



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL TIPO
DIFERENCIAL DIDÁCTICO PARA APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE
CONTROL BASADO EN ALGORITMOS TRADICIONALES E
INTELIGENTES EN EL LABORATORIO DE LA CARRERA INGENIERÍA
MECATRÓNICA DE LA UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
ESPE SEDE LATACUNGA”**

DEPARTAMENTO DE CIENCIA DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO EN MECATRÓNICA**

Autores:

Macas Llamuca, Johan Enrique
Recalde Simancas, Luis Fernando

Director:

Ing. Constante Prócel, Patricia Nataly



RESUMEN

Este trabajo se basa en el diseño y construcción de un robot móvil tipo diferencial, el cual será usado como módulo de pruebas de algoritmos de control tradicionales e inteligentes. El robot móvil fue diseñado para que pueda transportar hasta 1 kg y se utilizó Ros como sistema de comunicación entre el robot y la el computador encargado de ejecutar los algoritmos. Los algoritmos de control tradicionales que fueron implementados son: (1) Control proporcional basado en el modelo, (2) Control predictivo basado en el modelo y los controladores inteligentes son: (1) Controlador Proporcional Derivativo adaptativo basado en lógica difusa y (2) Controlador P adaptativo basado en redes neuronales artificiales.

Finalmente, para un mejor uso del sistema se desarrolló una interfaz de usuario donde, el operario puede seleccionar de forma sencilla entre los distintos tipos de controladores.

Planteamiento del problema

Problemas:

- Las plantas industriales modernas y los productos tecnológicos a menudo requieren realizar tareas complejas con alta precisión, en condiciones no muy bien definidas, donde los algoritmos de control cumplen el rol central
- Las técnicas de control tradicionales pueden no ser bastante efectivas en estos sistemas modernos, mientras que las técnicas de control inteligentes tienen un tremendo potencial.
- Alta demanda existente en la carrera, requiere un mayor número de estaciones para realizar prácticas en donde puedan aplicar distintas técnicas de control tradicionales e inteligentes.
- Los robots móviles son sistemas donde se pueden aplicar distintas técnicas de control, son un foco importante de investigaciones modernas y es muy importante que cada universidad tenga uno o más módulos.

Objetivos

Objetivo General:

- Diseñar y construir un robot móvil tipo diferencial didáctico para aplicación de técnicas de control basado en algoritmos tradicionales e inteligentes en el Laboratorio de la carrera Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.

Objetivos

Objetivos específicos:

- Investigar el estado actual de la tecnología basado en la recolección de información a través de publicaciones e información técnica de los robots móviles para obtener parámetros de diseño.
- Diseñar la estructura, dimensionando y seleccionando materiales de forma adecuada el cual permita trasladar un kilogramo de peso.
- Modelar el robot móvil diferencial considerando el centro de masa de la plataforma como punto de interés para la obtención de la representación matemática del sistema
- Desarrollar los esquemas de control basados en algoritmos tradicionales e inteligentes para tareas de navegación autónoma y transporte de un robot móvil en espacios de trabajos parcialmente estructurados
- Validar la hipótesis a través de pruebas experimentales virtuales y reales con el objetivo de comprobar el desempeño de los algoritmos de control propuestos.

