



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

“PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN NUEVO PROTOTIPO DE PLATAFORMA MÓVIL JUNTO A SU MODELO MATEMÁTICO PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE EXPLORACIÓN FULL COVERAGE”

GLADYS JANNETH URQUIZO BUENAÑO

Trabajo de Titulación Modalidad Proyectos de Investigación y Desarrollo,
presentado ante el Instituto de Posgrado de Educación Continua de la
ESPOCH, como requisito parcial para la obtención del grado de:

**MAGISTER EN SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN
INDUSTRIAL**

Riobamba - Ecuador

Julio 2017



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

CERTIFICACIÓN:

EL TRIBUNAL DE TRABAJO DE TITULACIÓN CERTIFICA QUE:

El Proyecto de Investigación, titulado “**PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN NUEVO PROTOTIPO DE PLATAFORMA MÓVIL JUNTO A SU MODELO MATEMÁTICO PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE EXPLORACIÓN FULL COVERAGE**” de responsabilidad de la Ing. Gladys Janneth Urquizo Buenaño, ha sido prolijamente revisada y se autoriza su presentación.

Tribunal:

ING. FREDY PROAÑO ORTIZ PhD.

PRESIDENTE

FIRMA

ING. JAVIER GAVILANES MSc.

DIRECTOR

FIRMA

ING. GABRIEL DELGADO O. MSc.

MIEMBRO

FIRMA

ING. PATRICIO ENCALADA MSc.

MIEMBRO

FIRMA

Riobamba Julio, 2017

DERECHOS INTELECTUALES

Yo, Gladys Janneth Urquizo Buenaño, soy responsable de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en el presente Proyecto de Investigación, y que el patrimonio intelectual generado por la misma pertenece exclusivamente a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Ing. Gladys Janneth Urquizo Buenaño

C.I. 060396293-7

DECLARACIÓN DE AUTENTICIDAD

Yo, Gladys Janneth Urquizo Buenaño, declaro que el presente proyecto de Investigación es de mi autoría y que los resultados de los mismos son auténticos y originales. Los textos constantes en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autora, asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este proyecto de investigación de maestría.

Riobamba, Julio de 2017

Ing. Gladys Janneth Urquizo Buenaño

C.I. 060396293-7

DEDICATORIA

A mi brujita preciosa, a mi sirenita y a Ángel... mi Familia, porque que son la razón de mi TODO.

Janneth

AGRADECIMIENTO

A Dios por darme las oportunidades que se han presentado en mi vida, a mi Familia por brindarme su apoyo incondicional, especialmente a mi mamita, a mi papi por ser un ejemplo para mí, a Ángel por ser un pilar fundamental en mi vida y por su apoyo para superarme cada día. A la ESPOCH, a todas las personas que me ayudaron y me guiaron, a Dénis, Erika y Danilo.

Janneth

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	xiv
SUMMARY.....	xv
CAPITULO I.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Situación Problemática	1
1.2 Formulación del Problema.....	3
1.3 Preguntas Directrices	3
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1 <i>General</i>	<i>3</i>
1.4.2 <i>Específicos</i>	<i>4</i>
1.5 Justificación	4
1.6 Hipótesis	6
CAPITULO II.....	7
2. MARCO DE REFERENCIA	7
2.1 Antecedentes	7
2.1.1 <i>Tipos de sistemas de locomoción</i>	<i>8</i>
2.1.2 <i>Morfología de los robots móviles.</i>	<i>9</i>
2.1.2.1 <i>Tipos de Ruedas</i>	<i>9</i>
2.1.3 <i>Reconocimiento de trayectorias</i>	<i>20</i>
2.1.4 <i>Tipos de entornos en los que opera un robot móvil.....</i>	<i>21</i>
2.1.6 <i>Tipos de trayectoria que pueden realizar los robots móviles.....</i>	<i>23</i>
2.1.7 <i>Métodos para determinar el modelo cinemático</i>	<i>26</i>
2.1.8 <i>Simulación de trayectorias del robot móvil.....</i>	<i>31</i>
2.1.9 <i>Diseño de planos</i>	<i>32</i>

CAPITULO III	34
3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	34
3.1 Tipo y Diseño de Investigación	34
3.2 Supuestos de diseño:	34
3.3 Supuesto operacional:	35
3.4 Elección de Llantas	35
3.5 Diseño Estructural	37
3.5.1 Análisis estructural	39
3.6 Análisis Geométrico del Robot	42
3.7 Modelo Matemático	42
3.8 Simulación	45
3.8.1 Robot Dimension	46
3.8.2 Robot Plot 3D	46
3.9 Control de Velocidad	49
3.10 Planificación de Pruebas	50
CAPITULO IV	51
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
4.1 Prueba 1: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 1.5	52
4.2 Prueba 2: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 3	53
4.3 Prueba 3: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 5	54
4.4 Prueba 4: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 0	55
4.5 Prueba 5: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 1.5	56
4.6 Prueba 6: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 3	57
4.7 Prueba 7: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 5	58
4.8 Prueba 8 : Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 0	59
4.9 Prueba 9: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 1.5	60
4.10 Prueba 10: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 3	60

4.11	Prueba 11: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 5.....	62
4.12	Prueba 12: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 0.....	62
4.13	Prueba 13: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 1.5 ...	63
4.14	Prueba 14: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 3.....	65
4.15	Prueba 15: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 5.....	66
	CONCLUSIONES.	70
	RECOMENDACIONES.	73
	BIBLIOGRAFÍA.....	75
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2	Ecuaciones configuración tipo bicicleta	30
Tabla 1-3	Características de la llanta convencional.....	36
Tabla 2-3	Característica de la Llanta Omnidireccional	37
Tabla 3-3	Propiedades del PLA	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-2 Tipos de ruedas; a) Convencionales; b) Castos; c) De bolas	9
Figura 2-2 Rueda fija con parámetros	10
Figura 3-2 Rueda orientable centrada.....	10
Figura 4-2 Rueda orientable descentrada	11
Figura 5-2 Rueda omnidireccional	11
Figura 6-2 Parámetros para una rueda sueca	11
Figura 7-2 Configuraciones de robots móviles de ruedas	13
Figura 8-2 Robot Omnidireccional Uranus: a) Maniobrabilidad, b) Robot Uranus.....	13
Figura 9-2 Robot omnidireccional con ruedas orientables centradas; a) Disposición sobre una estructura mecánica, b) Robot Seekur	14
Figura 10-2 Sincronismo entre el sistema de tracción y dirección, con ruedas omnidireccionales.	14
Figura 11-2 Robot Uniciclo: a) Estructura, b) Robot Pioneer.....	15
Figura 12-2 Robot Triciclo: a) Estructura, b) Robot Neptuno y Romeo-3R.....	15
Figura 13-2 Sistema de dirección Ackerman.....	16
Figura 14-2 Sistema de tracción y dirección en ejes independientes.	17
Figura 15-2 Sistema de tracción y dirección sobre un mismo eje.	17
Figura 16-2 Sistema de tracción y dirección sobre todos los ejes.	18
Figura 17-2 Tipos de entorno en los que opera un robot móvil.....	21
Figura 18-2 a) Robots de interior (amigobot) y b) exterior (seekur) de activemedia....	22
Figura 19-2 Gráfica del funcionamiento del PWM según el ancho de pulso	22
Figura 20-2 Energía entregada a la carga (motor dc)	23
Figura 21-2 Posibles configuraciones de ruedas convencionales. (a) Dos ruedas de tipo automóvil y una rueda convencional, (b) dos ruedas convencionales con dos puntos de apoyo, (c) tres ruedas convencionales.	24
Figura 22-2 Movimientos posibles de una configuración de dos ruedas de tipo automóvil y una Convencional. (a) Movimientos frontales y de giro, (b) Rotación sobre un punto.	24
Figura 23-2 Movimientos posibles en una configuración de dos ruedas convencionales y dos puntos de apoyo. (a) Desplazamientos frontales, (b) Desplazamientos laterales...	25
Figura 24-2 Rueda Convencional de tipo Forward Offset Steered.....	25

Figura 25-2	Trayectoria de un robot con dos ruedas Forward Offset Steered.....	26
Figura 26-2	Diseño de la estructura de un robot omnidireccional de tres ruedas.....	26
Figura 27-2	Modelo geométrico planteado.....	28
Figura 1-3	Rueda convencional motriz.....	35
Figura 2-3	Rueda omnidireccional	36
Figura 3-3	Modelos desarrollados en Solidworks. a) motor de las ruedas posteriores. b) motor de la rueda omnidireccional	38
Figura 4-3	Base desarrollada en SOLIDWORK para el sistema robotizado.....	38
Figura 5-3	Configuración TORII desarrollo en SOLIDWORK.....	39
Figura 6-3	Sujeciones y fuerzas en el análisis de la base diseñada.	40
Figura 7-3	Malla solida generada sobre el diseño de la base	41
Figura 8-3	Presión que sufre la base al ser aplicada la fuerza sobre ella.....	42
Figura 9-3	Análisis del Sistema.....	43
Figura 10-3	Diseño prototipo móvil para exploración de interiores usando una configuración tipo bicicleta.	45
Figura 11-3	Código: Función Robot_Dimensión.	46
Figura 12-3	Código: Robot_Plot_3D.....	47
Figura 13-3	Código para generación de la TRAYECTORIA	48
Figura 14-3	Diagrama de Flujo del Programa desarrollado en MATLAB.....	48
Figura 15-3	CI L293	49
Figura 16-3	Configuración L293D	49
Figura 1-4	Prueba 1: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 1.5.....	52
Figura 2-4	Resumen estadístico descriptivo de la prueba 1.....	52
Figura 3-4	Prueba 2: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 3.....	53
Figura 4-4	Resumen estadístico descriptivo prueba 2.....	53
Figura 5-4	Prueba 3: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 5.....	54
Figura 6-4	Resumen estadístico descriptivo prueba 3.....	54
Figura 7-4	Prueba 4: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 0.....	55
Figura 8-4	Resumen estadístico descriptivo prueba 4.....	55
Figura 9-4	Prueba 5: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 1.5.....	56
Figura 10 4	Resumen estadístico descriptivo prueba 5.....	56
Figura 11 4	Prueba 6: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 3.....	57
Figura 12-4	Resumen estadístico descriptivo prueba 6.....	57
Figura 13-4	Prueba 7: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 5.....	58

Figura 14 4 Resumen estadístico descriptivo prueba 7.....	58
Figura 15 4 Prueba 8: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 0.....	59
Figura 16-4 Resumen estadístico descriptivo prueba 8.....	59
Figura 17-4 Prueba 9: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 1.5.....	60
Figura 18 4 Resumen estadístico descriptivo prueba 9.....	60
Figura 19-4 Prueba 10: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 3.....	61
Figura 20-4 Resumen estadístico descriptivo Prueba 10.....	61
Figura 21-4 Prueba 11: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 5.....	62
Figura 22-4 Resumen estadístico descriptivo prueba 11.....	62
Figura 23-4 Prueba 12: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 0.....	63
Figura 24-4 Resumen estadístico descriptivo prueba 12.....	63
Figura 25-4 Prueba 13: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 1.5.....	64
Figura 26 4 Resumen estadístico descriptivo prueba 13.....	64
Figura 27-4 Prueba 14: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 3.....	65
Figura 28 4 Resumen estadístico descriptivo prueba 14.....	65
Figura 29 4 Prueba 15: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 5.....	66
Figura 30 4 Resumen estadístico descriptivo prueba 15.....	66
Figura 31-4 Trayectoria tipo línea recta.....	67
Figura 32-4 Simulación de Matlab de la trayectoria tipo línea recta.....	68
Figura 33-4 Trayectoria tipo circunferencia.....	68
Figura 34-4 Simulación de Matlab de la trayectoria tipo circunferencia.....	69
Figura 35-4 Trayectoria Elipse tipo Helicoidal	70
Figura 36-4 Simulación de Matlab de la trayectoria Elipse tipo Helicoidal	70

