



# **UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR**

**FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DISEÑO DE UN ROBOT MÓVIL NO HOLONÓMICO TIPO UNICICLO  
PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN  
MECATRÓNICA**

**PABLO RICARDO SOSA IRIARTE**

**DIRECTOR: GABRIELA MAGDALENA ANDALUZ ORTIZ, MSc**

**D. M. Quito,**

**2021**

## DECLARACIÓN

Yo, Pablo Ricardo Sosa Iriarte, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado, o calificación profesional; y, que he investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.



---

**PABLO RICARDO SOSA IRIARTE**

**C.I. 171656042-8**

## CERTIFICACIÓN

El proyecto de investigación denominado “Diseño de un robot móvil no holonómico tipo unicycle para seguimiento de trayectorias”, fue desarrollado por el Sr. Pablo Ricardo Sosa Iriarte y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Facultad de Ciencias Técnicas, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gabriela Andalu', is written over a horizontal line.

**ING. GABRIELA ANDALUZ, MSc.**  
**DIRECTOR DE PROYECTO**

*"I think it is possible for ordinary people to choose to be extraordinary."*

*- Elon Musk*

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres por su guía para forjar mis valores, a mi abuelita por estar siempre presente en mi vida y ser parte fundamental de la misma. A mis hermanas, con quienes sé que siempre voy a contar.

A Dome, a quien agradezco por haberme acompañado en esta etapa tan importante, en la que me ha impulsado a ser mejor, con su amor y apoyo.

Agradezco a mis amigos, los hornados paisa, ustedes saben muchachos. Y también a todos mi amigos con lo que he podido convivir estos años.

Finalmente, quiero agradecer a la Universidad Internacional del Ecuador, y en especial al Ingeniero Brito, quien ha sido un referente para mí.

Le doy una agradecimiento particular a la Ingeniera Gabriela Andaluz y a todos los maestros que han inculcado en mi sus conocimientos.

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Tema . . . . .	1
2.	Objetivos . . . . .	1
2.1.	General . . . . .	1
2.2.	Específicos . . . . .	1
3.	Planteamiento del problema . . . . .	2
4.	Hipótesis . . . . .	2
5.	Estudio teórico de la robótica móvil . . . . .	2
5.1.	Introducción . . . . .	2
5.2.	Robótica móvil . . . . .	4
5.3.	Robots con ruedas . . . . .	4
5.3.1.	Configuraciones de robots con ruedas . . . . .	5
5.3.2.	Sistema holonómico . . . . .	9
5.3.3.	Sistema no holonómico . . . . .	9
6.	Cinemática de los robots móviles . . . . .	10
6.1.	Modelo cinemático de un robot tipo unicycle . . . . .	10
6.1.1.	Modelo cinemático del robot móvil tipo unicycle . . . . .	11
6.1.2.	Modelo cinemático del robot móvil con punto de interés desplazado . . . . .	13
6.2.	Características de robots móviles de tipo unicycle existentes . . . . .	14
6.3.	Seguimiento de trayectoria . . . . .	15
6.4.	Tipos de algoritmos para el seguimiento de trayectorias para un robot no holonómico tipo unicycle . . . . .	15
6.4.1.	Controlador basado en Lyapunov . . . . .	17
6.5.	Inteligencia artificial . . . . .	20
6.5.1.	Visión por computador . . . . .	21
6.5.2.	Procesamiento de imágenes . . . . .	22
7.	Diseño y dimensionamiento mecatrónico del robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica . . . . .	23

7.1.	Análisis de requerimientos del diseño . . . . .	24
7.2.	Diseño de la estructura mecánica . . . . .	26
7.2.1.	Diseño mecánico . . . . .	28
7.2.2.	Material de la estructura . . . . .	28
7.2.3.	Dimensionamiento del chasis . . . . .	30
7.2.4.	Selección de las ruedas . . . . .	32
7.2.5.	Dimensionamiento de los motores . . . . .	33
7.2.6.	Selección de motor . . . . .	36
7.2.7.	Dimensionamiento del espaciador . . . . .	39
7.2.8.	Dimensionamiento del soportes . . . . .	40
7.2.9.	Selección de la rueda pivote . . . . .	43
7.2.10.	Dimensionamiento de la caja del circuito de control . . . . .	44
7.3.	Dimensionamiento electrónico . . . . .	45
7.3.1.	Selección del controlador . . . . .	46
7.3.2.	Selección de encoder . . . . .	49
7.3.3.	Selección módulo de comunicación inalámbrica . . . . .	50
7.3.4.	Selección de driver . . . . .	53
7.3.5.	Selección de interruptor de encendido y apagado . . . . .	53
7.3.6.	Selección zumbador . . . . .	54
7.3.7.	Dimensionamiento de la fuente de alimentación . . . . .	55
7.3.8.	Sistema de monitoreo de la batería . . . . .	57
7.4.	Desarrollo de la programación . . . . .	59
7.4.1.	Desarrollo del algoritmo de procesamiento de imagen . . . . .	60
7.4.2.	Diseño del algoritmo de control de seguimiento de trayectorias del robot móvil de tipo unicycle . . . . .	63
7.4.3.	Control de seguimiento con saturación de velocidades . . . . .	66
7.5.	Pruebas de simulación . . . . .	67
7.5.1.	Seguimiento de trayectoria . . . . .	67
7.5.2.	Prueba 1: Trayectoria circular . . . . .	68
7.5.3.	Prueba 2: Trayectoria sinusoidal . . . . .	71

7.5.4.	Prueba 3: Trayectoria de número 8 . . . . .	74
7.5.5.	Prueba 4: Trayectoria curva de tipo Lissajous . . . . .	77
7.5.6.	Prueba 5: Trayectoria de giro continuo . . . . .	80
7.5.7.	Consideraciones para reducir el error de posicionamiento . .	82
8.	Conclusiones . . . . .	83
9.	Recomendaciones . . . . .	85

## ÍNDICE DE FIGURAS

1. Robot con ruedas tipo Hermes [1] . . . . .	4
2. Configuración síncrona de 3 ruedas directrices [1] . . . . .	5
3. Configuración omnidireccional de 3 ruedas [1] . . . . .	6
4. Configuración omnidireccional de cuatro ruedas [2] . . . . .	6
5. Configuración con cintas de deslizamiento [1] . . . . .	7
6. Configuración triciclo [1] . . . . .	7
7. Configuración ackerman [1] . . . . .	8
8. Configuración tipo unicycle [1] . . . . .	9
9. Sistema holonómico en un robot omnidireccional de 4 ruedas [1] . . . . .	9
10. Sistema no holonómico en un robot tipo unicycle [1] . . . . .	10
11. Geometría del robot móvil de tipo unicycle con punto de interés en la mitad del eje de las ruedas [3] . . . . .	11
12. Geometría del robot móvil de tipo unicycle con punto de interés desplazado [3]	13
13. Ilustración de la estabilidad de Lyapunov [4] . . . . .	18
14. Ilustración de la estabilidad asintótica de Lyapunov [4] . . . . .	19
15. Ilustración de la inestabilidad [4] . . . . .	19
16. Resultados de la detección y substracción del fondo de una imagen de una mano humana. [5] . . . . .	23
17. Robot móvil de tipo unicycle, vista isométrica . . . . .	27
18. Robot móvil de tipo unicycle, vista inferior . . . . .	27
19. Placa superior del robot móvil de tipo unicycle . . . . .	31
20. Placa inferior del robot móvil de tipo unicycle . . . . .	31
21. Llanta azul de 65 mm [6] . . . . .	32
22. Kit de soporte del eje y pernos [6] . . . . .	32
23. Diagrama de cuerpo libre [7] . . . . .	34
24. Motorreductor DC CHR-GM25-370 [8] . . . . .	37
25. Motor a pasos Nema 17 [9] . . . . .	38
26. Espaciador 50 mm PLA . . . . .	39

27. Pieza del soporte entre la rueda y la placa inferior . . . . .	40
28. Análisis de cargas en el soporte entre la rueda y la placa inferior . . . . .	41
29. Pieza del soporte entre el motor y la placa inferior . . . . .	41
30. Análisis de cargas en el soporte entre el motor y la placa inferior . . . . .	42
31. Pieza del soporte entre el batería y la placa inferior . . . . .	42
32. Análisis de cargas en el soporte de la batería . . . . .	43
33. Rueda pivote con llanta [10] . . . . .	43
34. Rueda pivote con bola [11] . . . . .	44
35. Contenedor Arduino Nano . . . . .	45
36. Dimensiones contenedor Arduino Nano . . . . .	45
37. Diagrama de bloques de los componentes electrónicos del robot móvil tipo uniciclo . . . . .	46
38. Arduino Nano [12] . . . . .	47
39. Arduino Uno [13] . . . . .	48
40. Raspberry Pi Pico [14] . . . . .	48
41. Encoder 25 GA [15] . . . . .	50
42. Módulo Bluetooth HC-05 [16] . . . . .	51
43. Módulo WiFi ESP8266 [17] . . . . .	52
44. Driver L298N [18] . . . . .	53
45. Interruptor eléctrico 45042 [19] . . . . .	54
46. Zumbador 5 V AR0167 [20] . . . . .	55
47. Batería Lipo Turnigy 1000mAh [21] . . . . .	56
48. Diagrama de flujo de la identificación de color y forma y del seguimiento de trayectorias . . . . .	59
49. Captura de imagen de un círculo rojo . . . . .	60
50. Transformación a escala de grises . . . . .	61
51. Transformación a imagen binaria . . . . .	61
52. Pregunta de selección de figura geométrica entre círculo, triángulo y cuadra- do . . . . .	62
53. Graficación del centroide y el delimitador de la figura identificada en el proceso	62

54. Esquema de control en simulación para el seguimiento de trayectoria . . . . .	64
55. Animación 3D del seguimiento de la trayectoria circular . . . . .	69
56. Desplazamiento en $x$ y $y$ del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria circular	69
57. Gráfica de las velocidades lineal y angular de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria circular . . . . .	70
58. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria circular . . . . .	71
59. Animación 3D del seguimiento de la trayectoria sinusoidal . . . . .	72
60. Desplazamiento en $x$ y $y$ del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria sinusoidal . . . . .	72
61. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria sinusoidal . . . . .	73
62. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria sinusoidal . . . . .	74
63. Animación 3D del seguimiento de la trayectoria de número 8 . . . . .	75
64. Desplazamiento en $x$ y $y$ del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria de número 8 . . . . .	75
65. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de número 8 . . . . .	76
66. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de número 8 . . . . .	76
67. Animación 3D del seguimiento de la trayectoria de tipo Lissajous . . . . .	78
68. Desplazamiento en $x$ y $y$ del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria de tipo Lissajous . . . . .	78
69. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de tipo Lissajous . . . . .	79
70. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de tipo Lissajous . . . . .	79
71. Animación 3D del seguimiento de la trayectoria de giro continuo . . . . .	80

72. Desplazamiento en $x$ y $y$ del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria de giro continuo . . . . .	81
73. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de giro continuo . . . . .	81
74. Gráfica de los errores de posicionamiento en $x$ y $y$ de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de giro continuo . . . . .	82

## ÍNDICE DE TABLAS

1. Características de robot móviles de tipo unicycle existentes . . . . .	14
2. Rango de dimensiones permisibles para el diseño del robot móvil de tipo unicycle . . . . .	24
3. Descripción de los principales componentes del robot móvil de tipo unicycle .	28
4. Especificaciones técnicas rueda CH1016183 [6] . . . . .	33
5. Masa de la plataforma móvil . . . . .	33
6. Especificaciones técnicas motorreductor DC CHR-GM25-370 [8] . . . . .	37
7. Especificaciones técnicas motor a pasos Nema 17 [9] . . . . .	39
8. Especificaciones técnicas rueda pivote con llanta [11] . . . . .	44
9. Especificaciones técnicas rueda pivote con bola [11] . . . . .	44
10. Análisis de Entradas/Salidas . . . . .	46
11. Características del Arduino Nano, [12] . . . . .	47
12. Características del Arduino Uno, [13] . . . . .	48
13. Características del Raspberry Pi Pico, [14] . . . . .	49
14. Especificaciones técnicas del encoder 25 GA [15] . . . . .	50
15. Especificaciones técnicas del módulo bluetooth HC-05 [16] . . . . .	51
16. Especificaciones técnicas del módulo WiFi ESP8266 [16] . . . . .	52
17. Especificaciones técnicas del driver L298N [18] . . . . .	53
18. Especificaciones técnicas del interruptor eléctrico 45042 [19] . . . . .	54
19. Especificaciones técnicas del zumbador 5 V AR0167 [20] . . . . .	55
20. Corriente total y voltaje de operación de los componentes del sistema . . . .	55
21. Especificaciones de la batería seleccionada [21] . . . . .	56
22. Componentes electrónicos seleccionados . . . . .	58
23. Correspondencia de trayectoria con identificación de color y forma . . . . .	63

# **DISEÑO DE UN ROBOT MÓVIL NO HOLONÓMICO TIPO UNICICLO PARA SEGUIMIENTO DE TRAYECTORIAS**

## **1. Tema**

"Diseño de un robot móvil no holonómico tipo unicycle para seguimiento de trayectorias".

## **2. Objetivos**

### **2.1. General**

Diseñar un robot no holonómico tipo unicycle para seguimiento de trayectorias.

### **2.2. Específicos**

- Investigar y documentar los tipos de configuraciones de robots con ruedas y los algoritmos de control de seguimiento de trayectoria para robots móviles tipo unicycle con restricción no holonómica.
- Diseñar un prototipo de robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica.
- Determinar el modelo cinemático de un robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica.
- Determinar un algoritmo para la selección de trayectoria de un robot móvil tipo unicycle mediante visión artificial a través de la identificación de forma y color de un objeto.
- Determinar un algoritmo de control de seguimiento de trayectoria para un robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica.
- Realizar pruebas de simulación para comprobar el funcionamiento del algoritmo de control en el robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica.

### **3. Planteamiento del problema**

La aplicación de la robótica móvil en los últimos años ha trascendido desde su utilización solo en ambientes industriales hacia tareas más especializadas. Entre ellas se encuentran la ejecución de actividades peligrosas o que ponen en riesgo al ser humano. Además de aplicaciones, como ejemplo: el posicionamiento, regulación, evasión de obstáculos, seguimiento de caminos o seguimiento de trayectorias. Siendo el seguimiento de trayectorias una de las tareas complejas y significativas a solucionar. Esto ocurre porque es una actividad que se realiza de forma autónoma y que es susceptible a generar errores de posicionamiento y en algunos casos no permite que se cumplan adecuadamente los objetivos de control.

### **4. Hipótesis**

El diseño de un robot móvil no holonómico con configuración tipo unicycle y la implementación de un algoritmo de visión artificial para la selección de trayectoria, permitirá al robot desplazarse por entornos no estructurados.

### **5. Estudio teórico de la robótica móvil**

#### **5.1. Introducción**

Durante los años setenta, la investigación y desarrollo sobre la robótica móvil ha generado un importante avance tecnológico [22]. Estos cambios han permitido, que, a partir de nuevas tecnologías, sus aplicaciones mejoren y sean utilizados en áreas como lo son: ambientes peligrosos, exploración, sanidad, uso doméstico e industria, para los cuales se garantizan los movimientos de alta precisión [23]. Según su definición, un robot móvil es un sistema electromecánico capaz de desplazarse de manera autónoma sin estar sujeto físicamente a un solo punto. La clasificación de este tipo de robots se establece según las características de su locomoción, la cual puede ser por medio de: ruedas, patas o por orugas [24]. Para el proyecto de la investigación, se establece para el robot móvil la configuración de tipo unicycle. Este tipo de robot se encuentra constituido por una estructura

mecánica que consta de dos ruedas motoras que se controlan de manera independiente y posee una rueda pivote que le confiere estabilidad, permitiéndole navegar a través de un determinado ambiente de trabajo de forma autónoma [25]. Se entiende que, durante un proceso de modelado cinemático, el uso de las ecuaciones de conservación del momento angular y lineal son necesarias para eliminar las variables dependientes dentro del sistema. Las restricciones holonómicas son representadas por ecuaciones de velocidad, indicando que las ecuaciones de conservación de momento lineales son integrables. Una restricción no holonómica responde a las ecuaciones de conservación de momento angular que no pueden representarse por su forma integrada [26]. El seguimiento de la trayectoria es un proceso importante para la robótica móvil, siendo muy desafiante por su sistema altamente no lineal y no holonómico, que indica cuando no todas las restricciones a las que está sometido son integrables en las limitaciones posicionales de la forma [27], y según el mismo autor, se indican los siguientes métodos: control robusto, control inteligente, control de redes neuronales, control difuso y control de modo deslizante, etc. Como un ejemplo de control no holonómico en un robot móvil, se presenta una percepción difusa [28], aplicada tanto en el diseño como en el comportamiento reactivo y sus combinaciones dentro de la arquitectura de control de comportamientos difusos, al cual se refiere dentro de la investigación, como un sistema de mejoras en la aplicación práctica. Para realizar esta tarea, se puede observar según [29], la creación de un mapa del entorno a través de ciertos algoritmos que le permitan al robot analizar los nodos del mapa conocido y desplazarse dentro del mismo. En este caso, no se presenta la ejecución de un plan para evadir obstáculos, al contrario de [27], en su algoritmo indica una simulación capaz de evadir obstáculos mediante un modelo matemático de un control no lineal predictivo, activándose en cuanto la distancia entre el obstáculo y el sensor es de 0,35m. Existen múltiples métodos y consideraciones para el control de seguimiento, esto se debe, como indica [26], a la disposición de las acciones que deba realizar el robot, en esta investigación el objetivo es crear un rastreo de figuras complejas obteniendo la mejor precisión en los gráficos simulados. Siendo así, que el presente proyecto considerará el diseño de un prototipo de robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica, al cual mediante la determinación de su modelo cinemático, se implementará un algoritmo de control para el seguimiento de trayectorias.

## 5.2. Robótica móvil

La robótica móvil considera a toda aquella máquina que tiene la capacidad de desplazarse en un entorno, mediante un sistema locomotor con cierto nivel de autonomía que cumple con una función establecida. Por lo general, sus aplicaciones son muy amplias, dado que su uso se adapta a las características del entorno en el cual deberá movilizarse, por ejemplo, la inspección, vigilancia y control de operaciones a distancia [30].

Se distingue a los robots móviles de acuerdo a su característica de movimiento sobre un espacio físico, pudiendo ser terrestre, aéreo o acuático, adecuando las restricciones sobre el mismo y evaluando su aptitud en el entorno en el cual efectuará su tarea. Esto contempla las distintas particularidades que serán evaluadas, de acuerdo a la estructura del robot móvil, que examina el tipo de rueda, el sistema de tracción, la dirección y forma física del robot. Por consiguiente, se establecen las propiedades sensoriales y que en su conjunto determinan los requerimientos de precisión, estabilidad y rapidez de llegada, de acuerdo a la velocidad, maniobrabilidad y tipo de terreno [31].

## 5.3. Robots con ruedas

De acuerdo a su tipo de locomoción, estos robots, como se muestra en la Figura 1, son aquellos que se desplazan mediante el uso de ruedas. Son robots que poseen una alta capacidad de carga, pero se los considera deficientes ante terrenos irregulares [32]. Las diferentes configuraciones de las ruedas y su cantidad, dependen en su totalidad de la aplicación del robot y el terreno en el cual cumplirá su función.



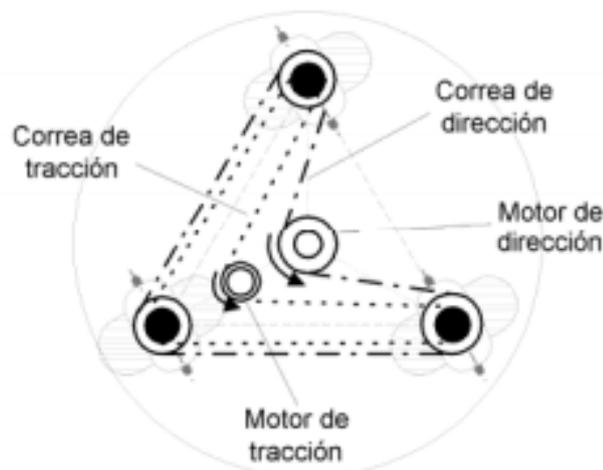
**Figura 1.** Robot con ruedas tipo Hermes [1]

### 5.3.1. Configuraciones de robots con ruedas

Se contempla el accionamiento de las ruedas, según los tipos de características y particularidades que adoptan los robots móviles en su locomoción. Los atributos pertinentes son: maniobrabilidad, control y estabilidad [33].

#### ■ Configuración síncrona

Es un sistema de tres ruedas sincronizadas por un motor de tracción, como se observa en la Figura 2, que se encarga de ajustar la velocidad de las ruedas simultáneamente, mediante una cadena, correa o sistema de engranes. Posee un motor de dirección cuya función consiste en orientar las ruedas en una dirección establecida, controlando el eje de rotación. El robot es incapaz de desplazarse y rotar al mismo tiempo, para ello el robot deberá detenerse y alinear sus ruedas. Las ventajas radican en la separación de los motores que le permiten una traslación y rotación más simple, tanto en línea recta, como en configuraciones omnidireccionales. Las desventajas estructurales se presentan sobre el control del chasis y su orientación debido a las variaciones de velocidad [34].

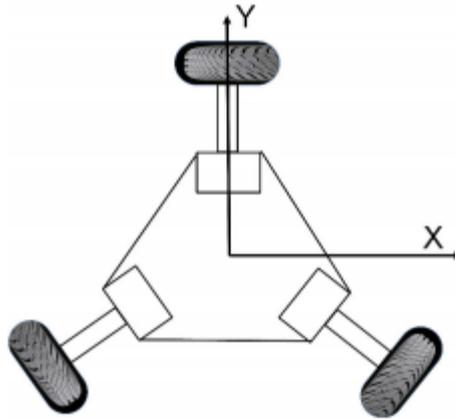


**Figura 2.** Configuración síncrona de 3 ruedas directrices [1]

#### ■ Configuración omnidireccional

Posee una estructura con tres ruedas directrices y motrices, con rodillos denominados mecanum, como se observa en Figura 3. Su ventaja estructural, basada en sus tres grados de libertad, le permite realizar movimientos en cualquier punto del espacio de

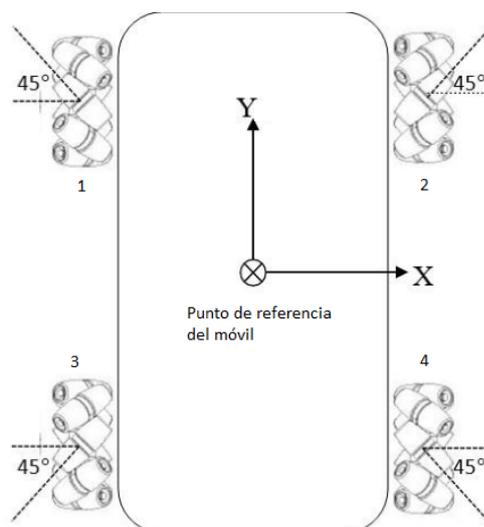
un plano, posicionarse en cualquier orientación gracias a la rotación de sus rodillos. Se aclara que esta configuración presenta una desventaja considerable al desplazarse en línea recta y es necesaria la implementación de un control, dificultando su implementación [35].



**Figura 3.** Configuración omnidireccional de 3 ruedas [1]

#### ■ Configuración omnidireccional de cuatro ruedas

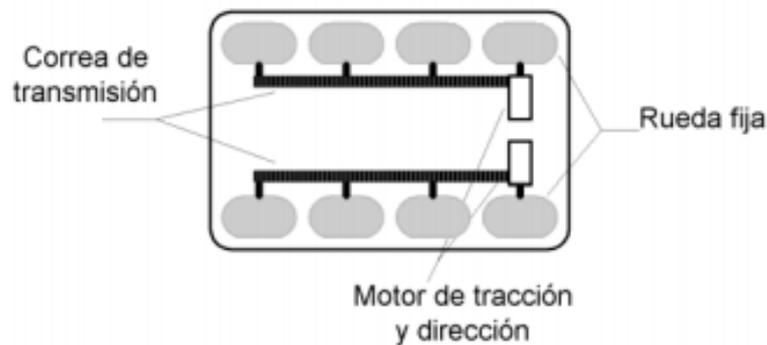
Similar al modelo omnidireccional anteriormente mencionado, y como se observa en la Figura 4, las ruedas poseen tres grados de libertad y es un modelo superior al modelo de cuatro ruedas fijas. Esto ocurre por la eficiencia del uso de motores, al aumentar su rango de velocidades. Con respecto al modelo de tres ruedas, destaca su estabilidad, su extensa maniobrabilidad, pero se dificulta la implementación de un control [35].



**Figura 4.** Configuración omnidireccional de cuatro ruedas [2]

### ■ Configuración con cintas de deslizamiento

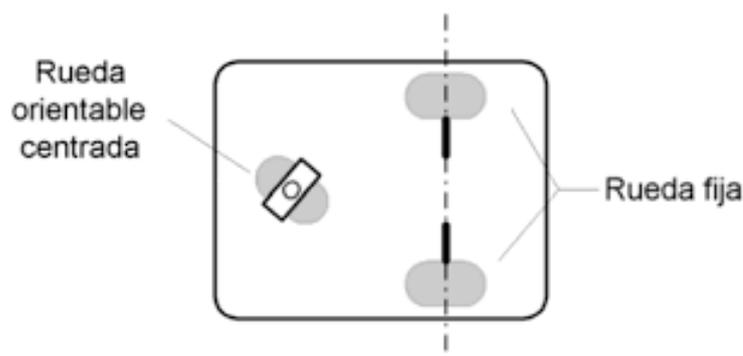
Esta configuración consiste en un sistema conformado por varias ruedas o bandas laterales que le permiten su desplazamiento y orientación, como se observa en la Figura 5. Posee un sistema de control más simple que acciona sus ruedas en la misma dirección, o de forma contraria o incluso con velocidades diferentes. Presentan una ventaja en maniobrabilidad sobre terrenos con irregularidades. Aunque se debe considerar que su orientación y posición varían por la fricción del suelo [36].