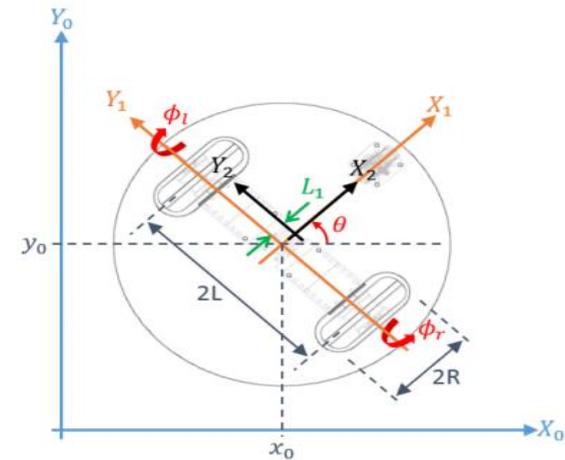
MARCO TEÓRICO

Robótica Móvil



E-puck para investigación de robótica de enjambre

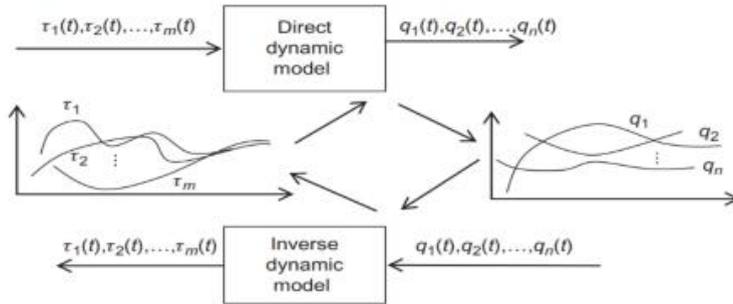
Robot móvil tracción diferencial



Robot móvil de configuración diferencial

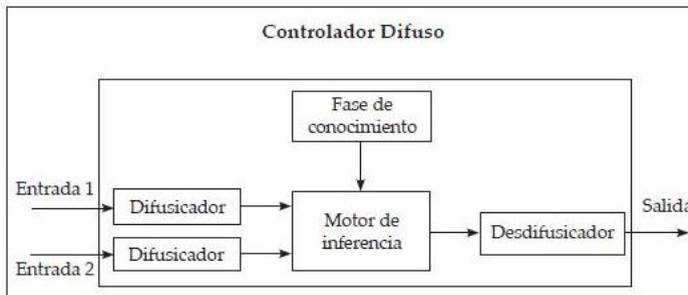
MARCO TEÓRICO

Dinámica



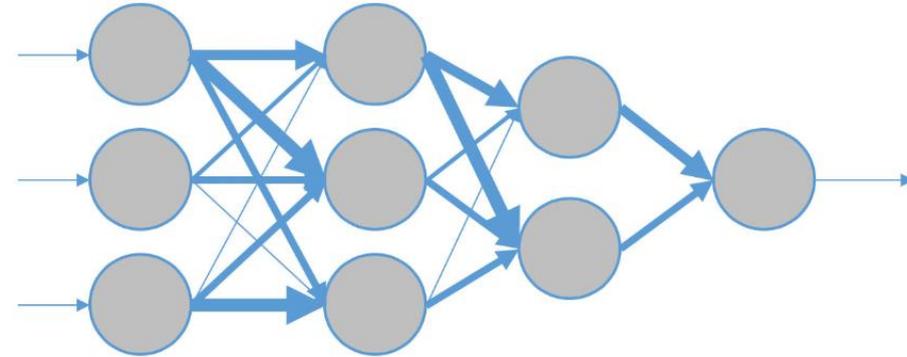
Dinámica directa e inversa

Lógica difusa



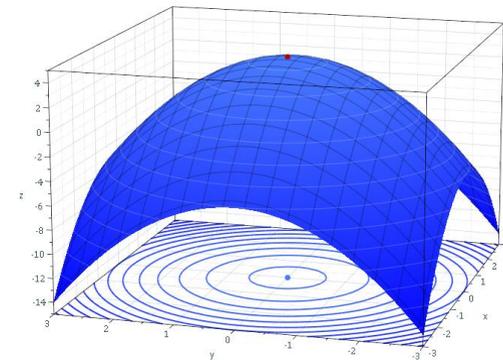
Control Mediante Lógica Difusa

Redes Neuronales



Esquema red neuronal artificial

Optimización



Máximo de una función

MARCO TEÓRICO

Microprocesador



Raspberry pi 3 +

Microcontrolador y Unidad de medición inercial



Open Cr

Sensor Lidar



Lidar HLS-LFCD2

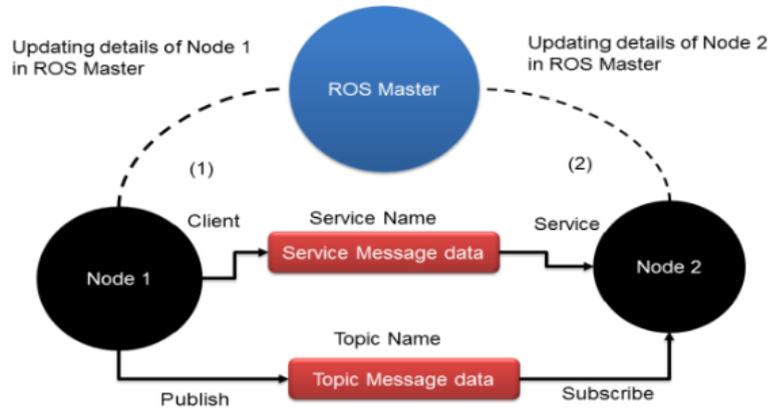
Motores



Dynamixel XL 430

MARCO TEÓRICO

Sistema comunicación



Comunicación entre nodos y master ROS

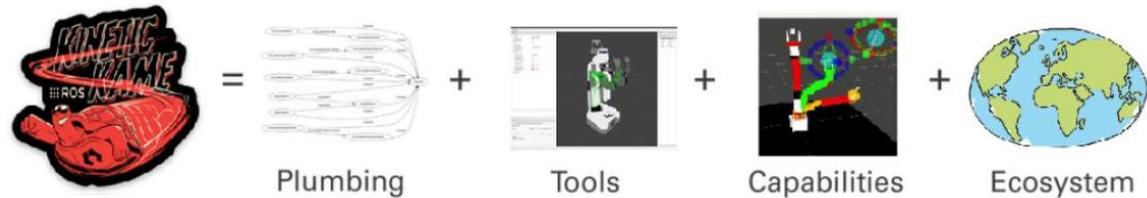
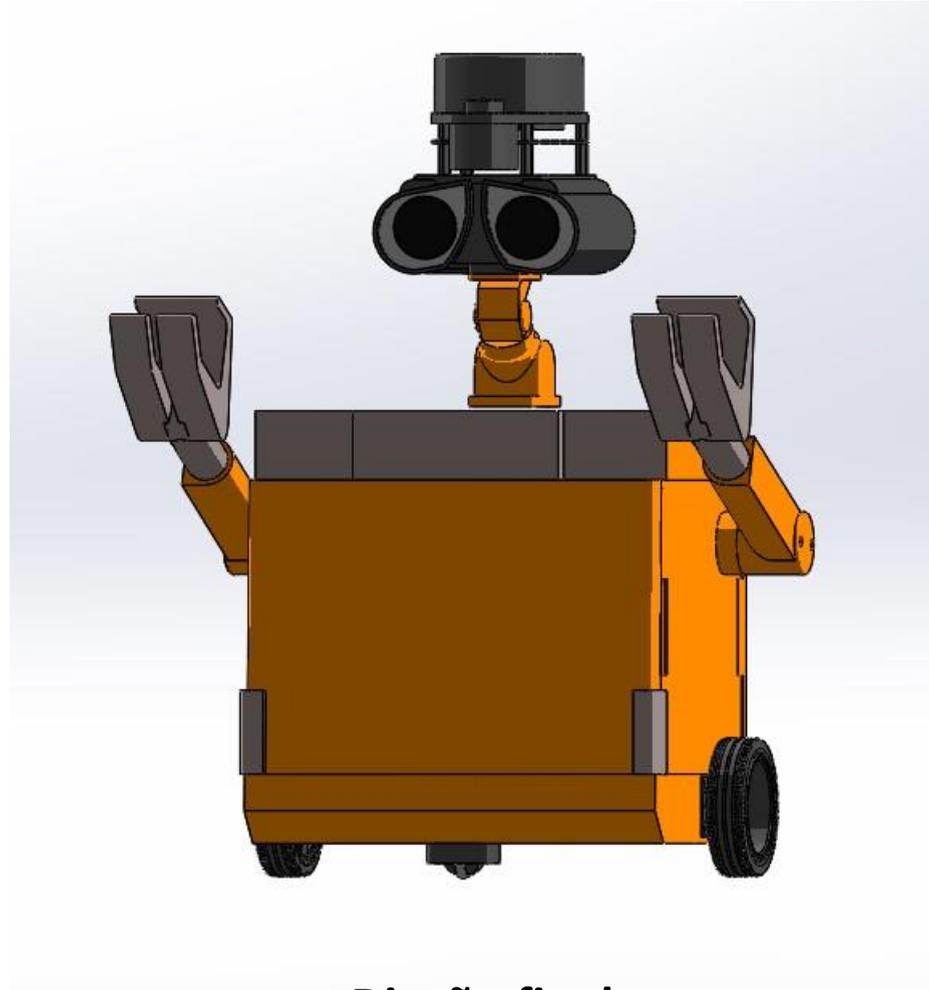