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1-3 Velocidad Lineal del Robot.....	43
Ecuación 2-3 Velocidad Angular de Robot.	44

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A. PROGRAMA EN MATLAB PARA EL ANALISIS DE PRUEBAS REALIZADAS

ANEXO B. SIMULACION EN MATLAB: FUNCIÓN ROBOT_DIMENSION

ANEXO C. SIMULACION EN MATLAB: FUNCIÓN ROBOT_PLOT_3D

ANEXO D. SIMULACION DE TRAYECTORIA DEL ROBOT EN MATLAB

ANEXO E. PLANO EN SOLID WORK

ANEXO F. CUADRO DE COSTOS

RESUMEN

El objetivo fue diseñar y validar un nuevo prototipo de plataforma móvil, junto a su modelo matemático para la realización de tareas de exploración FULL COVERAGE, cuyo principal aporte es la nueva configuración del posicionamiento de llantas sobre la plataforma móvil. La primera fase consistió en Diseñar los planos de la plataforma en Solidworks, el siguiente paso fue hallar el modelo matemático que gobierne el desplazamiento de la plataforma diseñada; en función de la geometría del móvil, la tercera fase consistió en el desarrollo de pruebas con la plataforma diseñada y la última fase consistió en desarrollar un programa mediante el Software Matlab, que permita aplicar el modelo matemático hallado para simular el desplazamiento de la plataforma, de acuerdo a diferentes voltajes aplicados a las ruedas. Se realizaron 15 tipos de pruebas, con diferentes valores de voltaje, las mismas que permitieron validar el funcionamiento de la plataforma. El programa desarrollado en Matlab permitió la aplicación del modelo matemático hallado, mostrando mediante simulación un comportamiento análogo al comportamiento real que tiene la plataforma. Es recomendable implementar un sistema de control de Velocidad en tiempo real, para las ruedas, con el fin de mejorar el comportamiento de la plataforma.

Palabras Clave: <TECHNOLOGY AND SCIENCE OF ENGINEERING>, <AUTOMATIC CONTROL>, <ROBOTICS>, <MOBILE PLATFORMS>, <TYPES OF WHEELS>, <MATHEMATICAL MODEL>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <SOLIDWORKS (SOFTWARE)>

SUMMARY

The objective was to design and validate a new prototype of mobile platform, along with its mathematical model to perform exploration tasks FULL COVERAGE, whose main contribution is the new configuration of the positioning of tires on the mobile platform. The first phase consisted in designing the planes of the platform in Solidworks. The next step was to find the mathematical model that governs the displacement of the designed platform; Based on the mobile geometry, the third phase consisted in the development of tests with the designed platform and the last phase was to develop a program using the Matlab Software, which allows to apply the mathematical model found to simulate the displacement of the platform, according to different voltages applied to the wheels. Fifteen types of tests were carried out, with different values of voltage, the same ones that allowed to validate the operation of the platform. The program developed in Matlab allowed the application of the mathematical model found, showing by simulation a behavior analogous to the actual behavior of the platform. It is advisable to implement a speed control system in real time, for the wheels, in order to improve the performance of the platform.

Key Words: <TECHNOLOGY AND SCIENCE OF ENGINEERING>, <AUTOMATIC CONTROL>, <ROBOTICS>, <MOBILE PLATFORMS>, <TYPES OF WHEELS>, <MATHEMATICAL MODEL>, <MATLAB (SOFTWARE)>, <SOLIDWORKS (SOFTWARE)>.

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Situación Problemática

Una de las tareas que se realizan en la navegación con robots móviles es la Planificación de trayectorias. Existen numerosos métodos de planificación de caminos para robots móviles que se basan en hipótesis simplificadoras como: entorno conocido y estático, robots omnidireccionales, con movimiento lento y ejecución perfecta de trayectoria. La posibilidad de ejecutar desplazamientos omnidireccionales por parte de un robot, se debe principalmente a los tipos de ruedas utilizadas y su configuración siendo considerable su estudio en los últimos años (Doroftei, Grosu, & Spinu, 2007).

Estos trabajos previos pueden dividirse principalmente en dos grandes áreas. Una de estas áreas es el desarrollo de ruedas especiales como las ruedas de tipo Universal, Mecanum y Esfera, cuyo objetivo se basa en la idea de poseer una componente activa que provee tracción en una dirección y una componente pasiva en otra dirección, mientras que la segunda área de desarrollo trata las estructuras de los distintos robots omnidireccionales. En esta área se debe tener especial cuidado en el equilibrio del robot, el terreno sobre el cual circulará y la carga que se deberá soportar, que son las condiciones que definen qué características tendrá el robot en cuanto a cantidad y tipo de ruedas, material componente, y disposición de las mismas (Song & Byun, 2006).

“La construcción de mapas del terreno no es una tarea sencilla, ya que para generar mapas fiables es necesaria una buena estimación de la posición desde la cual se están capturando estos datos; y para tener una buena estimación es importante, a su vez, contar con un mapa que ofrezca total fiabilidad. Este problema es bien conocido en el mundo de la robótica móvil y la forma de resolverlo constituye prácticamente una

disciplina dentro de esta, donde es conocido como SLAM (Simultaneous Localization and Mapping). A pesar de los importantes resultados obtenidos con la aplicación de las técnicas del SLAM-6D, aún persisten problemas como los derivados de la ubicación óptima de los sensores para la reconstrucción tridimensional de un entorno” (Pulido, 2012).

Para realizar un reconocimiento de trayectorias son necesarios dos sistemas, el primero el sistema de locomoción y el segundo el sistema de adquisición de imágenes. El sistema de locomoción dependerá estrictamente de la configuración de las llantas de la plataforma móvil destinada para este proceso, debido a las limitaciones que tiene cada configuración, mientras que, para realizar la adquisición de imágenes en exploración y reconocimiento de lugares, generalmente se usa una cámara fija y se trabaja con las trayectorias necesarias para recorrer todo el lugar que se desee; empleando algoritmos de exploración y otros. Otra solución para obtener un detalle completo del lugar en el cual se está trabajando sería usar una cámara que tenga una visión de 360 grados de manera que a medida que la plataforma móvil se desplace por el área, el sistema de adquisición capte simultáneamente las imágenes del lugar y se logre una reconstrucción fiable.

Una de las configuraciones más eficientes para el reconocimiento de lugares es la de Modo Diferencial, en la cual la plataforma necesita al menos de dos señales de control para los motores de las ruedas y una señal adicional para girar la cámara. Su funcionamiento se puede describir de la siguiente manera: en cada paso que avance la plataforma de debe hacer girar la cámara en 360 grados para obtener la información requerida y repetir dicho proceso las veces que sean necesarias; dando un total de 360 cilindros de imágenes, con las cuales se debería trabajar para obtener la reconstrucción deseada.

Las trayectorias que se generen con un robot móvil dependen estrictamente del tipo de configuración que tenga dicha plataforma, debido a sus limitaciones geométricas, por ejemplo, la plataforma diferencial no puede ir en una línea recta ideal infinito debido a la mecánica de sus actuadores. Con la configuración Ackerman la plataforma puede ir en línea recta, pero tiene la desventaja de no poder girar sobre su propio eje. Mientras que para lograr una trayectoria en forma de rizo con una plataforma móvil usando

alguna de estas dos configuraciones, se necesita una función sinusoidal con distintas frecuencias para cada uno de los actuadores del sistema diferencial (Guitierrez & Silva, 2013).

1.2 Formulación del Problema

¿Es posible diseñar y validar un nuevo prototipo de plataforma móvil junto a su modelo matemático para la realización de tareas de exploración full coverage, que permita explorar interiores?

1.3 Preguntas Directrices

¿Cuáles son las configuraciones de Plataformas móviles principales en la actualidad?

¿Se puede realizar una plataforma móvil con una rueda omnidireccional junto a una rueda normal fija, que brinde las ventajas de los dos tipos de llantas simultáneamente?

¿Se puede validar mediante software el modelo matemático de una plataforma con una configuración que no exista en la bibliografía actual?

¿Se puede realizar FULL COVERAGE de interiores estructurados?

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Diseñar y validar un nuevo prototipo de plataforma móvil, junto a su modelo matemático para la realización de tareas de exploración FULL COVERAGE.

1.4.2 *Específicos*

- Diseñar una nueva configuración de llantas para plataformas móviles.
- Diseñar un modelo matemático que describa el comportamiento de la nueva plataforma móvil.
- Simular la trayectoria realizada mediante Software.
- Realizar una exploración FULL COVERAGE en un medio interior, con la nueva plataforma.

1.5 **Justificación**

Diversos estudios y trabajos en robótica móvil destacan características y propiedades respecto a la eficiencia energética, dimensiones, cargas útiles y maniobrabilidad. De los sistemas motrices más comunes en robots móviles, así tenemos:

- Ackerman, cuya configuración de cuatro ruedas convencionales, brinda dos grados de libertad, no permitiendo desplazamientos laterales por lo que las trayectorias posibles a realizar por éstos se encuentran acotadas.
- Triciclo, la maniobrabilidad es mayor que en la configuración anterior, pero puede presentar problemas de estabilidad en terrenos difíciles.
- Diferencial, el direccionamiento y tracción viene dado por la diferencia de velocidades en sus ruedas, la complejidad radica en los desplazamientos en línea recta ya que en la práctica no es posible que las ruedas tengan la misma velocidad debido a factores como la fricción del suelo (Baturone, 2001).

Y otras configuraciones con distintos tipos de ruedas convencionales. De igual forma se ha utilizado ruedas especiales dispuestas en alineaciones determinadas, para lograr realizar desplazamientos omnidireccionales.

Para un robot móvil la habilidad de navegar es una de las más importantes. La navegación se puede definir como la combinación de tres habilidades fundamentales:

- La importación o construcción de mapas 3D (p. ej. SLAM), que es el proceso de realizar mapas a partir de las lecturas de los sensores en diferentes posiciones,
- La localización, que es el proceso de conocer la posición actual del robot a partir de las lecturas de los sensores y el mapa actual,
- La generación de trayectorias, que es el proceso de obtener una trayectoria factible y segura desde una determinada posición a otra objetivo a partir del mapa actual (Canudas de Wit, Siciliano, & Bastín, 1996).

Así entonces, el principal problema a resolver en un robot móvil es generar trayectorias y guiar su movimiento según éstas, en base a la información proveniente del sistema de sensores externos (ultrasonidos, láser, visión), permitiendo al vehículo desplazarse entre dos puntos cualesquiera del ambiente de trabajo de manera segura, sin colisiones (Secchi, 2008).

En síntesis, las técnicas de obtención de imágenes para reconstrucción de entornos, representan un alto costo tanto computacional como económico. Por tal motivo en el presente proyecto se propone construir un prototipo de configuración similar a la de una bicicleta, estableciendo una configuración eficiente para el robot móvil, permitiéndole desempeñar tareas como la obtención de imágenes para la reconstrucción de entornos en interiores. Al mismo tiempo se formula el modelo matemático de este prototipo que servirá de base para planear estrategias de control.

El aporte de este trabajo radica en el hecho de que el robot móvil propuesto realizará trayectorias complejas como la de rizo, con solo establecer distintos niveles de voltaje en los actuadores, además se utiliza el mínimo número de ruedas y por ende de

actuadores lo cual simplifica costos económicos y computacionales (técnicas de control). Así mismo la plataforma servirá de apoyo en la navegación de robots, específicamente en la reconstrucción de entornos, en este punto conviene mencionar que con la ubicación adecuada de una sola cámara sobre la estructura móvil planteada se conseguirá cubrir toda el área de exploración, con lo cual el robot logrará una capacidad de percepción eficiente, para posteriormente generar algoritmos de navegación que son críticos para las aplicaciones de robots móviles, tales como la cobertura máxima del espacio en robots de limpieza en el hogar, entrega de artículos en robots logísticos de almacenes y hospitales, por nombrar dos de las más comunes («Simulación de robot con Simulink», 2014)

Por lo tanto esta investigación provee las pautas necesarias para proseguir en el avance del conocimiento científico y tecnológico de la robótica móvil. Específicamente en el proceso de reconstrucción de entornos, para la navegación y exploración de robots en interiores. Conforme a lo estipulado en el Plan Nacional del Buen Vivir del Ecuador. Concretamente lo definido dentro del objetivo 10, literal a) del lineamiento 10.2, que expresa: “Articular la investigación científica, tecnológica y la educación superior con el sector productivo, para una mejora constante de la productividad y competitividad sistémica, en el marco de las necesidades actuales y futuras del sector productivo y el desarrollo de nuevos conocimientos” («Plan Nacional del Buen vivir», 2013).