**Figura 5.** Configuración con cintas de deslizamiento [1]

### ■ Configuración triciclo

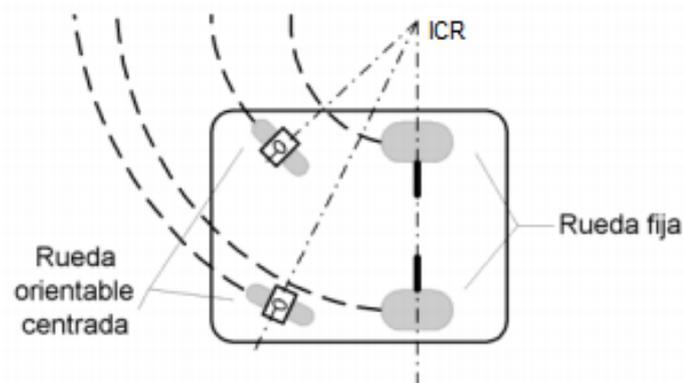
La configuración triciclo, como se observa en la Figura 6 consiste de una rueda motora, con la capacidad de direccionarse, presentando restricciones no holonómicas. Para la estabilidad, este modelo consta de dos ruedas fijas, unidas por un eje, no controladas. El modelo para desplazarse en línea recta debe posicionar la rueda en la mitad y debe estar recta. Para moverse hacia los lados, la rueda motora debe girarse de acuerdo a la dirección a la cual se desee dirigir, generando así una trayectoria curvada [36].



**Figura 6.** Configuración triciclo [1]

### ■ Configuración ackerman

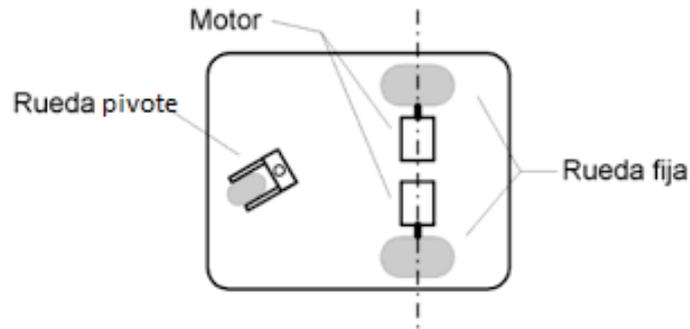
Configuración clásica de los automóviles [36]. Consiste en la combinación de dos pares de ruedas, la primera en la parte posterior que son las ruedas motoras y el otro par en la parte frontal para dirigir el móvil, ambos pares unidos por un eje respectivamente, como se observa en la Figura 7. Para evitar deslizamiento el robot gira con respecto a su centro de rotación instantáneo denominado *ICR*, considerando sus restricciones no holonómicas.



**Figura 7.** Configuración ackerman [1]

### ■ Configuración tipo unicycle

Esta configuración está compuesta por dos ruedas motoras controladas de forma independiente y una rueda pivote para mantener su estabilidad, como se observa en la Figura 8. Este tipo de robot móvil se acciona según las diferencias entre las velocidades de cada rueda para orientarse, por ejemplo, si las ruedas giran a la misma velocidad el robot se desplazará en línea recta, hacia adelante o hacia atrás. Si una de las ruedas gira más rápido que la otra, el robot seguirá una trayectoria curvada, y si las ruedas del robot giran a la misma velocidad en sentido contrario, el robot girará en un punto medio entre las dos ruedas motoras, representando sus restricciones no holonómicas. Se toma en consideración que la velocidad angular y la velocidad lineal son las que controlan el desplazamiento del robot [37].

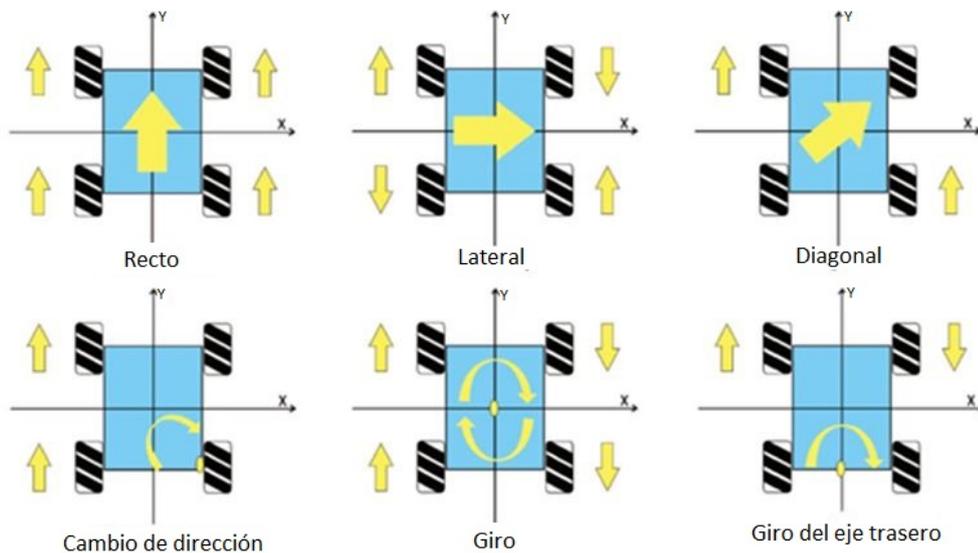


**Figura 8.** Configuración tipo unicyclo [1]

### 5.3.2. Sistema holonómico

Se caracteriza porque no presenta restricciones de velocidad en su sistema de referencia, indicando la capacidad de movimiento en cualquier dirección, sin la necesidad de rotar previamente.

Este sistema posee la misma cantidad de grados de libertad efectivos que controlables. Un ejemplo de este sistema son los robots omnidireccionales, como se indica en la Figura 9.



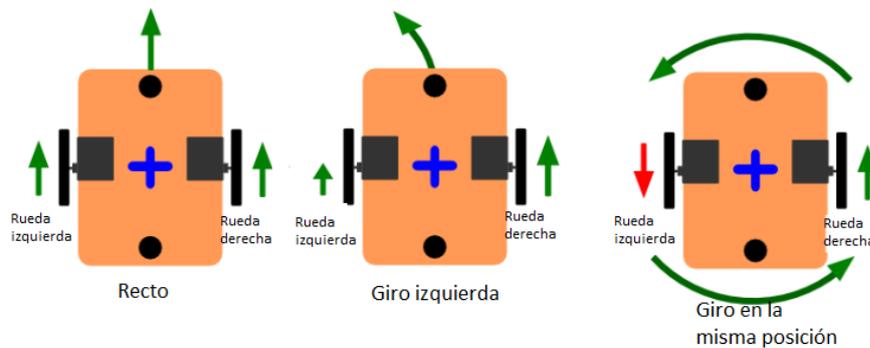
**Figura 9.** Sistema holonómico en un robot omnidireccional de 4 ruedas [1]

### 5.3.3. Sistema no holonómico

El sistema no holonómico, sí presenta restricciones de velocidad, impidiéndole modificar su dirección, la cual depende de la orientación y velocidad de sus ruedas.

Los grados de libertad controlables en el sistema no holonómico, son menores que el total de grados de libertad del robot [38].

Un ejemplo de este sistema es el robot móvil de tipo unicycle, como se observa en la Figura 10.



**Figura 10.** Sistema no holonómico en un robot tipo unicycle [1]

## 6. Cinemática de los robots móviles

La cinemática de los robots móviles determina la configuración de los mismos en su ambiente de trabajo, las relaciones geométricas y sus restricciones en las trayectorias [39]. Las ecuaciones dependen de la estructura geométrica del robot, pudiendo ser cartesianas, cilíndricas, esféricas o de estructura articulada. El estudio cinemático es muy importante y funciona de base para el estudio dinámico, estabilidad y control del robot [40]. Es fundamental definir la cinemática directa e inversa, como parte esencial del proceso para crear modelos cinemáticos de robots móviles.

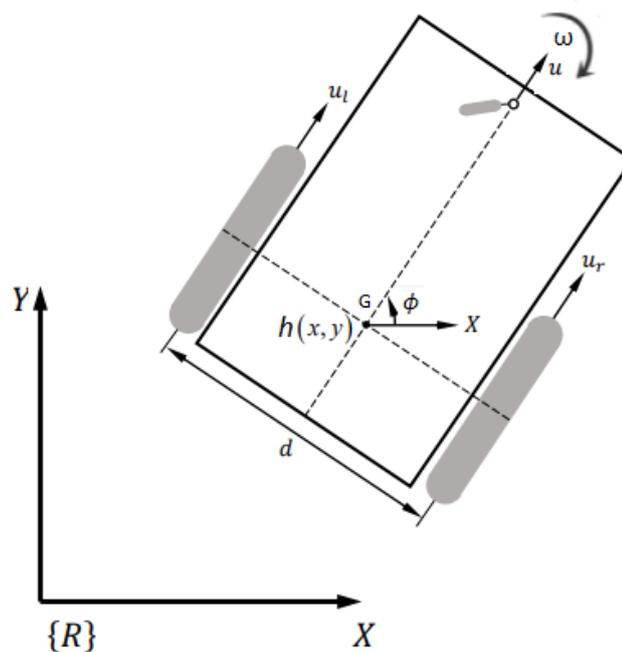
### 6.1. Modelo cinemático de un robot tipo unicycle

Un modelo cinemático es aquel que estudia, de acuerdo a un sistema de referencia fijo, las posiciones, velocidades, aceleración y orientación de un robot móvil. Este modelo no considera las fuerzas o momentos que originan el movimiento y es usado en aplicaciones de baja velocidad y poca carga sobre la estructura [25]. Los cambios en el sistema de locomoción permiten calcular la posición del robot dentro de un sistema de coordenadas definido. Para este análisis se considera que las ruedas del robot no se deslizan sobre la superficie en la cual se desplaza [41].

Existe la posibilidad de representar el modelo cinemático de un robot móvil de tipo unicycle de acuerdo a la posición de su punto de interés, pudiendo ser en el centro del eje de los motores o estando alejado del mismo.

### 6.1.1. Modelo cinemático del robot móvil tipo unicycle

La Figura 11 representa la geometría y parámetros del robot móvil de tipo unicycle cuando este presenta una masa puntual, ubicada en el centro del eje de los motores.



**Figura 11.** Geometría del robot móvil de tipo unicycle con punto de interés en la mitad del eje de las ruedas [3]

Donde

- $\{R\}$  sistema de coordenadas global;
- $h(x,y)$  punto de interés, en m;
- $\phi$  orientación del robot móvil de tipo unicycle, en  $^\circ$ ;
- $u$  velocidad lineal del robot móvil de tipo unicycle, en  $\frac{m}{s}$ ;
- $u_l$  velocidad de desplazamiento de la rueda izquierda, en  $\frac{m}{s}$ ;
- $u_r$  velocidad de desplazamiento de la rueda derecha, en  $\frac{m}{s}$ ;

- $\omega$  velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle, en  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ ;
- $d$  distancia entre la rueda derecha e izquierda, en m;
- $G$  centro de masa, en kg.

A partir de la Figura 11, se determina la cinemática del robot móvil, iniciando por el cálculo de la velocidad lineal del robot móvil que se indica en (1).

$$u = \frac{u_r + u_l}{2} \quad (1)$$

Posteriormente, se determina la velocidad angular del robot móvil de acuerdo a las velocidades lineales de cada rueda según se observa en (2).

$$\omega = \frac{u_r - u_l}{d} \quad (2)$$

A partir de (1) y (2) y de acuerdo a la geometría del robot móvil presentada en la Figura 11, se determina el modelo cinemático para un robot móvil tipo unicycle con restricción holonómica y punto de interés  $h(x,y)$  ubicado en el centro de la recta que une las dos ruedas, quedando definido por (3).

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & 0 \\ \sin(\phi) & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde

- $[\dot{x} \ \dot{y} \ \dot{\phi}]^T$  vector de velocidades del modelo cinemático del robot móvil.

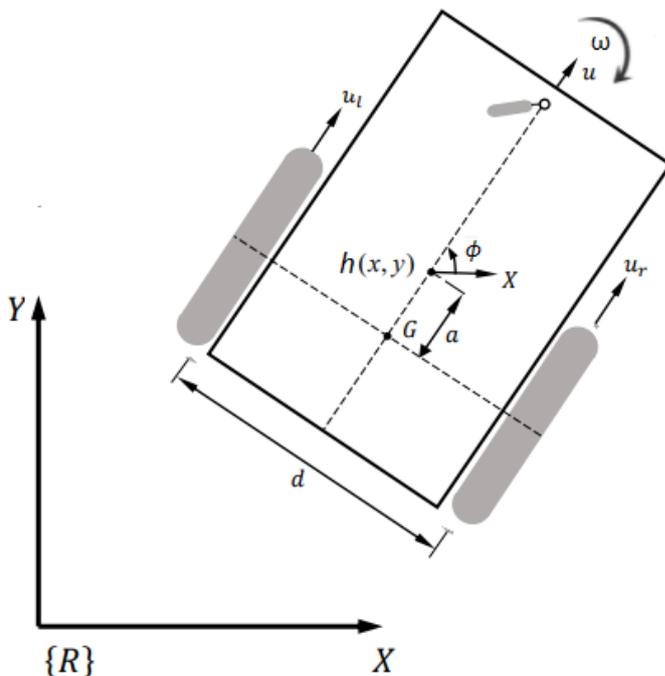
La restricción no holonómica es definida por (4).

$$\dot{y}\cos(\phi) - \dot{x}\sin(\phi) = 0 \quad (4)$$

La restricción representa la incapacidad del robot móvil de tipo unicycle para desplazarse en dirección lateral al eje de las ruedas.

### 6.1.2. Modelo cinemático del robot móvil con punto de interés desplazado

Se presenta en la Figura 12 el esquema del robot móvil de tipo unicycle con punto de interés desplazado.



**Figura 12.** Geometría del robot móvil de tipo unicycle con punto de interés desplazado [3]

Donde se incluye el siguiente parámetro adicional:

- $a$  distancia del centro del eje de las ruedas, en m.

El modelo cinemático del robot móvil de tipo unicycle con punto de interés desplazado y restricción no holonómica en (5) queda definido por [4].

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -a\sin(\phi) \\ \sin(\phi) & a\cos(\phi) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \omega \end{bmatrix} \quad (5)$$

La restricción no holonómica de este modelo se observa en (6).

$$\dot{x}\sin(\phi) - \dot{y}\cos(\phi) + a\dot{\phi} = 0 \quad (6)$$

## 6.2. Características de robots móviles de tipo unicycle existentes

Se presenta en la Tabla 1 un resumen de las características de algunos de los robots móviles tipo unicycle que se comercializan o han sido diseñados a nivel de investigación.

**Tabla 1.** Características de robots móviles de tipo unicycle existentes

Nombre robot unicycle o proyecto	Tipo	Especificaciones	Fotografía
E-puck[20]	Producto comercial marca: GCtronic	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensiones: 70 mm de diámetro, 55 mm de altura</li> <li>• Masa: 0,15 kg</li> <li>• Batería: 5 Wh LiION recargable.</li> <li>• Autonomía: 3 horas</li> <li>• Motor: 2 motores a pasos de 50:1 caja reductora.</li> </ul>	
Pioneer 3-DX[21]	Producto comercial marca: Adept	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensiones: 455 x 381 x 237 mm.</li> <li>• Masa: 9 kg</li> <li>• Batería: 3 baterías de 7,2 Ah cada una</li> <li>• Autonomía: 8-10 horas</li> <li>• Motor: 2 motores de alta velocidad, alto torque DC.</li> </ul>	
<b>Proyecto: Diseño, construcción y modelo dinámico de un robot móvil de tracción diferencial aplicado al seguimiento de trayectorias[22]</b>	Proyecto desarrollado por: Daniel Hernández, Universidad Autónoma de Puebla	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dimensiones: 250 mm diámetro y 79,2 mm de altura</li> <li>• Masa: no se especifica</li> <li>• Baterías: no se especifica</li> <li>• Autonomía: no se especifica</li> <li>• Motor: 2 motor-reductores pololu (131:1) caja reductora.</li> </ul>	

### 6.3. Seguimiento de trayectoria

El término trayectoria comprende el recorrido de las sucesivas posiciones del móvil en el curso de su movimiento, es decir el robot deberá seguir como referencia una curva parametrizada en función del tiempo, tomando específicamente esto como una restricción cuando establece que, el robot deberá encontrarse en un punto determinado en un tiempo dado. Para obtener un modelo práctico, que un robot móvil de tipo unicycle pueda seguir correctamente, se deben considerar las características físicas y dinámicas del robot, esto en cuanto a sus limitantes como velocidad y aceleración [42]. La creación de una trayectoria puede realizarse con el uso de sensores o también como una generación prevista ya establecida, conforme al ambiente de trabajo. Una vez esta trayectoria ha sido definida, el robot deberá rastrearla, esto significa que, el punto de interés del robot seguirá el punto referencial de la trayectoria establecida, generando el menor error posible de acuerdo a la medición de la distancia. En términos ideales, se podría realizar este control con comandos de avance, pero dado que existen factores que en la realidad impiden esta idea, se debe emplear un control retroalimentado que combine los comandos de avances para obtener un resultado favorable. A continuación, se establecen distintos métodos para realizar el cometido del seguimiento de trayectorias.

### 6.4. Tipos de algoritmos para el seguimiento de trayectorias para un robot no holonómico tipo unicycle

Se establecen cuatro métodos para el control de robots móviles de configuración de tipo unicycle con restricción no holonómica.

#### ■ Controlador lineal

El trabajo de investigación [43] propone un algoritmo para un controlador lineal. La forma más sencilla de realizar el diseño de un controlador de seguimiento trayectoria consiste en utilizar una linealización tangente a lo largo de la misma. Es importante mencionar que, la dinámica del robot no se considera. Aunque, en el caso de esta investigación, las velocidades ni aceleraciones, superan los límites del robot y aproximadamente pueden seguir la referencia como comandos de velocidades lineal y

angular. Cuando la velocidad temporalmente supera las limitaciones del robot, esto genera una saturación. En estos instantes, es importante que el robot mantenga su dirección, lo que significa que la relación de velocidades deberá conservarse.

El controlador lineal emplea una ecuación en función del tiempo, de acuerdo al punto de referencia al que el robot se espera que llegue. Para el controlador lineal, se establece que debe consistir de una parte de retroalimentación y otra parte de prealimentación en el sistema. Estos valores son obtenidos por las referencias de la velocidad angular y lineal en la trayectoria.

#### ■ **Controlador basado en Lyapunov**

La teoría de estabilidad de Lyapunov, se establece como una herramienta con una aplicabilidad muy alta para el análisis de sistemas no lineales que varían en el tiempo. Es una estrategia que se aplica también al diseño de controladores. Su objetivo principal consiste en encontrar una función candidata de Lyapunov, de tal modo que cumpla con las condiciones que aseguren la estabilidad de sus estados de equilibrio [4].

#### ■ **Métodos predictivos**

Este control basa su desempeño en predicciones, tanto de las variables de entrada como de salida del controlador. Estas predicciones se identifican por parámetros llamados horizontes de predicción y horizonte de control, mediante los cuales, es posible predecir el cambio de las variables y efectuar una o más acciones sobre esas predicciones, respectivamente. El número de predicciones puede convertirse en una buena estrategia para la sintonización del controlador hasta cierto punto, ya que una desventaja del uso de este controlador consiste en su carga computacional, la cual puede ser muy alta comparándola con otras estrategias de control [43].

#### ■ **Métodos neuronales**

Un área de interés sobre el control de robots móviles, se presenta mediante el uso de redes neuronales en aplicaciones de lazo cerrado con retroalimentación. Se debe considerar que la presencia de redes neuronales implica otros puntos análisis, de tal forma que garanticen la estabilidad del sistema, en función de los pesos de la red. La idea de este tipo de algoritmo, al igual que los anteriores, pretende encontrar una

velocidad de control adecuada para estabilizar este sistema en su lazo cerrado. Los modelos no holonómicos de control se simplifican, asumiendo una velocidad ideal de seguimiento, lo cual presenta problemas como lo son, que la velocidad de simulación, no es la misma que en la práctica o experimentación, las perturbaciones no son analizadas y finalmente, la dinámica del sistema es necesaria para el control [44].

La investigación realizada por [43], establece el punto de comparación sobre el mejor modelo en cuanto a robustez del sistema y bajo error de seguimiento de trayectoria. El problema de seguimiento de trayectoria trata de un procedimiento computacional que ejecute correctamente los comandos que le permitan al robot seguir la referencia de la trayectoria. Para ello, la trayectoria debe ser planeada con antelación, de tal manera que se cumpla la restricción no holonómica. Por lo general, el seguimiento de trayectoria consiste en procesos de retroalimentación que evalúan el error obtenido, alimentando el sistema para disminuirlo y corregir la trayectoria de ser necesario.

#### **6.4.1. Controlador basado en Lyapunov**

Para explicar el siguiente controlador es necesario establecer los conceptos, definiciones y teoremas principales que abarcan el modelo de Lyapunov, para sistemas no lineales, bajo las consideraciones de estabilidad de acuerdo a [4].

##### **6.5.1.1. Estabilidad de Lyapunov**

Un sistema estable se caracteriza por su cercanía al punto de equilibrio, alejándose lo más posible de la inestabilidad del mismo.

El método de estabilidad de Lyapunov se aplica a sistemas no lineales. Lyapunov definió dos métodos de estabilidad. El primer método requiere de la disponibilidad del tiempo de respuesta del sistema. El segundo método no requiere del conocimiento del tiempo de respuesta del sistema. La matriz  $\mathbf{A}(t)$  que cumple con estas propiedades, se conoce como la matriz de Hurwitz.

##### **6.5.1.2. Teoremas y definiciones**

A continuación se describen las definiciones y teoremas principales relacionados al método de Lyapunov.

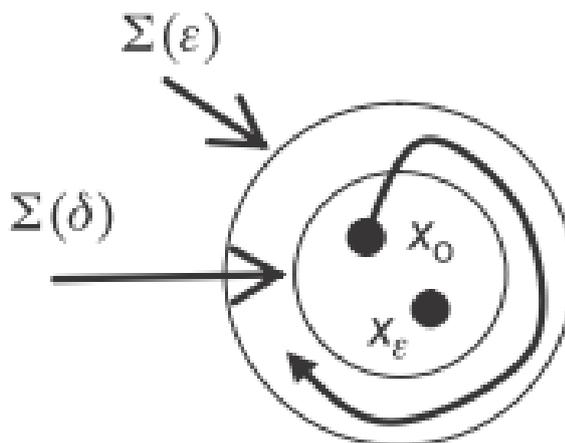
**Definición 1:**

El estado de equilibrio  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ , del sistema evaluado  $\mathbf{A}(t)\mathbf{x}$  es estable, siempre y cuando para el valor inicial del tiempo  $t_0$  y cada número real  $\epsilon > 0$ , exista algún número  $\sigma$  que dependa de  $t_0$  y  $\epsilon$ , como se presenta en la Figura 13. Tal que,

$$\|\mathbf{x}(t_0)\| < \sigma(t_0, \epsilon) \Rightarrow \|\mathbf{x}(t)\| < \epsilon, \forall t \geq t_0$$

La función del sistema se establece en (7) con la derivada del estado de equilibrio.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}(t)\mathbf{x} \quad (7)$$



**Figura 13.** Ilustración de la estabilidad de Lyapunov [4]

**Teorema 1:**

La matriz de transición  $\Phi(t, t_0)$  de un sistema esta englobada por:

$$\|\Phi(t, t_0)\| < k(t_0) \forall t \geq t_0 \iff (x = 0), = \mathbf{A}(t)\mathbf{x}$$

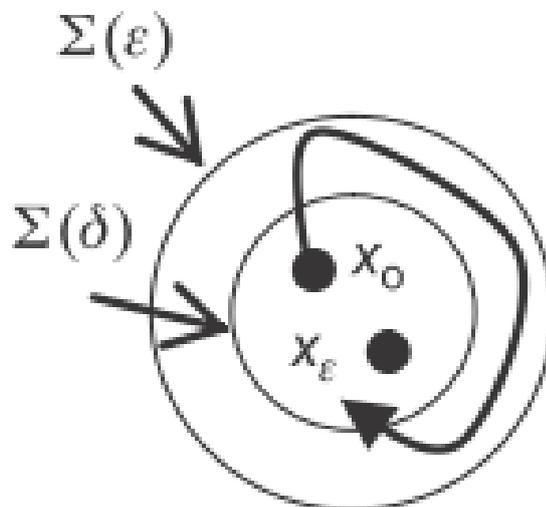
Siendo  $\mathbf{A}(t)\mathbf{x}$  estable para Lyapunov y  $k$  un valor de ganancia. Considerando  $\|\mathbf{x}(t)\|$  el límite de un sistema lineal que no depende de  $\mathbf{x}_0$ . Otorgándole así un estabilidad global. Cuando la estabilidad depende de  $\mathbf{x}_0$ , el sistema se conoce como estabilidad local. Claramente, un sistema con estabilidad global posee la estabilidad local.

**Definición 2:**

El estado de equilibrio  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$  es asintóticamente estable, de acuerdo a la Figura 14 si:

- El sistema posee los criterios de estabilidad de Lyapunov.

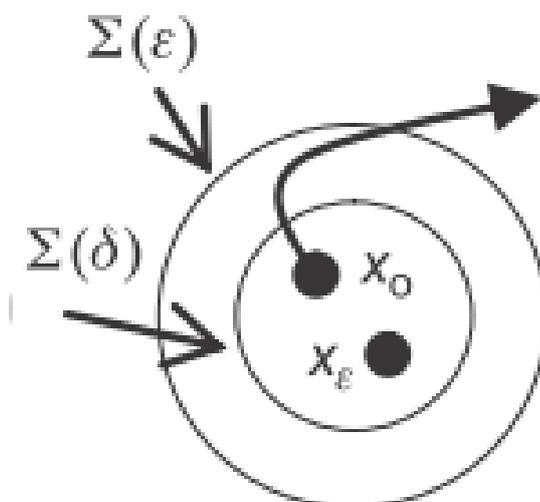
Cada  $t_0$  y  $\mathbf{x}_0$  lo suficientemente cerca de  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ , bajo la condición de  $\mathbf{x}(t) \rightarrow \mathbf{0}; t \rightarrow \infty$



**Figura 14.** Ilustración de la estabilidad asintótica de Lyapunov [4]

**Definición 3:**

El estado de equilibrio  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ , del sistema (7) es inestable, como se observa en la Figura 15, si para algunos números reales  $\epsilon > 0$ , algunos  $t_1 > t_0$  y cualquier número real  $\sigma$  arbitrariamente pequeño, existe un estado inicial  $\|\mathbf{x}_0\| < \sigma$ , tal que;  $\|\mathbf{x}(t)\| > \epsilon$  cuando  $t$  es mayor o igual que  $t_1$ .