Diagrama de ROS

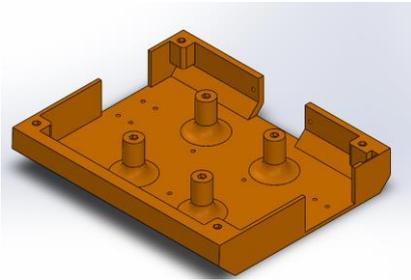
DISEÑO



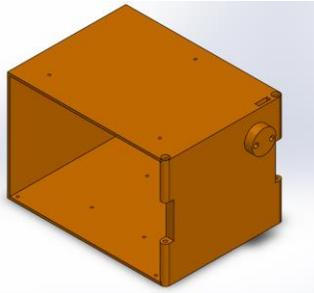
Diseño final

DISEÑO

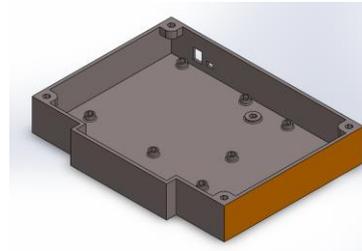
Partes del robot



Base 1



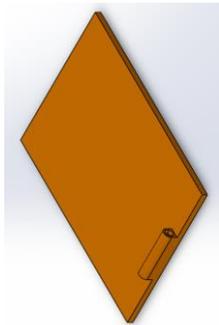
Base 2



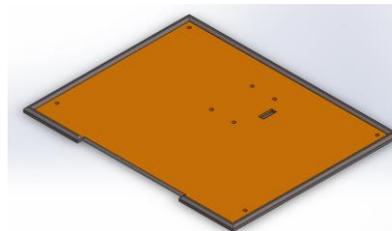
Base 3



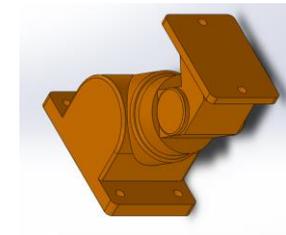
Soporte Sensor Lidar



Tapa Posterior



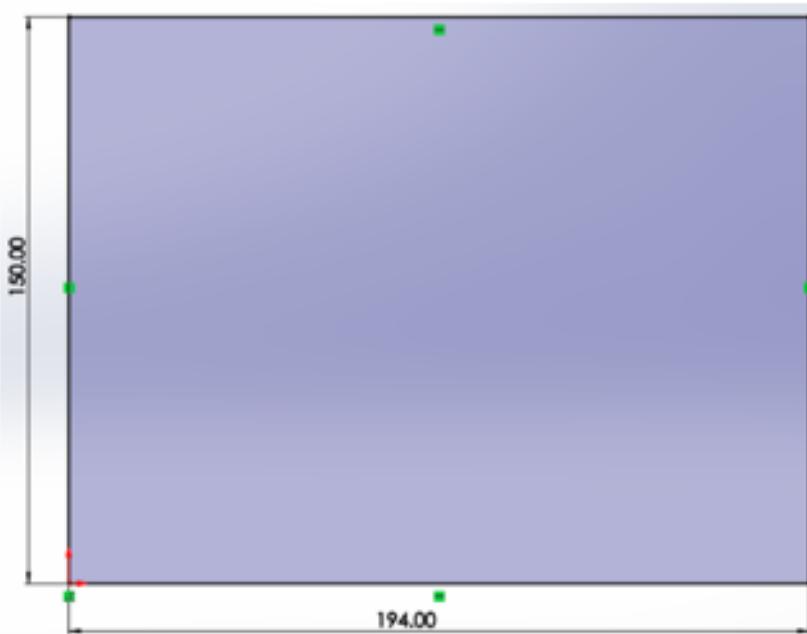
Tapa Superior



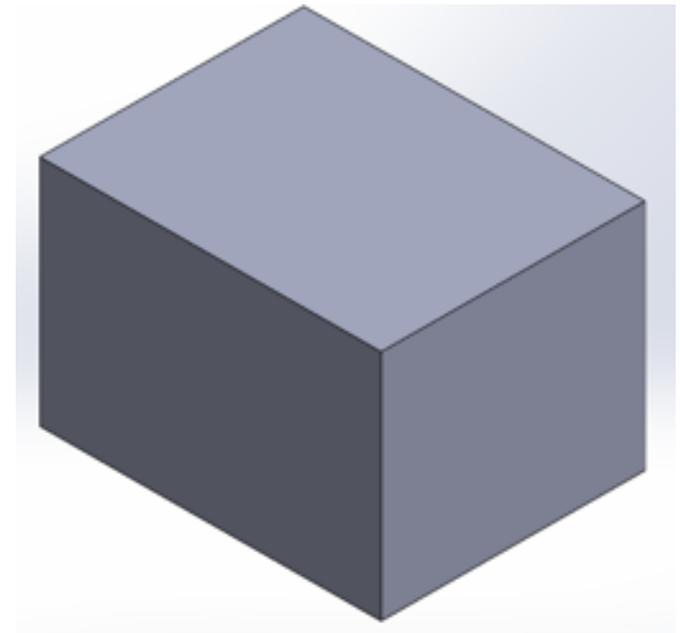
**Sujetador soporte sensor
Lidar**

DISEÑO

Dimensiones del espacio de carga



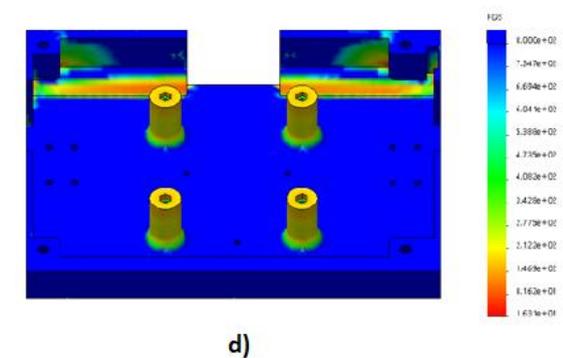
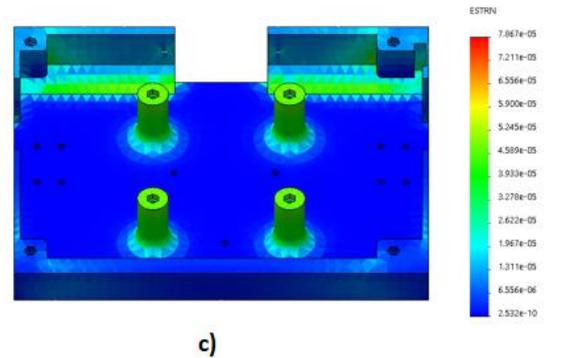
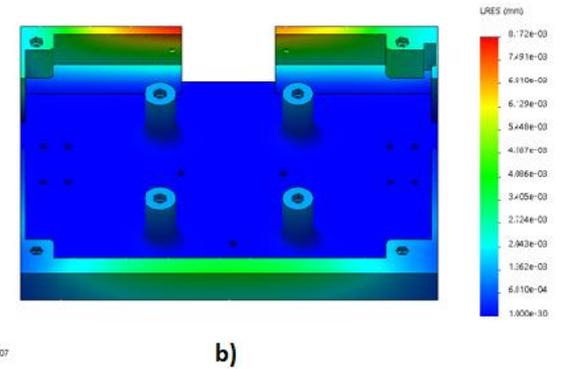
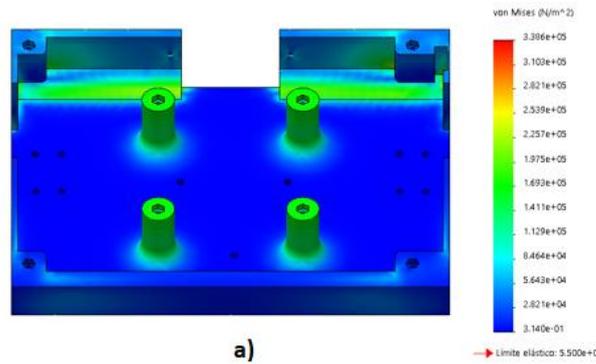
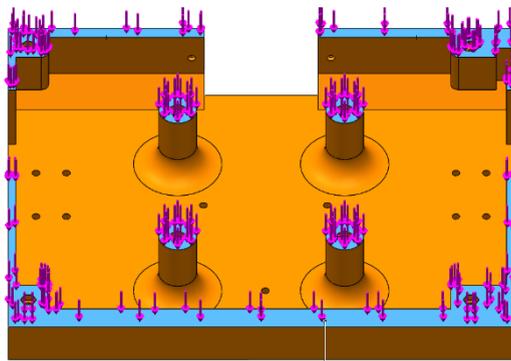
Boceto 2D



Boceto 3D

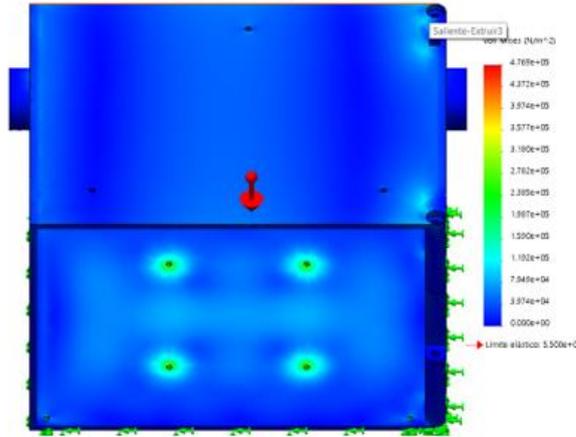
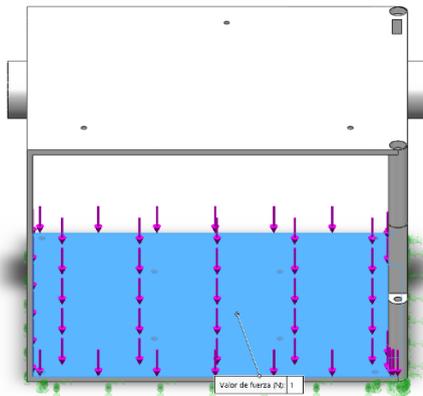
ANÁLISIS ESTÁTICO

Base 1

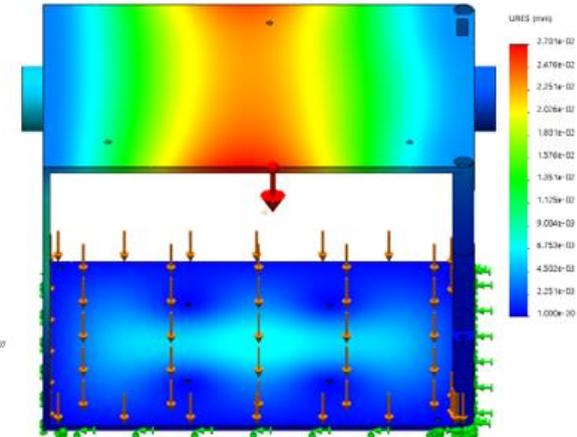


ANÁLISIS ESTÁTICO

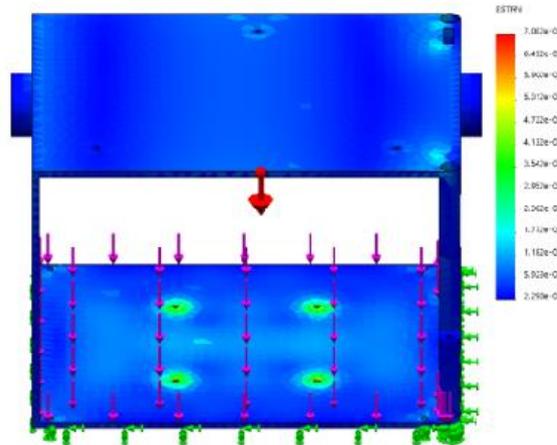
Base 2



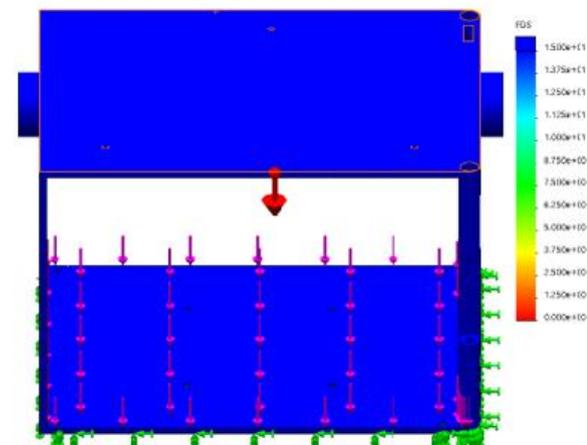
a)



b)



c)



d)