1.6 Hipótesis

El diseño de la plataforma con una nueva configuración de llantas realiza tareas de reconocimiento de trayectoria FULL COVERAGE.

CAPITULO II

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1 Antecedentes

Las primeras apariciones de los autómatas se dieron en el mundo griego, pasando por los autómatas de los artesanos franceses y suizos del siglo XVIII que acoplaban dispositivos mecánicos que ayudaban al control de movimientos automáticamente, hasta llegar a la actualidad en dónde el desarrollo de los mismos está íntimamente ligado con el desarrollo tecnológico. Los robots móviles, por su parte, tienen como precedentes dispositivos electromecánicos, tales como los "micro-mouse", creados en los años treinta para desarrollar funciones inteligentes como descubrir caminos en laberintos, mientras que los vehículos autónomos que comenzaron a aplicarse en la industria, eran; guiados por cables bajo el suelo o mediante sensores ópticos para seguir líneas trazadas en la planta. La mayor parte de las experiencias desarrolladas en los años 70 se lograron bajo la utilización de plataformas que soportan sistemas de visión y para los años 80 ya se desarrollaron robots móviles, tanto para interiores como para navegación exterior (Baturone, 2001)

El desarrollo de los robots móviles responde a la necesidad de extender el campo de aplicación de la robótica. De igual forma incrementar la autonomía limitando todo lo posible la intervención humana. El grado de autonomía de los robots móviles depende en gran medida de la facultad del robot para abstraer el entorno y convertir la información obtenida en órdenes, de tal modo que, aplicadas sobre los actuadores del sistema de locomoción, garantice la realización eficaz de su tarea. Es decir el robot

tenga suficiente inteligencia como para reaccionar y tomar decisiones basándose en observaciones de su entorno (Secchi, 2008).

Dicha inteligencia se basa en un sistema de navegación automática. En estos sistemas se incluyen tareas de planificación, percepción y control. El problema de la planificación, en el caso más general puede descomponerse en planificación global de la misión, de la trayectoria y evitar obstáculos. Los métodos de planificación buscan caminos libres de obstáculos que minimizan la distancia recorrida en un entorno modelado mediante polígonos. En otros casos, se modela el espacio libre tratando de encontrar caminos por el centro del mismo. Para facilitar la búsqueda existen técnicas de descomposición del espacio de celdas (Baturone, 2001).

La capacidad de percepción del robot móvil se traduce en la síntesis de toda la información provista por los sensores, con el objeto de generar mapas globales y locales del entorno de acuerdo a los diversos niveles de control. El control se encarga de mantener el vehículo en la trayectoria planificada. Para este fin se han propuesto estrategias de control (deliberativo y reactivo). Que pretenden lograr un algoritmo que identifique rápidamente los obstáculos para que el robot móvil se desplace de un punto a otro en el mínimo tiempo posible.

2.1.1 Tipos de sistemas de locomoción

El sistema de locomoción está condicionado por su entorno, de acuerdo a las características del mismo, el robot puede ser:

- Terrestre: Por ruedas (Muir & Neuman, 1986), por patas (Todd, 1985) y orugas (Granosik & Borenstein, 2005).
- Acuático: Flotante, submarino.
- Aéreo (UAV).

2.1.2 Morfología de los robots móviles.

Es la tarea misma la que determina en una primera etapa las particularidades estructurales del robot que van desde el tipo de rueda, el sistema de tracción y dirección, así como la forma física del robot. En una segunda etapa es la tarea la que determinará las características sensoriales del robot.

En general los robots móviles distribuyen sus sistemas de tracción y dirección sobre los ejes de sus ruedas de acuerdo a las exigencias de velocidad, maniobrabilidad y características del terreno. La precisión y rapidez con que el robot móvil debe alcanzar su destino, implica tener un sistema de tracción confiable y un sistema de dirección que dé maniobrabilidad al robot. Esta confiabilidad y maniobrabilidad que debe tener el robot móvil, determinan las características del sistema de tracción y dirección, no sólo en lo que respecta a la técnica, sino también al número de ruedas necesarias, así como al tipo y disposición de éstas para lograr una estructura mecánica estable (Campion, Bastin, & D'Andrea-Novel, 1993).

2.1.2.1 Tipos de Ruedas

Dependiendo de la configuración cinemática que lo conforme, los RMR utilizan cuatro tipos de ruedas para su locomoción estas son: convencionales, tipo castor, ruedas de bolas y omnidireccionales, se pueden observar en la figura 1-2. En el marco de las configuraciones cinemáticas posibles y las ruedas que estas utilizan, los RMR documentados en la literatura utilizan comúnmente la configuración de tracción diferencial, donde se utilizan ruedas convencionales (figura 1-2a), o ruedas motrices y una o dos ruedas tipo castor, de bola, (figuras 1-2b, 1-2c), respectivamente, para proveer de estabilidad al móvil” (Silva Ortigoza et al., 2010).

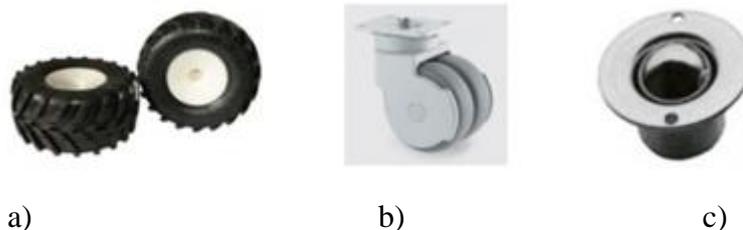


Figura 1-2 Tipos de ruedas; a) Convencionales; b) Castos; c) De bolas

Fuente: (Silva Ortigoza et al., 2010)

De acuerdo al tipo de fijación de las ruedas a la plataforma existen algunos tipos de ruedas, entre las principales se encuentran:

- *Rueda Fija*

No posee articulación de dirección, por lo que su posición respecto a la estructura es siempre fija, figura 2-2.

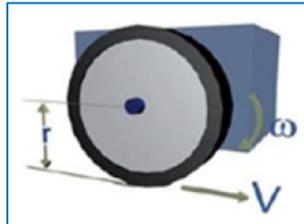


Figura 2-1 Rueda fija con parámetros

Fuente: (Suárez & Sánchez, 2015) (Wit & Siliciano, 1997)

- *Rueda orientable centrada*

Tiene articulación de dirección, es decir es orientable respecto a la estructura del vehículo, pasando su eje de dirección por el centro de rotación de la rueda, figura 3-2.

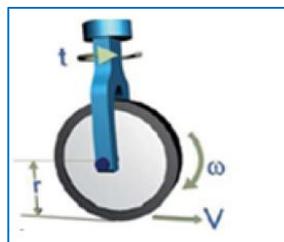


Figura 3-2 Rueda orientable centrada

Fuente: (Suárez & Sánchez, 2015) (Wit & Siliciano, 1997)

- *Rueda orientable descentrada*

Posee articulación de dirección, es decir es orientable respecto a la estructura del vehículo, no pasando su eje de dirección por el centro de rotación de la rueda, figura 4-2.

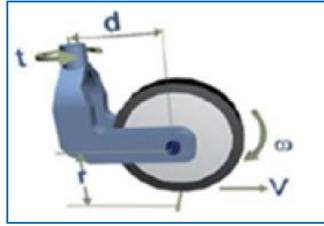


Figura 4-2 Rueda orientable descentrada

Fuente: (Suárez & Sánchez, 2015) (Wit & Siliciano, 1997)

- *Rueda fija con rodillos (Sueca, Universal, Mecanum)*

Es fija respecto a la estructura del vehículo y posee rodillos entre la rueda y el suelo con una determinada orientación fija respecto a la rueda (Gracia, 2015), figura 5-2.

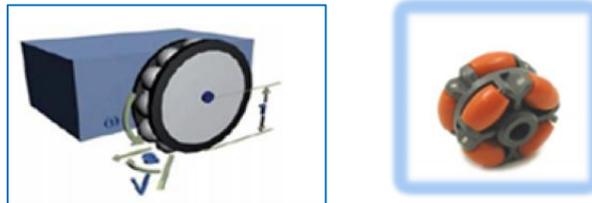


Figura 5-2 Rueda omnidireccional

Fuente: (Suárez & Sánchez, 2015) (Wit & Siliciano, 1997)

Los parámetros para este tipo de rueda se observan en la figura 6-2:

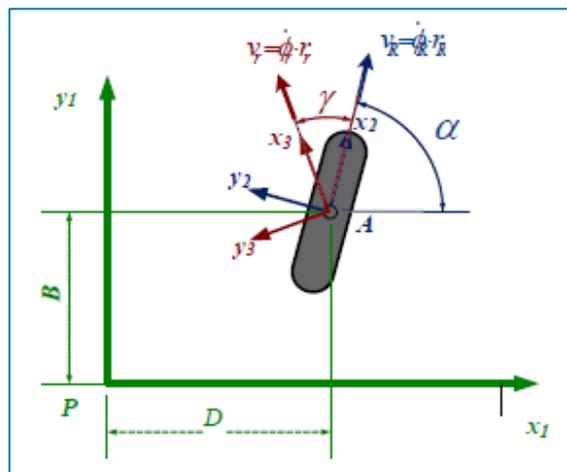


Figura 6-2 Parámetros para una rueda sueca

Fuente: (Suárez & Sánchez, 2015) (Wit & Siliciano, 1997)

Descripción

- D la coordenada de la posición de la rueda respecto a x_1 .
- B la coordenada de la posición de la rueda respecto a y_1 .
- α ángulo que forma la rueda respecto al sistema de referencia (x_1-y_1) .
- γ ángulo del vector velocidad de cada rodillo de las ruedas respecto al sistema (x_2-y_2) .
- v_R velocidad lineal de la rueda.
- v_r velocidad lineal del rodillo de la rueda.
- ϕ_r velocidad angular del rodillo.
- ϕ_R velocidad angular de la rueda sueca.
- r_r radio del rodillo.
- r_R radio de la rueda sueca.

2.1.2.2 *Tipos de Configuración de Robots Móviles.*

De acuerdo a la disposición física de las ruedas en la Plataforma se pueden distinguir algunas configuraciones, “Dentro de los atributos más relevantes de los Robots Móviles con Ruedas (RMR), destacan su eficiencia en cuanto a energía en superficies lisas y firmes, a la vez que no causan desgaste en la superficie donde se mueven y requieren un número menor de partes y menos complejas, en comparación con los robots de patas y de orugas, lo que permite que su construcción sea más sencilla” (Azcon, 2003).

Existen diferentes configuraciones cinemáticas para los RMR, estas dependen principalmente de la aplicación hacia dónde va enfocado. La combinación de los diversos tipos de ruedas, lleva a tener una gran variedad de robots móviles que se diferencian por su grado de maniobrabilidad, de manera general se tienen las siguientes configuraciones: Ackerman, triciclo clásico, tracción diferencial, skid steer, síncrona y tracción omnidireccional, figura 7-2.



Figura 7-2 Configuraciones de robots móviles de ruedas

Fuente: (Silva Ortigoza et al., 2010)

En función al número de ruedas que presenta la plataforma se tienen la siguiente clasificación:

- *Robot omnidireccional*

Estos robots tienen máxima maniobrabilidad en el plano; esto significa que ellos pueden moverse en cualquier dirección sin necesidad de reorientarse. En contraste, los otros tipos de robots tienen una maniobrabilidad restringida.