**Figura 15.** Ilustración de la inestabilidad [4]

### 6.5.1.3. Método directo de Lyapunov

Siendo  $d(\mathbf{x}(t), 0)$ , la distancia del estado  $\mathbf{x}(t)$ , desde el origen en  $\mathbf{x} = \mathbf{0}$ . Existiendo el caso en el que encontramos una distancia  $d(\mathbf{x}(t), 0)$ , que tienda a cero desde  $t \rightarrow \infty$ , se puede concluir que el sistema es asintóticamente estable. Para el modelo directo no es necesario encontrar una distancia, en cambio se debe buscar una función de energía generalizada.

#### Definición 4

La función de Lyapunov invariante en el tiempo se denomina función escalar  $V(\mathbf{x})$ , cuando  $\mathbf{x}$  para todo  $t \geq t_0$  y  $\mathbf{x}$  en cercanía con el origen satisface las siguiente cuatro condiciones:

(i)  $V(\mathbf{x})$ , es continuo y tiene derivadas continuas

(ii)  $V(0) = 0$

(iii)  $V(\mathbf{x}) > 0 \forall \mathbf{x} \neq 0$

(iv)  $\frac{dV(\mathbf{x})}{dt} = \left[ \frac{\partial V(\mathbf{x})}{\partial \mathbf{V}\mathbf{x}} \right]^T \frac{d\mathbf{x}}{dt} < 0$ , para cada  $\mathbf{x} \neq 0$

## 6.5. Inteligencia artificial

La aplicación de la inteligencia artificial consiste en diseñar algoritmos que sean capaces de la toma de decisiones y cumplir con su función de forma autónoma. El estudio de estas técnicas dentro de la robótica móvil, permite que el sistema pueda reaccionar ante situaciones no previstas o errores, para lo cual podrá buscar una solución o alternativa funcional [45].

Existen varias técnicas para que un sistema se considere inteligente, cuyas características son las siguientes:

- Percepción mediante sistemas sensoriales.
- Capacidad de adaptación ante circunstancias espaciales modificadas.
- Navegación, planificación y actuación autónomas.
- Software/programación orientados a tareas.

De forma general, según [45] ciertas aplicaciones prácticas se pueden listar de la siguiente forma:

- Monitoreo: recoger, analizar y utilizar la información para optimizar su funcionamiento.

- **Visión artificial:** detectar y reconocer la presencia y orientación de un objeto o pieza, realizar tareas de inspección y selección, así como analizar los resultados de una operación y tomar las decisiones correspondientes.
- **Adaptación:** ajustar la orientación de la tarea a medida que el resto de las máquinas se mueven. Además, también son capaces de controlar la fuerza requerida para una aplicación concreta como puede ser la de pick and place, que consiste en recoger cosas de un lugar y colocarlas en otro, o detectar una posible colisión y evitarla consecuentemente.
- **Aprendizaje:** predecir y diagnosticar errores en la producción mediante la identificación automática de los patrones de las tareas que esté realizando.

### **6.5.1. Visión por computador**

Esta técnica consiste en entrenar a una computadora para interpretar y entender, de forma visual su entorno. Esto se logra a partir de la conversión digital de imágenes, utilizando una cámara que cumple la función de sensor y es capaz de observar el objetivo correspondiente para procesar dicha información.

En vehículos autónomos, sean con ruedas, acuáticos o aéreos, el nivel de autonomía presenta el espectro de sistemas completamente independientes de un usuario, hasta asistentes que presentan información relevante desde su análisis visual, como la detección de obstáculos o geolocalización.

Entre las tareas comunes de la visión por computador se indican las siguientes:

- **Reconocimiento:** identificación, reconocimiento y detección de objetos.
- **Análisis de movimiento:** movimiento de la cámara, seguimiento y flujo óptico.
- **Reconstrucción de escenas:** consiste en un escaneo de un entorno para luego reconstruirlo en 3D en un mapa virtual.
- **Restauración de imágenes:** eliminación de ruido, movimiento, desenfoque, entre otros, mediante la utilización de filtros para mejorar la calidad del resultado.

### 6.5.2. Procesamiento de imágenes

El conjunto de técnicas utilizadas para procesar imágenes tiene como objetivo, mejorar su calidad o permitir la búsqueda de información. Dicha imagen se convierte en una función digital, compuesta por un número finito de elementos denominados píxeles [46]. La cantidad de píxeles en una imagen es su resolución, y cada píxel puede encontrarse coloreado. Estos espacios de color, entre ellos el más utilizado (RGB), de sus siglas en inglés, Rojo, Verde y Azul, son la representación matricial de la cantidad de niveles de intensidad correspondiente, es decir la cantidad de color rojo, verde y azul que posee un píxel.

El análisis y procesamiento de imágenes es el área de la ingeniería que se encarga de la extracción de mediciones, datos o información contenida en una imagen, posee de parámetro de entrada una imagen y su salida, por lo general es una salida numérica [46].

Existen diversas etapas de procesamiento y filtrado para cada aplicación específica y que el resultado del procesamiento dependa en su totalidad del problema que se este abordando [46]. Entre los campos más grandes de análisis se tienen los que se describen a continuación:

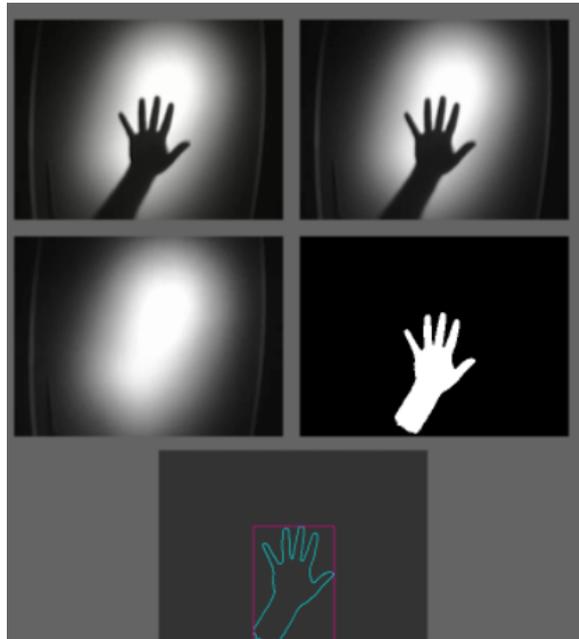
- La digitalización y codificación de imágenes que facilite la transmisión, representación y almacenamiento de las mismas.
- Mejora y restauración de una imagen para interpretar más fácilmente su contenido.
- Descripción y segmentación de imágenes para aplicaciones de visión robótica o visión artificial.

Se presenta en la Figura 16 un ejemplo del procesamiento de imagen, aplicado a la detección y substracción del fondo de una imagen de una mano humana.

Y finalmente, se exponen los tres grupos más grandes de procesamiento de imágenes, según [46], los cuales son:

- Algoritmos en el dominio espacial. Se refiere a métodos que procesan una imagen píxel por píxel, o también tomando en cuenta un conjunto de píxeles vecinos.
- Algoritmos en el dominio de la frecuencia. Frecuentemente, estos métodos son aplicados sobre los coeficientes resultantes de la Transformada de Fourier de una imagen.

- Algoritmos de extracción de características. A diferencia de los dos grupos anteriores, los algoritmos de extracción de características están enfocados al análisis de imágenes para la extracción de atributos y regiones de interés, separación de objetos del fondo, detección de bordes o formas, entre otros.



**Figura 16.** Resultados de la detección y substracción del fondo de una imagen de una mano humana. [5]

## 7. Diseño y dimensionamiento mecatrónico del robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica

Se realiza en la presente sección el diseño, dimensionamiento y selección de componentes, mecánicos y electrónicos, a su vez del desarrollo del algoritmo de programación. Los parámetros fundamentales de diseño de la plataforma se establecen de acuerdo al criterio de función del robot móvil de tipo unicycle. Se consideran las tareas que realizará, además de la descripción de las características y sus especificaciones. Finalmente, se determinan los elementos y tecnologías que le permitirán al robot móvil de tipo unicycle, cumplir con los objetivos de su funcionamiento, haciendo alusión a sus materiales, componentes, dispositivos de control y el algoritmo de control e identificación del seguimiento de trayectoria.

### 7.1. Análisis de requerimientos del diseño

El robot móvil de tipo unicycle será utilizado en su totalidad para el seguimiento de trayectorias definidas en el algoritmo de control. La ley de control del sistema pretende corregir su posicionamiento con la resta de los resultados del seguimiento y sus datos referenciales, de acuerdo a la trayectoria definida y la evaluación del error por medio de los sensores en las ruedas del robot, de tal forma que se logre completar satisfactoriamente el seguimiento.

Como valor agregado se emplea la detección de color y forma, como técnicas de inteligencia artificial, cuyo propósito consiste en ser el mecanismo de selección de las trayectorias que el robot móvil de tipo unicycle deberá seguir,

Las especificaciones técnicas parten del cumplimiento de los objetivos del trabajo de investigación y se analizan a continuación los puntos más relevantes de su diseño.

#### ■ Dimensiones:

Para definir la dimensiones se realizó un análisis de los modelos existentes de robots móviles de tipo unicycle, como se expuso en la sección 6.2. De acuerdo a los tres modelos evaluados en el marco teórico, se concluye que para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, las dimensiones aproximadas que deberá tener el robot se encuentra en el siguiente rango se que se observa en la Tabla 2.

**Tabla 2.** Rango de dimensiones permisibles para el diseño del robot móvil de tipo unicycle

Dimensiones	Mínimo	Máximo
Largo	18 cm	20 cm
Ancho	20 cm	25 cm
Alto	10 cm	15 cm

#### ■ Masa máxima:

El robot móvil de tipo unicycle debe ser ligero y de acuerdo a los modelos analizados, no superar 1 kg de masa. Evitando así la necesidad de que los motores ejerzan un torque alto para moverlo.

- **Capacidad de carga útil:**

La capacidad de carga útil es la cantidad de masa autorizada adicional que soporta el robot móvil de tipo unicycle, se considera el funcionamiento con una carga útil de 0,2 kg en caso de colocar algún elemento adicional al sistema.

- **Velocidad del robot:**

Según la investigación realizada de los modelos existentes, una velocidad lineal adecuada para el seguimiento de trayectorias en robots móviles de tipo unicycle se encuentra entre  $0,1 \frac{m}{s}$  a  $0,6 \frac{m}{s}$  y una velocidad angular de  $1 \frac{rad}{s}$ , debido a consideraciones de maniobrabilidad y velocidad de respuesta sobre las trayectorias, lo cual se implementa en el algoritmo de control.

- **Tiempo de funcionamiento:**

El tiempo de funcionamiento esperado del robot móvil de tipo unicycle es de al menos una hora, antes de cargar su batería. Durante este intervalo el robot deberá ser capaz de realizar el seguimiento de todas las trayectorias definidas en su algoritmo y varias iteraciones de las mismas.

- **Superficie de desplazamiento:**

La superficie en la que se desplazará el robot móvil de tipo unicycle deberá ser lisa, sin inclinaciones y sin presentar obstáculos. Bajo estas consideraciones, se establece que el error generado durante el seguimiento de trayectoria sea mínimo. Las superficies ideales para el desplazamiento son aquellas cuyo coeficiente de fricción se encuentra entre  $> 0,2$  y  $< 0,4$  por ejemplo: las baldosas cerámicas esmaltadas y lisas de clase 1, el piso de madera pulida y el piso flotante según el apartado 4.1 de la norma ISO 10545-17.

- **Autonomía:**

El robot móvil de tipo unicycle realiza un desplazamiento autónomo para el seguimiento de trayectorias, sin ser considerada la evasión de obstáculos, sin embargo, la ley de control deberá corregir, mediante el uso de sensores de velocidad, el posicionamiento

del mismo sobre la trayectoria definida, interactuando con un módulo de comunicación inalámbrica.

- **Procesamiento de imagen:**

Para el procesamiento de imagen se requiere de un dispositivo que sea capaz de capturar una imagen, que pueda ser analizada dentro del algoritmo, a fin de identificar el color y la forma. Este dispositivo se encuentra externo al robot móvil de tipo unicycle y tiene una posición fija con iluminación adecuada. Según la investigación realizada, se trabaja con los colores: verde, rojo y azul, y figuras geométricas tales como: círculo, triángulo y cuadrado.

## **7.2. Diseño de la estructura mecánica**

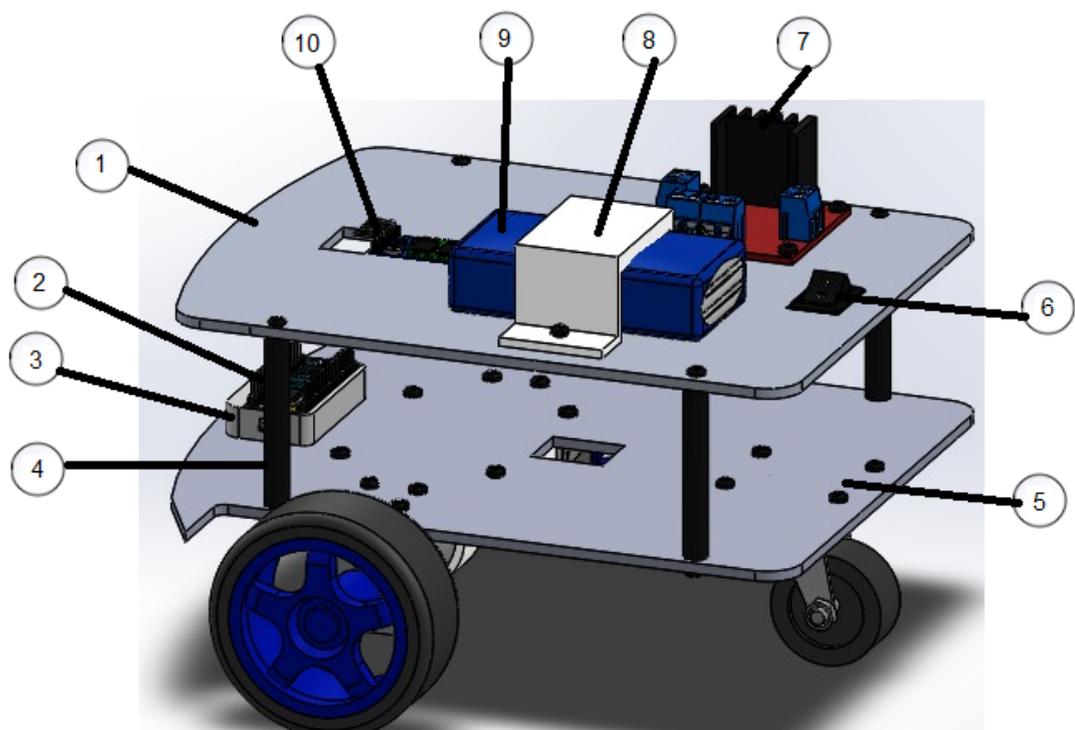
El diseño y dimensionamiento mecánico, se lo realiza de acuerdo a las especificaciones técnicas analizadas, se dispuso de un diseño modular que permita reemplazar, reparar o modificar al robot móvil de tipo unicycle de una forma rápida.

La estructura consta de un chasis de dos placas, una superior y una inferior, separadas 5 cm por un espaciador, los componentes electrónicos se acoplan a la placa inferior, y se ajustan con su respectivo soporte o empernados directamente. Al controlador se lo coloca dentro de un contenedor plástico. El módulo bluetooth y el interruptor se colocan en la placa superior.

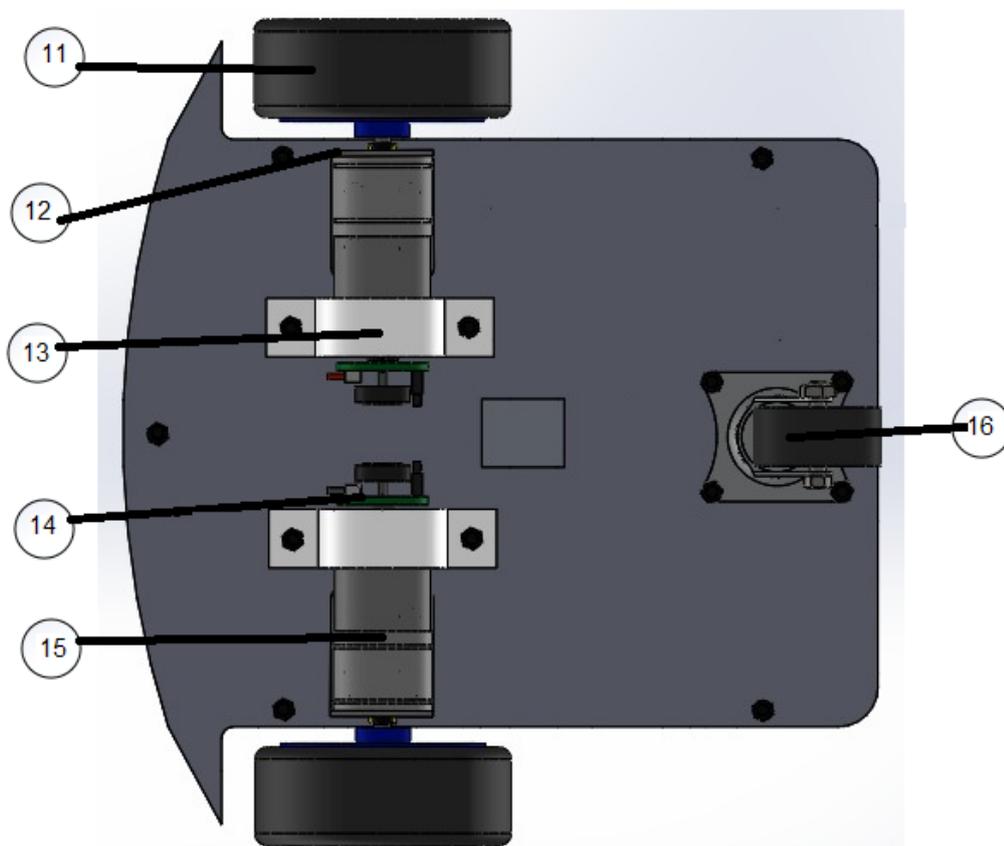
Bajo las consideraciones del modelo del robot móvil de tipo unicycle, se colocan dos ruedas motoras independientes, con su respectivo soporte, sensor de velocidad y una rueda pivote que otorga estabilidad al robot móvil.

Además, en esta sección se definen las características de los componentes diseñados como sus dimensiones y material, y la selección de los motores del robot móvil de tipo unicycle. Se muestra el diseño 3D realizado en Solidworks, con los componentes principales, como se observa en las Figura 17 y 18.

La Tabla 3, presenta el todos los elementos numerados del robot móvil de tipo unicycle



**Figura 17.** Robot móvil de tipo unicycle, vista isométrica



**Figura 18.** Robot móvil de tipo unicycle, vista inferior

**Tabla 3.** Descripción de los principales componentes del robot móvil de tipo unicycle

Numeración	Descripción
1	Placa superior del robot móvil
2	Controlador Arduino Nano
3	Contenedor Arduino Nano
4	Espaciador
5	Placa inferior del robot móvil
6	Interruptor ON/OFF
7	Driver
8	Soporte batería
9	Batería Lipo
10	Módulo bluetooth
11	Rueda
12	Soporte rueda/placa inferior
13	Soporte motor/placa inferior
14	Encoder
15	Motorreductor DC
16	Rueda pivote con llanta

### 7.2.1. Diseño mecánico

El dimensionamiento mecánico contempla el diseño del chasis, soportes, espaciadores y contenedor del controlador de la estructura del robot móvil de tipo unicycle, la selección del material y el dimensionamiento de los motores de acuerdo al análisis de requerimientos, las dimensiones completas de cada elemento se encuentran en el Anexo B.

### 7.2.2. Material de la estructura

Para la selección de materiales del chasis del robot móvil de tipo unicycle, se considera que la estructura sea rígida, liviana y estable, capaz de resistir golpes ligeros, y que no sea muy costosa.

Se realiza una comparación entre tres tipos diferentes de materiales, que cumplan con estas condiciones.

- **Aluminio:** De acuerdo a los criterios del catálogo de Almexa [47], se presenta al aluminio como una opción favorable para la construcción de maquinaria y automóviles.

El catálogo indica la siguientes características del uso del aluminio:

- Alta maleabilidad

- Alta rigidez
  - Fácil de maquinar
  - Fortaleza
  - Larga vida útil
  - Densidad:  $2,7 \frac{g}{cm^3}$
- **PLA:** El PLA o ácido poliláctico, es un polímero sintético de uso común para impresión en 3D, con un amplio uso para la fabricación de diversos elementos y piezas, entre sus características se presentan las siguientes:
- Alta versatilidad para diferentes aplicaciones
  - Material frágil que no es aconsejable maquinar una vez se encuentre impreso
  - Baja resistencia a esfuerzos
  - Susceptible a altas temperaturas
  - Muy alta capacidad de impresión
  - Bajo costo
  - Larga vida útil
  - Densidad:  $1,24 \frac{g}{cm^3}$
- **Acrílico:** El acrílico o metacrilato es un termoplástico rígido, por lo general transparente óptimo para diferentes usos, entre sus características más importantes se encuentran las siguientes:
- Alta versatilidad para diferentes aplicaciones
  - Fácil de maquinar
  - Baja resistencia a la abrasión
  - Larga vida útil
  - Bajo costo
  - Densidad:  $1,19 \frac{g}{cm^3}$

En conclusión, para la aplicación del seguimiento de trayectorias y considerando que el robot móvil de tipo unicycle no soportará cargas adicionales a las ya consideradas dentro del diseño, cualquiera de estos materiales podría ser utilizado para su construcción. Sin embargo, se considera la plancha lisa de aluminio de 3 mm para las piezas de su chasis, porque gracias a su composición, le otorga al mismo la rigidez necesaria, sin el riesgo de fracturarse, que sea liviano, larga vida útil y además, que el desgaste de material en los orificios es menor en comparación con los otros materiales evaluados.

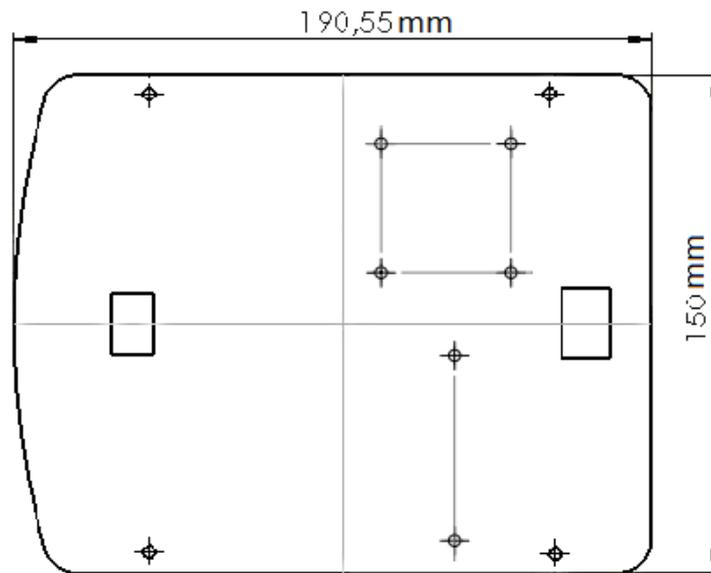
En cuanto a los otros componentes, como espaciadores, soportes de los motores y el contenedor se opta por PLA que es un material versátil que facilita el diseño de las piezas requeridas para el robot móvil de tipo unicycle.

### 7.2.3. Dimensionamiento del chasis

De acuerdo a la Tabla 2, se establecen las dimensiones del robot móvil de tipo unicycle, para esto se obtuvo el promedio entre valores máximos y mínimos permisibles y se ajustó de acuerdo a la selección y dimensionamiento de los otros componentes del robot móvil, de tal manera que las placas sostengan a todos los elementos mediante pernos, sin obstruirse y con distancias adecuadas para su funcionamiento.

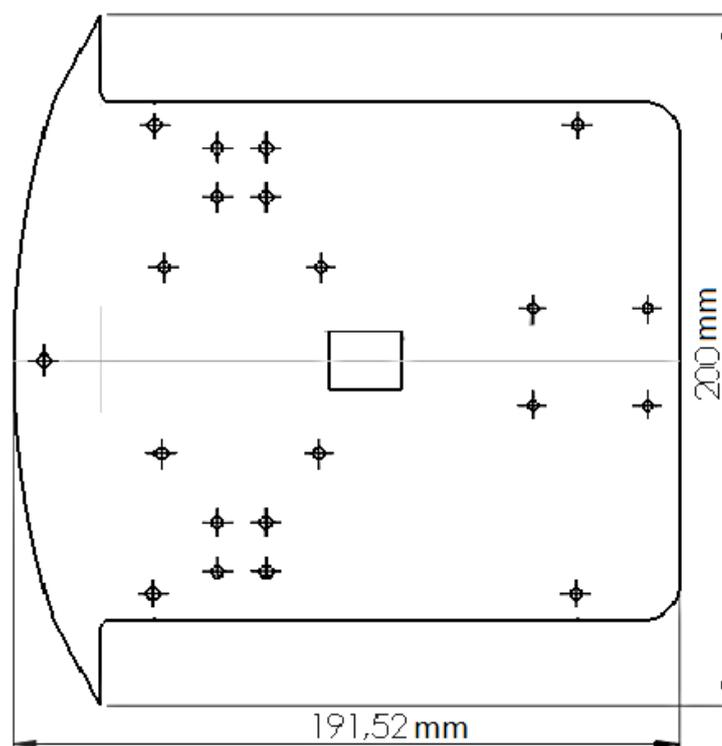
Los valores finales son los siguientes:

- Largo: 19,15 cm
- Ancho: 21,0 cm
- Alto: 12,8 cm
- **Placa superior del robot móvil de tipo unicycle:** La placa superior de chapa de aluminio posee las siguientes dimensiones 190,5 x 150 x 3 mm. Presenta diez perforaciones para los pernos de los espaciadores, soporte de la batería, driver y dos orificios para la colocación del módulo bluetooth y del interruptor, como se observa en la Figura 19.