CONSTRUCCIÓN

Construcción del prototipo



Base 1



Base 2



Tapa Delantera



Brazos del robot



Base 3



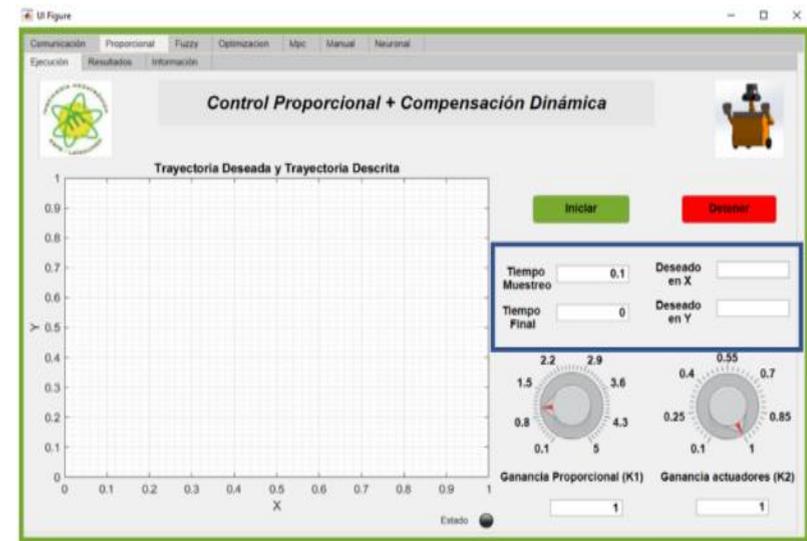
Sensor Lidar

Interfaz usuario

Menú conexión

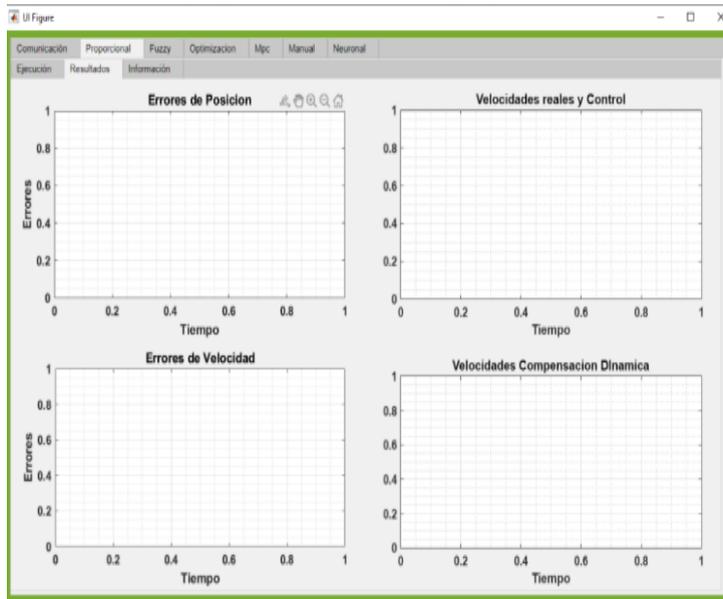


Menú Controlador

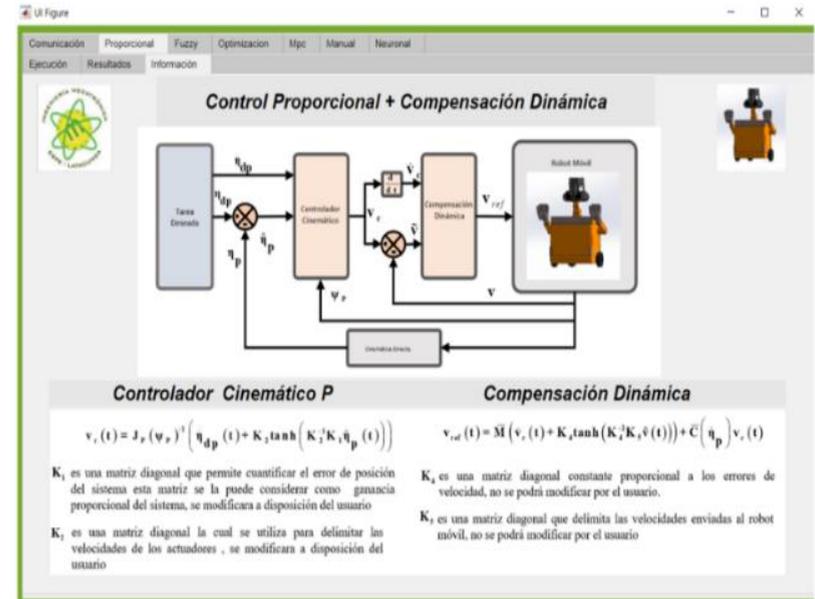


Interfaz usuario

Menú resultados



Menú Información



Simulador

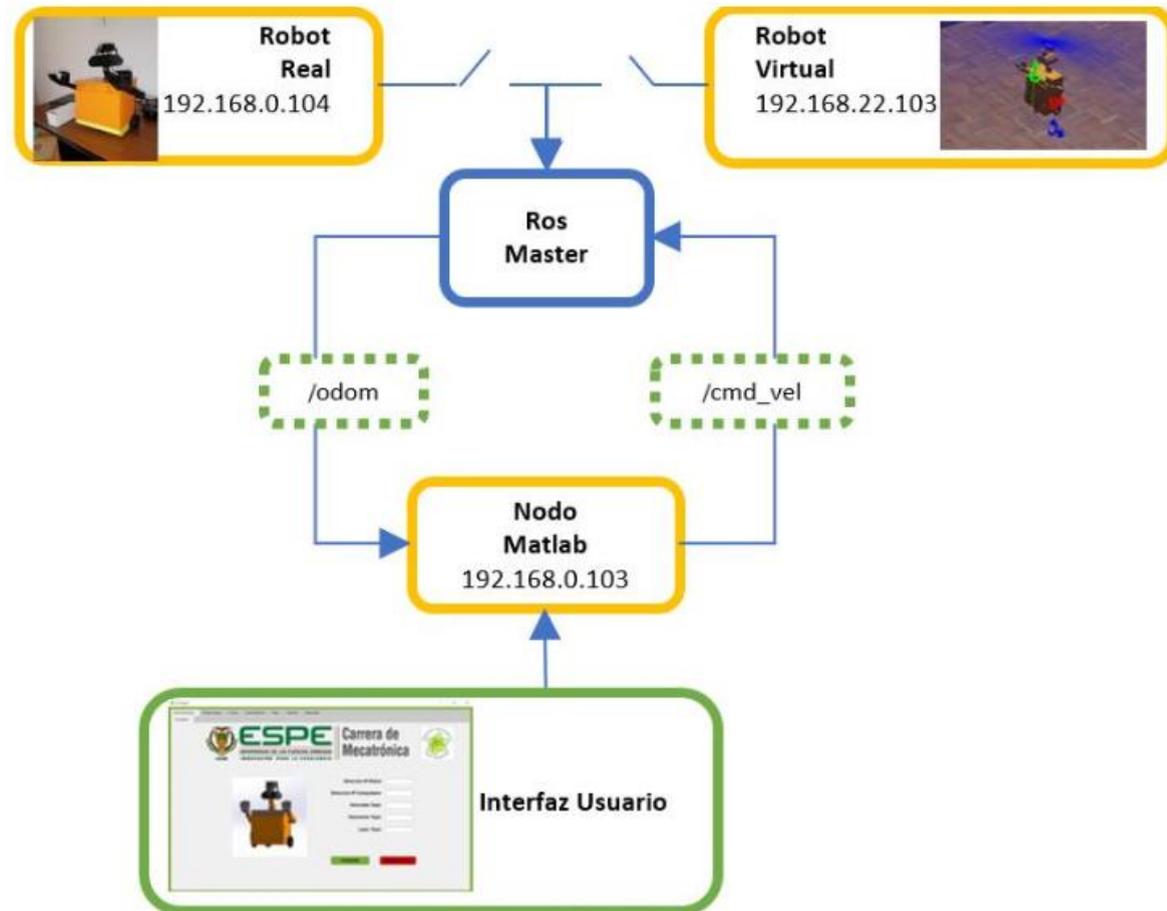
Entorno simulado Webots



Wall3 en entorno simulado



ESTRUCTURA DEL SISTEMA



Modelación matemática y algoritmos de control

Modelo cinemático

$$\dot{\eta}_{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\psi}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\psi_p) & -a \sin(\psi_p) \\ \sin(\psi_p) & a \cos(\psi_p) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mu} \\ \dot{\psi}_p \end{bmatrix}$$

$$\dot{\eta}_{\mathbf{p}}(t) = \mathbf{J}_{\mathbf{p}}(\psi_p) \mathbf{v}(t)$$

Modelo dinámico

$$L = K - P$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{d\dot{\eta}_{\mathbf{p}}} \right) - \frac{dL}{d\eta_{\mathbf{p}}} = \mathbf{f}_{\mathbf{p}}$$

$$\mathbf{f}(t) = \mathbf{M}(\eta_{\mathbf{p}}) \ddot{\eta}_{\mathbf{p}}(t) + \mathbf{C}(\eta_{\mathbf{p}}, \dot{\eta}_{\mathbf{p}}) \dot{\eta}_{\mathbf{p}}(t)$$

$$\begin{bmatrix} fx_p \\ fy_p \\ \tau\psi_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m & 0 & -am \sin(\psi_p) \\ 0 & m & am \cos(\psi_p) \\ -am \sin(\psi_p) & am \cos(\psi_p) & m(a^2 + 1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x}_p \\ \ddot{y}_p \\ \ddot{\psi}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & -am \cos(\psi_p) \dot{\psi}_p \\ 0 & 0 & -am \sin(\psi_p) \dot{\psi}_p \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\psi}_p \end{bmatrix}$$

Transformación a velocidades generales

$$\mathbf{v}_{\text{ref}}(t) = \bar{\mathbf{M}} \dot{\mathbf{v}}(t) + \bar{\mathbf{C}}(\dot{\eta}_{\mathbf{p}}) \mathbf{v}(t)$$

$$\begin{bmatrix} u_{\text{ref}} \\ \dot{\psi}_{p\text{ref}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \chi_1 & 0 \\ 0 & \chi_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mu} \\ \dot{\psi}_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \chi_3 & \chi_4 + \chi_5 \dot{\psi}_p \\ \chi_6 \dot{\psi}_p & \chi_7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \psi_p \end{bmatrix}$$

Modelación matemática y algoritmos de control

Identificación de parámetros

$$\begin{bmatrix} \dot{u} & 0 & u & \dot{\psi}_p & \dot{\psi}_p^2 & 0 & 0 \\ 0 & \ddot{\psi}_p & 0 & 0 & 0 & u\dot{\psi}_p & \dot{\psi}_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_1 \\ \chi_2 \\ \chi_3 \\ \chi_4 \\ \chi_5 \\ \chi_6 \\ \chi_7 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{ref} \\ \dot{\psi}_{p,ref} \end{bmatrix}$$

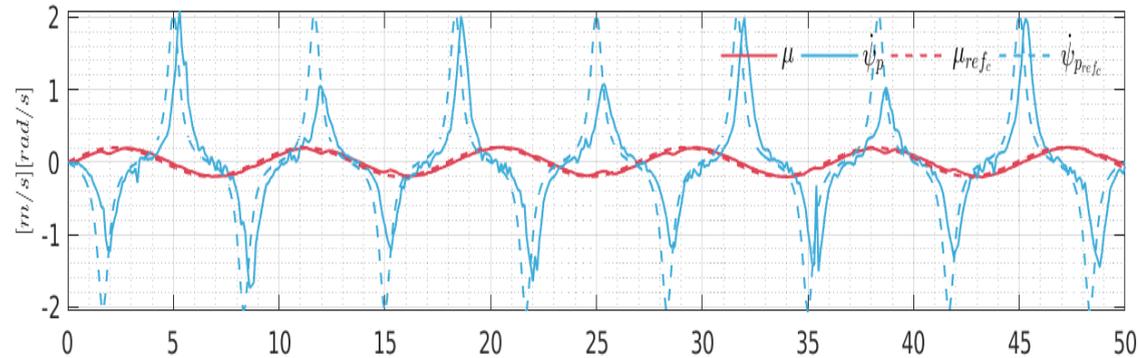
$$\mathbf{X}_k \boldsymbol{\chi} = \mathbf{Y}_k$$

$$\mathbf{J}(\boldsymbol{\chi}) = (\mathbf{Y}^T - \boldsymbol{\chi}^T \mathbf{X}^T)(\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\chi})$$