La Figura 8-2 muestra el robot omnidireccional Uranus desarrollado en la Universidad de Michigan y el conjunto de movimientos posibles que el mismo puede desarrollar. De acuerdo a la rotación de cada una de las ruedas el robot puede avanzar, girar o desplazarse lateralmente sin necesidad de reorientarse («Una introducción a los Robots móviles», 2008).

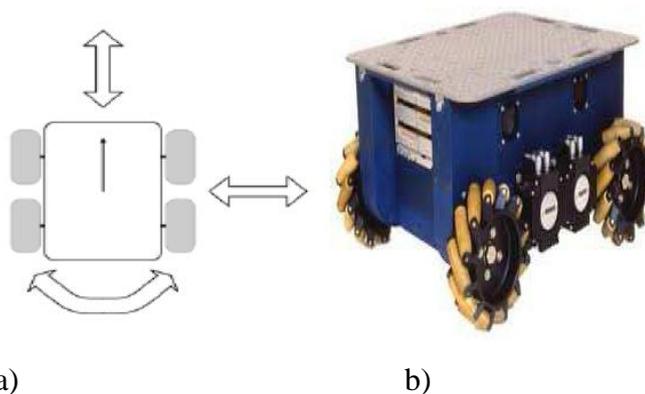


Figura 8-2 Robot Omnidireccional Uranus: a) Maniobrabilidad, b) Robot Uranus

Fuente: (Secchi, 2008)

En la Figura 9-2 se presenta otra versión de robot omnidireccional con ruedas orientables centradas. En este caso el robot puede cambiar la dirección de su movimiento simplemente cambiando la orientación de las ruedas.

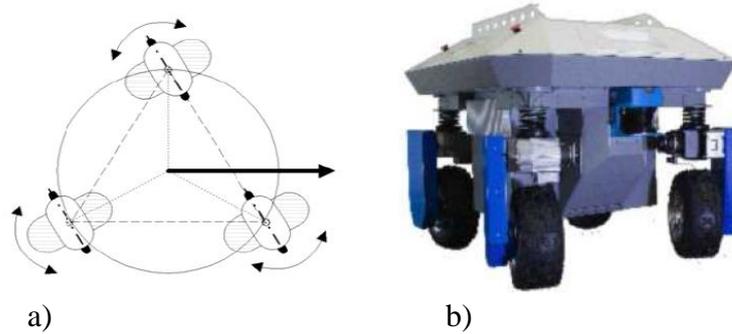


Figura 9-2 Robot omnidireccional con ruedas orientables centradas; a) Disposición sobre una estructura mecánica, b) Robot Seekur

Fuente: (Secchi, 2008)

Este movimiento sincronizado se puede lograr por medios mecánicos, figura 10-2 (a), empleando sistemas de tracción y dirección por correas o por medios electrónicos, figura 10-2 (b), mediante señales de accionamientos simultáneas a partir de la electrónica que comanda cada uno de los motores en las ruedas.

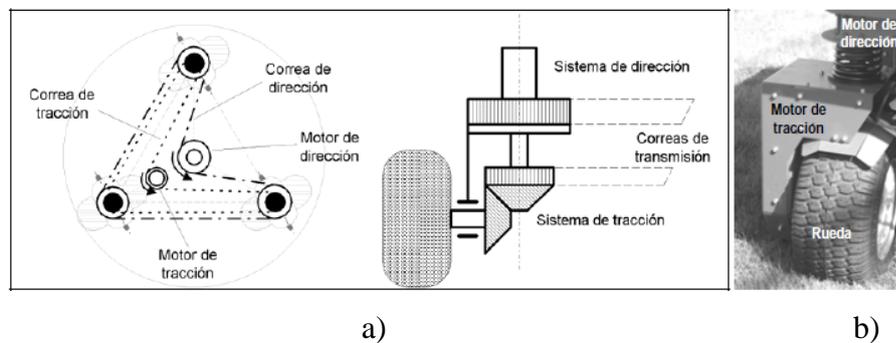


Figura 10-2 Sincronismo entre el sistema de tracción y dirección, con ruedas omnidireccionales, a) Por medios Mecánicos y b) por medios electrónicos.

Fuente: (Secchi, 2008)

Las ventajas de un robot omnidireccional se ven disminuidas por la complejidad mecánica y/o electrónica necesarias para conservar una buena coordinación entre las ruedas y evitar derivas en la pose del robot («Una introducción a los Robots móviles», 2008).

- *Robot Uniciclo*

Es una estructura que consta de dos ruedas fijas convencionales sobre el mismo eje, controladas de manera independiente y una rueda loca que le confiere estabilidad. El sistema de tracción-dirección asociado al robot le permite independizar las consignas de velocidad lineal y angular respectivamente, figura 11-2.

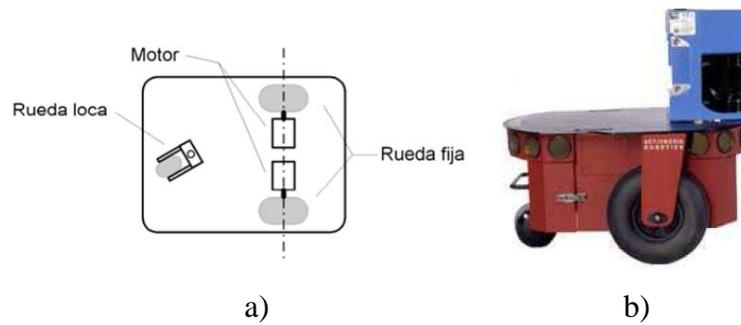


Figura 11-2 Robot Uniciclo: a) Estructura, b) Robot Pioneer

Fuente: (Secchi, 2008)

- *Robot Triciclo*

El robot tipo triciclo está formado por dos ruedas convencionales fijas sobre un mismo eje y una rueda convencional centrada orientable que concentra las funciones de tracción-dirección, figura 12-2.

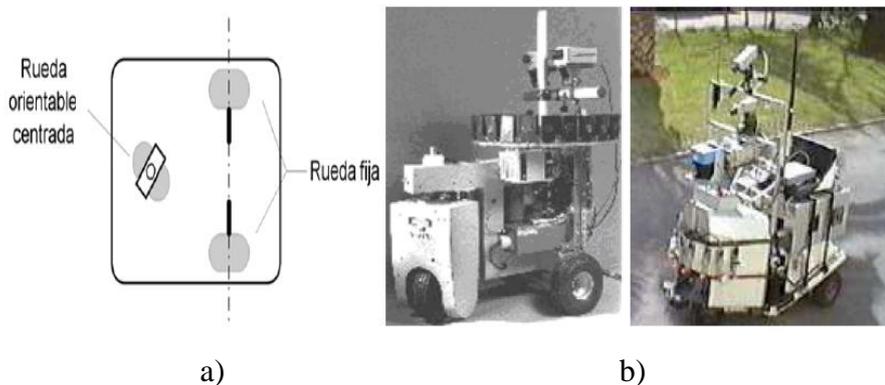


Figura 12-2 Robot Triciclo: a) Estructura, b) Robot Neptuno y Romeo-3R

Fuente: (Secchi, 2008)

- *Cuatriciclo*

Un problema asociado con la configuración tipo triciclo es que el centro de gravedad del vehículo se posiciona, en algunas ocasiones, en los límites de la superficie de equilibrio definida por las tres ruedas, cuando el vehículo está en movimiento. Esto produce una pérdida de tracción en el vehículo y es fuente de error a la hora de estimar la posición del robot. Una solución a este problema lo presenta el sistema de dirección Ackerman. Como se observa en la Figura 13-2 los ejes de las dos ruedas frontales se interceptan en un punto C que pertenece al eje común de las ruedas traseras. El lugar de los puntos en el plano trazados por cada rueda, alrededor de este punto C, es un conjunto de arcos concéntricos donde todos los vectores velocidad instantánea son tangente a estos arcos. Esta estructura, además de brindar mayor estabilidad, evita el deslizamiento en la ruedas y por lo tanto reduce los errores de odometría (Secchi, 2008).

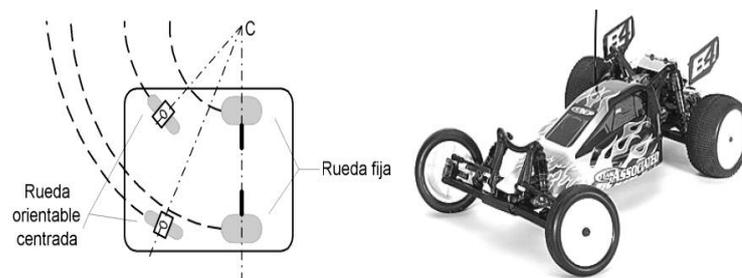


Figura 13-2 Sistema de dirección Ackerman

Fuente: (Secchi, 2008)

2.1.2.3 *Tracción y dirección de Robots Móviles con Ruedas*

El sistema de tracción y dirección no sólo está relacionado con la disposición de ruedas adoptada, sino que también lo está con los algoritmos de control local de los motores y la mecánica asociada a estos. A medida que se requiere, del robot, más confiabilidad (alta maniobrabilidad, máxima tracción en sus ruedas motorizadas, máxima adherencia de todas sus ruedas, etc.) la mecánica, electrónica e informática asociadas es más compleja (Secchi, 2008).

Existen tres sistemas básicos a partir de los cuales se pueden obtener diversas configuraciones:

- Tracción y dirección en ejes independientes (Adamowski, Simoes, & Gozman, 1990).
- Tracción y dirección en un mismo eje (Cox, 1991).
- Tracción y dirección sobre todos los ejes (Connell & Viola, 1990).

Tracción y dirección en ejes independientes

La tracción se efectúa en las ruedas traseras y el control de dirección en las ruedas delanteras o viceversa (Figura 14-2). Si bien el control de dirección es más sencillo, la precisión en la dirección depende de la adherencia de las ruedas correspondientes; esto se debe básicamente a la masa despreciable de estas ruedas respecto al resto de la estructura. Además, posee un radio de giro bastante elevado en relación a otros sistemas, por lo que en este tipo de modelos no se pueden lograr cambios de dirección muy cerrados.

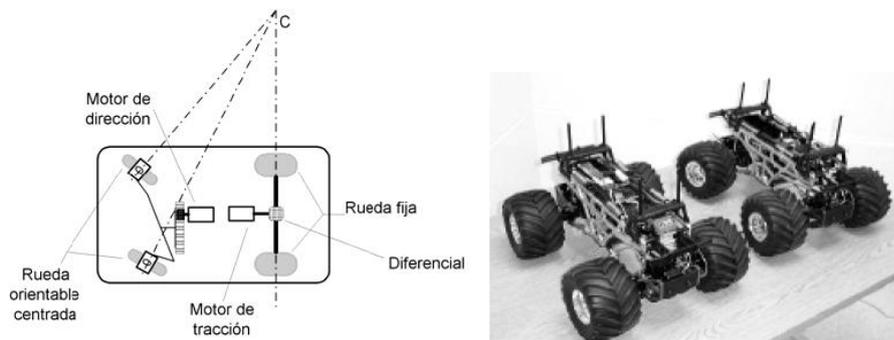


Figura 14-2 Sistema de tracción y dirección en ejes independientes.

Fuente: (Secchi, 2008)

Tracción y dirección en un mismo eje

Esto se logra con motores independientes en las ruedas de un mismo eje y ruedas "locas" en el resto de los ejes (Figura 15-2). Este modelo es de construcción sencilla y permite radios de giro del orden del tamaño del vehículo. La única desventaja que posee es que los motores deben ser de características idénticas, para que el control de estos sea simple.