**Figura 19.** Placa superior del robot móvil de tipo unicycle

- Placa inferior del robot móvil de tipo unicycle:** La placa inferior de chapa de aluminio posee las siguientes dimensiones 191,5 x 200 x 3 mm. Presenta veinte y un perforaciones para los pernos de los espaciadores, soportes de motores, contenedor, rueda pivote y un orificios para la conexión de los motores y sus sensores, como se observa en la Figura 20.



**Figura 20.** Placa inferior del robot móvil de tipo unicycle

#### 7.2.4. Selección de las ruedas

Según las especificaciones técnicas se determinó que el alto máximo del robot móvil de tipo unicycle deberá ser de 12,8 cm y las ruedas deberán ser capaces de desplazarse en superficies lisas.

De acuerdo a estos parámetros, se selecciona a partir del Catálogo de Chihai Motor [6], el modelo de llanta CH1016183, visto en la Figura 21, que presenta un buen agarre sobre superficies lisas por su revestimiento de plástico y su textura. Se incluye el soporte de 4 mm con el eje de motor tipo D y sus respectivos pernos para ajustarlo, como se observa en la Figura 22 con las siguientes características en la Tabla 4.



**Figura 21.** Llanta azul de 65 mm [6]



**Figura 22.** Kit de soporte del eje y pernos [6]

**Tabla 4.** Especificaciones técnicas rueda CH1016183 [6]

<b>Especificación</b>	<b>Descripción</b>
Material	Plástico
Color	Azul cromado
Diámetro interno	60 mm
Diámetro externo (con llanta)	65 mm
Ancho	28 mm

### 7.2.5. Dimensionamiento de los motores

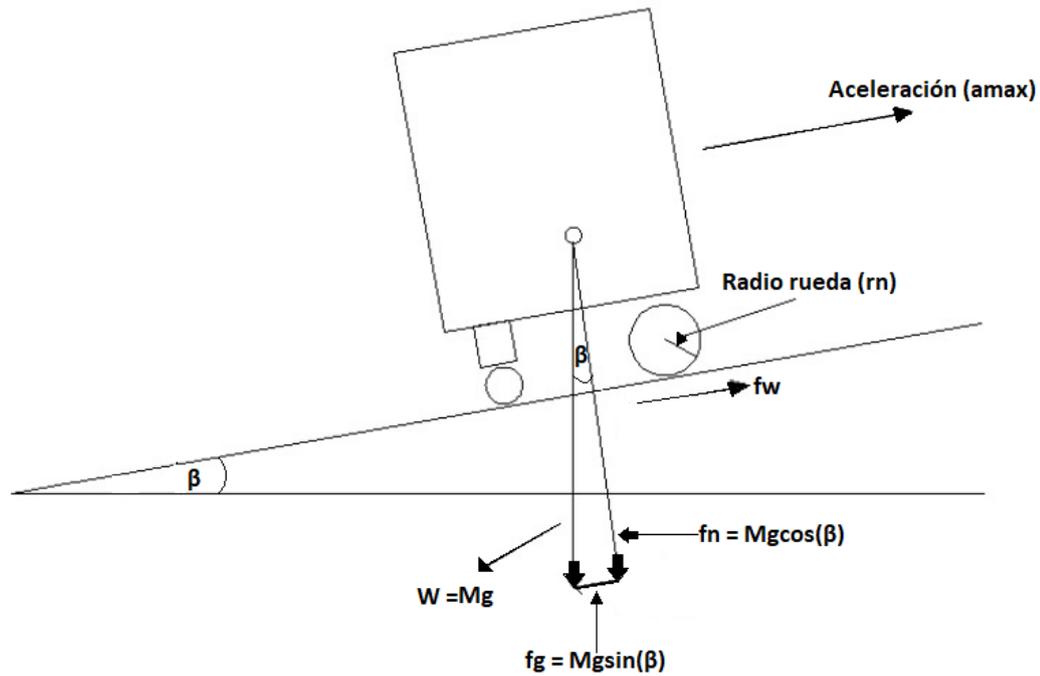
Para encontrar el motor requerido para el movimiento del robot de tipo unicycle se calcula a partir de las recomendaciones de la revista ServoMagazine [7], que presenta un método para obtener la potencia del motor. Se observa el valor total de masa del robot móvil de tipo unicycle en la Tabla 5 y la suma del valor de la carga útil de 0,2 kg, determinado en las especificaciones técnicas.

**Tabla 5.** Masa de la plataforma móvil

<b>Descripción</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Masa unitaria (kg)</b>	<b>Masa total (kg)</b>
Placa inferior	1	0,225	0,225
Placa superior	1	0,221	0,221
Soportes	varios	0,024	0,024
Componentes electrónicos	varios	0,047	0,047
Espaciadores	4	0,004	0,016
Rueda	2	0,035	0,07
Motor DC	2	0,097	0,194
Batería	1	0,049	0,049
Rueda pivote con rueda	1	0,025	0,025
Contenedor arduino	1	0,004	0,004
Carga útil	varios	0,2	0,2
<b>Total</b>			<b>1,075</b>

En total se tiene una masa de 0,875 kg solo del robot móvil de tipo unicycle y a este valor se suma la carga útil adicional de 0,2 kg, y finalmente, con este valor se procede a calcular los motores más adecuados para el sistema, de acuerdo al diámetro de la rueda que se utiliza de 65 mm.

Se utiliza el siguiente diagrama de cuerpo libre de la Figura 23 para determinar las fuerzas en (8):



**Figura 23.** Diagrama de cuerpo libre [7]

$$\sum \text{Fuerza} = f_{total} = f_w - f_g = Ma_{max} \quad (8)$$

Donde

- $f_w$  fuerza que empuja contra la rueda, en N;
- $f_g$  fuerza de gravedad sobre el robot móvil de tipo unicycle, en N;
- $g$  gravedad, en  $\frac{m}{s^2}$ ;
- $W$  peso del robot móvil de tipo unicycle, en N;
- $T$  torque del motor, en Nm;
- $M$  masa total del robot móvil de tipo unicycle, en kg;
- $r_n$  radio de la rueda, en m;
- $\beta$  ángulo de inclinación, en  $^\circ$ .

Se establece la aceleración del robot móvil tipo unicycle de acuerdo a la velocidad máxima de  $0,6 \frac{m}{s}$ , dato establecido en las especificaciones técnicas, que el robot puede alcanzar en 2 segundos de acuerdo a (9).

$$a_{max} = \frac{u}{t} \quad (9)$$

Donde

- $u$  velocidad lineal máxima del robot móvil de tipo unicycle, en  $\frac{m}{s}$ ;
- $t$  tiempo que demora el robot móvil en llegar a su velocidad máxima, en s;
- $a_{max}$  aceleración del robot móvil cuando llega a velocidad máxima en 2 segundos, en  $\frac{m}{s^2}$ .

A continuación se despeja  $a_{max}$ :

$$a_{max} = \frac{0,6 \frac{m}{s}}{2s}$$

$$a_{max} = 0,3 \frac{m}{s^2}$$

Despejando  $f_w$  se obtiene:

$$f_w = Ma_{max} + f_g$$

El siguiente paso consiste en despejar los valores de cada fuerza:

$$\frac{T}{r_n} = Ma_{max} + M \sin(\beta)$$

Obteniéndose finalmente (10) que permite obtener el torque del sistema.

$$T = M(a_{max} + g \sin(\beta))r_n \quad (10)$$

Se estima que el robot móvil de tipo unicycle se desplace sobre una superficie sin inclinación, sin embargo se considera un valor de  $\beta$  de  $5^\circ$ , como valor máximo para su funcionamiento adecuado.

Despejando lo valores en (10) se obtiene el siguiente resultado:

$$T = 1,075 \text{kg} (0,3 \frac{m}{s^2} + 9,8 \frac{m}{s^2} \sin(5)) 0,0325 \text{m}$$

$$T = 0,04\text{Nm}$$

Al tener dos motores, el valor obtenido se divide para 2, siendo 0,02 Nm. El siguiente paso consiste en determinar la velocidad angular del motor a partir de (11):

$$\omega = 2\pi r_n \quad (11)$$

Reemplazando los valores se determina la velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle en  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

$$\omega = 2\pi \frac{0,204 \frac{\text{rev}}{\text{min}}}{60\text{s}}$$

$$\omega = 0,02 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Donde

- $P$  potencia del motor, en Hp;
- $\omega$  velocidad angular del robot móvil tipo unicycle, en  $\frac{\text{rad}}{\text{s}}$ .

Finalmente, se calcula la potencia requerida del motor con (12).

$$P = T\omega \quad (12)$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$P = 0,02\text{Nm} \cdot 0,02 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P = 0,04 \text{ W}$$

### 7.2.6. Selección de motor

- **Motorreductor DC:** Se realiza una segunda iteración para el cálculo de la potencia con un valor comercial de velocidad sin carga de  $14,66 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  del motor CHR-GM25-370, según el catálogo 300Omhs [8].

La potencia en este caso es de:

$$P = 0,02\text{Nm} \cdot 14,66 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P = 0,293 \text{ W}$$

Del catálogo se toman los valores de potencia máxima de 3,2 W y torque de 0,43 Nm del motor CHR-GM25-370, los cuales cumplen con los requerimientos técnicos de los motores para el robot móvil de tipo unicycle y garantizando su funcionamiento cuando se adiciona una carga útil de 0,2 kg.

Además el motor CHR-GM25-370, se utiliza para aplicaciones de alta velocidad de respuesta y de sistemas ligeros, como se observa en la Figura 24. Las especificaciones del motor se indican en la Tabla 6.



**Figura 24.** Motorreductor DC CHR-GM25-370 [8]

**Tabla 6.** Especificaciones técnicas motorreductor DC CHR-GM25-370 [8]

Especificación	Descripción
Voltaje de operación	12 V
Velocidad sin carga	140 rpm
Eficiencia máxima	0,17 Nm / 2,1 W/0,33 A
Potencia máxima	0,43 Nm / 3,2 W/ 0,75 A
Relación de engranajes	1:47
Dimensiones	24,4 x 73 mm
Masa	150 g

- **Motor a pasos:** Se realiza el mismo procedimiento anterior para el cálculo de la potencia con un valor comercial de velocidad sin carga de  $20,94 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$  del motor Nema 17, según el catálogo PBC Linear [9].

La potencia en este caso es de:

$$P = 0,02\text{Nm} \cdot 20,94 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$P = 0,418 \text{ W}$$

Del catálogo se toman los valores de potencia máxima de 7,5 W y torque de 0,39 Nm del motor Nema 17, los cuales cumplen con los requerimientos técnicos de los motores para el robot móvil de tipo unicyclo y garantizando su funcionamiento cuando se adiciona una carga útil de 0,2 kg.

Asimismo, el motor Nema 17, como se observa en la Figura 25, se usa generalmente para aplicaciones de alta velocidad de respuesta, como los son máquinas CNC de propósito general. Las especificaciones del motor se indican en la Tabla 7.



**Figura 25.** Motor a pasos Nema 17 [9]

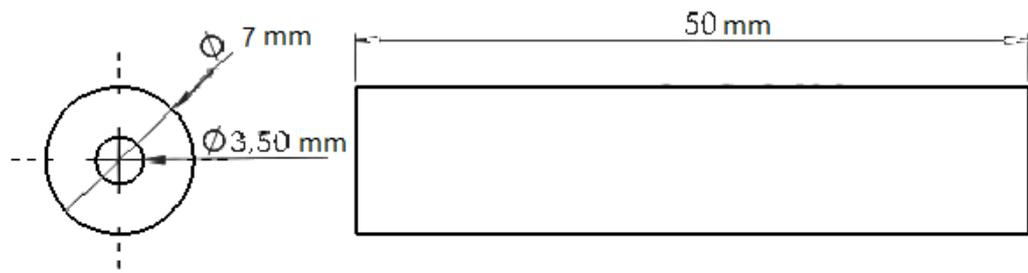
**Tabla 7.** Especificaciones técnicas motor a pasos Nema 17 [9]

Especificación	Descripción
Voltaje de operación	12 V
Velocidad sin carga	200 rpm
Corriente	0,17 A
Torque	0,39 Nm
Ángulo de paso	1.8°
Tipo	Bipolar
Dimensiones	49,02 x 41,91 x 69,08 mm
Masa	350 g

En conclusión, los dos motores cumplen con los requerimientos de diseño, de acuerdo al criterio de potencia y torque, sin embargo la masa del Nema 17 supera considerablemente al motorreductor DC, lo que aumentaría ampliamente la masa total del robot móvil de tipo unicycle. Además, el motor Nema 17 no posee ranuras especializadas para implementar el sensor de velocidad y se necesita diseñar una pieza adicional. Finalmente, se escoge el motorreductor DC CHR-GM25-370 porque se puede adquirir el sensor de velocidad dentro del mismo kit y cumple satisfactoriamente los requisitos de diseño y su tamaño es adecuado para el robot móvil de tipo unicycle.

### 7.2.7. Dimensionamiento del espaciador

Se diseña un espaciador de 50 mm para sujetar la placa inferior con la placa superior del robot móvil de tipo unicycle, mediante dos orificios para perno M4\*8 en sus extremos, como se observa en la Figura 26. El espaciador se imprime en 3D, para facilitar su implementación en el robot móvil de tipo unicycle.

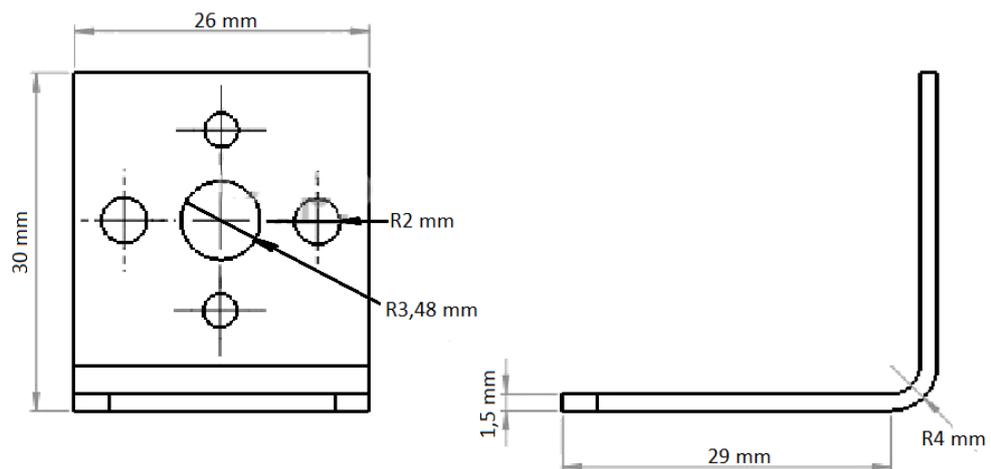
**Figura 26.** Espaciador 50 mm PLA

### 7.2.8. Dimensionamiento del soportes

Los soportes diseñados son impresos en 3D, para facilitar su elaboración y posteriormente el acoplamiento al robot móvil de tipo unicycle. Cada uno posee dos orificios que mediante dos pernos M4\*8 se acoplan a la estructura.

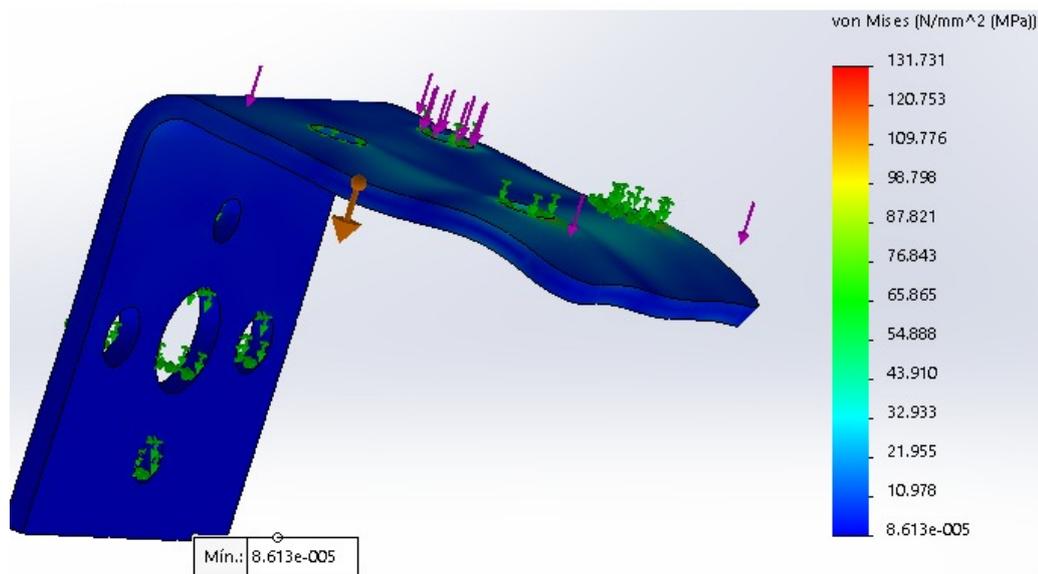
#### ■ Diseño del soporte de la rueda con la placa inferior

Se diseña una pieza de soporte para ajustar la rueda, de tal forma que mantenga la estabilidad del motor y evite desviaciones que aumenten el error durante el seguimiento de trayectoria. Se dimensiona esta pieza de acuerdo al diámetro del eje del motor y a los orificios que este posee para ajustar el soporte. La pieza se indica en la Figura 27.



**Figura 27.** Pieza del soporte entre la rueda y la placa inferior

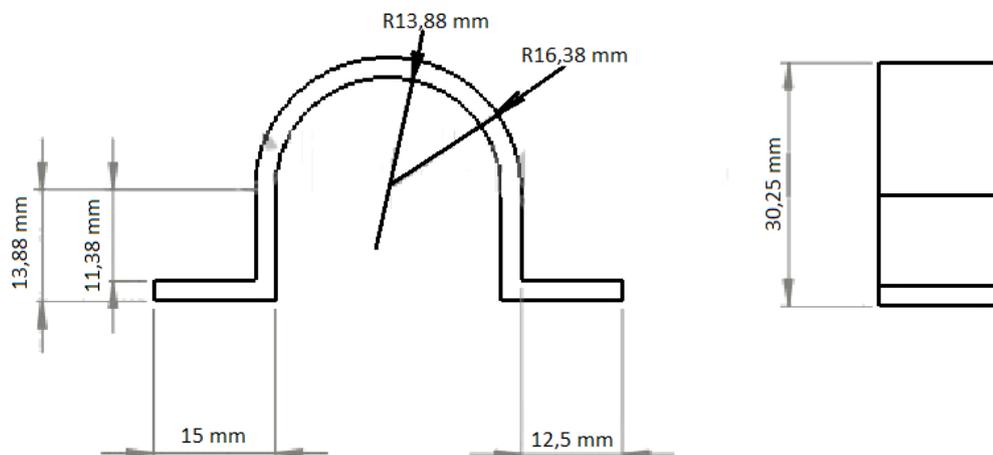
Mediante un análisis de cargas se determina la zona crítica y una posible deformación ante una fuerza externa, de tal forma que mientras la pieza no presente una carga mayor a 0,0086 MPa, no se deformará, como se observa en la Figura 28.



**Figura 28.** Análisis de cargas en el soporte entre la rueda y la placa inferior

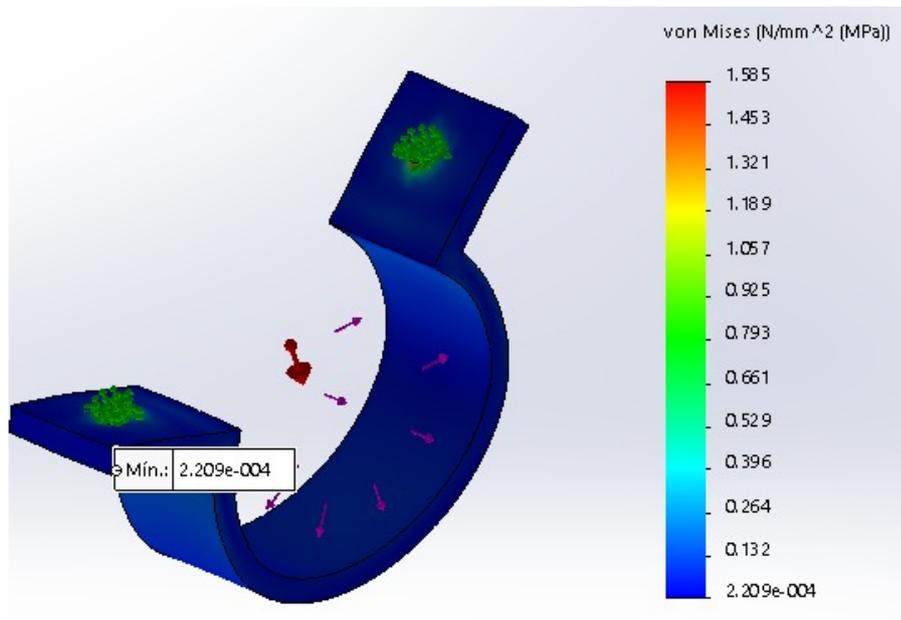
#### ■ Diseño del soporte del motor con la placa inferior

Se dimensiona esta pieza para otorgar estabilidad y apoyo al motor con la placa inferior. Se diseña este soporte con las dimensiones del motorreductor DC CHR-GM25-370. Se muestra en la Figura 29 sus dimensiones generales.



**Figura 29.** Pieza del soporte entre el motor y la placa inferior

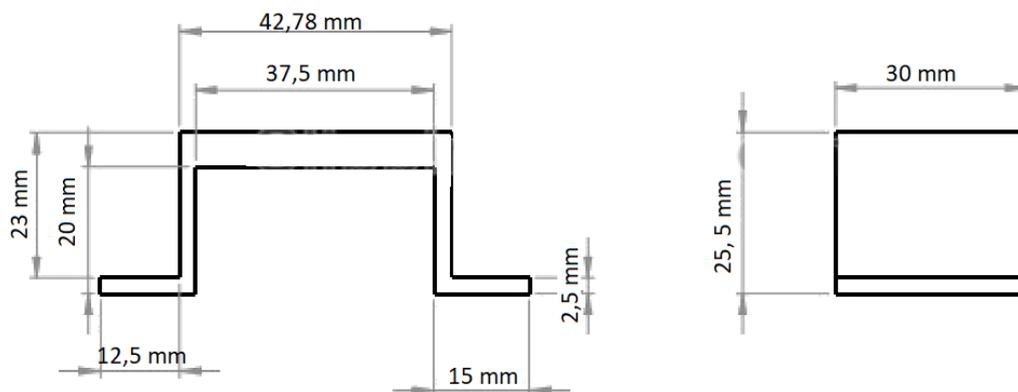
Se realiza un análisis de cargas para determinar la zona crítica, considerando únicamente la masa del motorreductor. Como resultado se obtiene que mientras la pieza no presente una carga mayor a 0,022 MPa, no sufrirá deformación alguna, como se observa en la Figura 30.



**Figura 30.** Análisis de cargas en el soporte entre el motor y la placa inferior

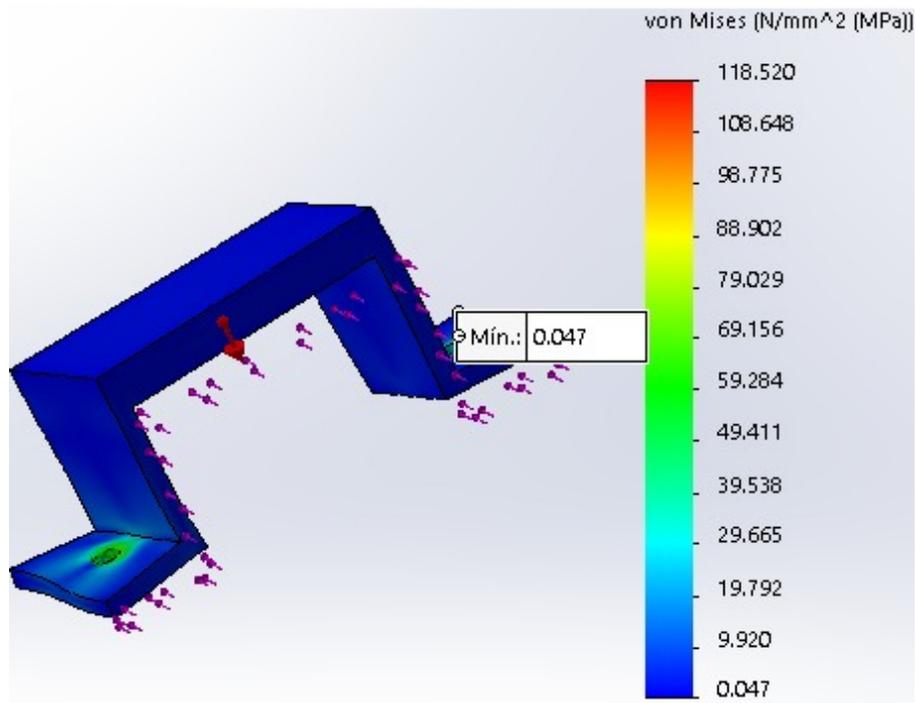
#### ■ Diseño del soporte de la batería

El siguiente soporte pretende sujetar la batería con la placa inferior, se diseña este soporte con las dimensiones de la batería Lipo Turnigy 1000 mAh. Cuya dimensiones generales se presentan en la Figura 31.



**Figura 31.** Pieza del soporte entre el batería y la placa inferior

El análisis de cargas permite determinar, el esfuerzo máximo ejercido por una fuerza externa, para deformar el soporte. Como resultado se obtiene que mientras la pieza no presente una carga mayor a 0,047 MPa, no sufrirá deformación alguna, como se observa en la Figura 32.



**Figura 32.** Análisis de cargas en el soporte de la batería

### 7.2.9. Selección de la rueda pivote

Para la selección de la rueda pivote se identificaron dos tipos de ruedas pivote, se compararan de acuerdo a sus dimensiones y entre otras especificaciones importantes como su capacidad máxima de carga.