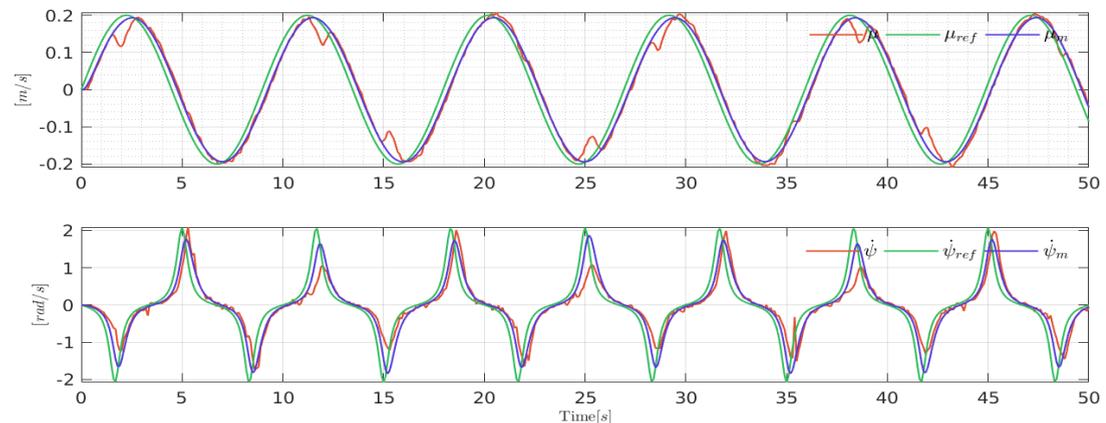
$$\frac{d\mathbf{J}}{d(\boldsymbol{\chi})} = (-\mathbf{Y}^T \mathbf{X} + \boldsymbol{\chi}^T \mathbf{X}^T \mathbf{X})$$

$$\boldsymbol{\chi} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y}$$

Señales identificación

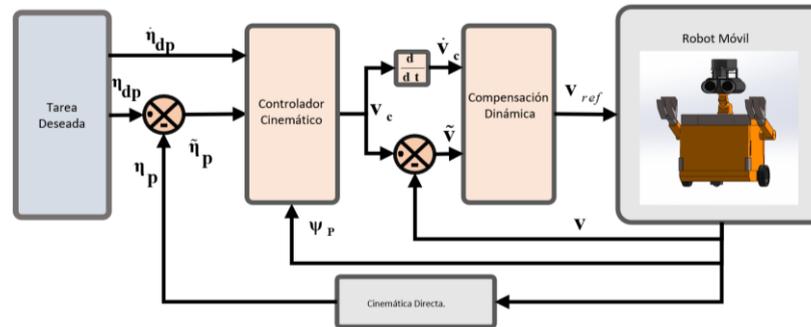


Validación modelo Dinámico



Modelación matemática y algoritmos de control

Control Proporcional basado en el modelo



Ley control

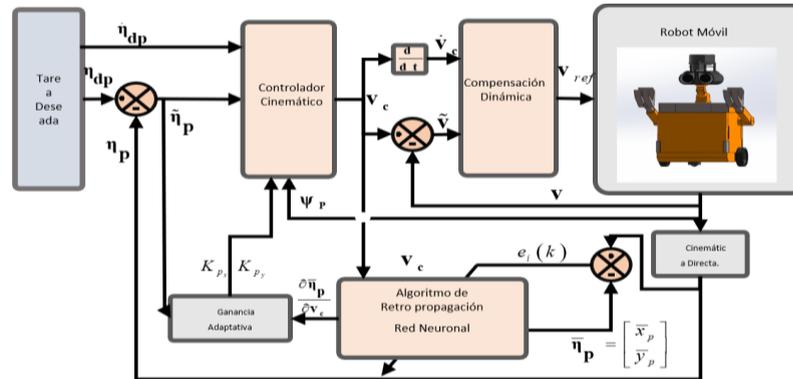
$$v_c(t) = J_p(\psi_p)^{-1} \left(\dot{\eta}_{dp}(t) + K_2 \tanh \left(K_2^{-1} K_1 \tilde{\eta}_p(t) \right) \right)$$

Estabilidad

$$\dot{v}(\tilde{\eta}_p) = -\tilde{\eta}_p(t)^T K_2 \tanh \left(K_2^{-1} K_1 \tilde{\eta}_p(t) \right)$$

Modelación matemática y algoritmos de control

Controlador MPC



Modelo general sistema

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \\ \dot{\psi}_p \\ \dot{\mu} \\ \ddot{\psi}_p \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \mu \cos(\psi_p) - a \sin(\psi_p) \dot{\psi}_p \\ \mu \sin(\psi_p) + a \cos(\psi_p) \dot{\psi}_p \\ \dot{\psi}_p \\ -\frac{\mu \chi_3}{\chi_1} - \frac{\chi_4 \dot{\psi}_p}{\chi_1} - \frac{\chi_5 \dot{\psi}_p \dot{\psi}_p}{\chi_1} \\ -\frac{\chi_6 \dot{\psi}_p \mu}{\chi_2} - \frac{\chi_7 \dot{\psi}_p}{\chi_2} \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ \chi_1 & 0 \\ 0 & 1 \\ \chi_2 & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{ref} \\ \dot{\psi}_{p,ref} \end{bmatrix}$$

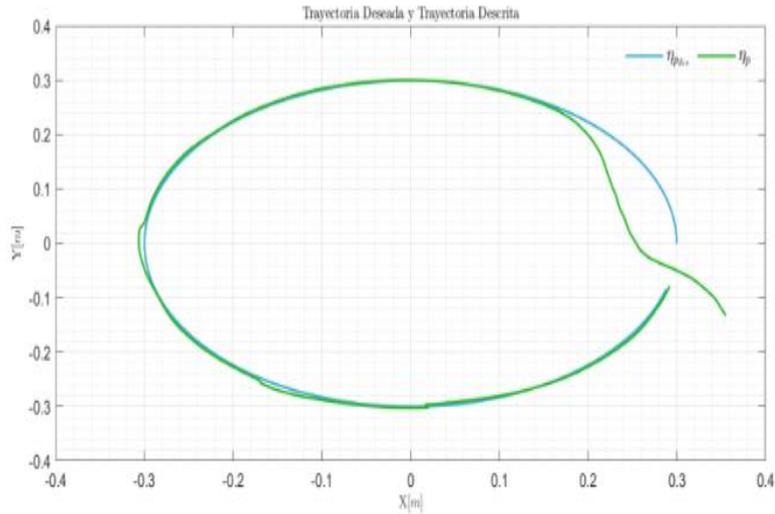
$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{g}(\mathbf{v}(t))$$

Función a minimizar

$$\mathbf{J} = \sum_{i=1}^N \delta \mathbf{e}(k+i|k)^T \mathbf{Q} \mathbf{e}(k+i|k) + \lambda \Delta \mathbf{v}(k+i|k)^T \mathbf{R} \Delta \mathbf{v}(k+i|k)$$