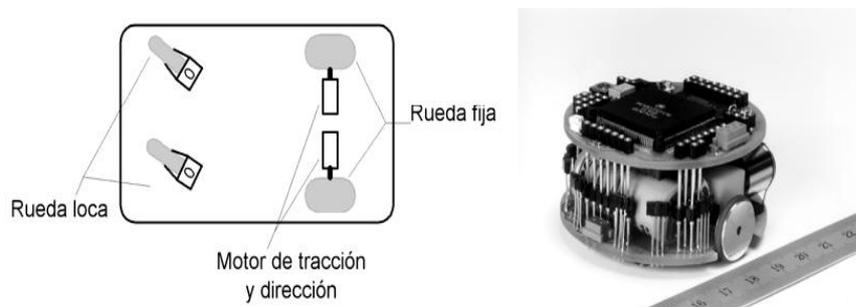


Figura 15-2 Sistema de tracción y dirección sobre un mismo eje.

Fuente: (Secchi, 2008)

Tracción y dirección sobre todos los ejes

En la Figura 16-2 se muestra la estructura y un modelo comercial de ActiveMedia. Su aplicación está destinada a terrenos hostiles, donde la velocidad de traslación es menos importante que una buena adherencia al terreno. Esta configuración necesita de un sistema odométrico complejo debido a la incertidumbre en los radios de giro asociada a este sistema de tracción y dirección, aunque existen entre los robots omnidireccionales estructuras que presentan menor complejidad para resolver los errores por odometría (Secchi, 2008).

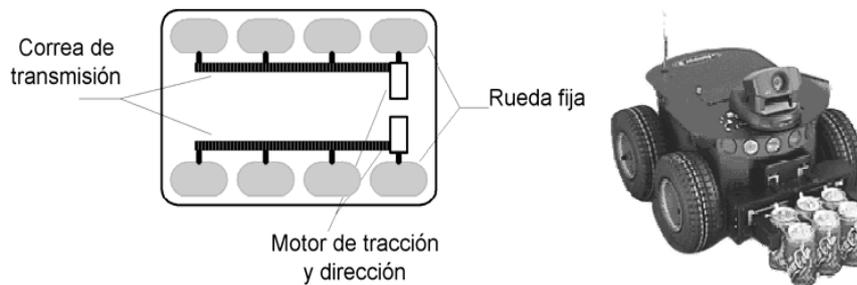


Figura 16-2 Sistema de tracción y dirección sobre todos los ejes.

Fuente: (Secchi, 2008)

2.1.2.4 *Visión en los Robots Móviles.*

A nivel de visión de robots móviles, el progreso hecho en las últimas dos décadas ha estado en dos frentes separados: La navegación basada en visión para robots de interiores y la navegación basada en visión para robots de exteriores. En ambas áreas los avances han sido significativos (DeSouza & Kak, 2002).

Navegación en interiores.

Algunos de los primeros sistemas de Visión desarrollados para la navegación de robots móviles dependían fuertemente de la geometría del espacio y otra información métrica para manejar los procesos de visión y desempeñar la tarea de auto-localización. Para representar espacios de entornos interiores, se utilizaba modelos CAD con cierto nivel de complejidad, pero en algunos casos, dichos modelos eran reemplazados por modelos más simples tales como los mapas de ocupación, los mapas topológicos e inclusive las secuencias de imágenes.

Los diferentes métodos para obtener imágenes con un amplio campo de visión, pueden ser clasificados en las siguientes categorías (Gracia, 2015).

- Utilización de imágenes múltiples.
- Utilización de objetivos especiales.
- Utilización de espejos convexos (cámaras catadióptricas).

Obtención de imágenes múltiples

Una imagen omnidireccional se puede obtener a partir de la composición de varias imágenes, bien sean obtenidas por medio de una sola cámara desplazada angularmente, o por varias cámaras dispuestas de tal forma que cada una cubre un campo de visión, cuyo ángulo en suma con los ángulos de las demás cámaras, componen una imagen del espacio total circundante.

Utilizando una sola cámara, que obtiene imágenes rotando a velocidad constante alrededor de un eje vertical, se debe recomponer la imagen panorámica a partir del total de las imágenes capturadas, teniendo en cuenta que el algoritmo de recomposición debe evitar la pérdida de información. La desventaja de estos sistemas, consiste en que el tiempo requerido para la adquisición de una imagen panorámica es muy grande.

Cuando se utilizan varias cámaras para obtener una imagen panorámica, el tiempo de captura de las imágenes es menor que en el caso de una sola cámara en rotación. El resultado es una imagen panorámica de muy buena resolución, sin embargo, puede presentarse el caso de perder partes de la imagen en ángulos muertos o, como caso contrario a ello, duplicar información. La calibración del sistema y la sincronización de las imágenes obtenidas, así como un alto costo computacional es otra desventaja.

Utilización de objetivos especiales

Este método consiste en la utilización de dispositivos ópticos ensamblados sobre una cámara CCD, con el fin de desviar los rayos luminosos, tal como sucede en una cámara ojo de pez. Las imágenes adquiridas, tienen un alto grado de deformación y su análisis

no es simple, debido a que no pueden ser transformadas a imágenes en perspectiva y porque no tienen un centro de proyección único.

Utilización de espejos convexos (cámaras catadióptricas).

Este tipo de sistemas están diseñados de tal manera que el eje óptico de la cámara se alinea con el eje de revolución de un espejo convexo, permitiendo a la cámara adquirir la imagen de la totalidad de su entorno a partir de la imagen proyectada sobre la superficie del espejo. El resultado es una imagen omnidireccional. Para que la imagen panorámica (omnidireccional desenvuelta), represente el entorno con un mínimo de distorsiones ópticas admisibles, se debe elegir adecuadamente la curva del espejo, la resolución de la cámara y diseñar un algoritmo eficiente de desenvolvimiento.

Navegación con cámaras omnidireccionales

El uso de una cámara panorámica en oposición a un sistema multi-cámara o a un mecanismo que reoriente la mirada de una cámara de perspectiva típica, simplifica el procesamiento de la información sensorial y reduce la complejidad del hardware requerido. En actuales implementaciones de sistemas de navegación para robots móviles, se están utilizando cámaras panorámicas. Sin embargo, la baja resolución en el sentido de baja agudeza visual, parece que es el precio a pagar por obtener una visión 360° (Arias, 2009).

2.1.3 Reconocimiento de trayectorias

“La exploración puede definirse como el proceso mediante el cual un robot móvil recorre el entorno detectando lugares de referencia y transiciones entre ellos sin otro objetivo que construir de forma autónoma un modelo del entorno lo más completo posible. En ocasiones, el proceso de exploración no tiene lugar de forma independiente, construyéndose el modelo del entorno a medida que el robot va completando misiones. De esta forma, cada misión lleva consigo la búsqueda de un camino que una la salida con la meta y una exploración de la zona del entorno en la que tiene lugar.

El modelo del entorno así construido será incompleto, ya que incluirá solamente las zonas del entorno por las que se ha pasado durante la búsqueda del objetivo, sin tener en cuenta todas las alternativas desde cada lugar de referencia. Además, como el camino puede que no sea reversible, el modelo construido puede no ser útil cuando se invierten los papeles entre los lugares de salida y de llegada. Por ello, este tipo de exploración precisa de una fase de refinamiento del modelo, que permita ampliarlo con zonas que todavía no se han visitado y completar las ya conocidas.” (De Lope, Maravall, & Zato, 2013).

2.1.4 Tipos de entornos en los que opera un robot móvil

El tipo de entorno en el cual va a operar el robot móvil es la característica que fija mayores restricciones en el robot móvil, figura 17-2.

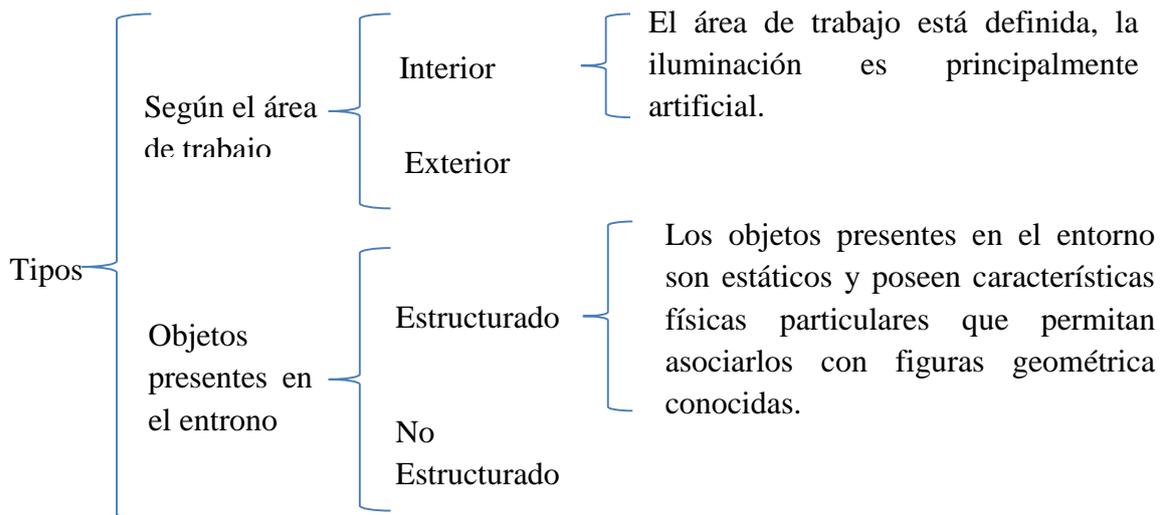


Figura 17-2 Tipos de entorno en los que opera un robot móvil

Fuente: (Suárez & Sánchez, 2015), (Baturone, 2001).

Los robots según el área de trabajo se muestran en la figura 18-2.

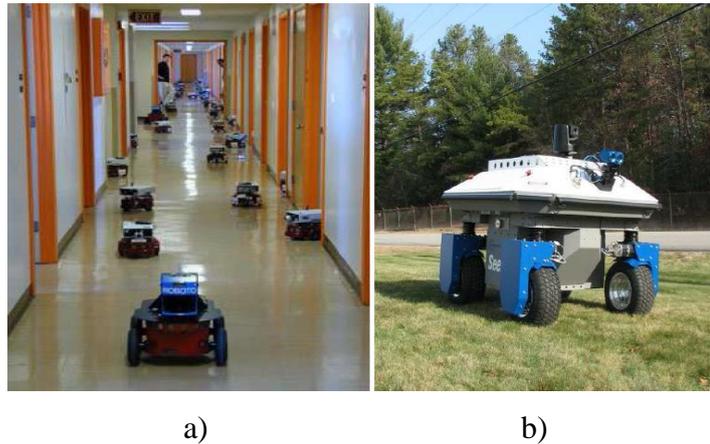


Figura 2-2 a) Robots de interior (amigobot) y b) exterior (seekur) de activemedía
Fuente: (Secchi, 2008)

2.1.5 Control de velocidad PWM

Uno de los problemas fundamentales de la robótica es el control de la velocidad del motor de corriente continua. El método más común de control de velocidad se conoce como PWM o modulación por ancho de pulso (Bolaños, 2011).

El PWM de una señal o fuente de energía, consiste en una técnica en la que se modifica el ciclo de trabajo de una señal periódica (una senoidal, o una cuadrada), ya sea para transmitir información a través de un canal de comunicaciones, o bien, para controlar la cantidad de energía que se envía a una carga (motor DC). La figura 3-2 muestra las formas de onda en el caso de 10%, 50% y 90% de la señal (Escrivá, 2013).

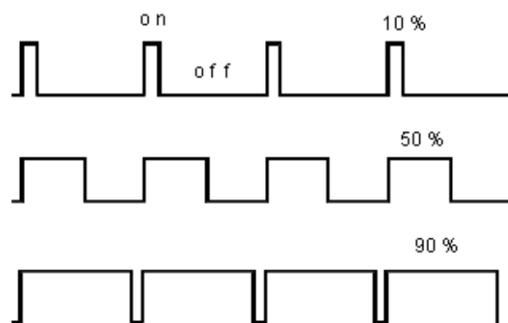


Figura 3-2 Gráfica del funcionamiento del PWM según ancho de pulso
Fuente: (Bolaños, 2011)

La figura 4-2 indica que representan los anchos de pulso en términos de la energía entregada al motor y su velocidad.