- **Rueda pivote con llanta:**

Se analiza, según el catálogo Unit Electronics la rueda pivote con llanta, que se observa en la Figura 33, sus especificaciones se detallan en la Tabla 8.



**Figura 33.** Rueda pivote con llanta [10]

**Tabla 8.** Especificaciones técnicas rueda pivote con llanta [11]

Especificación	Descripción
Masa máxima soportada	50 kg
Altura	32 mm
Diámetro de la rueda	35 mm
Ancho de la rueda	15 mm
Distancia entre agujeros de montaje	35 mm
Material estructura	Acero
Material rueda	Nylon PP Negro
Masa	25 g

■ **Rueda pivote con bola:**

Se muestra, según el catálogo Sanstore, la siguiente rueda pivote con bola, se observa en la Figura 34 y sus especificaciones técnicas en la Tabla 9.

**Figura 34.** Rueda pivote con bola [11]**Tabla 9.** Especificaciones técnicas rueda pivote con bola [11]

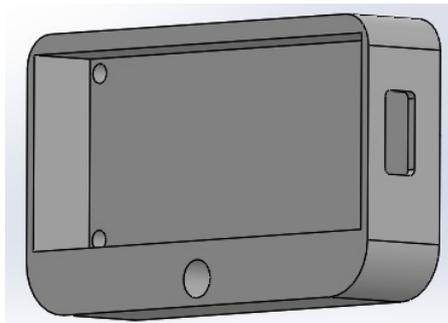
Especificación	Descripción
Masa máxima soportada	15 kg
Altura	32,5 mm
Diámetro de la bola	12 mm
Material	Acero
Masa	38,3 g

En conclusión, la rueda pivote con bola no presenta modelos del tamaño requerido para el diseño, por lo tanto se escoge la rueda pivote con llanta que sí los satisface. Una ventaja significativa de la rueda pivote con llanta, sobre la de bola, es su menor capacidad de retener polvo y otros elementos obstructivos, que podrían limitar su funcionamiento.

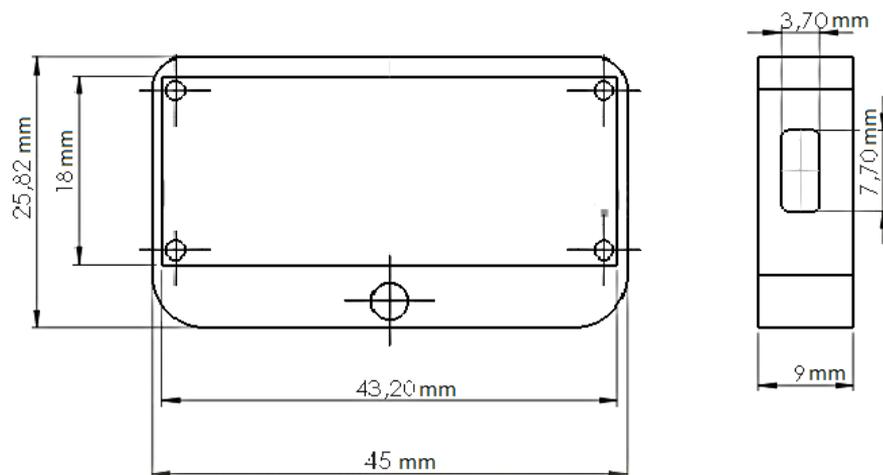
#### 7.2.10. Dimensionamiento de la caja del circuito de control

Se diseña un contenedor específicamente para el controlador Arduino Nano, como se observa en la Figura 35, de tal forma que lo acople a la placa inferior mediante cuatro pernos

de cabeza hexagonal M2\*16 y un perno M4\*8. El contenedor se imprime en 3D con PLA y sus dimensiones son 45 x 26 x 9 mm. Su lateral derecho posee un orificio de 3,7 x 7,7 mm para que el conector del Arduino Nano quede expuesto para conectarlo. La profundidad del contenedor es de 5,72 mm y las dimensiones del borde interior son 43,2 x 18 mm, visto en la Figura 36.



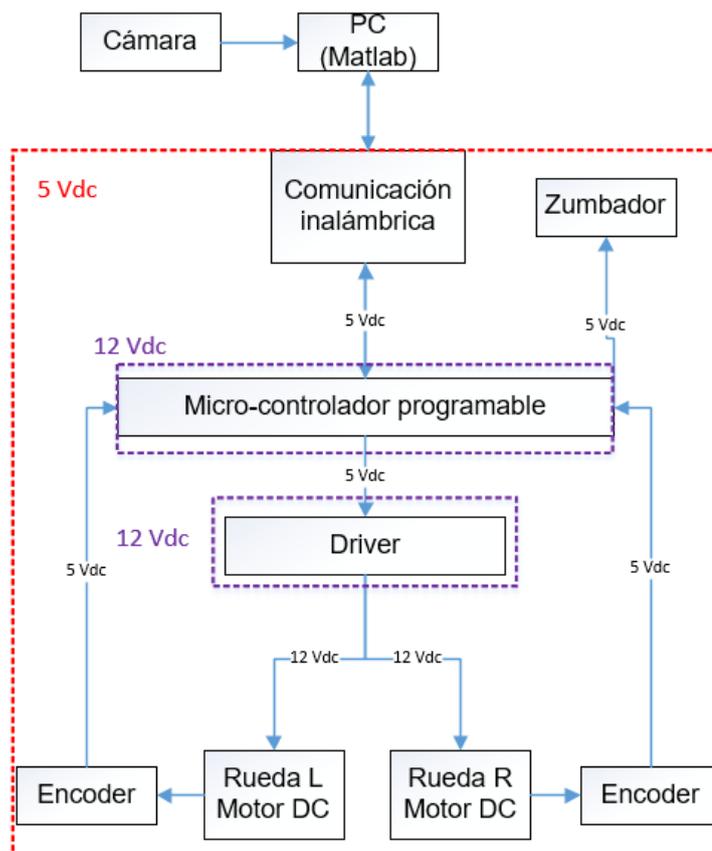
**Figura 35.** Contenedor Arduino Nano



**Figura 36.** Dimensiones contenedor Arduino Nano

### 7.3. Dimensionamiento electrónico

El dimensionamiento electrónico contempla a los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del robot móvil de tipo unicycle con restricción no holonómica. Esta sección parte con un diagrama de bloques, que se observa en la Figura 37 que establece todos los requerimientos fundamentales del sistema y sus componentes electrónicos.



**Figura 37.** Diagrama de bloques de los componentes electrónicos del robot móvil tipo unicycle

### 7.3.1. Selección del controlador

Las entradas y salidas del sistema incluyen las señales de control, sensores y los actuadores, permiten determinar el controlador más adecuado para la función del robot móvil de tipo unicycle, lo cual se visualiza en la Tabla 10.

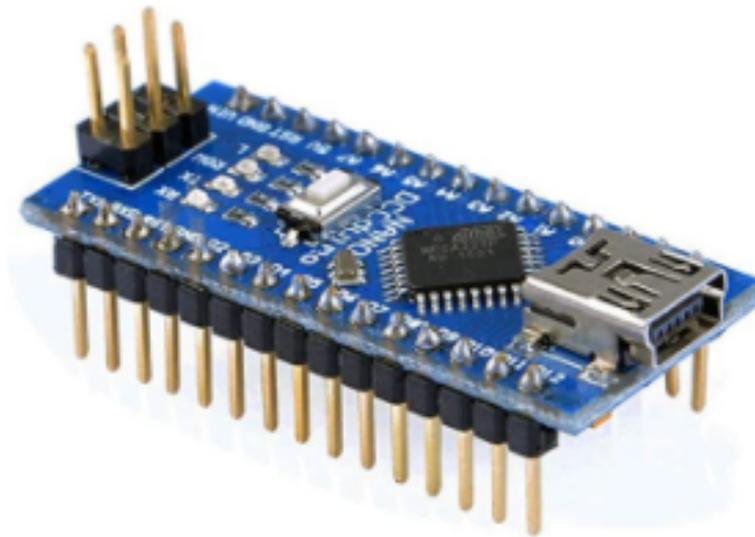
**Tabla 10.** Análisis de Entradas/Salidas

Entrada/salida	Elemento	Señal	Cantidad
Entrada	Señal de entrada motor A encoder	Digital	2
Entrada	Señal de entrada motor B encoder	Digital	2
Entrada	Receptor serial de datos	Digital	1
Entrada	Señal descarga de batería	Analógica	1
Salida	Transmisor serial de datos	Digital	1
Salida	Motor A pines de entrada	Digital	2
Salida	Motor B pines de entrada	Digital	2
Salida	Señal Enable motor A	Digital	1
Salida	Señal Enable motor B	Digital	1
Salida	Señal de encendido del zumbador	Digital	1
<b>Total</b>			<b>14</b>

El controlador deberá tener al menos cinco entradas y ocho salidas digitales totales y una entrada analógica.

Se presentan las siguientes alternativas para seleccionar el controlador adecuado para el sistema, de acuerdo a sus especificaciones. Se indica que los controladores presentados poseen la capacidad de comunicación inalámbrica con el PC mediante el uso de módulos especializados, como módulos bluetooth o WiFi.

- **Arduino Nano:** Se presenta el controlador en la Figura 38 y sus especificaciones en la Tabla 11.



**Figura 38.** Arduino Nano [12]

**Tabla 11.** Características del Arduino Nano, [12]

Característica	Descripción
Micro-controlador	Atmel ATmega328
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada	7-12 V
Rango máximo y mínimo de voltaje	6-20 V
Entradas/salidas digitales	14
PWM	6
Entradas analógicas	8
Largo	45 mm
Ancho	18 mm
Masa	7 g

- **Arduino UNO:** Este controlador se observa en la Figura 39, y sus especificaciones técnicas en la Tabla 12.

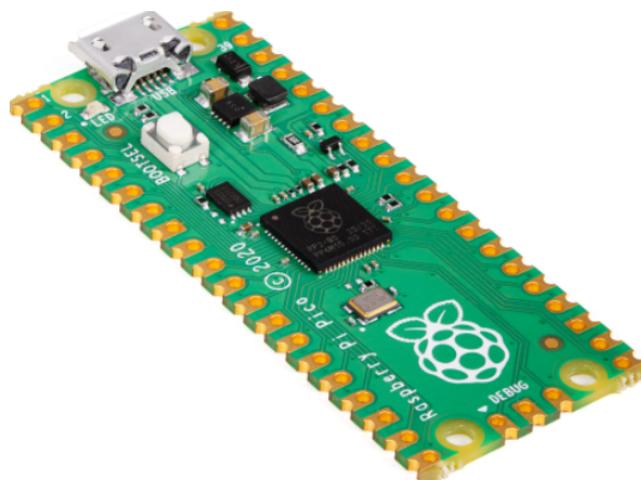


**Figura 39.** Arduino Uno [13]

**Tabla 12.** Características del Arduino Uno, [13]

Característica	Descripción
Micro-controlador	Atmel ATmega328
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada	7-12 V
Rango máximo y mínimo de voltaje	6-20 V
Entradas/salidas digitales	14
PWM	6
Entradas analógicas	6
Largo	68,6 mm
Ancho	53,4 mm
Masa	25 g

- **Raspberry Pi Pico:** Se presenta en la Figura 40, cuyas especificaciones se indican en la Tabla 13.



**Figura 40.** Raspberry Pi Pico [14]

**Tabla 13.** Características del Raspberry Pi Pico, [14]

Característica	Descripción
Micro-controlador	RP2040
Voltaje de operación	1,8 - 5,5 V
Voltaje de entrada	3,3 V
GPIO	26 pines multifunción
Otros pines	2x SPI, 2x I2C, 2x UART, 3x 12-bit ADC, 16x PWM
Largo	51 mm
Ancho	21 mm
Masa	19 g

A partir de las características generales analizadas, se define que el controlador que mejor se adapta al sistema del robot móvil de tipo unicycle es el Arduino Nano, dado que satisface la necesidad de entradas y salidas del sistema y sus dimensiones se ajustan de la forma deseada al diseño.

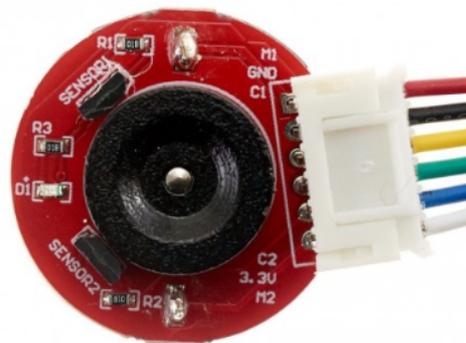
### 7.3.2. Selección de encoder

Los encoders convierten el movimiento en una señal eléctrica que es interpretada para satisfacer al sistema de control de movimiento, esta señal permite determinar la velocidad, la posición y la dirección. Para el proyecto es necesario contar con un elemento que permita al robot móvil de tipo unicycle, conocer la velocidad de sus ruedas, que son las señales de las entradas del sistema para desarrollar el seguimiento de trayectorias. Se establecen las alternativas a continuación:

- **Tipo óptico:** Se utiliza para medir tanto la posición relativa de rotación como la distancia recorrida por un eje. Funciona haciendo brillar una luz en el borde de un disco equipado con ranuras espaciadas uniformemente alrededor de una circunferencia. A medida que el disco gira, la luz pasa a través de las ranuras o es bloqueada por los espacios opacos existentes entre las rendijas, detectando por cuántas ranuras ha pasado la luz.
- **Tipo cuadratura:** Es un tipo de encoder rotativo incremental que tiene la capacidad de indicar tanto la posición como la velocidad y la dirección del movimiento del eje del motor. Posee dos sensores de efecto Hall que generan dos señales de pulsos digitales

desfasada en  $90^\circ$  eléctricos o en cuadratura, gracias a un disco magnético giratorio montado en el eje trasero del motor. Estos dos sensores activan y desactivan en una secuencia que permite saber la dirección y el número de desplazamientos que han ocurrido en el encoder [48].

A partir de sus características generales, se elige el encoder de cuadratura, como se observa en la Figura 41 y sus especificaciones técnicas en la Tabla 14, dado que no requiere de un acople adicional como el tipo óptico y permite detectar el sentido de giro. Presenta un uso común para aplicaciones con motores DC, como lo son robots móviles y brazos robóticos.



**Figura 41.** Encoder 25 GA [15]

**Tabla 14.** Especificaciones técnicas del encoder 25 GA [15]

Especificación	Descripción
Tipo	Hall de dos fases
Voltaje de alimentación	3,3 V - 5 V DC
Resolución Hall	341,2 PPR
Diámetro	25 mm

### 7.3.3. Selección módulo de comunicación inalámbrica

Se plantean dos opciones de comunicación, bluetooth y WiFi con sus respectivos módulos y sus especificaciones técnicas.

- Módulo bluetooth:** Mediante el uso de un módulo bluetooth se podrá enviar las señales de activación hacia el controlador, seleccionando la trayectoria que seguirá

el robot móvil de tipo unicycle. Se presenta la alternativa el módulo HC-05 sugerido por Arduino para la comunicación inalámbrica, como se visualiza en la Figura 42, que debe configurarse para trabajar en modo esclavo y sus especificaciones técnicas se observan en la Tabla 15.

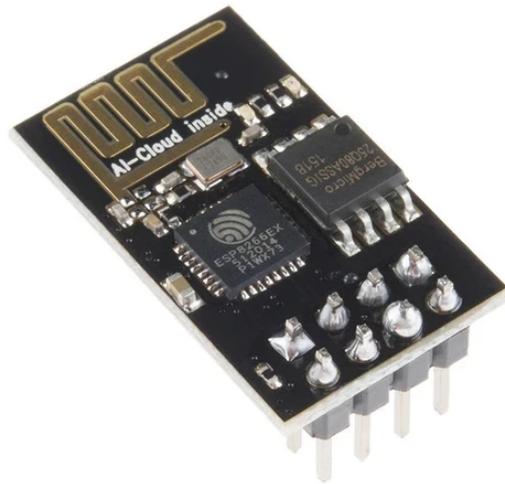


**Figura 42.** Módulo Bluetooth HC-05 [16]

**Tabla 15.** Especificaciones técnicas del módulo bluetooth HC-05 [16]

Especificación	Descripción
Voltaje de operación	3,6 V - 6 V DC
Consumo de corriente	50 mA
Alcance	10 m
Dimensiones	37 x 16 mm
Masa	3,6 g
Interface de comunicación	Serial TTL
Bit rate	Hasta 1,0 Mbit/s
Seguridad	Baja

- Módulo WiFi:** Mediante la configuración de una red de internet, se podrá transmitir los datos para el seguimiento de trayectorias hacia el controlador del robot móvil de tipo unicycle. Se toma como alternativa el módulo WiFi ESP8266, que se observa en la Figura 43, y sus especificaciones técnicas en la Tabla 16.



**Figura 43.** Módulo WiFi ESP8266 [17]

**Tabla 16.** Especificaciones técnicas del módulo WiFi ESP8266 [16]

Especificación	Descripción
Voltaje de operación	2,5 V - 5,5 V
Corriente máxima operación	170 mA
Protocolo	802,11 b/g/n (HT20)
Rango de frecuencia	2,4 GHz
TX Fuente	802,11 b: +20 dBm
RX Sensibilidad	802,11 g: -75 dbm (54 Mbps)
Alcance	100 m
Bit rate	Hasta 6,75 Gbit/s
Seguridad	Alta

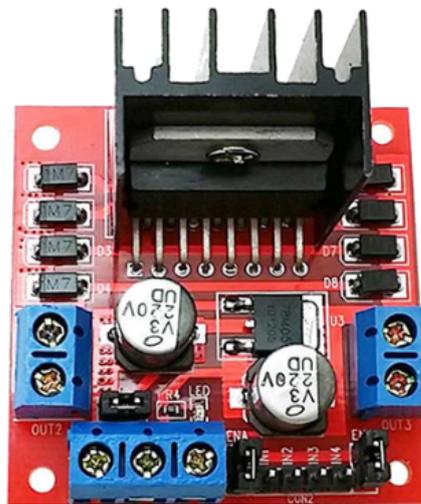
De acuerdo a los requerimientos del proyecto y el propósito del mismo, indican que la transmisión de datos será a una corta distancia hacia el PC, porque el proyecto de investigación consiste en comprobar el funcionamiento del algoritmo de control de seguimiento de trayectorias.

Se realiza la apertura del canal de comunicación con Arduino en el algoritmo desarrollado en Matlab dentro del PC, de tal forma que los valores registrados por medio de los sensores de velocidad en las ruedas puedan evaluarse y corregirse para transmitir esta información hacia el robot móvil de tipo uniclo y que complete la trayectoria designada.

Por tales motivos, la comunicación inalámbrica por medio de bluetooth es suficiente para realizar esta tarea, tanto en el rango y latencia de transmisión de datos entre el PC y el controlador Arduino Nano.

### 7.3.4. Selección de driver

Para la selección del driver, se toma el valor máximo de corriente con carga de los motores seleccionados, según sus características que se indican en la Tabla 6, es 0,66 A. Se considera un modelo que posea dos canales de control y que soporte la intensidad de corriente con carga para los motores del robot móvil de tipo unicycle y en el cual se pueda invertir su giro, por lo tanto, se selecciona el driver L298N, como se visualiza en la Figura 44, que soporta 2 A máximos y satisface los requerimientos de control. Sus especificaciones técnicas se observan en la Tabla 17.



**Figura 44.** Driver L298N [18]

**Tabla 17.** Especificaciones técnicas del driver L298N [18]

Especificación	Descripción
Canales	2 (motores DC)
Voltaje lógico	5 V
Voltaje de potencia	5 V - 35 V DC
Consumo de corriente	0 - 36 mA
Capacidad de corriente	2 A
Potencia máxima	25 W
Dimensiones	43 x 43 x 27 mm
Masa	30 g

### 7.3.5. Selección de interruptor de encendido y apagado

Se necesita un interruptor que permita encender y apagar el sistema, de tal manera que se selecciona a partir del catálogo de EDMProduct [19], la categoría de bipolar, dado que

se necesitan dos estados para el robot móvil de tipo unicycle, que sea de tipo pulsador y que sus dimensiones se encuentren limitadas por el tamaño del robot móvil. Finalmente, se escoge el interruptor negro empotrado pequeño visto en la Figura 45 y sus especificaciones técnicas se citan en la Tabla 18.



**Figura 45.** Interruptor eléctrico 45042 [19]

**Tabla 18.** Especificaciones técnicas del interruptor eléctrico 45042 [19]

Especificación	Descripción
Voltaje de máximo	250 V
Material	Polipropileno
Intensidad máxima	10 A
Dimensiones	18,5 x 12,5 x 23 mm
Masa	4 g

### 7.3.6. Selección zumbador

El zumbador cumple la función de alarma sonará para alertar al usuario que la batería se descargará pronto y requiere cargarse nuevamente.

Se establecen dos parámetros para la selección del zumbador, la primera que sea adecuado para la salida de voltaje del Arduino Nano, que sea audible para el oído del ser humano y que sea activo.

Para ello se realiza una búsqueda en el catálogo UNIT Electronics [20], el cual ofrece varias opciones para este componente. Finalmente, se escoge el zumbador AR0167, tipo activo que se observa en la Figura 46 y sus especificaciones técnicas que se presentan en la Tabla 19.



**Figura 46.** Zumbador 5 V AR0167 [20]

**Tabla 19.** Especificaciones técnicas del zumbador 5 V AR0167 [20]

Especificación	Descripción
Voltaje de operación	5 V DC
Corriente máxima	30 mA
Frecuencia de resonancia	23 kHz
Salida de sonido mínimo	85 dB
Dimensiones	12 mm x 9,5 mm

### 7.3.7. Dimensionamiento de la fuente de alimentación

Para el dimensionamiento de la batería se presenta cada elemento del sistema, de acuerdo a sus requerimientos de voltaje y corriente, como se indica en la Tabla 20, en la que se determina la cantidad de corriente total del sistema.

**Tabla 20.** Corriente total y voltaje de operación de los componentes del sistema

Componente	Cantidad	Corriente (mA)	Corriente total (mA)	Voltaje (V)
Arduino Nano	1	15	15	12
Driver L298N	1	36	36	5
Encoder de cuadratura	2	20	40	5
Motor	2	330	660	12
Módulo Bluetooth HC-05	1	50	50	5
Zumbador	1	30	30	5
<b>Total</b>			831	5 y 12

De acuerdo al resultado de la Tabla 20, se establecen los requerimientos de voltaje alimentación son de 5 V DC y 12 V DC, que se dividen en la alimentación del Arduino Nano para los elementos que requieren 5 V y 12 V para el controlador y el driver de los motores a través de la batería. Se necesita una corriente total de 0,831 A; para satisfacer al sistema se selecciona la batería Lipo Turnigy de 3 celdas como se observa en la Figura 47 y sus

especificaciones se observan en la Tabla 21.



**Figura 47.** Batería Lipo Turnigy 1000mAh [21]

**Tabla 21.** Especificaciones de la batería seleccionada [21]

Especificación	Descripción
Capacidad	1000 mAh
Configuración	11,1 V / 3 CELL
Descarga constante	20 C
Masa	49 g
Dimensiones	56 x 30 x 19 mm
Conector	JST-XH

Se establece la potencia máxima de consumo del sistema en (13).

$$P_{max} = I_{max} V_{max} \quad (13)$$

Donde

- $P_{max}$  potencia máxima del sistema, en W;
- $I_{max}$  corriente requerida del sistema, en mA;
- $V_{max}$  voltaje máximo del sistema, en V.

Se reemplazan los valores y se obtiene que:

$$P_{max} = 0,831 \cdot 12$$

$$P_{max} = 9,972 \text{ W}$$

El tiempo de descarga de la batería se calcula de acuerdo a (14).

$$T_{des} = \frac{C_{bat}}{C_{con}} \quad (14)$$

Donde

- $T_{des}$  tiempo de descarga de la batería, en h;
- $C_{bat}$  carga de la batería, en mAh;
- $C_{con}$  consumo de corriente del sistema, en mA.

Se reemplazan los valores y se obtiene que:

$$T_{des} = \frac{1000}{831}$$

$$T_{des} = 1,20 \text{ h}$$

La batería que se ha seleccionado permitirá una autonomía de funcionamiento al robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica de 1,2 horas.

### 7.3.8. Sistema de monitoreo de la batería

Se debe realizar un sistema de protección del circuito, dado que la batería de tipo Lipo no debe descargarse menos de 3,5 V, porque causaría un daño irreparable en la misma y tampoco cargarse cada celda a más de 4,2 V, en el caso de la batería seleccionada, esta posee tres celdas y el cargador de la misma debe especificar esta consideración.

La tensión de carga total de la Lipo batería seleccionada es de 12,6 V y la tensión mínima de la batería es de 10,5 V, de acuerdo a las tres celdas que posee.

El siguiente paso es diseñar un divisor de voltaje en (15) como parte del sistema de monitoreo de la batería.

$$R_1 = \frac{R_2(V_i - V_o)}{V_o} \quad (15)$$

Se asigna a  $R_2$  un valor comercial de 4,7 k $\Omega$ .

Donde

- $V_i$  voltaje de entrada, en V;
- $V_o$  voltaje de salida, en V;
- $R_1$  resistencia 1, en  $\Omega$ ;

- $R_2$  resistencia 2, en  $\Omega$ .

$$V_i = 12,6 \text{ V}$$

$$V_o = 4 \text{ V}$$

Y se reemplaza a continuación para calcular  $R_1$

$$R_1 = \frac{4,7k(12,6 - 4)}{4}$$

$$R_1 = 10,105 \text{ k}\Omega$$

Se establece un valor comercial para  $R_1$  de 10 k $\Omega$

Para finalizar, se calcula  $V_o$  en (16) a partir del valor comercial de las resistencias obtenidas y con un valor de seguridad para  $V_i$  de 11 V.

$$V_o = \frac{R_2(V_i)}{R_1 + R_2} \quad (16)$$

Y reemplazando los valores se obtiene:

$$V_o = \frac{4,7k(11)}{10k+4,7k}$$

$$V_o = 3,5 \text{ V}$$

Con este valor final de  $V_o$  se programa para el Arduino Nano la activación del zumbador siempre y cuando sea menor de 3,5 V e indicarle al usuario cuando deberá cargar la batería.

Se muestra en resumen en la Tabla 22 los componentes electrónicos seleccionados para el robot móvil de tipo unicycle.

