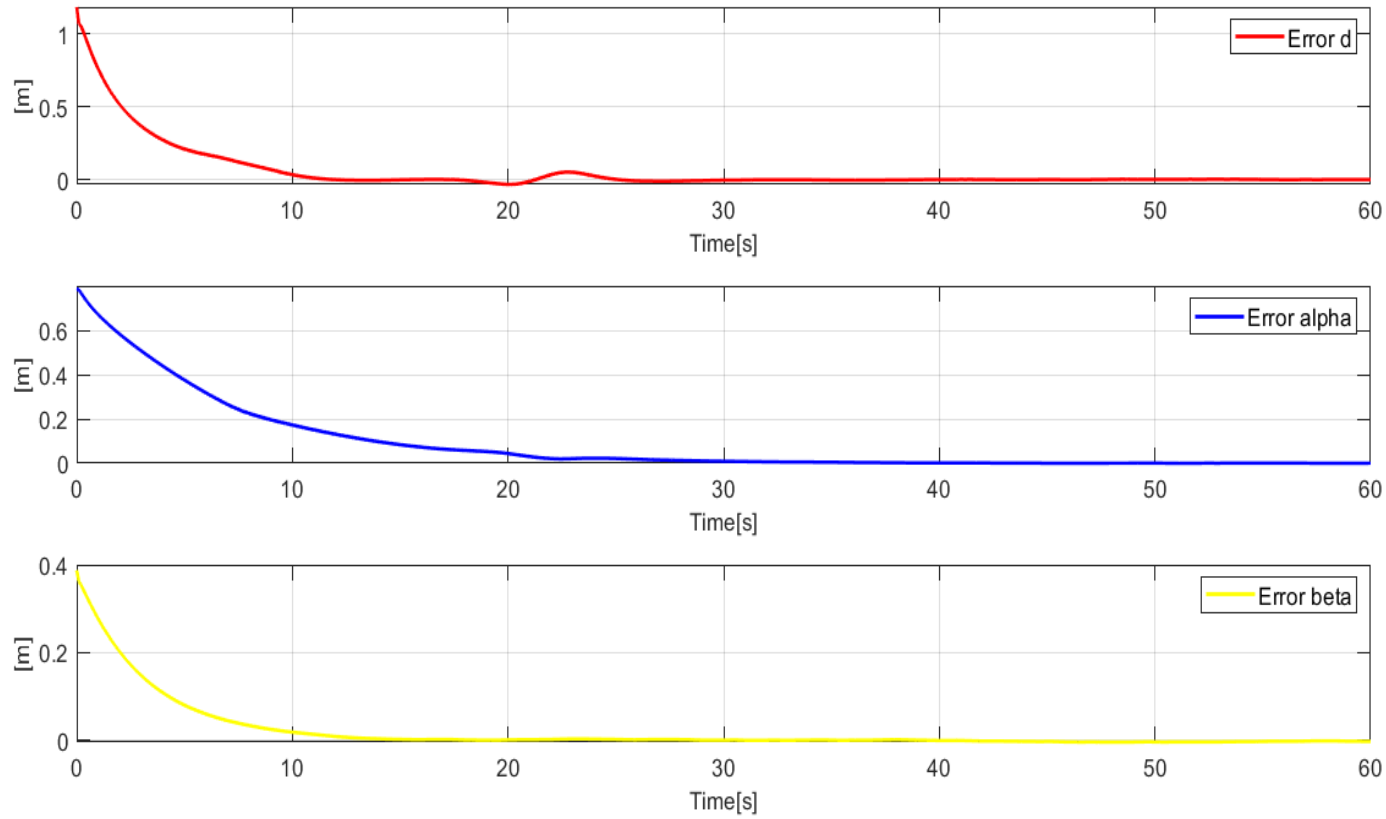
```
1 - clear
2 - close all
3 - clc
4 - warning off
5
6 %% TIEMPOS
7 - ts=0.1; tf=100;
8 - t=0:ts:tf;
9
10 %% HABILITAR CLIENTE UNO Y DOS TCP(ROBOTS)
11 Client_uno=true;
12 Client_dos=true;
13
14 Open_tcp(Client_uno,Client_dos);
15 global senddata senddata2
16 disp("TCP CONECT")
17 %% CREAR MEMORIAS PARA UNITY
18 Crear_Memorias;
```

The Command Window at the bottom shows the prompt `fx >>`. The left sidebar shows the current folder structure, including files like `Cerrar_Tcp.m`, `Crear_Memorias.m`, and `SERVIDOR_CONTROLADOR_MATLAB.m`. The workspace is currently empty.