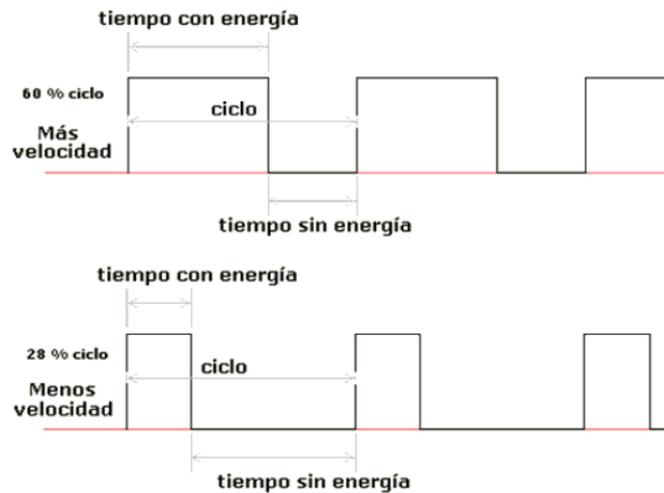


Figura 4-2 Energía entregada a la carga (motor dc)

Fuente: (Bolaños, 2011)

Estas señales se envían al motor a una determinada frecuencia. El resultado final del proceso de PWM es que la potencia total enviada al motor se puede ajustar desde x % ciclo de trabajo a casi 100% del ciclo de trabajo con un buen rendimiento y un control estable.

El circuito con un 555 es muy útil para generar las señales necesarias para PWM. De igual manera se puede utilizar un microcontrolador, para este objetivo.

2.1.6 Tipos de trayectoria que pueden realizar los robots móviles

El problema básico de la robótica móvil se podría resumir en cómo encontrar la mejor trayectoria, para desplazarse de un origen a un destino recorriendo la menor distancia o pasando por determinados puntos intermedios.

Para poder abordar el problema es necesario almacenar en todo momento información sobre el entorno del robot. En este sentido se han desarrollado diferentes configuraciones utilizando un tipo de rueda convencional u omnidireccional.

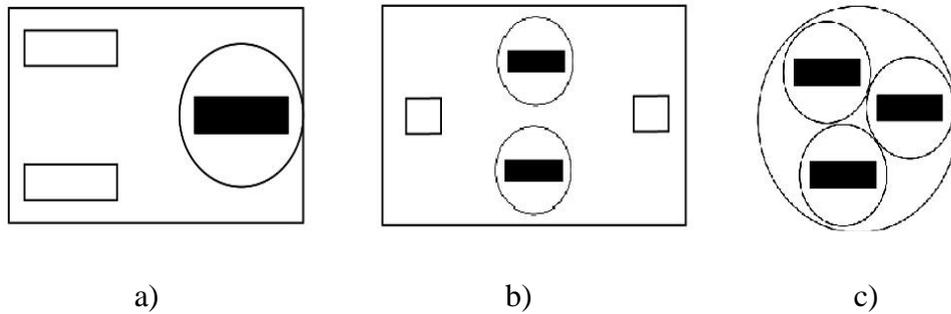


Figura 5-2 Posibles configuraciones de ruedas convencionales. (a) Dos ruedas de tipo automóvil y una rueda convencional, (b) dos ruedas convencionales con dos puntos de apoyo, (c) tres ruedas convencionales.

Fuente: (Braunl, 2006)

La primera configuración figura 5-2 (a), es decir dos ruedas de tipo automóvil y una rueda convencional, permite una rotación sobre un punto pero no permite realizar desplazamientos laterales, figura 6-2, mientras que es posible para la segunda configuración, figura 5-2 (b), con dos ruedas convencionales y uno o dos puntos de contacto, tal como se ve en la figura 7-2. La tercera configuración, figura 5-2 (c), con tres ruedas convencionales, permiten realizar trayectorias omnidireccionales.

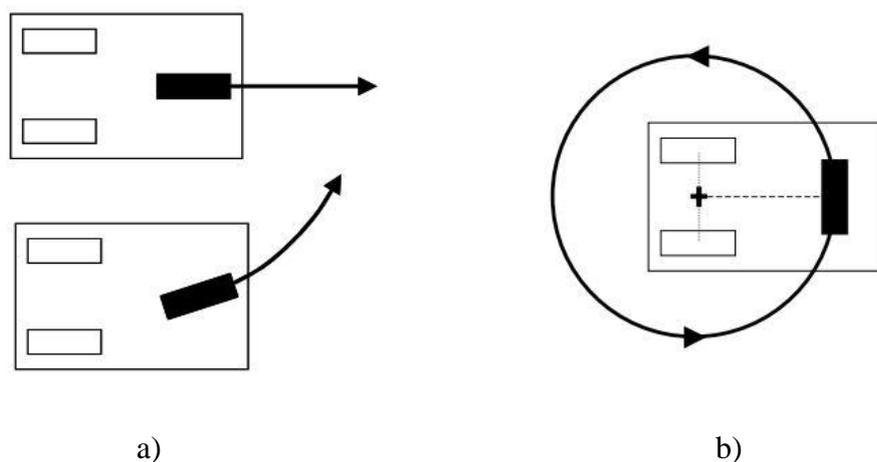


Figura 6-2 Movimientos posibles de una configuración de dos ruedas de tipo automóvil y una Convencional. (a) Movimientos frontales y de giro, (b) Rotación sobre un punto.

Fuente: (Braunl, 2006)

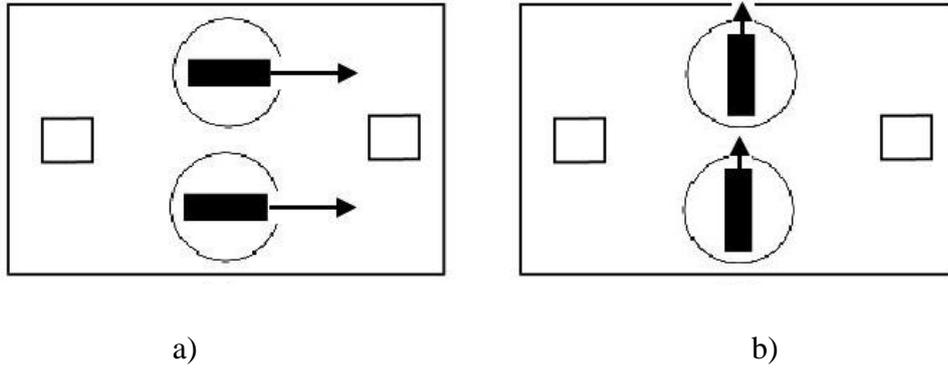


Figura 7-2 Movimientos posibles en una configuración de dos ruedas convencionales y dos puntos de apoyo. (a) Desplazamientos frontales, (b) Desplazamientos laterales.

Fuente: (Braunl, 2006)

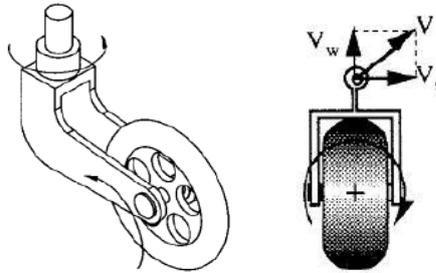


Figura 8-2 Rueda Convencional de tipo Forward Offset.

Fuente: (Braunl, 2006)

Por último, las ruedas convencionales de tipo Forward Offset Steered (figura 8-2) (también conocidas como Castor) permiten que el eje de rotación se mueva en cualquier dirección sin posicionar la rueda anteriormente. Esto se observa dado que la dirección de la velocidad del eje (V_s) y de la rueda (V_w) son perpendiculares. Así, la composición de las velocidades de cada rueda permite obtener un vector velocidad V con cualquier dirección. Por lo tanto, este tipo de ruedas brinda al robot la capacidad de realizar trayectorias omnidireccionales. En la figura 9-2 se observa un movimiento continuo para un robot con dos ruedas de este tipo, reafirmando la posibilidad de ejecutar trayectorias omnidireccionales (Wada & Morig, 1996).

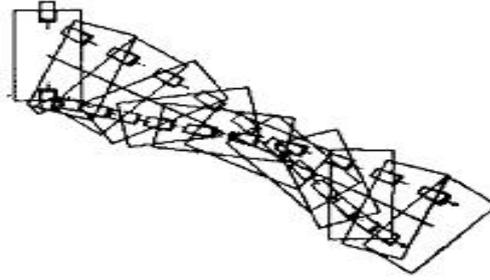


Figura 9-2 Trayectoria de un robot con dos ruedas
Forward Offset Steered

Fuente: (Wada & Mori, 1996)

Es posible ampliar el espectro de trayectorias mediante configuraciones con ruedas omnidireccionales, figura 10-2.

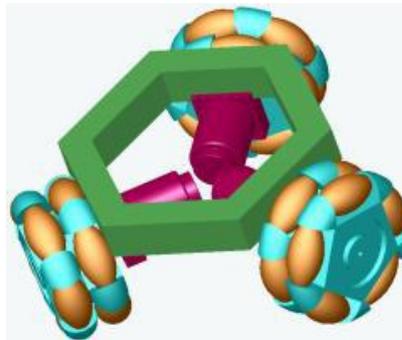


Figura 10-2 Diseño de la estructura de un robot omnidireccional
de tres ruedas

Fuente: (Wada & Mori, 1996)

Estas ruedas omnidireccionales, son las componentes que permiten que el robot se desplace en cualquier dirección sin tener primero que rotar. El uso de estas ruedas también permite realizar trayectorias complejas que estén compuestas por un desplazamiento y rotación del robot simultáneamente para así poder alcanzar el destino con un ángulo deseado (Rojas & Gloye, 2006).

2.1.7 Métodos para determinar el modelo cinemático

Tanto para robots móviles como para manipuladores, la obtención de modelos cinemáticos y dinámicos ha dedicado mucho estudio a lo largo del tiempo, dando como resultado una extensa bibliografía de la cual se puede hacer referencia. En el caso de robots móviles, este modelo proporciona una descripción matemática del movimiento

del vehículo sin considerar las fuerzas que afectan al mismo. Se utiliza, fundamentalmente, el álgebra vectorial y matricial para efectuar estas representaciones. Para obtener el modelo cinemático de los vehículos con ruedas. Se tiene el método geométrico y matricial.

2.1.7.1 *Método matricial.*

De la basta lista de referencias sobre el tema, en (Muir & Neuman, 1986) se plantea un método semejante al utilizado en robots manipuladores. Para lo cual se ha sistematizado su análisis partiendo por el convenio de Sheth-Uicker. Asignando los ejes de coordenadas y desarrollar una matriz de transformación algebraica de coordenadas.

Comenzando con el análisis de cada una de las ruedas, a las cuales se les relaciona matrices Jacobianas que relacionan sus movimientos individuales con el movimiento general del robot. A partir de estos pasos iniciales se podrá continuar con su modelado análogo al análisis de un robot manipulador común.

Desde el enfoque matricial, quizás, sea la metodología de modelado más destacada, donde se emplean matrices de transformación homogénea para relacionar sistemas de coordenadas, de forma análoga al caso tradicional de robots manipuladores. El resultado es una relación (matriz Jacobiana de rueda) entre el vector de velocidad del vehículo y las velocidades de rueda. Sin embargo, lo planteado tiene los siguientes inconvenientes (Muir & Neuman, 1986):

- Se consideran tres ecuaciones por rueda, cuando realmente sólo hay dos restricciones (bajo el supuesto de no deslizamiento) por rueda. Esto se debe a introducir una variable de velocidad de rueda sin sentido práctico, ya que no puede ser sensorizada ni actuada. Esto produce un coste computacional innecesario, además de una inconsistencia cinemática al calcular la evolución del vehículo con información redundante.