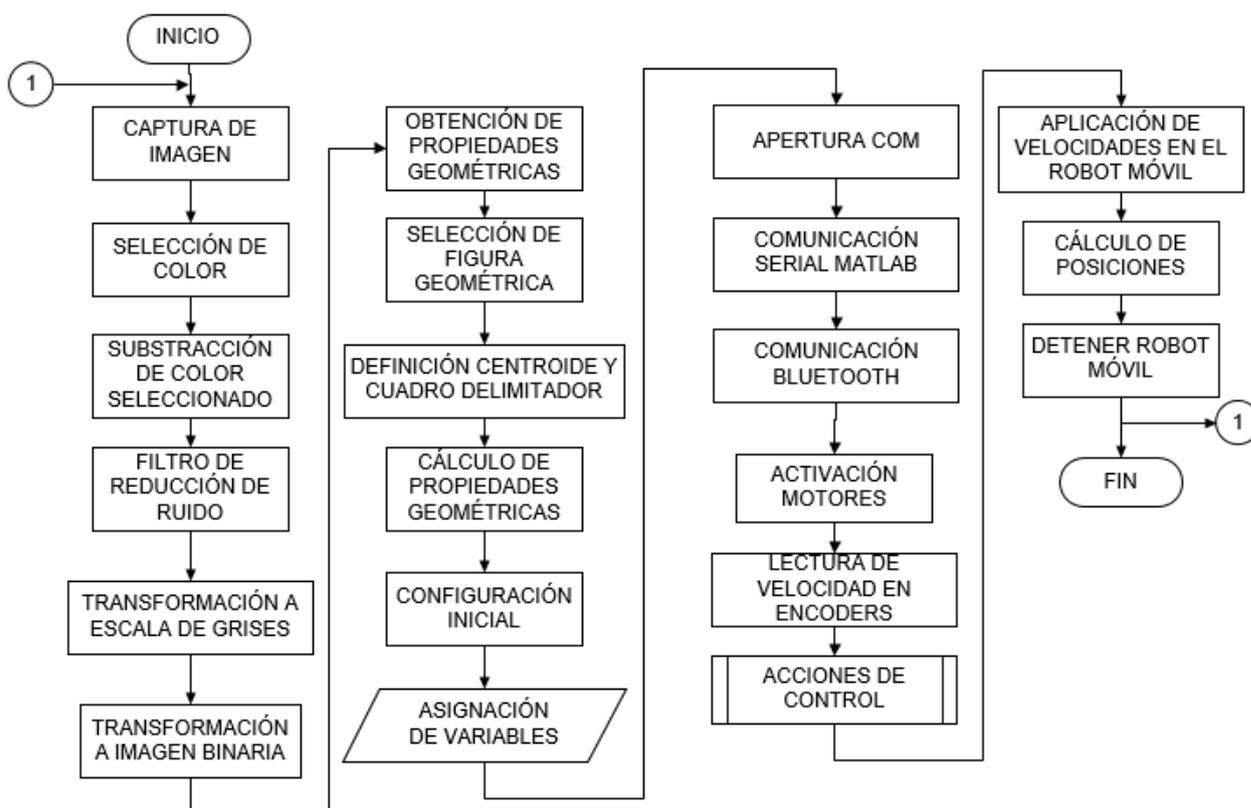
**Tabla 22.** Componentes electrónicos seleccionados

Componentes	Descripción	Cantidad
Controlador	Arduino NANO	1
Motores	GM25-370CA	2
Driver	L298N	1
Módulo bluetooth	HC-05	1
Interruptor	Interruptor eléctrico 45042	1
Batería	Batería Lipo Turnigy 1000mAh 3S 20C	1
Zumbador	Zumbador 5 V AR0167	1
Encoder	25 GA	2
Resistencia 1	4,7 k $\Omega$ 1/4 W	1
Resistencia 2	10 k $\Omega$ 1/4 W	1

#### 7.4. Desarrollo de la programación

El algoritmo de control de trayectoria de un robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica consiste en la identificación de una imagen mediante visión artificial, para determinar las propiedades de color y atributos geométricos, en la que el usuario deberá preparar la escena con los objetos de colores: verde, rojo y azul y a su vez del tipo de figura, cuadrado, triángulo y círculo para escoger una trayectoria parametrizada que el robot móvil de tipo unicycle deberá seguir y al finalizar, comprobar el funcionamiento del mismo mediante gráficas de control.

La Figura 48 presenta el algoritmo de control para la interacción del microcontrolador con los actuadores y sensores, así como la comunicación para la ejecución de las acciones de control del algoritmo de seguimiento de trayectoria y visión artificial.



**Figura 48.** Diagrama de flujo de la identificación de color y forma y del seguimiento de trayectorias

#### 7.4.1. Desarrollo del algoritmo de procesamiento de imagen

El desarrollo del algoritmo para el procesamiento de imagen consiste en una detección de color automática, de la cual se toma una captura.

La captura de imagen se realiza mediante una webcam conectada con el PC, la que se activa al ejecutar el programa y captura 30 frames durante 30 segundos. Durante este tiempo se plantea la oportunidad de preparar la escena correctamente y en tiempo real se observa la detección de color, para que al finalizar se capture una sola imagen y se proceda con la identificación de las formas en la misma.

Es recomendable colocar las imágenes en un fondo blanco, con el lente de la webcam frente a la escena a 30 cm y con una iluminación adecuada, por ejemplo con un foco blanco de 27 W, ubicado a una distancia entre 30 a 40 cm de la escena.

Para ejemplificar el desarrollo del algoritmo de procesamiento de imagen, se utiliza un objeto circular de color rojo, como se observa en la Figura 49.



**Figura 49.** Captura de imagen de un círculo rojo

- Se subtrae el color elegido de la imagen y se la transforma a escala de grises, en la Figura 50.



**Figura 50.** Transformación a escala de grises

- Se transforma en la Figura 51 el resultado en escala de grises a una imagen binaria.



**Figura 51.** Transformación a imagen binaria

- Se utiliza el comando `regionprops('BoundingBox', 'Centroid')` en Matlab para obtener las propiedades del delimitador y el centroide de la figura geométrica identificada.

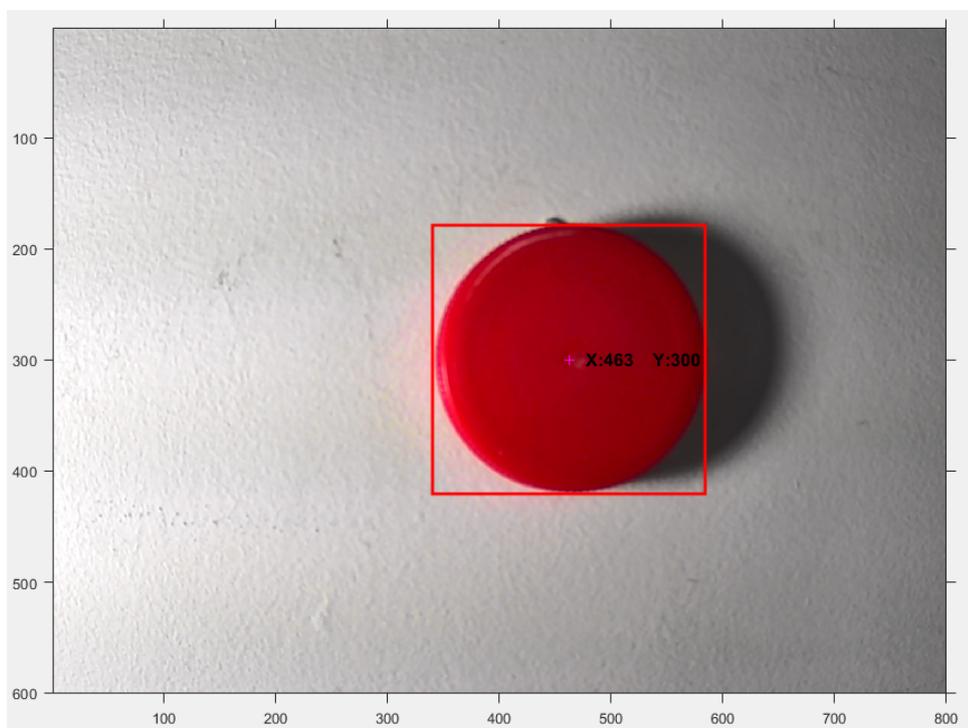
La siguiente etapa consiste en realizar la pregunta de acuerdo a la figura geométrica, para elegir la trayectoria que el robot móvil deberá seguir, con los siguientes pasos:

- Se pregunta al usuario, qué figura geométrica desea escoger; sea un círculo, triángulo o cuadrado en la Figura 52.

```
1. Círculo
2. Triángulo
3. Cuadrado
Seleccione una figura:
```

**Figura 52.** Pregunta de selección de figura geométrica entre círculo, triángulo y cuadrado

- En un bucle se miden las figuras que cumplen con el color previamente escogido y se grafica en un plano el centroide y el cuadro delimitador, como indica la Figura 53.

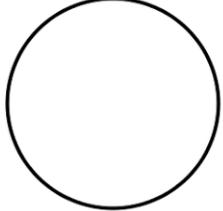
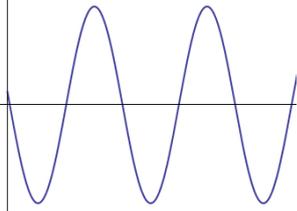
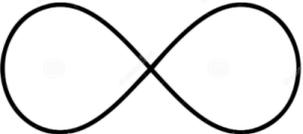
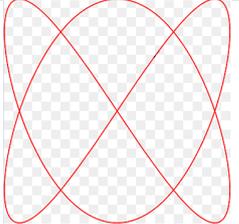
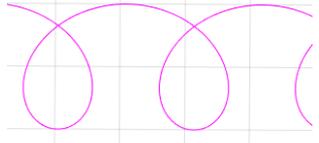


**Figura 53.** Graficación del centroide y el delimitador de la figura identificada en el proceso

- Al finalizar el procesamiento de imagen, se establece la posición inicial del robot móvil de tipo unicycle y las referencias de la trayectoria.

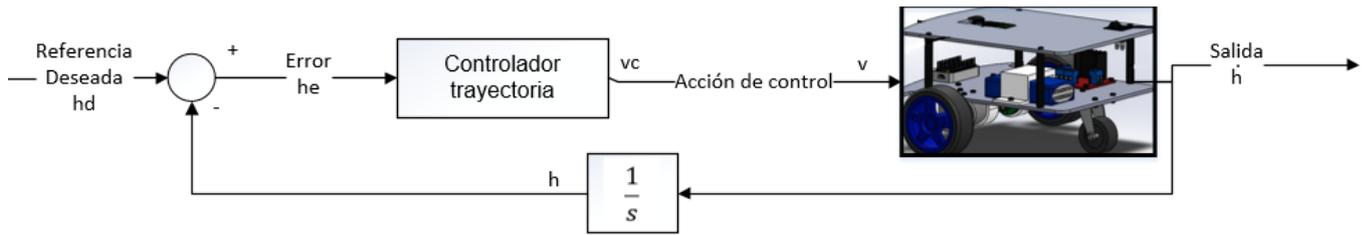
Se presenta a continuación en la Tabla 23, la correspondencia de la identificación de color y forma con la trayectoria.

**Tabla 23.** Correspondencia de trayectoria con identificación de color y forma

Nombre	Trayectoria	Selección color	Selección figura
Círculo		Rojo	Círculo
Sinusoidal		Azul	Cuadrado
Número 8		Verde	Triángulo
Curva Lissajous		Rojo	Triángulo
Curva de giro continuo		Verde	Círculo

#### 7.4.2. Diseño del algoritmo de control de seguimiento de trayectorias del robot móvil de tipo unicycle

El diseño del algoritmo de control de seguimiento de trayectorias describe la solución que le permite al robot móvil de tipo unicycle, ir asintóticamente de un estado inicial a un estado deseado, corrigiendo el error de posicionamiento con una tendencia a cero. Se indica en la Figura 54 el esquema de control del algoritmo de seguimiento de trayectoria.



**Figura 54.** Esquema de control en simulación para el seguimiento de trayectoria

Donde

- $h_d$  posición deseada de  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle,  $h_d = [x_d \ y_d]$ , en m;
- $h_e$  error de posición del robot móvil de tipo unicycle,  $h_e = h_d - h$ , en m;
- $h$  posición de  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle,  $h = [x \ y]$  en m;
- $\dot{h}$  velocidades en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle,  $\dot{h} = [\dot{x} \ \dot{y}]$  en  $\frac{m}{s}$ ;
- $v_c$  velocidad del controlador del robot móvil de tipo unicycle,  $v_c = [u_c \ \omega_c]$ , en  $\frac{m}{s}$  y  $\frac{rad}{s}$ ;
- $v$  velocidades de referencia del robot móvil de tipo unicycle,  $v = [u_{ref} \ \omega_{ref}]$ , en  $\frac{m}{s}$  y  $\frac{rad}{s}$ .

A partir del modelo cinemático del robot móvil de tipo unicycle descrito en (5), se expresa su forma compacta de la siguiente manera en (17).

$$\dot{h} = Jv \quad (17)$$

Donde

- $J$  jacobiano, la matriz de relación entre el punto de control y la velocidad del robot.

Para diseñar la ley de control se parte de la siguiente Candidata de Lyapunov:

$$V = \frac{1}{2} h_e^T h_e \quad (18)$$

Donde  $V$  es la función definida positiva, y  $V = 0$  cuando  $h_e = 0$ , por lo tanto cumple con la condición para ser una función de Lyapunov.

Derivando (18), se tiene:

$$\dot{V} = \frac{1}{2} (\dot{h}_e)^T h_e + \frac{1}{2} (h_e)^T \dot{h}_e \quad (19)$$

Desarrollando (19), se tiene (20):

$$\dot{V} = (h_e)^T \dot{h}_e \quad (20)$$

Como  $\dot{h}_e = \dot{h}_d - \dot{h}$ , se reemplaza en (20).

$$\dot{V} = (h_e)^T (\dot{h}_d - \dot{h}) \quad (21)$$

Reemplazando el modelo compacto del robot móvil de tipo unicycle con restricción no holonómica (17) en (21), se obtiene:

$$\dot{V} = (h_e)^T (\dot{h}_d - Jv) \quad (22)$$

Asumiendo un seguimiento perfecto de velocidad, se tiene que  $v = v_c$  donde  $v_c$  es la salida del controlador, definiéndose en (23).

$$\dot{V} = (h_e)^T (\dot{h}_d - Jv_c) \quad (23)$$

Para que se cumpla que  $\dot{V} < 0$ , se debe definir a  $v_c$  como indica (24).

$$v_c = J^{-1}(\dot{h}_d + Kh_e) \quad (24)$$

Reemplazando (24) en (23), se tiene:

$$\dot{V} = (h_e)^T (\dot{h}_d - JJ^{-1}(\dot{h}_d + Kh_e)) \quad (25)$$

Desarrollando la expresión se tiene:

$$\dot{V} = (h_e)^T (\dot{h}_d - \dot{h}_d + Kh_e)$$

$$\dot{V} = -(h_e)^T (Kh_e)$$

Como  $K$  es una matriz definida positiva, entonces  $\dot{V} < 0$ , y se verifica que  $h_e \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ , indicando así que el error converge asintóticamente a cero. Por lo tanto, la ley de control queda definida por (26).

$$v_c = J^{-1}(\dot{h}_d + Kh_e) \quad (26)$$

### 7.4.3. Control de seguimiento con saturación de velocidades

Mediante esta técnica se pretende acotar el error de posicionamiento y ajustar la velocidad lineal y angular del robot, hacia límites adecuados para su funcionamiento. Además, en el caso de tratarse de distancias largas, el robot durante la simulación generará velocidades altas, que para el robot físico podrían comprometer sus elementos.

Los controladores de tipo saturado son útiles para asegurar la estabilidad asintótica global de un sistema y elimina la saturación de los actuadores incluyendo funciones trigonométricas, hiperbólicas y exponenciales en la ley de control. Este tipo de controladores son aplicados para el control de trayectorias, específicamente en robots, en los cuales se controla la posición o regulación de posición. Su consideración específica es que la variable del error tienda asintóticamente a cero.

El controlador tangente hiperbólico fue propuesto por Cai y Song [49], para reducir el error de posición que ocurre por el fenómeno de fricción articular. Este modelo de solución puede aplicarse a un robot diferencial, como se observa en la investigación [50].

Se plantea la ley de control con una saturación hiperbólica en el error, quedando de la siguiente forma en (27):

$$v_c = J^{-1}(\dot{h}_d + K \tanh(h_e)) \quad (27)$$

Se verifica si con esta ley de control el sistema es asintóticamente estable. Reemplazando (27) en la derivada de la función candidata de Lyapunov dada en (23), se

tiene:

$$\dot{V} = (h_e)^T (\dot{h}_d - J J^{-1} (\dot{h}_d + K \tanh(h_e))) \quad (28)$$

Desarrollando (28) se tiene:

$$\dot{V} = -(h_e)^T (K \tanh(h_e))$$

Como  $K$  es una matriz definida positiva, entonces  $\dot{V} < 0$ , y se verifica que  $h_e \rightarrow 0$  cuando  $t \rightarrow \infty$ , indicando así que el error converge asintóticamente a cero. Por lo tanto, la ley de control con saturación queda definida por (29).

$$v_c = J^{-1} (\dot{h}_d + K \tanh(h_e)) \quad (29)$$

## 7.5. Pruebas de simulación

A continuación se presentan los resultados obtenidos del seguimiento de trayectorias del robot móvil tipo unicycle con restricción no holonómica.

### 7.5.1. Seguimiento de trayectoria

La simulación para comprobar el algoritmo de control de seguimiento de trayectorias para un robot móvil de tipo unicycle con restricción no holonómica, se realiza empleando el software Matlab versión R2019a, a través de una animación del robot móvil de tipo unicycle que se traslada sobre las trayectorias, para lo cual es necesario dibujar la geometría del robot en un archivo .m, la función de las dimensiones de las ruedas y el chasis del robot móvil de tipo unicycle utilizados para comprobar el funcionamiento del algoritmo.

Se requieren de dos figuras circulares para las llantas y una base poligonal, en la que, con color azul se diferencia la parte frontal del robot.

- **Animación del robot móvil de tipo unicycle:** Se presenta una captura de la animación del robot móvil de tipo unicycle sobre un plano en 3D, en el que se observa su desempeño sobre el seguimiento de la trayectoria designada. Para este caso se coloca de color magenta la referencia y de color verde claro el resultado, además de los puntos de inicio y final.
- **Desplazamiento en XY del robot móvil de tipo unicycle:** Esta gráfica presenta el resultado del seguimiento de trayectoria de la animación del robot móvil de tipo unicycle, pero visto en un plano 2D.
- **Velocidad lineal y velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle:** Esta gráfica se compone de 2 planos en el que se muestran la velocidad lineal y velocidad angular que mantiene el robot móvil de tipo unicycle durante el tiempo establecido del seguimiento de trayectorias.
- **Los errores de posicionamiento en x y y del robot móvil de tipo unicycle:** Finalmente, la gráfica de errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  indica el tiempo que le toma al robot móvil acotar el error y ubicarse sobre la trayectoria designada.

### 7.5.2. Prueba 1: Trayectoria circular

- **Condiciones iniciales**

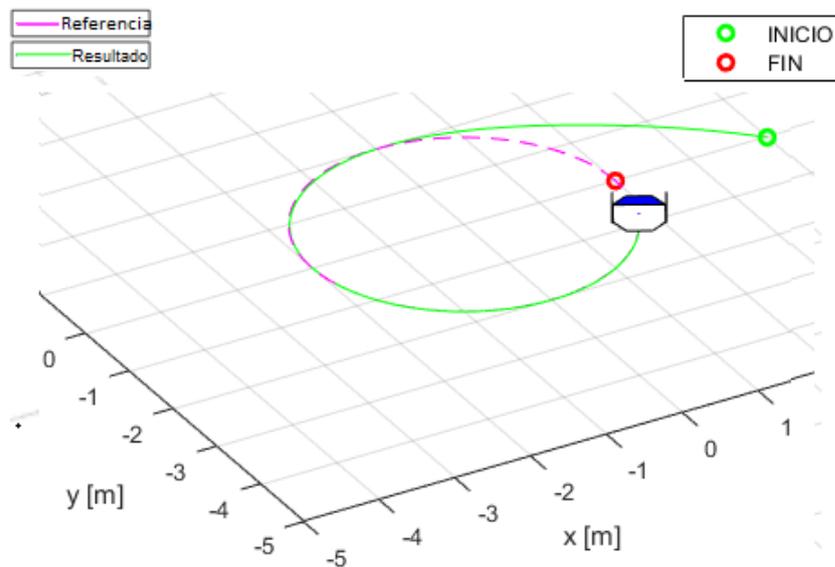
Las condiciones iniciales para ejecutar la trayectoria circular son las siguientes:

- **Tiempo de simulación:** 65 s.
  - **Tiempo de muestreo:** 0,1 s.
- **Posición y orientación inicial**
  - **Posición inicial en x:** 4 m.
  - **Posición inicial en y :** 0 m.
  - **Orientación inicial:** 0 rad.
- **Trayectoria deseada:**
  - Posición deseada en x:  $x_d = 2\cos(0,1t)$ , en m.
  - Posición deseada en y:  $y_d = 2\sin(0,1t)$ , en m.

- **Matriz de ganancias:**

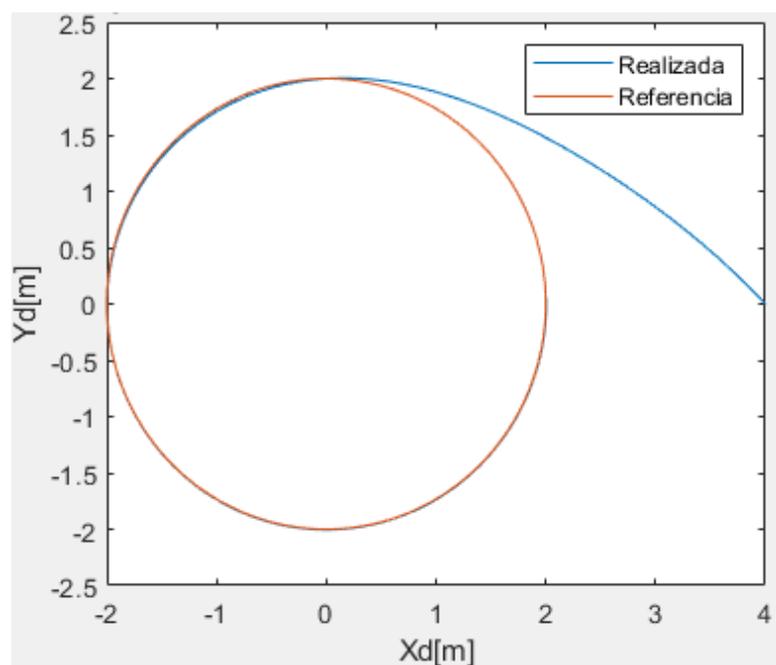
$$\circ K = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,8 \end{bmatrix}$$

Se presenta en la Figura 55 una captura de la animación del algoritmo de seguimiento de la trayectoria circular.



**Figura 55.** Animación 3D del seguimiento de la trayectoria circular

La Figura 56 indica el desplazamiento en  $x$  y  $y$  del seguimiento de la trayectoria circular en un plano 2D.



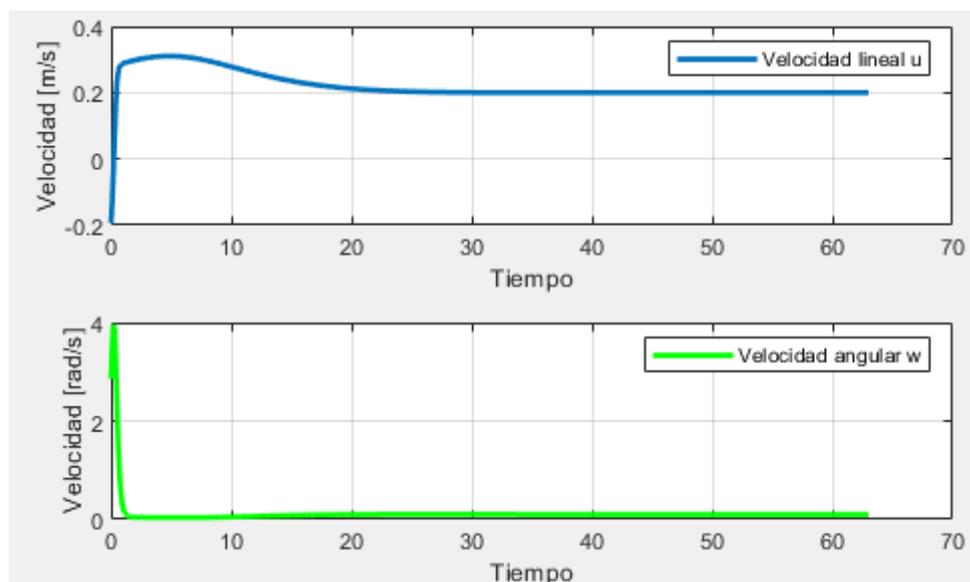
**Figura 56.** Desplazamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicyclo en la trayectoria circular

- **Velocidad lineal y velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle:**

Se observa en la Figura 57, que la velocidad lineal del robot móvil de tipo unicycle en los primeros instantes tiene un pico de  $-0,2 \frac{m}{s}$ , lo que indica que el robot retrocede por la orientación y luego mantiene un rango adecuado de funcionamiento de  $0,2 \frac{m}{s}$  cuando se encuentra sobre la trayectoria circular.

La gráfica de velocidad angular presenta un pico de  $4 \frac{rad}{s}$  en los primeros instantes de la simulación para luego mantenerse en los valores del rango permitido de funcionamiento dentro de  $0,1 \frac{rad}{s}$  como valor máximo.