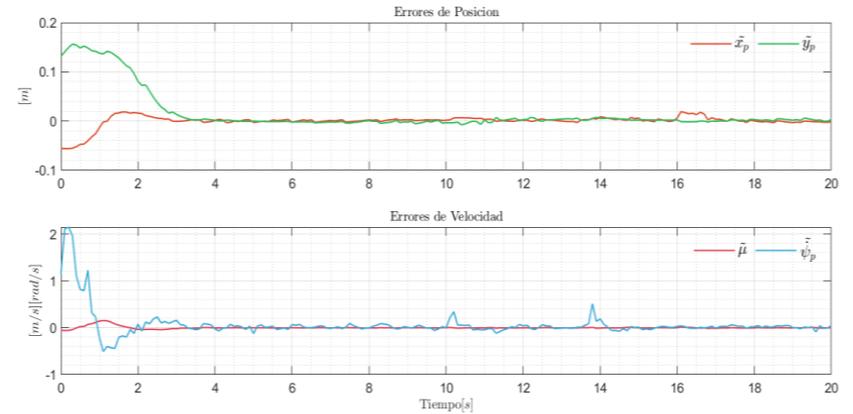
PRUEBAS DEL SISTEMA

Control proporcional

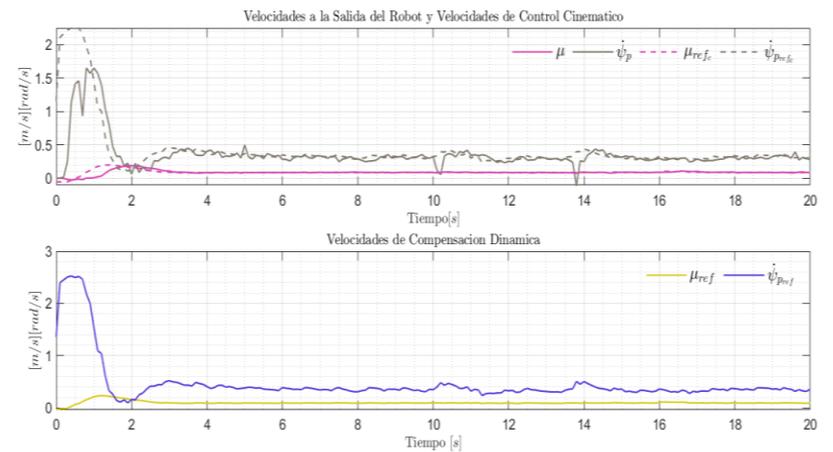


Trajectory control proporcional

Errores de control

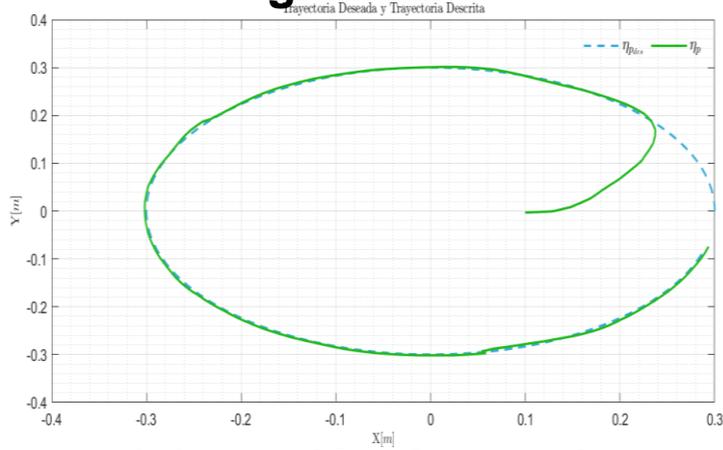


Velocidades reales y de control

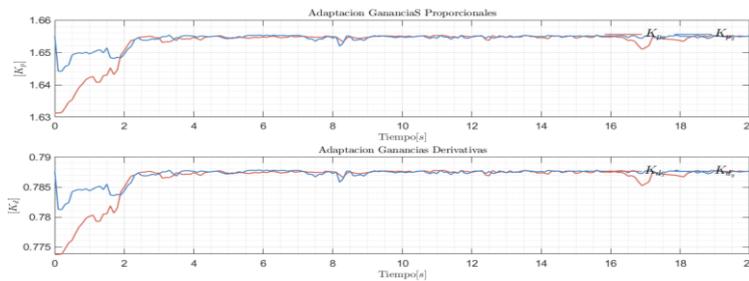


PRUEBAS DEL SISTEMA

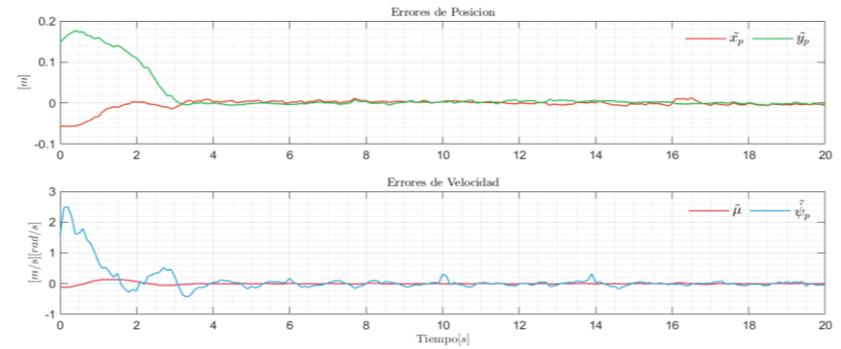
Control PD autoajustable basado en lógica difusa



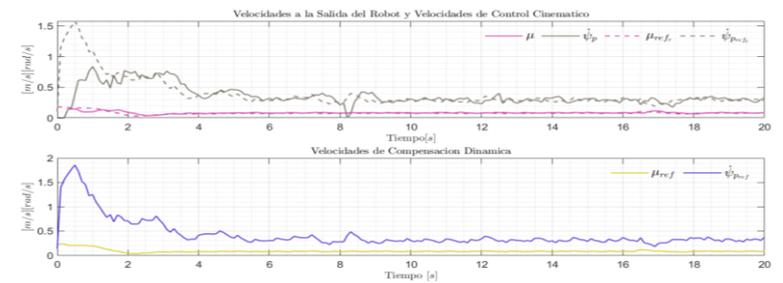
Adaptación Ganancias



Errores de control



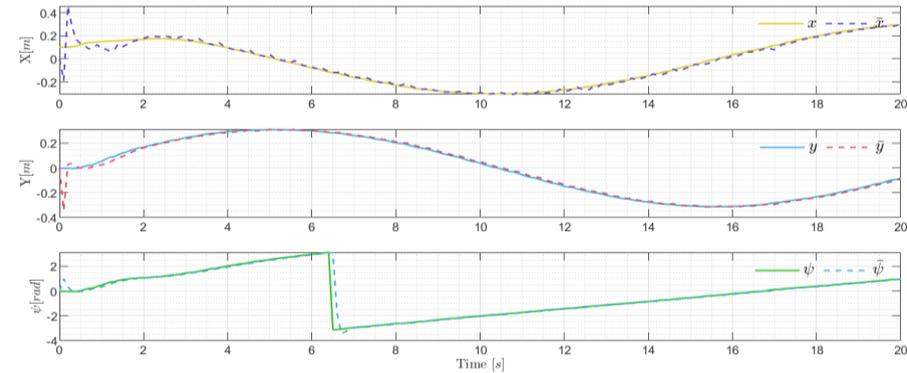
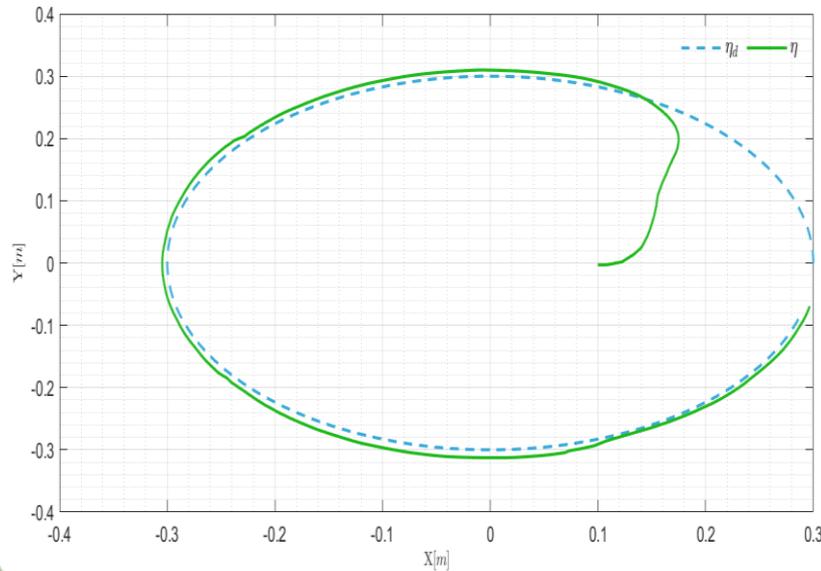
Velocidades reales y de control