- La rotación de rueda se incluye considerando un ficticio par planar entre la rueda y la superficie. Este innecesario procedimiento contrasta con la sistemática empleada de matrices de transformación. En su lugar se deberían utilizar dos sistemas de coordenadas adicionales, como se propone en (Shin & Park, 2001).

- Se asume no deslizamiento innecesariamente pronto, por lo que se complica la identificación del mismo en etapas posteriores. (Rajagopalan, 1997) continua el método de matrices de transformación y lo extiende a un nuevo tipo de rueda, con la columna de dirección inclinada y desplazada.

Otros estudios cinemáticos relevantes son (Alexander & Maddocks, 1989) y en concreto, utiliza un planteamiento vectorial para modelar la rueda, sólo valido para ruedas fijas y orientables (centradas).

2.1.7.2 Método geométrico

Las ecuaciones del movimiento se basan puramente en las relaciones geométricas que gobiernan el sistema. Considerando el modelo de la figura 11-2. Se tiene:

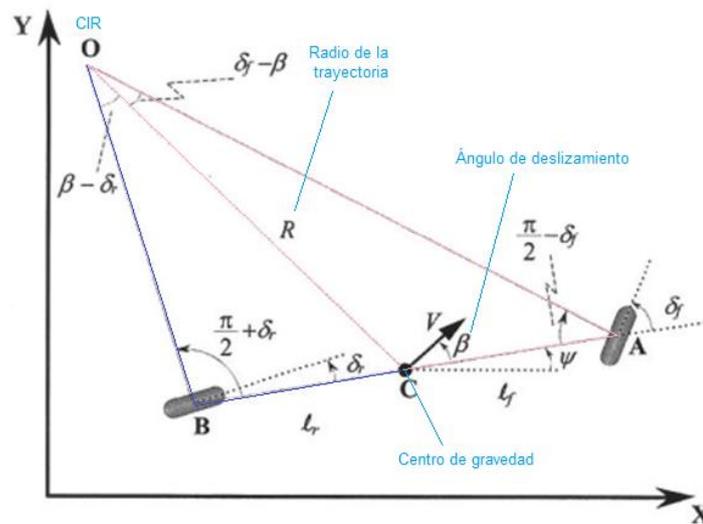


Figura 11-2 Modelo geométrico planteado

Fuente: (Rajamani, 2012)

(1)
$$\frac{R}{\sin\left(\frac{\pi}{2} - \delta_r\right)} = \frac{l_f}{\sin(\delta_f - \beta)}$$

(2)
$$\frac{\sin(\delta_f) \cos(\beta) - \sin(\beta) \cos(\delta_f)}{l_f} = \frac{\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) \cos(\delta_f) - \sin(\delta_f) \cos\left(\frac{\pi}{2}\right)}{R}$$

(3)
$$\frac{\sin(\delta_f) \cos(\beta) - \sin(\beta) \cos(\delta_f)}{l_f} = \frac{\cos(\delta_f)}{R}$$

$$(4) \quad (3) * \frac{l_f}{\cos(\delta_f)} = \tan(\delta_f) \cos(\beta) - \sin(\beta) = \frac{l_f}{R}$$

$$(5) \quad \frac{R}{\sin(\frac{\pi}{2} + \delta_r)} = \frac{l_r}{\sin(\beta - \delta_r)}$$

$$(6) \quad \frac{\sin(\beta) \cos(\delta_r) - \sin(\delta_r) \cos(\beta)}{l_r} = \frac{\sin(\frac{\pi}{2}) \cos(\delta_r) - \sin(\delta_r) \cos(\frac{\pi}{2})}{R}$$

$$(7) \quad \frac{\cos(\delta_r) \sin(\beta) - \cos(\beta) \sin(\delta_r)}{l_r} = \frac{\cos(\delta_r)}{R}$$

$$(8) \quad (7) * \frac{l_r}{\cos(\delta_r)} = \sin(\beta) - \tan(\delta_r) \cos(\beta) = \frac{l_r}{R}$$

$$(9) \quad (4) + (8) = \{\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)\} \cos(\beta) = \frac{l_f + l_r}{R}$$

Asumiendo que el radio de la trayectoria del vehículo cambia lentamente debido a la baja velocidad del vehículo.

$$(10) \quad \dot{\omega} = \frac{V}{R}$$

$$(11) \quad \text{De (9) y (10)} \quad \dot{\Psi} = \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} [\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)]$$

$$(12) \quad \dot{X} = V \cos(\Psi + \beta)$$

$$(13) \quad \dot{Y} = V \sin(\Psi + \beta)$$

$$(14) \quad (4) * l_r = \tan(\delta_f) \cos(\beta) l_r - l_r \sin(\beta) = \frac{l_r l_f}{R}$$

$$(15) \quad (8) * l_f = l_f \sin(\beta) - l_f \tan(\delta_r) \cos(\beta) = \frac{l_r l_f}{R}$$

$$(16) \quad (14) - (15) = \beta = \tan^{-1} \left(\frac{l_f \tan(\delta_r) + l_r \tan(\delta_f)}{l_f + l_r} \right)$$

Tres coordenadas son requeridas para describir el movimiento del vehículo (X,Y,Ψ), (X,Y) Son coordenadas inerciales de la localización del c.g. Del vehículo mientras que (Ψ) describe la orientación del vehículo (Rajamani, 2012).

La velocidad al c.g. del vehículo es denotada por V y hace un ángulo β con el eje longitudinal del vehículo. El ángulo β se denomina ángulo de deslizamiento del vehículo, Tabla 1-2.

Resumen de las ecuaciones del modelo:

Tabla 1-2: Ecuaciones configuración tipo bicicleta

X	Coordenada X del eje global	$\dot{X} = V \cos(\Psi + \beta)$
Y	Coordenada Y del eje global	$\dot{Y} = V \sin(\Psi + \beta)$
Ψ	Ángulo de orientación del robot con respecto al eje X global	$\dot{\Psi} = \frac{V \cos(\beta)}{l_f + l_r} [\tan(\delta_f) - \tan(\delta_r)]$
β	Ángulo de deslizamiento del vehículo	$\beta = \tan^{-1}\left(\frac{l_f \tan(\delta_r) + l_r \tan(\delta_f)}{l_f + l_r}\right)$

Fuente: (Rajamani, 2012)

Otro interesante estudio es (Kim, Yi, & Lim, 2004), donde la cinemática de rueda se obtiene por procedimientos vectoriales. La ecuación de rueda explicita las velocidades de deslizamiento en las dos direcciones, que son ocasionalmente utilizadas para conseguir una matriz Jacobiana cuadrada (añadiendo ecuaciones escalares triviales). Esta modificación facilita pasar de modelos directos a inversos y viceversa. No obstante, estas ecuaciones triviales deberían ser eliminadas en una etapa posterior para evitar un innecesario coste computacional.

En (Oliveira, Sousa, Moreira, & Costa, 2008) se lleva a cabo modelos para robots móviles omnidireccionales con tres y cuatro ruedas. El modelo derivado no es lineal, pero mantiene algunas similitudes con las ecuaciones lineales de espacio de estado. Posteriormente en (Pérez & Eraso, 2014), desarrollan un modelo cinemático en Matlab, para observar gráficamente el desplazamiento que realiza el sistema mecánico del robot.

Y se analiza este comportamiento con el modelo físico, demostrando que los resultados coinciden con el análisis realizado.

Finalmente, (Muñoz Martínez, Gil-Gómez, & García Cerezo, 2015) detalla una metodología para la construcción de los modelos cinemático y dinámico de los robots móviles con ruedas. Se plantea como una extrapolación de los procedimientos, ya consolidados, que persiguen el mismo fin, pero en el campo de los manipuladores.

2.1.8 Simulación de trayectorias del robot móvil

Una vez obtenido el modelo matemático, se puede lograr una simulación para observar el comportamiento del robot, es decir, su posición y orientación, cuando se aplican diversas combinaciones de velocidades angulares a las ruedas. Una herramienta que nos permite realizar este trabajo es MATLAB.

2.1.8.1 *MATLAB*

Este es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio y es una de las muchas herramientas sofisticadas de computación disponibles en el mercado para resolver problemas matemáticos. MATLAB es una abreviatura de MAtrix LABoratory, que traducido es Laboratorio de Matrices.

MATLAB se especializa en el manejo de matrices y es ampliamente utilizado en universidades e institutos de aprendizajes en cursos básicos y avanzados de matemáticas, ciencias y especialmente ingeniería. En la industria se utiliza habitualmente en investigación, desarrollo y diseño de prototipos (García, 2012).

Para la simulación se considerarán los parámetros siguientes:

- ❖ Radio de las ruedas.
- ❖ Separación entre las ruedas.
- ❖ Condiciones iniciales $(x(0), y(0), \varphi(0))$.

SIMULINK

Es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Admite el diseño y la simulación a nivel de sistema, la generación automática de código y la prueba y verificación continuas de los sistemas embebidos.

Requisitos para la simulación:

- ❖ Preparar el modelo CAD de manera que pueda ser importado a SimMechanics.
- ❖ Importar el modelo CAD.
- ❖ Añadir actuaciones a las articulaciones.
- ❖ Añadir ligaduras (restricciones de movimiento) a las articulaciones.
- ❖ Crear un entorno 3D.
- ❖ Simular sensores virtuales en Simulink.
- ❖ Diseñar y simular algoritmos.

2.1.9 Diseño de planos

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una subsidiaria de Dassault Systèmes (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. El programa permite modelar piezas como ensambles y extraer de ellos tanto dibujos de detalle como otro tipo de información necesaria para la producción (Cuatitlán, 2015).

Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada (Cuatitlán, 2015).

La construcción de un modelo en SolidWorks comienza generalmente con un boceto 2D. El dibujo se compone de la geometría como puntos, líneas, arcos, las cónicas (excepto la hipérbola), y las estrías. Las dimensiones se añaden al boceto para definir el tamaño y la ubicación de la geometría. Relaciones se utilizan para definir atributos tales como tangencia, paralelismo, perpendicularidad y concetricidad (Cuatitlán, 2015).

2.1.9.1 Creación de planos

Se pueden crear planos con las vistas de los modelos o ensamblajes de forma automática y en muy poco tiempo. La obtención de las vistas, alzado, planta y perfil requiere únicamente pulsar sobre un icono o arrastrar la pieza 3D desde su ventana hasta la ventana del dibujo (García, 2016).

El Módulo de Dibujo permite obtener proyecciones ortogonales (vistas estándar), secciones y cortes, perspectivas, acotación, lista de materiales, vistas explosionadas, entre otras muchas funciones. Los documentos de dibujo están totalmente asociados a las piezas y ensamblajes de forma que cualquier cambio en ellas se actualizan en tiempo real en sus planos, sin tener que modificarlos de forma manual (García, 2016).

CAPITULO III

3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Tipo y Diseño de Investigación

El presente trabajo de titulación presenta un estudio de tipo experimental, en el cual se va a emplear el Método de Experimentación Científica, basándose principalmente en artículos Científicos, fuentes de información; así como libros que abarque el tema contemplado, mientras que las técnicas que se usará, la información se recopilará de los experimentos que serán empleados en el desarrollo del tema propuesto.

3.2 Supuestos de diseño:

Para hacer más tratable el problema de modelado, se hará suposiciones de diseño y de operación del robot móvil (Muir y Neuman, 1986).

Los supuestos que se van a considerar para el diseño son los siguientes:

- 1) Los vehículos no poseen en su estructura partes flexibles, es decir: toda la estructura es rígida.
- 2) Por cada rueda puede haber una o ninguna articulación de dirección.
- 3) Todos los ejes de dirección existentes son perpendiculares a la superficie por la que se desplaza el vehículo.
- 4) Las ruedas están directamente en contacto con el suelo.
- 5) Las ruedas convencionales no tienen deslizamiento.