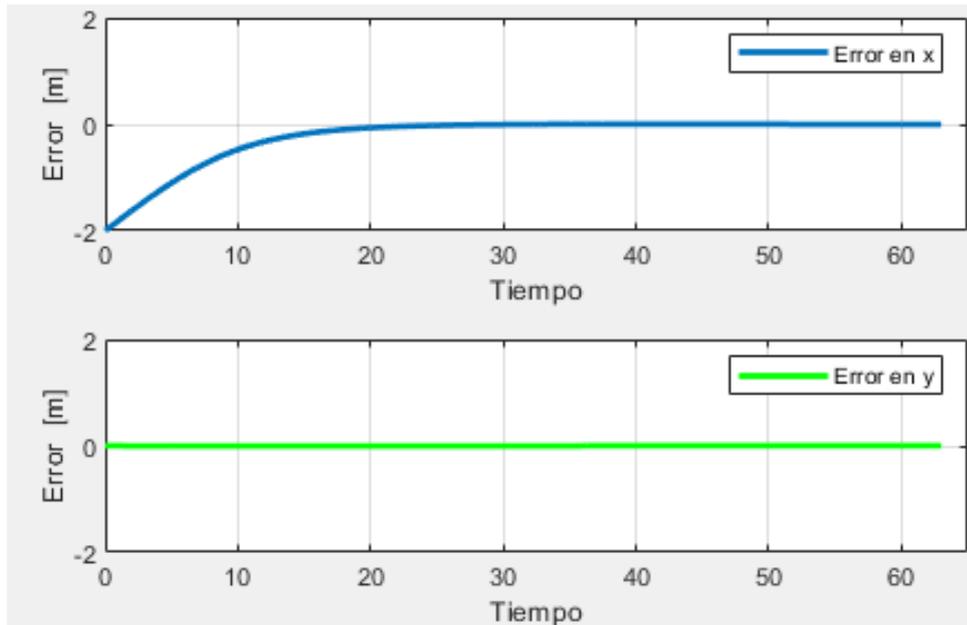
Este pico inicial responde a la orientación del robot móvil de tipo unicycle e indica que el robot debe girar hasta empezar a desplazarse y ubicarse sobre la trayectoria designada.



**Figura 57.** Gráfica de las velocidades lineal y angular de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria circular

- **Los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle:**

Se observa que el error de posicionamiento en  $y$  tiene un valor aproximado de 3 mm, dado que el robot únicamente se debe posicionar en  $x$ , que en cuyo caso inicia en -2 m y acota el error hasta 1 mm en la trayectoria circular, como se visualiza en la Figura 58.



**Figura 58.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria circular

### 7.5.3. Prueba 2: Trayectoria sinusoidal

- **Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales para ejecutar la trayectoria sinusoidal son las siguientes:

- **Tiempo de simulación:** 65 s.
- **Tiempo de muestreo:** 0,1 s.

- **Posición y orientación inicial**

- **Posición inicial en x:** -2 m.
- **Posición inicial en y :** 0 m.
- **Orientación inicial:** 0 rad.

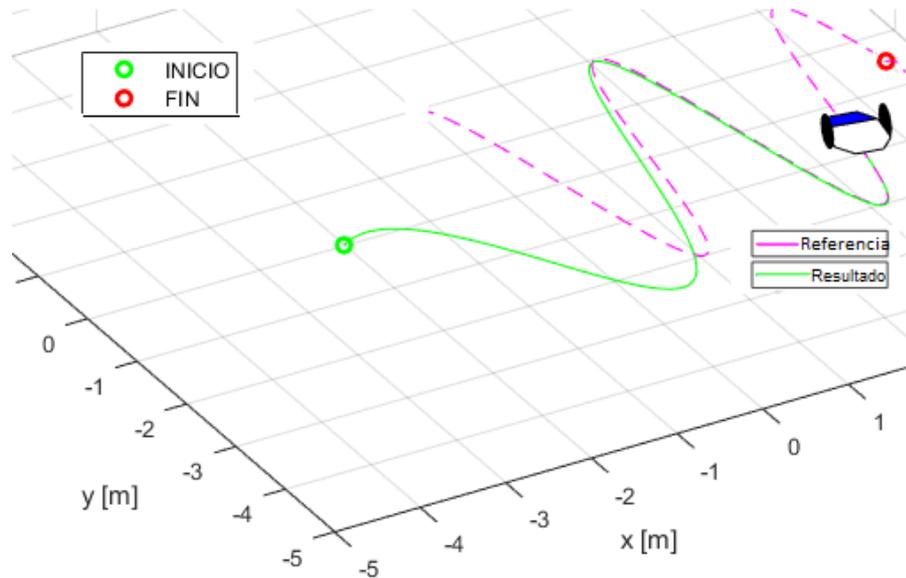
- **Trayectoria deseada:**

- Posición deseada en x:  $x_d = 0,1t$ , en m.
- Posición deseada en y:  $y_d = 2\cos(0,3t)$ , en m.

- **Matriz de ganancias:**

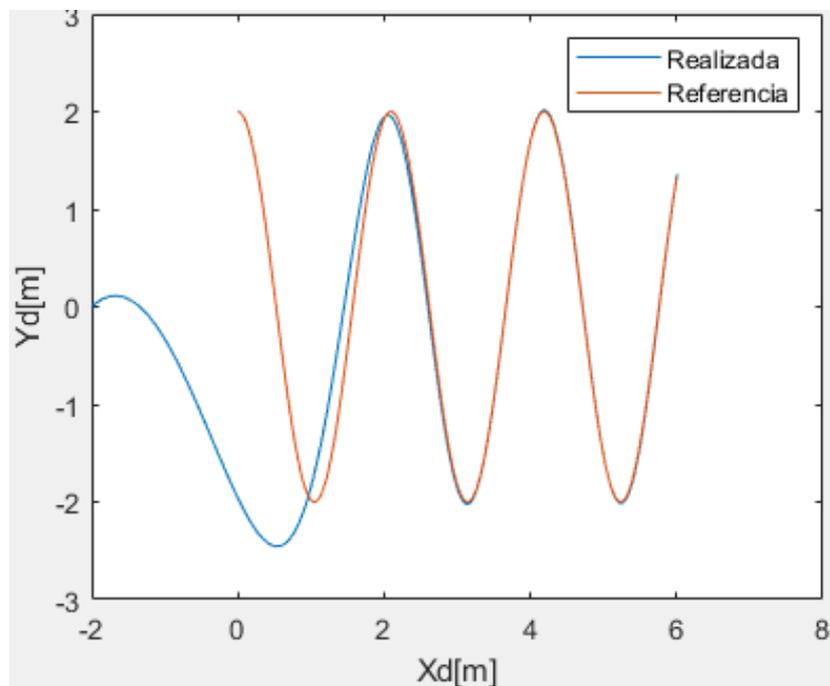
- $$K = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,8 \end{bmatrix}$$

La Figura 59 indica una captura de la animación del algoritmo de seguimiento de la trayectoria sinusoidal.



**Figura 59.** Animación 3D del seguimiento de la trayectoria sinusoidal

La Figura 60 indica el desplazamiento en  $x$  y  $y$  del seguimiento de la trayectoria sinusoidal en un plano 2D.



**Figura 60.** Desplazamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria sinusoidal

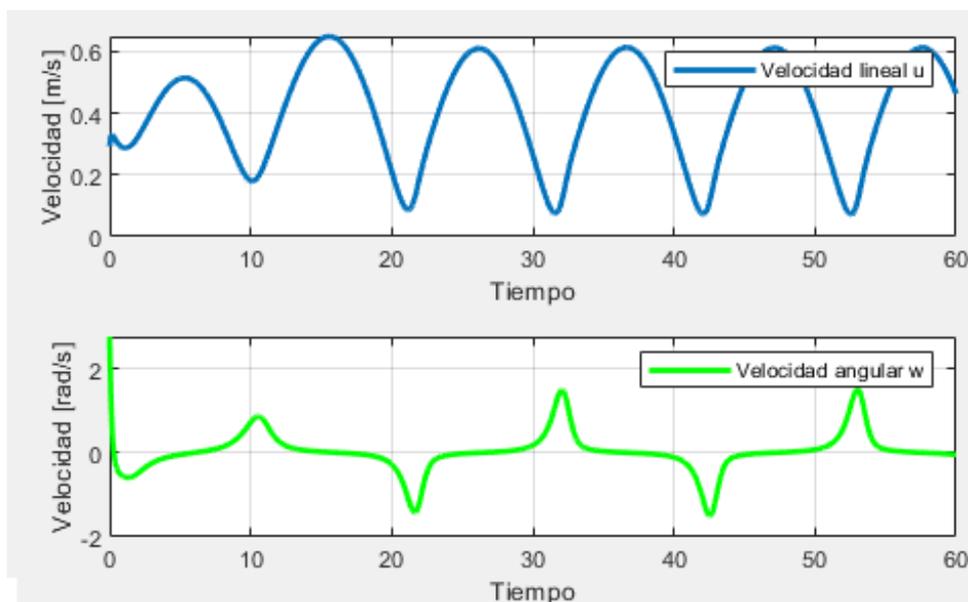
- **Velocidad lineal y velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle:**

Se observa que la velocidad lineal del robot móvil de tipo unicycle durante la si-

mulación de la trayectoria sinusoidal se mantiene en el rango adecuado de funcionamiento de  $0,1 \frac{m}{s}$  a  $0,6 \frac{m}{s}$ , como se examina en la Figura 61.

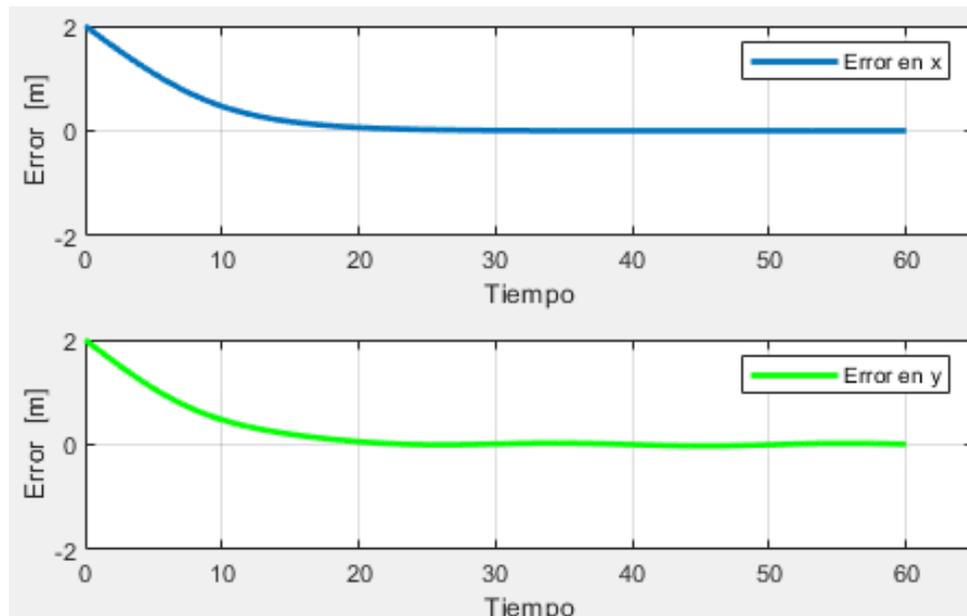
Se puede observar que en ciertas instancias la velocidad lineal del robot móvil de tipo unicycle es de  $0,6 \frac{m}{s}$  indicando que el robot se encuentra sobre una parte de la trayectoria que tiene una menor curvatura y activa los 2 motores de forma simultánea.

La gráfica de velocidad angular presenta un pico de  $2 \frac{rad}{s}$  en los primeros instantes de la simulación para luego mantenerse en los valores del rango permitido de funcionamiento dentro de  $1 \frac{rad}{s}$  como valor máximo.



**Figura 61.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria sinusoidal

- **Los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle:** Según la ubicación inicial del robot móvil de tipo unicycle, el error de posicionamiento disminuye de 2 m a 3 mm, tanto en  $x$  como en  $y$ , como se observa en la Figura 62.



**Figura 62.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria sinusoidal

#### 7.5.4. Prueba 3: Trayectoria de número 8

- **Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales para ejecutar la trayectoria de número 8 son las siguientes:

- **Tiempo de simulación:** 40 s.
- **Tiempo de muestreo:** 0,1 s.

- **Posición y orientación inicial**

- **Posición inicial en x:** 0 m.
- **Posición inicial en y :** 4 m.
- **Orientación inicial:** 0 rad.

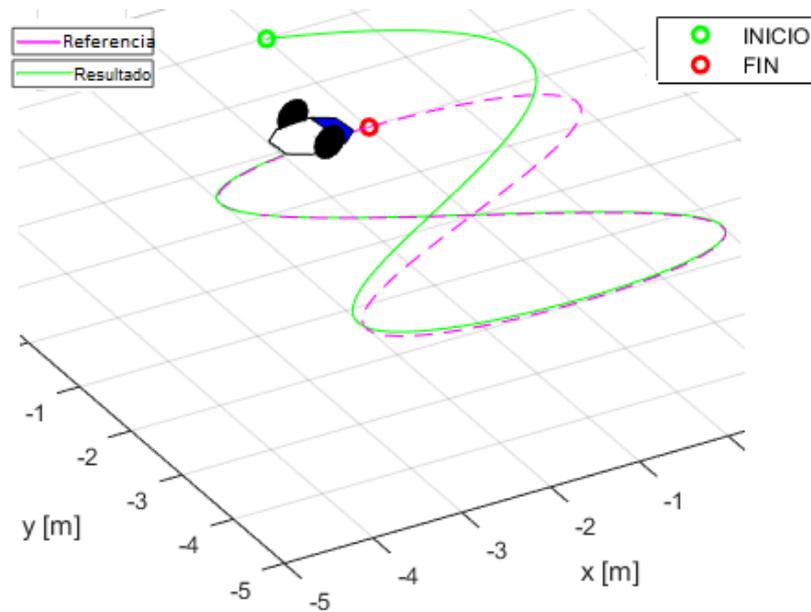
- **Trayectoria deseada:**

- Posición deseada en x:  $x_d = 2\sin(0,3t)$ , en m.
- Posición deseada en y:  $y_d = 2\cos(0,15t)$ , en m.

- **Matriz de ganancias:**

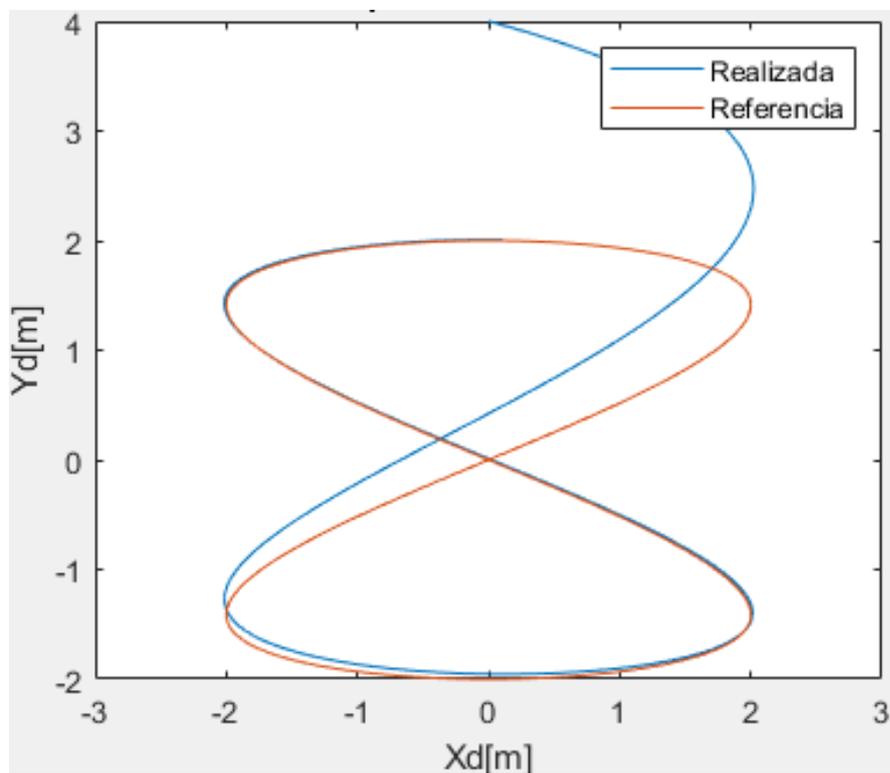
- $$K = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,8 \end{bmatrix}$$

Se presenta en la Figura 63 la captura de la animación del seguimiento de la trayectoria de número 8.



**Figura 63.** Animación 3D del seguimiento de la trayectoria de número 8

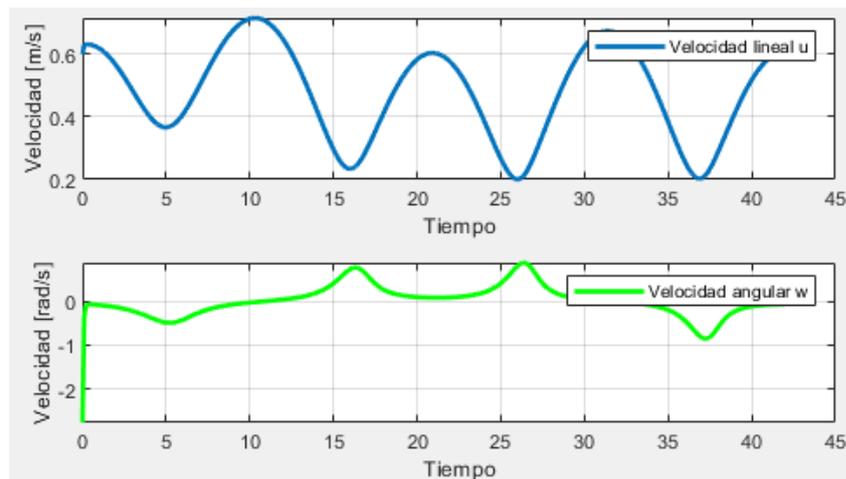
La Figura 64 indica el desplazamiento en  $x$  y  $y$  del seguimiento de la trayectoria de número 8 en un plano 2D.



**Figura 64.** Desplazamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria de número 8

- **Velocidad lineal y velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle:**

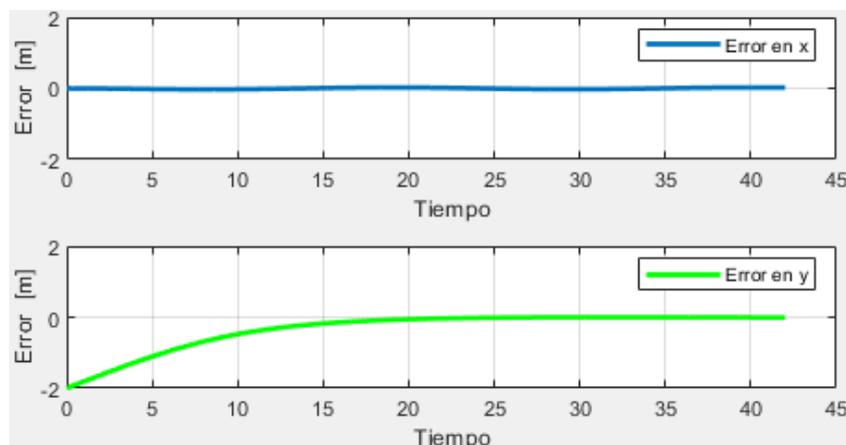
El rango de velocidad lineal que el robot de tipo unicycle alcanza durante el seguimiento de la trayectoria de número 8, es de  $0,2 \frac{m}{s}$  hasta  $0,65 \frac{m}{s}$ . Esto se explica por la presencia de una línea recta, en la cual los 2 motores se encuentran trabajando de forma simultánea, como se presenta en la Figura 65.



**Figura 65.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de número 8

- **Los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle:**

Se observa que el error de posicionamiento en  $x$  tiene un valor aproximado de 3 mm, dado que el robot únicamente se debe posicionar en  $y$ , que en cuyo caso inicia en -2 m y acota el error hasta 1 mm en el tiempo de simulación de la trayectoria de número 8, de acuerdo al resultado visto en la Figura 66.



**Figura 66.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de número 8

### 7.5.5. Prueba 4: Trayectoria curva de tipo Lissajous

- **Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales para ejecutar la trayectoria curva de tipo Lissajous son las siguientes:

- **Tiempo de simulación:** 65 s.
- **Tiempo de muestreo:** 0,1 s.

- **Posición y orientación inicial**

- **Posición inicial en x:** -0,5 m.
- **Posición inicial en y :** 0 m.
- **Orientación inicial:** 0 rad.

- **Trayectoria deseada:**

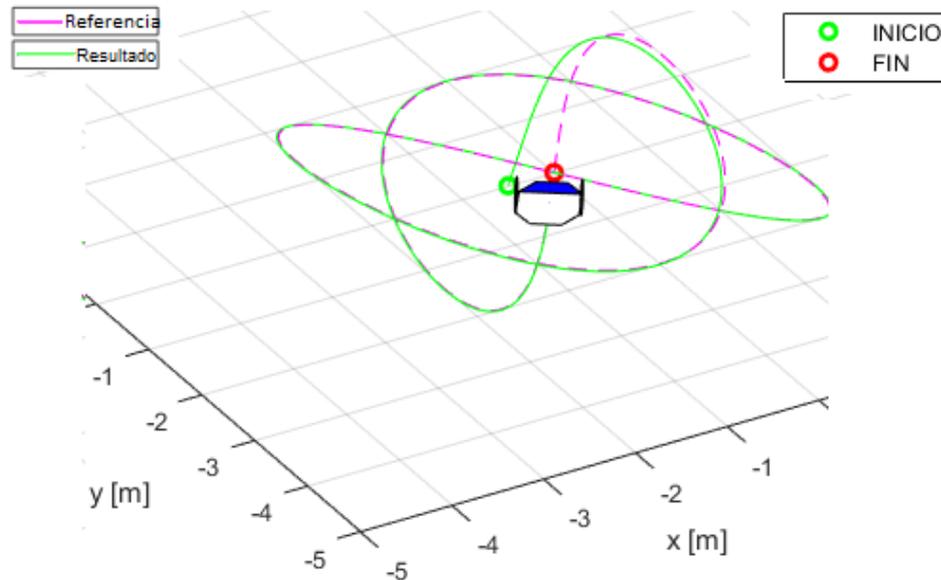
- Posición deseada en x:  $x_d = 2\sin(0,2t)$ , en m.
- Posición deseada en y:  $y_d = 2\sin(0,3t)$ , en m.

- **Matriz de ganancias:**

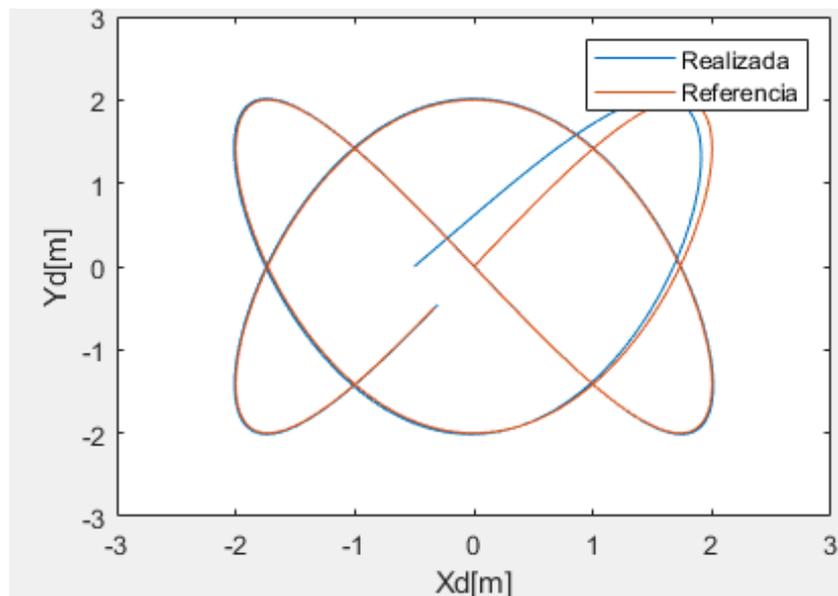
- $$K = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,8 \end{bmatrix}$$

La Figura 67 presenta la captura de la animación del seguimiento de la trayectoria de tipo Lissajous.

La Figura 68 indica el desplazamiento en  $x$  y  $y$  del seguimiento de la trayectoria de tipo Lissajous en un plano 2D.



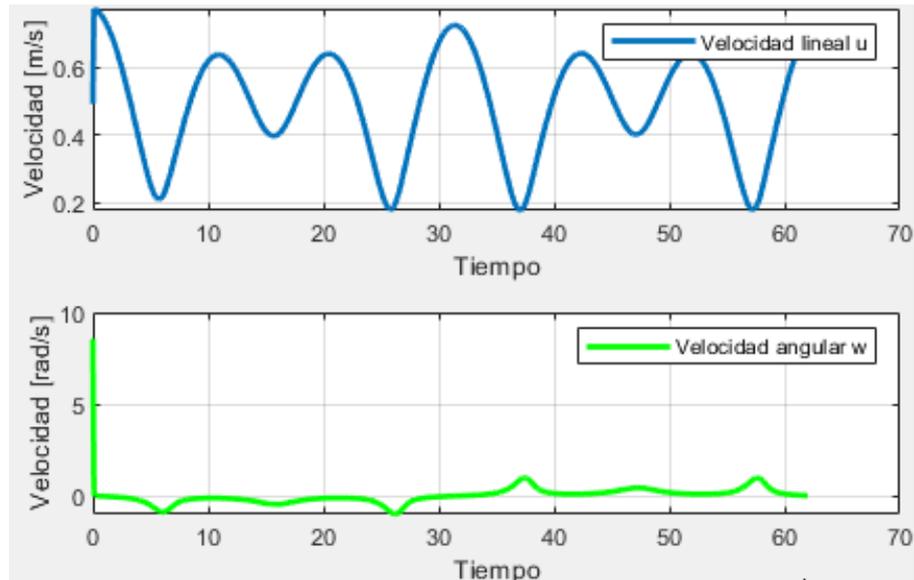
**Figura 67.** Animación 3D del seguimiento de la trayectoria de tipo Lissajous



**Figura 68.** Desplazamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria de tipo Lissajous

- **Velocidad lineal y velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle:**

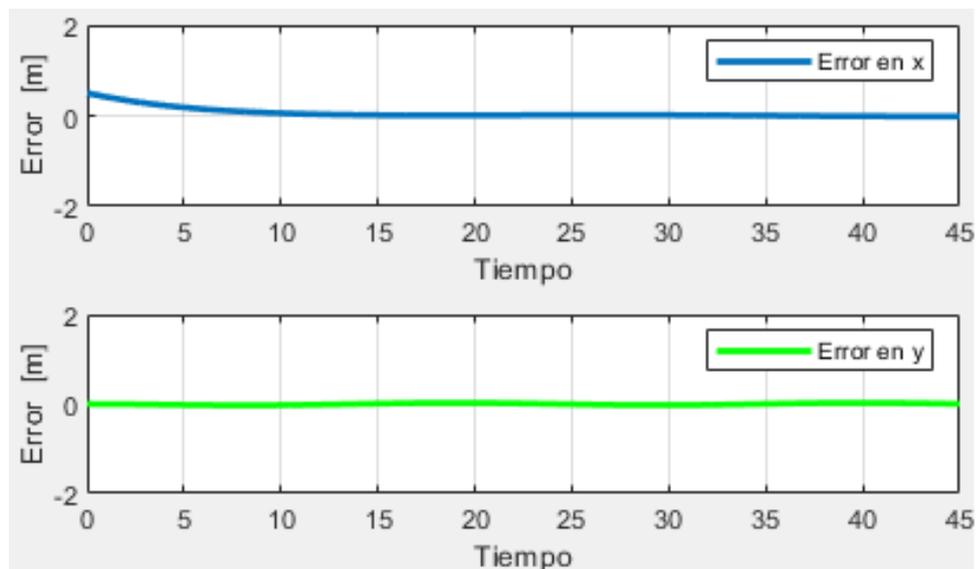
Al igual que en la trayectoria de número 8, la velocidad lineal del robot móvil de tipo unicycle presenta un rango de  $0,2 \frac{m}{s}$  hasta  $0,65 \frac{m}{s}$  indicando que acciona los 2 motores de forma simultánea por la presencia de una línea recta. La velocidad angular presenta un pico de  $8,5 \frac{rad}{s}$  que responde a la rotación inicial que debe realizarse antes de iniciar el seguimiento de la trayectoria de la curva de tipo Lissajous. Posteriormente, el rango de velocidad angular se mantiene entre  $0,1 \frac{rad}{s}$ , como se observa en la Figura 69.