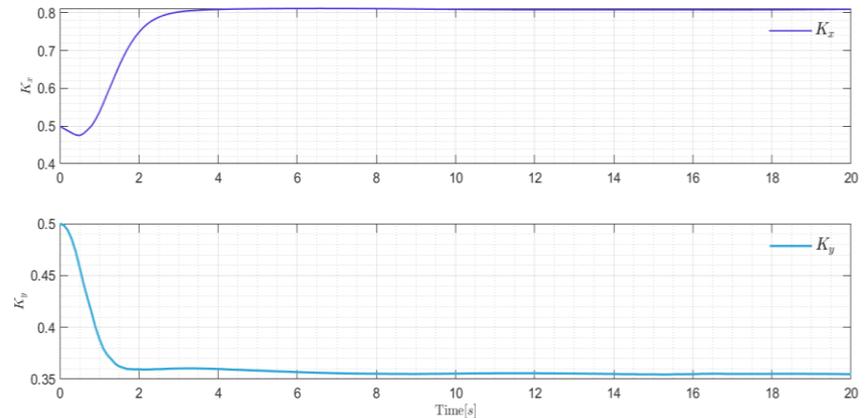
PRUEBAS DEL SISTEMA

Control P autoajustable basado en redes neuronales artificiales

Estimación estados internos



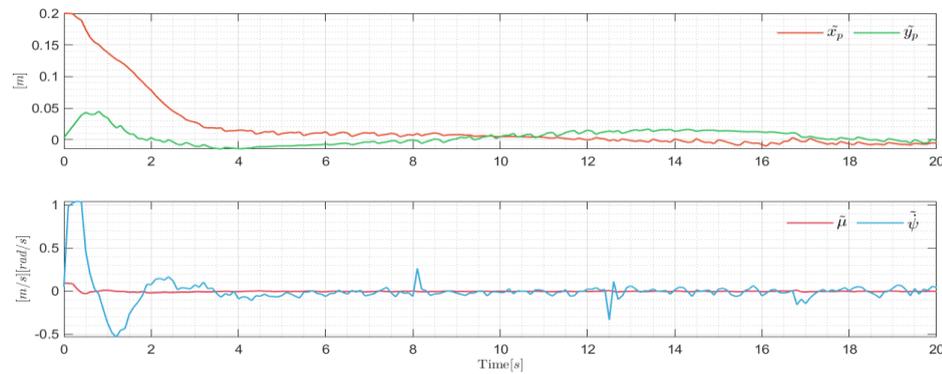
Adaptación ganancias



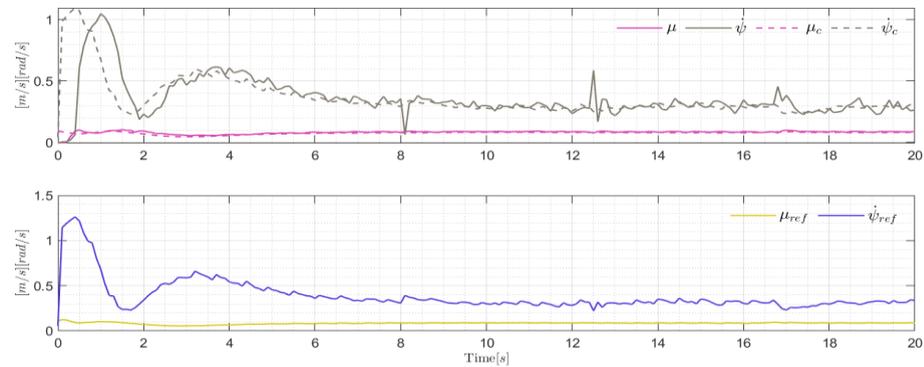
PRUEBAS DEL SISTEMA

Control PD autoajustable basado en lógica difusa

Errores de control

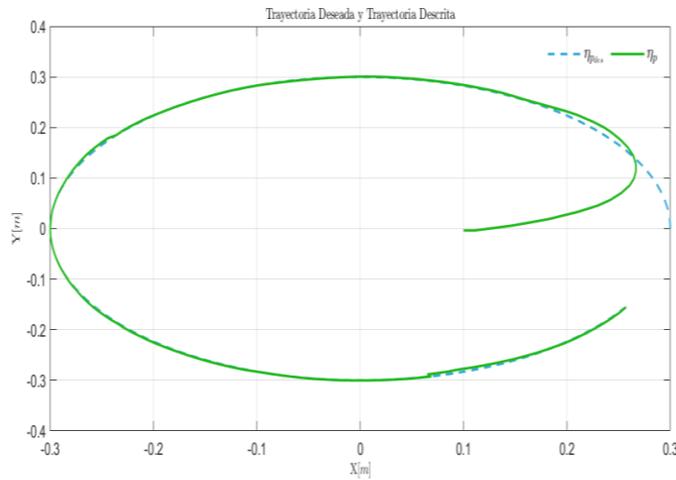


Velocidades reales y de control

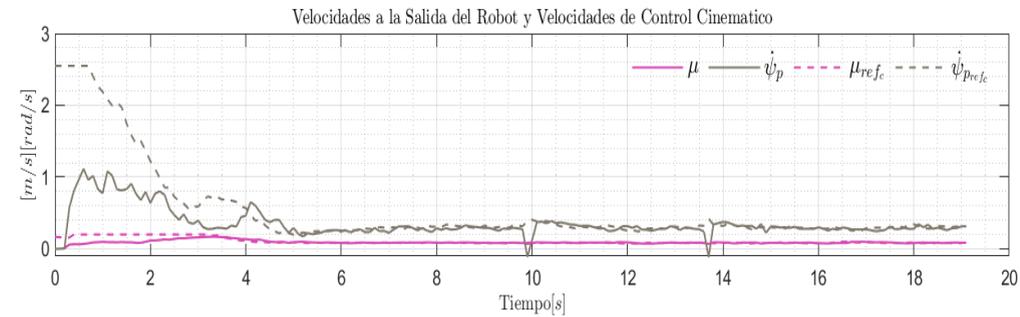


PRUEBAS DEL SISTEMA

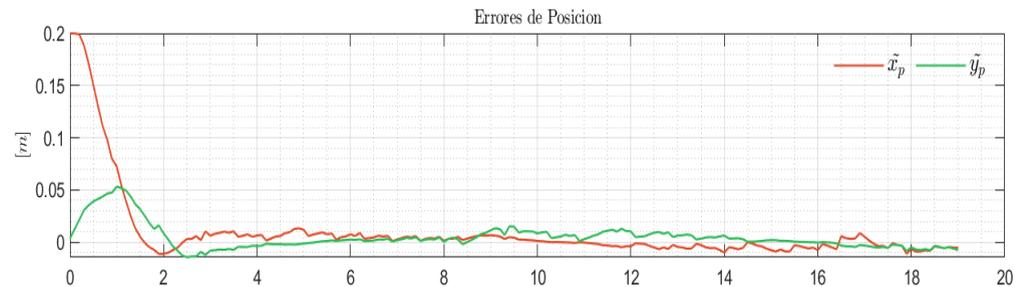
Controlador MPC



Velocidades reales y de control

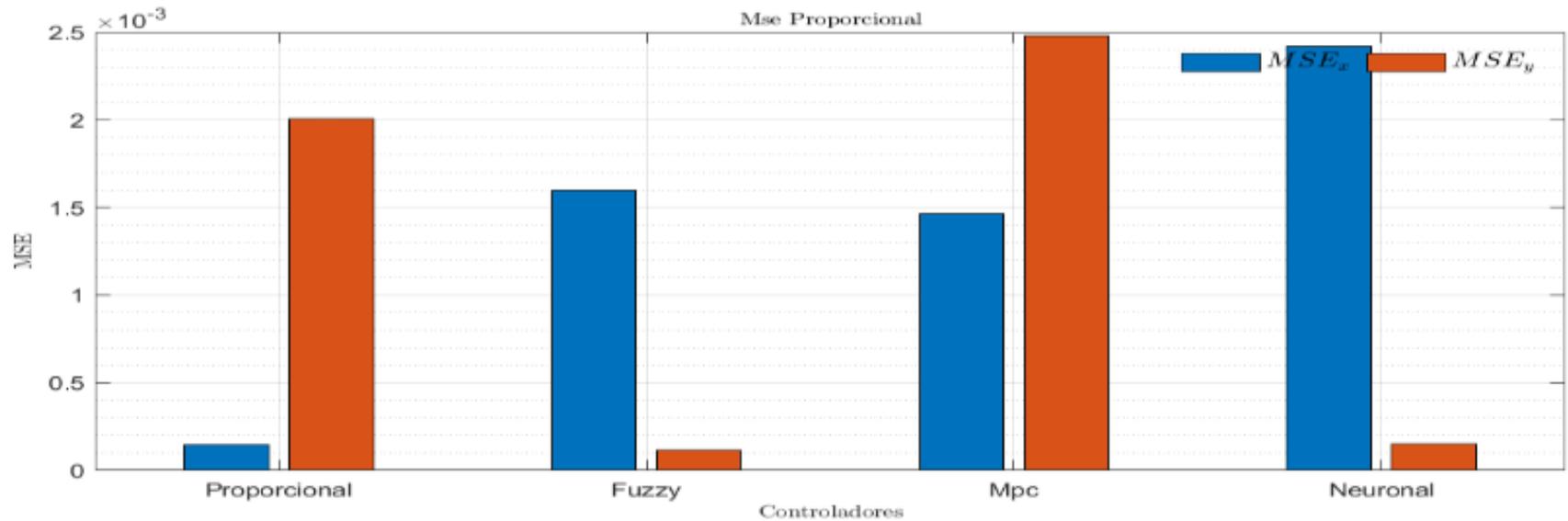


Errores de control



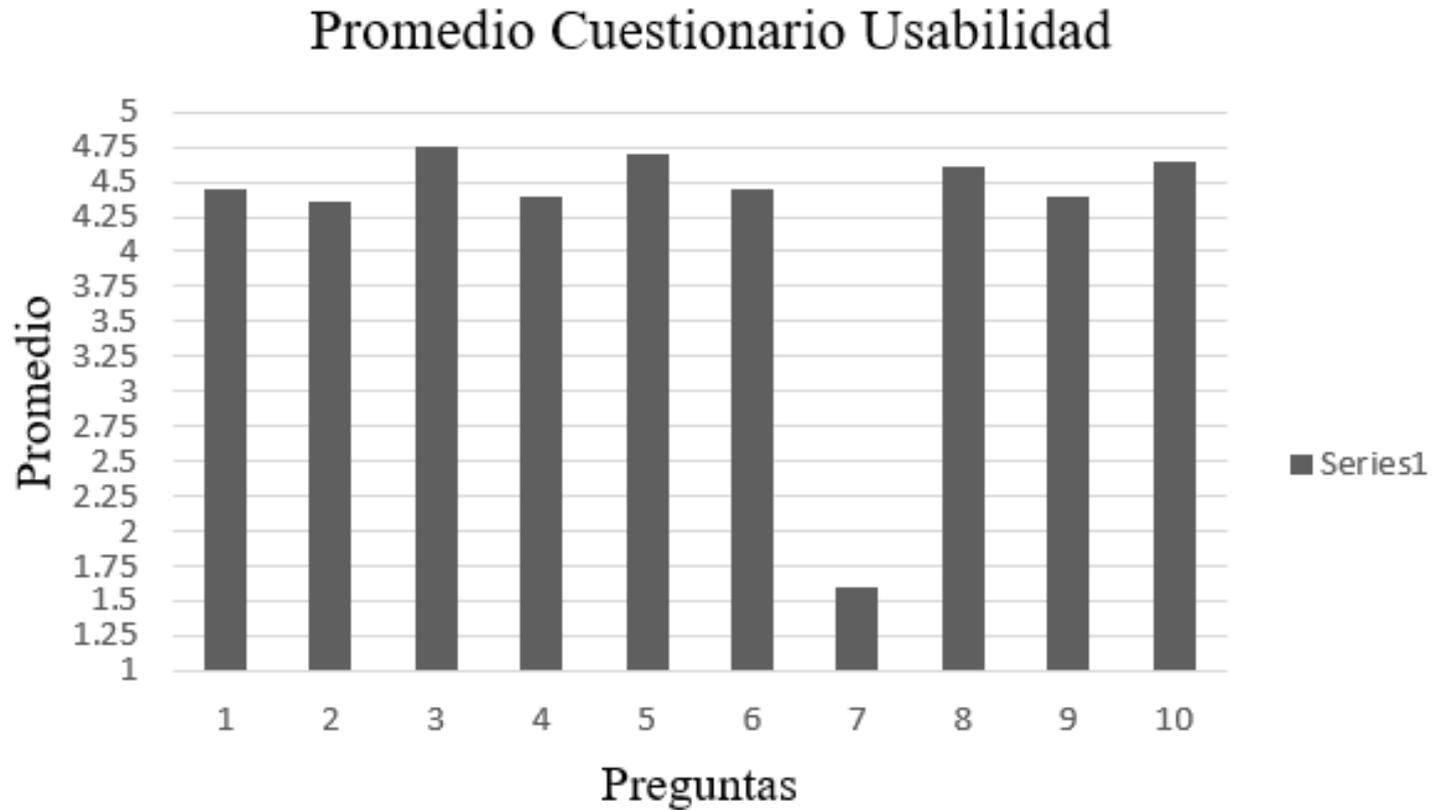
PRUEBAS DEL SISTEMA

Comparativa de controladores



PRUEBAS DEL SISTEMA

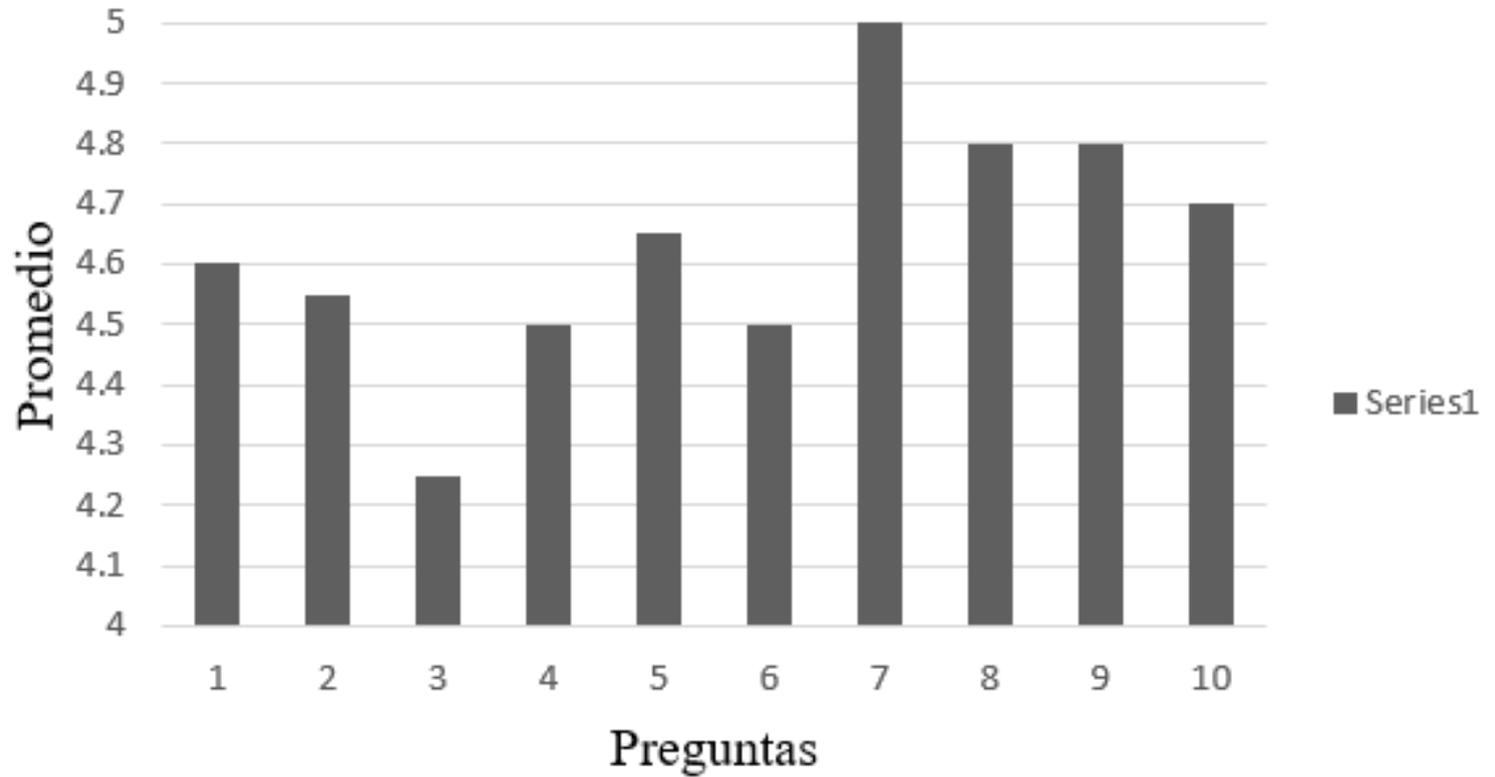
Resultados sobre usabilidad



PRUEBAS DEL SISTEMA

Resultados satisfacción del usuario

Promedio Encuesta Satisfacción



VALIDACIÓN DE HIPOTESIS

HIPOTESIS PROPUESTA

¿El diseño y construcción de un robot móvil tipo diferencial didáctico permitirá la aplicación de técnicas de control basado en algoritmos tradicionales e inteligentes en el Laboratorio de la carrera Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga?

HIPOTESIS NULA

- H_0 : La utilización del robot móvil permitió aplicar varias técnicas de control tanto tradicionales e inteligentes, afianzando los conocimientos de los usuarios de forma didáctica y práctica.

HIPOTESIS ALTERNATIVA

- H_1 : La utilización del robot móvil no permitió aplicar varias técnicas de control tanto tradicionales e inteligentes, el robot no tuvo impacto en los conocimientos de los usuarios.

VALIDACIÓN DE HIPOTESIS

Calificaciones de las pruebas realizadas a los usuarios antes y después de utilizar el robot Wall3

N	Nota antes del uso del robot	Nota despues del uso del robot
1	3	6
2	5	10
3	3	8
4	5	10
5	4	8
6	4	8
7	3	7
8	5	9
9	4	8
10	5	9
11	3	7
12	5	9
13	4	8
14	4	8
15	3	7
16	6	9
17	4	7
18	4	9
19	3	7
20	5	8

VALIDACIÓN DE HIPOTESIS

SHAPIRO WILKS TEST		
	Antes de utilizar el robot	Después de utilizar el robot
W	0.8654	0.9257
p-value	0.01	0.1
α	0.05	0.05

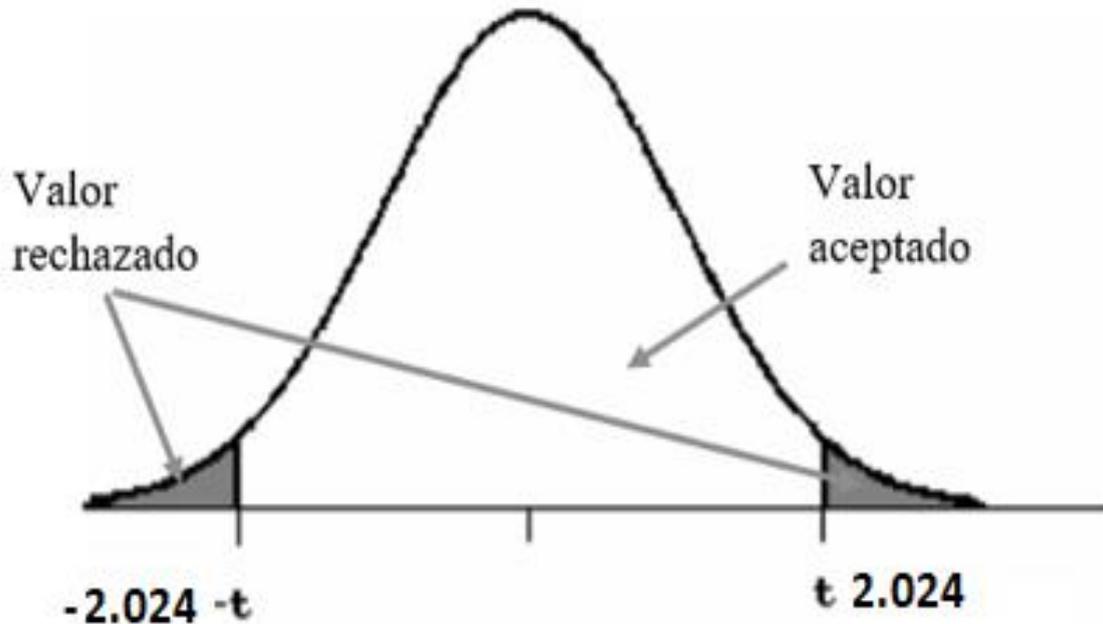
$p\text{-valor} > 0.05$ La muestra pertenece a una distribución normal o tiende a ser normal.

$p\text{-valor} < 0.05$ La muestra no pertenece a una distribución normal.

VALIDACIÓN DE HIPOTESIS

$$t = \frac{4,1 - 8,1}{0.313433} = -13.69$$

$$t_{critico} = \pm 2,024$$



CONCLUSIONES

- Se diseño y construyo un robot móvil tipo diferencial didáctico, el cual permite la aplicación de técnicas de control basado en algoritmos tradicionales e inteligentes en el Laboratorio de la carrera Ingeniería Mecatrónica de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Sede Latacunga.