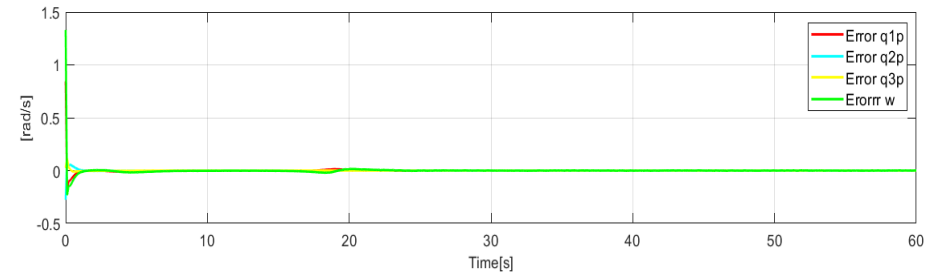
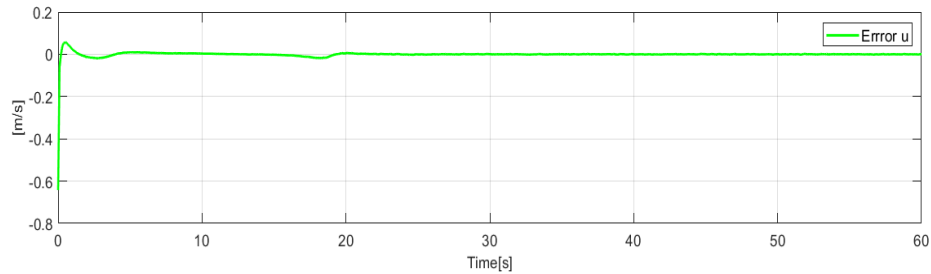
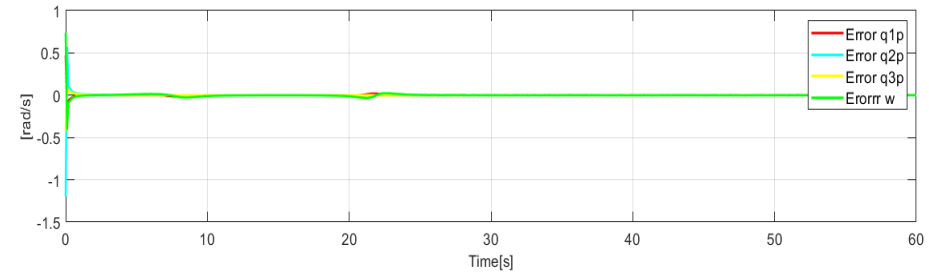
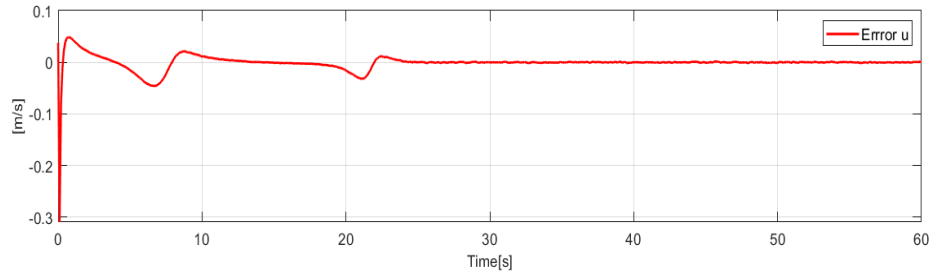
ERRORES DE POSICIÓN



ERRORES DE FORMA



VELOCIDAD EN CADA ROBOT MANIPULADOR MÓVIL



TRAYECTORIA DESEADA VS TRAYECTORIA OBTENIDA



1 INTRODUCCIÓN

2 MODELACIÓN

3 ESQUEMAS DE CONTROL

4 HARDWARE IN THE LOOP -VIRTUAL

5 RESULTADOS

6 CONCLUSIONES

- En la actualidad, el uso de robots para realiza tareas de alto riesgo supliendo a los humanos es mas frecuente, lo cual conlleva a buscar nuevos algoritmos de control avanzados que asegure el correcto funcionamiento de los robots.
- Un entorno virtual permite emular de una manera real robots sin costo elevado de implementación, pero con un costo de sistema informático.
- Con las pruebas desarrolladas a través del uso del sistema Hardware in the Loop fue posible verificar y evaluar el algoritmo de control implementado, demostrando la validez del controlador en el cumplimiento de la tarea establecida.
- En el desarrollo de este proyecto se hace evidente la flexibilidad que se obtiene al utilizar un sistema HIL, ya que permite crear sistemas eficientes con buen rendimiento a un costo mucho menor que el habitual en la industria actual.



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS – ESPE

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA E INSTRUMENTACIÓN

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

CONTROL COLABORATIVO DE ROBOTS MANIPULADORES MÓVILES A TRAVÉS DE LA TÉCNICA HARDWARE IN THE LOOP

Autores:

Santo Guanoluisa Luis Fernando
Tandalla Arequipa Richard Michael

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