**Figura 69.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de tipo Lissajous

- **Los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle:**

Los errores de posición tanto en  $x$  como en  $y$ , que se observan en la Figura 70, se encuentran en un rango de 1 cm a 5 mm, esto ocurre cuando el robot móvil de tipo unicycle no es capaz de ubicarse en la trayectoria de curvas cerradas y se distancia ligeramente de las mismas, hasta posicionarse nuevamente.



**Figura 70.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de tipo Lissajous

### 7.5.6. Prueba 5: Trayectoria de giro continuo

- **Condiciones iniciales**

Las condiciones iniciales para ejecutar la trayectoria de giro continuo son las siguientes:

- **Tiempo de simulación:** 50 s.
- **Tiempo de muestreo:** 0,1 s.

- **Posición y orientación inicial**

- **Posición inicial en x:** -1 m.
- **Posición inicial en y :** 4 m.
- **Orientación inicial:** 0 rad.

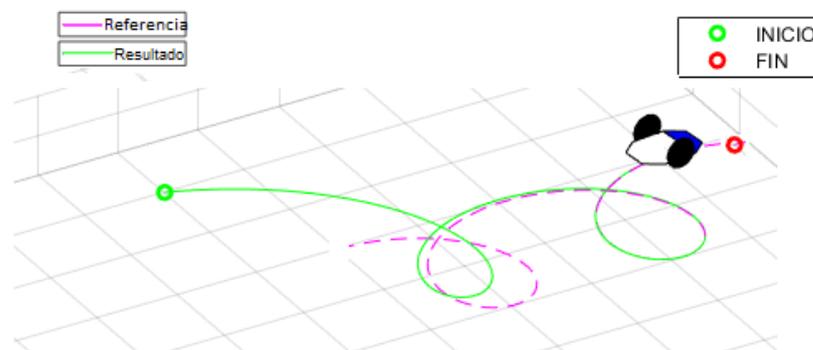
- **Trayectoria deseada:**

- Posición deseada en x:  $x_d = 0,1t + \sin(0,3t)$ , en m.
- Posición deseada en y:  $y_d = 1 + \cos(0,3t)$ , en m.

- **Matriz de ganancias:**

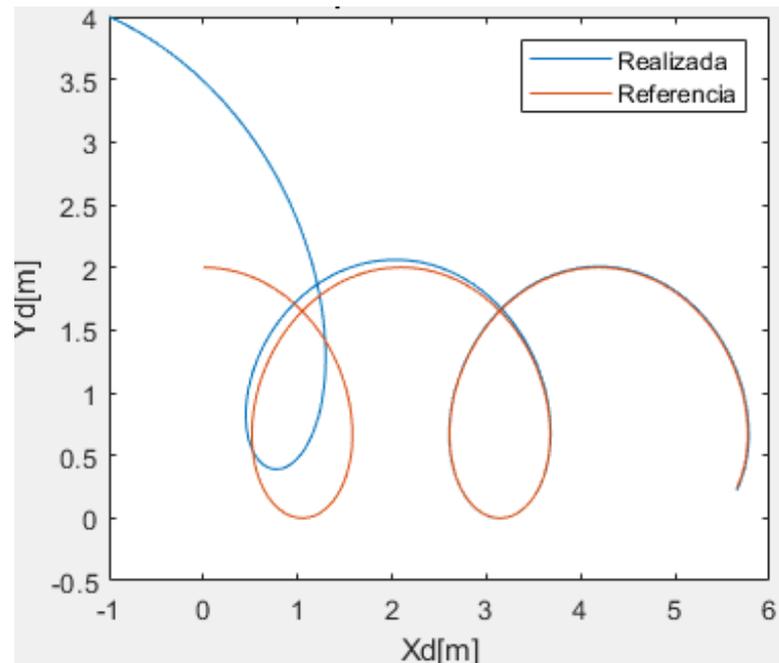
- $$K = \begin{bmatrix} 0,2 & 0 \\ 0 & 0,8 \end{bmatrix}$$

Se presenta en la Figura 71 la captura de la animación del seguimiento de la trayectoria de giro continuo.



**Figura 71.** Animación 3D del seguimiento de la trayectoria de giro continuo

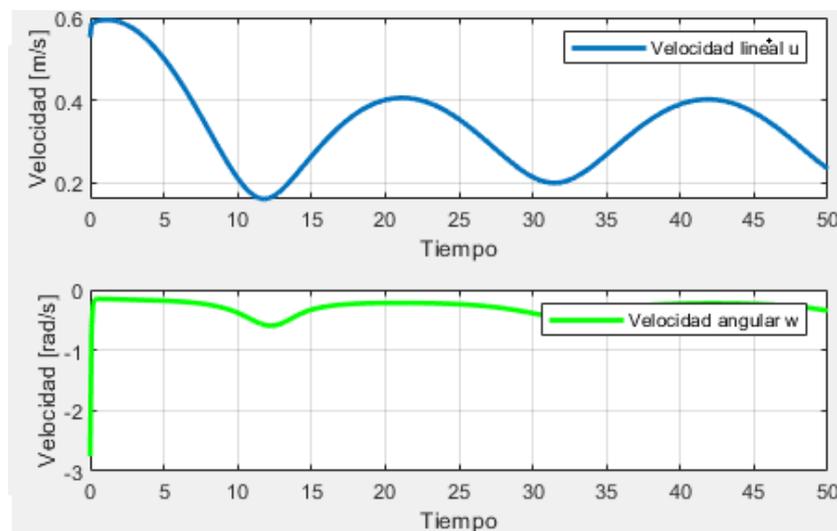
La Figura 72 indica el desplazamiento en  $x$  y  $y$  del seguimiento de la trayectoria de giro continuo en un plano 2D.



**Figura 72.** Desplazamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle en la trayectoria de giro continuo

- **Velocidad lineal y velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle:**

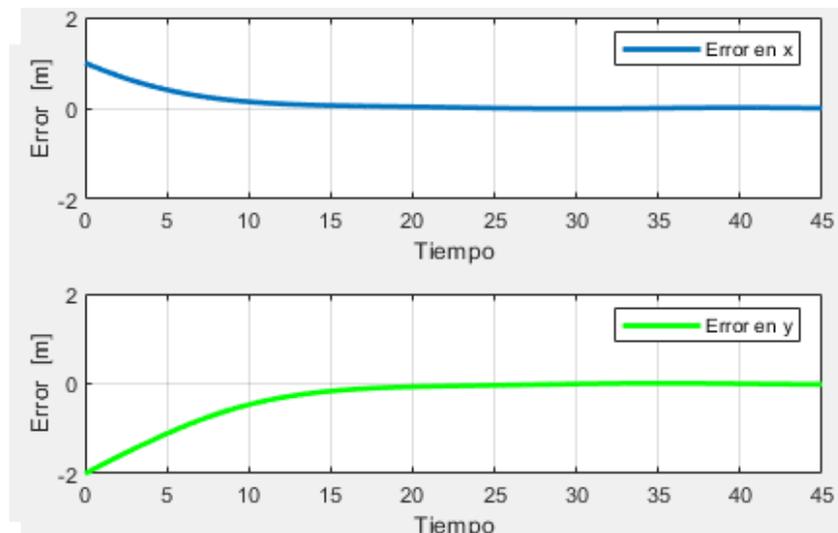
Inicialmente, el robot móvil de tipo unicycle alcanza una velocidad lineal de  $0,6 \frac{m}{s}$ , únicamente hasta posicionarse sobre la trayectoria de giro continuo y permanecer en un rango de  $0,2$  a  $0,4 \frac{m}{s}$ . La velocidad angular del robot móvil de tipo unicycle, presenta un pico de  $-3 \frac{rad}{s}$  debido al giro que debe realizar para el seguimiento de trayectoria y finalmente permanecer en un rango de  $-0,1 \frac{rad}{s}$  hasta finalizar el tiempo de simulación, como se observa en la Figura 73.



**Figura 73.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de giro continuo

- **Los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  del robot móvil de tipo unicycle:**

Se observa en la Figura 74, los errores de posicionamiento que en  $x$ , inicia en 1 m y se acota hasta 3 mm, mientras que en  $y$  inicia en -2 m hasta llegar hasta 3 mm de error al finalizar el seguimiento de la trayectoria de giro continuo.



**Figura 74.** Gráfica de los errores de posicionamiento en  $x$  y  $y$  de la simulación del robot móvil tipo unicycle sobre la trayectoria de giro continuo

### 7.5.7. Consideraciones para reducir el error de posicionamiento

Las consideraciones para reducir el error de posicionamiento son:

- Utilizar la saturación de velocidades mediante la tangente hiperbólica.
- Mantener una velocidad lineal del robot móvil de tipo unicycle dentro de sus parámetros de  $0,1 \frac{m}{s}$  a  $0,6 \frac{m}{s}$  y la velocidad angular dentro de  $1 \frac{rad}{s}$ .
- Ajustar la matriz de ganancias en la simulación de acuerdo a los resultados obtenidos, para evitar un pico que representa el sobre esfuerzo de los motores.

Al colocar el móvil sobre la trayectoria se evita la aceleración inicial excesiva, que antes de utilizar el controlador tangente hiperbólico, generaba velocidades lineales y angulares superiores a los límites de funcionamiento del robot físico, de acuerdo al análisis técnico realizado. De igual forma, mediante la aplicación de la saturación, los resultados obtenidos en las gráficas de velocidades se restringen a los valores adecuados de funcionamiento.

Es necesario indicar que pese a ocupar el método de saturación, en los primeros instantes de simulación, la velocidad angular registra datos superiores a los establecidos durante el diseño, pero que logra estabilizar este sobreimpulso sin comprometer a los componentes electrónicos del robot móvil de tipo unicycle.

## 8. Conclusiones

- Se concluye que, mediante la investigación sobre las distintas configuraciones de robots con ruedas, se obtuvo una base para entender el funcionamiento de estos sistemas y comprender sus características geométricas, para luego dar paso a los cálculos y obtener el modelo cinemático con restricciones no holonómicas para el robot de tipo unicycle.
- Dado que el sistema se encuentra limitado al modelo cinemático de un robot de tipo unicycle con restricción no holonómica, no es posible utilizar el mismo algoritmo de seguimiento de trayectorias para evaluar en otro tipo de configuraciones de robots.
- Para el diseño de este prototipo de robot móvil de tipo unicycle, se consideraron las siguientes dimensiones 19,15 cm de largo, 21 cm de ancho y 12,8 cm de alto, en función de las referencias de modelos existentes evaluados en la Tabla 1. Además, se estableció la masa máxima del prototipo, la cual es de 0,875 kg y se diseñaron los motores considerando la suma de una carga útil de 0,2 kg a la masa total del robot móvil.
- El diseño mecánico de los soportes de la estructura se realizó bajo el criterio de máxima deformación aceptable, de acuerdo a un análisis de cargas en sus puntos críticos, de tal forma que mantengan la estabilidad y la sujeción a la placa de aluminio.
- Se concluye que para el dimensionamiento de los motores del robot móvil de tipo unicycle, se requiere realizar un análisis de fuerzas, en el que se determine el torque que deberán ejercer los mismos para mover la masa completa del móvil de 1,075 kg y posteriormente, determinar la potencia y velocidad angular. A su vez,

la superficie de desplazamiento deberá ser lisa y sin inclinación, caso contrario no se garantiza el funcionamiento adecuado del robot móvil de tipo unicycle.

- El prototipo de robot móvil de tipo unicycle posee limitaciones en las dimensiones de su estructura mecánica que le impiden realizar otro tipo de tareas diferentes al seguimiento de trayectorias. Además, por su estructura modular no es capaz de resistir colisiones, ni caídas.
- El prototipo de robot móvil de tipo unicycle posee los componentes electrónicos necesarios para realizar una navegación autónoma para el seguimiento de trayectorias. Esto se realiza mediante la adquisición de las señales generadas por los sensores de velocidad, que son empleadas en lazo cerrado para determinar el error de posición y posteriormente, emplear en la ley de control.
- Se concluye que el medio de comunicación bluetooth mediante el módulo HC-05, empleado para la comunicación del robot móvil de tipo unicycle con la PC, es funcional siempre y cuando la distancia de los mismos sea menor a 10 m, según las especificaciones del fabricante, garantizando la latencia apropiada para la transmisión de datos.
- El algoritmo de visión artificial empleado para la identificación de color y forma se encuentra limitado a los colores, azul, rojo y verde y a las figuras geométricas de un círculo, cuadrado y triángulo. No obstante, es importante para el éxito de la implementación del algoritmo contar con una imagen de calidad para el respectivo procesamiento.
- La etapa de detección de color automática, requiere que la webcam se encuentre ubicada a 30 cm de la escena, que debe tener un fondo blanco uniforme y además, encontrarse iluminada con un foco blanco de 27 W ubicado entre 30 a 40 cm de la misma.
- Se han realizado pruebas a nivel de simulación para el seguimiento de trayectoria, donde se ha comprobado que los errores convergen a cero.
- Los errores de posicionamiento se encuentran en el rango de los milímetros, asegurando la fiabilidad del algoritmo de control desarrollado. Además, se garantiza

el funcionamiento del algoritmo en caso de implementación del robot móvil de tipo unicycle, dado que los valores máximos de velocidad se encuentran dentro de los rangos óptimos de funcionamiento.

## 9. Recomendaciones

- Para aumentar la navegación autónoma del robot móvil de tipo unicycle, se recomienda utilizar un microcontrolador como un Arduino Mega, que gracias a su arquitectura posee una mayor cantidad de pines digitales y analógicos en los cuales se podrían colocar otros sensores, como cámaras o finales de carrera en el cual se podría ubicar una unidad de control para mejorar comunicación e implementación de otras técnicas de control avanzado.
- Si se desea que el robot móvil de tipo unicycle tenga un funcionamiento continuo mayor a 1,2 horas, se recomienda implementar un banco de baterías Lipo, igualmente considerando si se mantienen los motores seleccionados durante el diseño de este proyecto.
- La estructura modular del robot móvil de tipo unicycle facilita los cambios y limpieza del mismo, la recomendación más importante es retirar la Lipo batería cuando el robot no sea utilizado y mantener el nivel de la batería dentro de los rangos recomendados por el fabricante, caso contrario podría generarse un daño irreparable. Una Lipo batería debe encontrarse en una temperatura entre  $5^{\circ}$  y  $25^{\circ}$ , en un lugar seco y no por debajo de un voltaje 3,5 V. Es un elemento sensible que podría iniciar un incendio si no se siguen correctamente las instrucciones.
- Para disminuir el error de reconocimiento, tanto de color como de forma, en el algoritmo de inteligencia artificial es recomendable mantener la escena iluminada, la cámara a una distancia y fondo apropiados, únicamente con los objetos que serán analizados para este procedimiento.
- Para la implementación del robot móvil de tipo unicycle es recomendable verificar que las ruedas y los motores se encuentren alineados y todos los pernos se encuentren ajustados adecuadamente con su respectiva tuerca.

- Se recomienda mantener rangos de velocidades bajas del robot móvil, para que evitar que la dinámica del robot genere errores grandes de posición. Y si se requiere trabajar en velocidades altas, se recomienda emplear un controlador dinámico.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Una introducción a los robots móviles. [En línea]. Disponible: <https://www.aadeca.org/pdf/CPmonografias/monografiarobotmovil.pdf> [Fecha de consulta: Abril 2018]
- [2] R. Martínez, S y Sisto, "Control y comportamiento de robots omnidireccionales," pp. 1–43, 2009.
- [3] A. Rosales, G. Scaglia, V. Mut, y F. Sciascio, "Navegación de robots móviles en entornos no estructurados utilizando Álgebra lineal," *Revista iberoamericana de automática e informática industrial (RIAI)*, ISSN 1697-7912, Vol. 6, N<sup>o</sup>. 2, 2009, pags. 79-88, vol. 6, 04 2009.
- [4] S. G. Tzafestas, *Introduction to Mobile Robot Control*, primera ed. Elsevier - USA, 2014.
- [5] Inteligencia artificial y robótica: La búsqueda de la perfección en la producción. [En línea]. Disponible: <https://openframeworks.cc/ofBook/chapters/imageprocessingcomputervision.html> [Fecha de consulta: Mayo 2021]
- [6] Espaciador. [En línea]. Disponible: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/chihai-motor-diy-arduino-g geared-motors-dc-gear-motor-with-encoder-and-65mm-wheel-coupling-kit-for-diy-robot-smart-car-62495822861.html> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [7] Servomagazine. [En línea]. Disponible: <https://www.servomagazine.com/uploads/issuedownloads/pdf/Tips20For20Selecting20DC20Motors20For20Your20Mobile20Robot.pdf> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [8] Motor reductor. [En línea]. Disponible: <https://p.globalsources.com/IMAGES/PDT/SPEC/301/K1123392301.pdf> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [9] Datasheet nema 17. [En línea]. Disponible: <https://www.scribd.com/doc/286726959/Datasheet-NEMA-17> [Fecha

de consulta: Mayo 2021]

- [10] Espaciador. [En línea]. Disponible: <https://uelectronics.com/producto/rueda-loca-nylon-con-25mm-para-carrito/> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [11] Rueda pivote. [En línea]. Disponible: <https://www.sanstore.com.mx/products/rueda-loca-de-plastico-para-robot-o-arduino>: :text=Esta20rueda20loca20o20de,diC31 metro20es20de202520mm. [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [12] Arduino nano. [En línea]. Disponible: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-nano> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [13] Espaciador. [En línea]. Disponible: <https://arduino.cl/arduino-uno/> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [14] Espaciador. [En línea]. Disponible: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-pico/> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [15] Espaciador. [En línea]. Disponible: <https://naylampmechatronics.com/motores-dc/616-motor-dc-con-caja-reductora-y-encoder-25ga-12v-350rpm.html> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [16] Hc-05. [En línea]. Disponible: <https://www.naylampmechatronics.com/inalambrico/43-modulo-bluetooth-hc05.html> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [17] Espaciador. [En línea]. Disponible: <https://www.330ohms.com/products/wifi-serial-tranceptor-con-esp8266-1mb-flash> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [18] Driver l298n. [En línea]. Disponible: <https://www.prometec.net/l298n/> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [19] Interruptor. [En línea]. Disponible: <https://edmproduct.com/producto/interruptor-negro-empotrado-pequeno/> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]

- [20] Espaciador. [En línea]. Disponible: <https://www.iberobotics.com/producto/buzzer-pasivo-5v-zumbador-pasivo/>  
[Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [21] Batería. [En línea]. Disponible: <https://sandorobotics.com/producto/t1000-3s/>  
[Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [22] D. B. H. Abid, N. Y. Allagui, y N. Derbel, "Navigation and trajectory tracking of mobile robot based on kinematic pi controller," *2017 18th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pp. 252–256, 2017.
- [23] R. Hedjar, M. Alsulaiman, y K. Almutib, "Approximated nonlinear predictive control for trajectory tracking of a wheeled mobile robot," in *2011 First International Conference on Robot, Vision and Signal Processing*, 2011, pp. 296–299.
- [24] V. Barrientos, J. Sánchez, y R. Ortigoza, "Robots móviles: Evolución y estado del arte," *Polibits*, vol. 35, pp. 12–17, 01 2007.
- [25] V. y. G. A. Andaluz, G. Andaluz, "Robots móviles: Evolución y estado del arte," *Polibits*, vol. 35, pp. 12–17, 01 2011.
- [26] S. Spanogianopoulos y K. Sirlantzis, "Non-holonomic path planning of car-like robot using rrt\*fn," *2015 12th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, pp. 53–57, 2015.
- [27] H. Yiqing, L. Xiaofeng, W. Panpan, W. Lisheng, y J. Ming, "Mixed fuzzy sliding mode three-dimensional trajectory tracking control for a wheeled mobile robot," in *2017 32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC)*, 2017, pp. 5–9.
- [28] B. Shim, J. Kim, I. Park, y S. Han, "An intelligent control of non-holonomic mobile robot based on fuzzy perception," in *ICCAS 2010*, 2010, pp. 2111–2114.
- [29] A. Yandún y N. Sotomayor, "Planeación y seguimiento de trayectorias para un robot móvil," 08 2012.

- [30] R. H. Alemán, "Control descentralizado de formación y movimiento coordinado de robots móviles tipo unicycle," *Proy. pregrado, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica, Universidad Autónoma de Nuevo León, Nuevo León, México*, 2013.
- [31] D. S. O. Correa, D. F. Sciotti, M. G. Prado, D. O. Sales, D. F. Wolf, y F. S. Osorio, "Mobile robots navigation in indoor environments using kinect sensor," in *2012 Second Brazilian Conference on Critical Embedded Systems*, 2012, pp. 36–41.
- [32] M. Faisal, H. Mathkour, y M. Alsulaiman, "Smart mobile robot for security of low visibility environment," in *2015 5th National Symposium on Information Technology: Towards New Smart World (NSITNSW)*, 2015, pp. 1–6.
- [33] B. Tarvirdizadeh, S. Spanogianopoulos, y K. Alipour, "Control of nonholonomic electrically-driven tractor-trailer wheeled robots based on adaptive partial linearization," in *2018 6th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (IcRoM)*, 2018, pp. 331–336.
- [34] M. Zaman y I. Y. Liao, "A generic model, and its validation, for the translational systematic errors in synchronous drive robots," in *2010 Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modelling and Computer Simulation*, 2010, pp. 106–111.
- [35] M. Velasco-Villa, A. Alvarez-Aguirre, y G. Rivera-Zago, "Discrete-time control of an omnidirectional mobile robot subject to transport delay," in *2007 American Control Conference*, 2007, pp. 2171–2176.
- [36] Hyok-Jo Kwon, Hyungwon Shim, Doo-Gyu Kim, Sung-Kook Park, y Jihong Lee, "A development of a transformable caterpillar equipped mobile robot," in *2007 International Conference on Control, Automation and Systems*, 2007, pp. 1062–1065.
- [37] M. Prufer, C. Schmidt, y F. Wahl, "Identification of robot dynamics with differential and integral models: a comparison," in *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1994, pp. 340–345 vol.1.

- [38] S. Seghour y M. Tadjine, "Consensus-based approach and reactive fuzzy navigation for multiple no-holonomic mobile robots," in *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)*, 2017, pp. 492–497.
- [39] S. Pérez, "Robot móvil de tracción diferencial con plataforma de control modular para investigación y desarrollo ágil de proyectos," in *10mo Congreso Nacional de Mecatrónica*, 2011, pp. 1–6.
- [40] H. R. Everett, *Sensors for Mobile Robots: Theory and Application*. USA: A. K. Peters, Ltd., 1995.
- [41] R. Yan, J. Wu, y J. Lee, "Motion planning of unicycle-like robot using single rrt with branch and bound algorithm," in *2013 10th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, 2013, pp. 599–601.
- [42] C. Chen, C. Chou, y F. Lian, "Trajectory planning for human host tracking and following of slave mobile robot on service-related tasks," in *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, 2011, pp. 2419–2420.
- [43] M. Brezak, I. Petrović, y N. Perić, "Experimental comparison of trajectory tracking algorithms for nonholonomic mobile robots," in *2009 35th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics*, 2009, pp. 2229–2234.
- [44] J. Velagic, N. Osmic, y B. Lacevic, "Neural network controller for mobile robot motion control," *Int. J. Intell. Syst. Technol.*, vol. 3, 01 2008.
- [45] Procesamiento de imágenes. [En línea]. Disponible: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12112/fichero/Documentoporcapitulos252F3CapC3ADtulo3.pdf> [Fecha de consulta: Mayo 2021]
- [46] A complete workflow: Background subtraction. [En línea]. Disponible: <https://blog.universal-robots.com/es/inteligencia-artificial-y-robotica> [Fecha de consulta: Mayo 2021]
- [47] Aluminio. [En línea]. Disponible: <http://www.almexa.com.mx/noticias-del-aluminio/ventajas-del-aluminio> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]
- [48] Espaciador. [En línea]. Disponible: <https://www.lbaindustrial.com.mx/que-es-un-encoder/> [Fecha de consulta: Diciembre 2020]

- [49] J. L. Barahona-Avalos y F. Reyes Cortés, "Evaluación experimental de controladores de posición tipo saturados para robot manipuladores," 09 2002.
- [50] E. Reyes y F. Cortés, ""modelado dinámico y control de un robot móvil con ruedas tipo: triciclo clásico"," 09 2018.