- Se recopiló la información correspondiente sobre robots móviles, tanto para el desarrollo del robot como para la modelación matemática usada en la implementación de los algoritmos de control comúnmente usados en este tipo de sistema.
- Se diseño la estructura del robot móvil enfocándose en que pueda trasportar una carga de 1 Kg, con lo cual se pudo conocer que material usar en la estructura y el torque necesario para los motores, tomando en cuenta que un módulo didáctico.
- Se desarrollo una interfaz de usuario intuitiva que permita el aprendizaje de control usando el robot móvil diferencial como sistema de pruebas.



CONCLUSIONES

- Se desarrollo el sistema de comunicación de forma que el robot móvil pueda enviar y recibir sus estados internos y los comandos de velocidad por WLAN, mientras en un computador se realizan los cálculos necesarios de cada algoritmo de control. Lo que es útil ya que el robot se puede utilizar de forma modular.
- Se desarrollo un simulador robótico, donde se incluyó al robot realizado en este proyecto, donde se pueden realizar pruebas antes de utilizar el robot real, tanto el simulador como el robot real disponen el mismo sistema de comunicación.
- Se desarrollo los algoritmos de control tradicionales usando el modelo matemático cinemático y dinámico del robot y para los algoritmos de control inteligentes se utilizó lógica difusa y redes neuronales artificiales, todos los algoritmos presentan un error cuadrático medio menor al 0.0025 m lo cual verifica que se puede aplicar una amplia gama de controladores.

RECOMENDACIONES

- Para un mejor desempeño del robot se debe utilizar un computador de alto rendimiento, con esto se asegura que el computo de los controladores sea rápido y eficiente.
- Para el correcto funcionamiento de los controladores no se recomienda usar trayectoria con velocidades muy altas ya que los motores son de bajas revoluciones y alto torque.
- Para instalar los programas necesarios del simulador se recomienda usar las versiones descritas y no cambiar a otras ya que el simulador fue diseñado en específico para estas.
- Durante el ensamblaje del robot Wall3, tomar en cuenta el patrón de colores de los cables de conexión de cada motor para un correcto funcionamiento del mismo.

RECOMENDACIONES

- Verificar la dirección IP del terminal de la computadora de cada usuario antes de utilizar el robot.
- Al momento que ejecutar la interfaz del robot Wall3, digitar correctamente los comandos de comunicación para que no se presente errores en la ejecución de la interfaz.
- Al momento de desarrollar un controlador basado en redes neuronales utilizar una ley de adaptación que garantice la convergencia de los errores de control a cero.