3.3 Supuesto operacional:

La superficie de desplazamiento (suelo) es plana. Para las estimaciones investigación se consideraron únicamente ambientes interiores, en los cuales los aspectos climáticos y atmosféricos no tienen mayor impacto en su desenvolvimiento. De la misma manera no se ha considerado obstáculos que puedan interferir en el desplazamiento de la trayectoria durante el desarrollo de pruebas.

3.4 Elección de Llantas

El tipo de llanta determina el tipo de trayectoria que se podrá obtener con el desplazamiento de la plataforma móvil y los recursos necesarios para lograrlo. Para el diseño de plataforma se eligieron dos tipos de ruedas: ruedas convencionales y una rueda omnidireccional.

Ruedas Convencionales.-

Se ubicaron dos ruedas convencionales motrices paralelas en la parte posterior de la plataforma que permiten un desplazamiento perpendicular a sus ejes, las ruedas fueron fabricadas a través de impresión en 3D, ver figura 1-3, y sus características se pueden observar en la tabla 1-3.

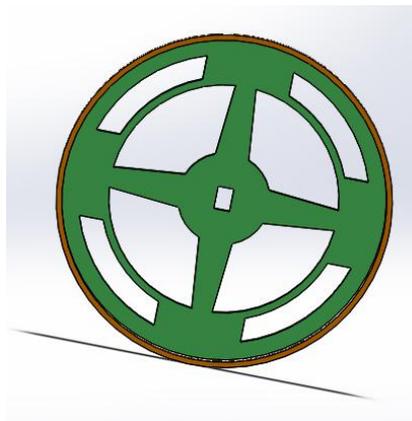


Figura 1-3 Rueda convencional motriz

Fuente: Autor

Tabla 1-3: Características de la llanta convencional

Característica	Valor
Diámetro	66 mm
Espesor	4 mm
Material	PLA y Polietileno de Baja densidad
Coefficiente de Fricción del Material: Polietileno	0.6-0.85 μ_s

Fuente: Autor

Rueda Omnidireccional.-

Se ubicó una rueda omnidireccional en dirección perpendicular al sistema, en la parte frontal, que permite dos tipos de desplazamiento respecto a su eje: paralela y perpendicularmente. El movimiento perpendicular se logra a través de la conexión a un motor de corriente alterna y el movimiento paralelo al eje se logra mediante una fuerza de empuje aplicada al sistema, debido a las propiedades físicas de la llanta. Su diseño se puede observar en la figura 2-3 y sus características se muestran en la tabla 2-3.



Figura 2-3 Rueda omnidireccional

Fuente: Autor

Tabla 2-3: Característica de la Llanta Omnidireccional

Característica	Valor
Diámetro	66 mm
Espesor	31.8 mm
Material	Polietileno de Baja densidad
Coefficiente de Fricción con desplazamiento creado por el motor	0.80 μ_s
Coefficiente de Fricción con desplazamiento creado por empuje de una fuerza externa	0.60 μ_s

Fuente: Autor

3.5 Diseño Estructural

Al momento de considerar un posible diseño para el sistema robótico, se debe tener en cuenta algunos aspectos fundamentales en el planteamiento. Para el cumplimiento de estos aspectos, en el diseño, se debe tomar en cuenta las limitaciones físicas y estructurales que impidan el colapsamiento de la estructura por su peso o dimensiones.

Se debe considerar que el diseño incluye dos motores, cualquiera fuera su tipo y la rueda correspondiente que se utilizarán para la propulsión del robot así como permanecer dentro de la configuración planteada denominada TORI.

Consideraciones para el diseño de la base de la plataforma del robot móvil:

- La separación entre las llantas posteriores sea la menor posible.
- El centro de la rueda omnidireccional utilizada se encuentre alineada con el centro de la estructura.
- El grosor de la plataforma ser la suficiente para soportar el peso de todos sus componentes.

Todo el sistema es un sólido rígido el cual no contará con articulaciones para la orientación de las ruedas. Por lo cual se plantea una plataforma por medio de un programa CAD como lo es SOLIDWORK para lo cual se siguió un plan estructurado.

Se tomaron en consideración las dimensiones de los motores que se usarán, Figura 3-3, debidos a que serán las bases de todo el diseño tanto por tamaño como por peso. El primer elemento a diseñar es el sistema de sujeción para el servo-motor para el motor DG01D

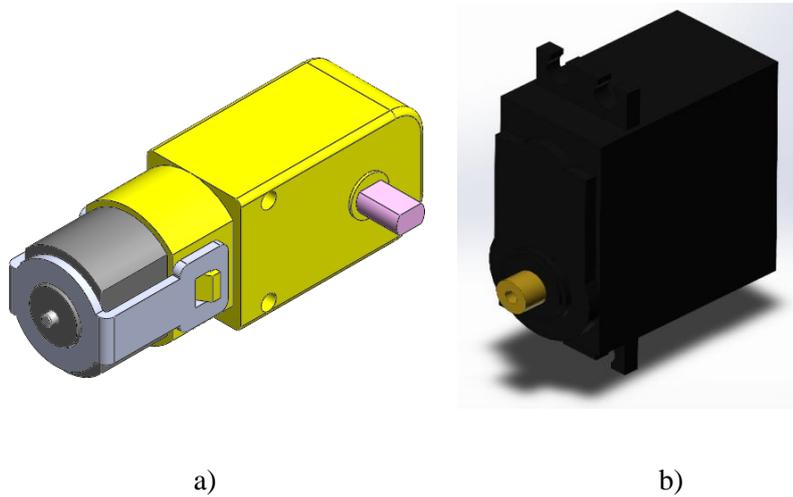


Figura 3-3 Modelos en Solidworks. a) motor de las ruedas posteriores. b) motor de la rueda omnidireccional

Fuente: Autor

Al considerar una forma de fijar estos elementos a la base se aprovecharán sus características físicas para lograrlo. Ya sean sus perforaciones o forma de empaquetado para desarrollar la plataforma, Figura 4-3. En caso del servo-motor deberemos considerar una colocación en la cual no influya al equilibrio del sistema completo.

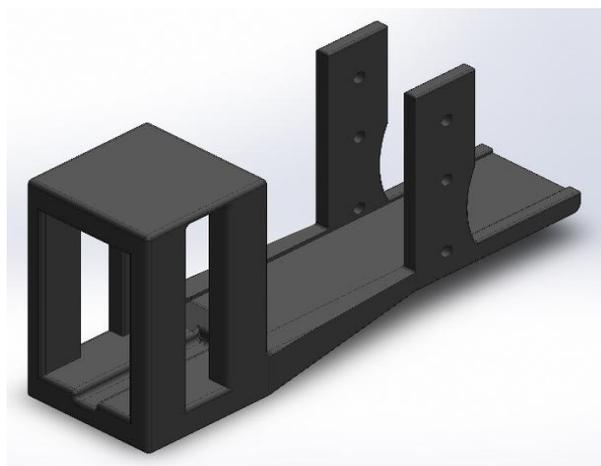


Figura 4-3 Base desarrollada en SOLIDWORK para el sistema robotizado

Fuente: Autor

Con esta base estructural podemos plantear un modelo previo del sistema robotizado, en el cual incluiremos los motores a utilizar, además de las ruedas previamente seleccionadas. No considerando aun el sistema de control ni la fuente de alimentación móvil que se usara para un funcionamiento autónomo, figura 5-3.

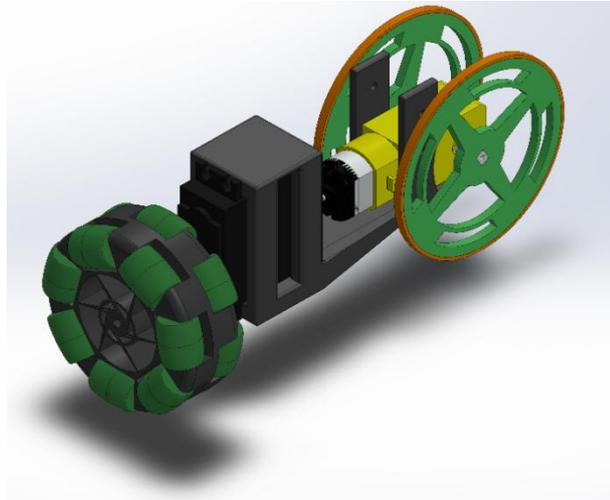


Figura 5-3 Configuración TORI desarrollo en SOLIDWORKS.

Fuente: Autor

3.5.1 *Análisis Estructural*

Asegurando un correcto funcionamiento de este sistema robotizado, se desea que por ninguna fuerza externa el diseño sufra alteración alguna. Para lo cual, en la próxima simulación, se han considerado temperatura y presión ambiental; así como una fuerza no mayor a 10 Newton en cualquier parte de su estructura. Los sitios de apoyo de los motores y aquellos que sufran un mayor estrés serán los de interés para su estudio.

Utilizando la herramienta “Asistente para análisis SimulationXpress”, de SOLIDWORKS, se evaluó el comportamiento que presentaría dicho diseño. Sobre el cual se debe tener muy en claro los lugares en los cuales existirán presiones en este modelo. Así como los puntos de sujeción que tendrán los distintos elementos del robot.

Se ha planificado la utilización de Ácido Poliláctico (PLA) para la fabricación de la plataforma, ya que tiene un amplio uso en el modelado 3D. Las características físicas son muy parecidas a las del Polietileno (NatureWorks, 2016) entre las más destacables propiedades de este material se detalla en la tabla 3-3.

Tabla 3-3: Propiedades del PLA

Propiedad	Magnitud	Sistema de Unidades
Densidad	1,25	g/cm ³
Módulo de elasticidad (Young)	3.5	GPa
Elongación a la rotura	6	% (adimensional)
Módulo de flexión	4	GPa
Resistencia a la flexión	80	MPa
Temperatura de transición vítrea	60	°C
Temperatura de deflexión del calor (a 455 kPa)	65	°C
Comienzo de fusión	160	°C
Módulo de corte	2,4	GPa
Capacidad calorífica específica	1800	J/kg-K
Relación fuerza-peso	40	kN-m/kg
Resistencia a la tracción (UTS)	50	MPa
Conductividad térmica	0,13	W/m-K

Fuente: («MakeltFrom.com :: Material Properties Database», 2015)

El software realiza una división del sólido en pequeños segmentos homogéneos, en un proceso denominado mallado, figura 6-3, Para lo cual, se considera que divisiones de 1.5 mm de tamaño por elemento con una tolerancia de 0.075 mm, propuesto por el software, será suficiente para efectuar el estudio. Siendo particiones lo suficientemente pequeñas, sin representar un consumo de recursos considerables del ordenador al momento de realizar el análisis. Esta división ha creado 114393 nodos para un total de 72759 elementos como se muestra en la figura 7-3 para ser estudiados.

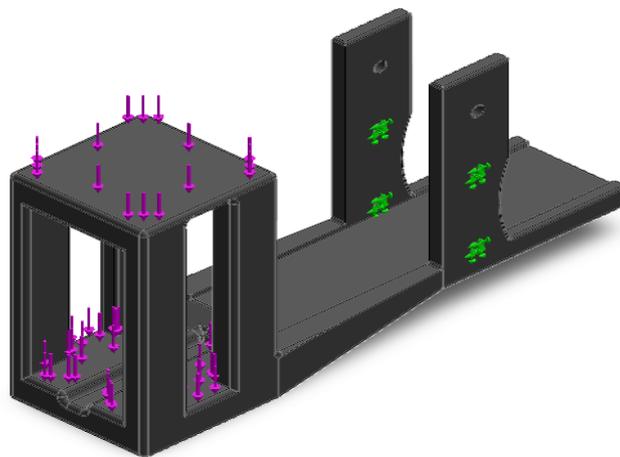


Figura 6-3 Sujeciones y fuerzas en el análisis de la base diseñada.

Fuente: Autor

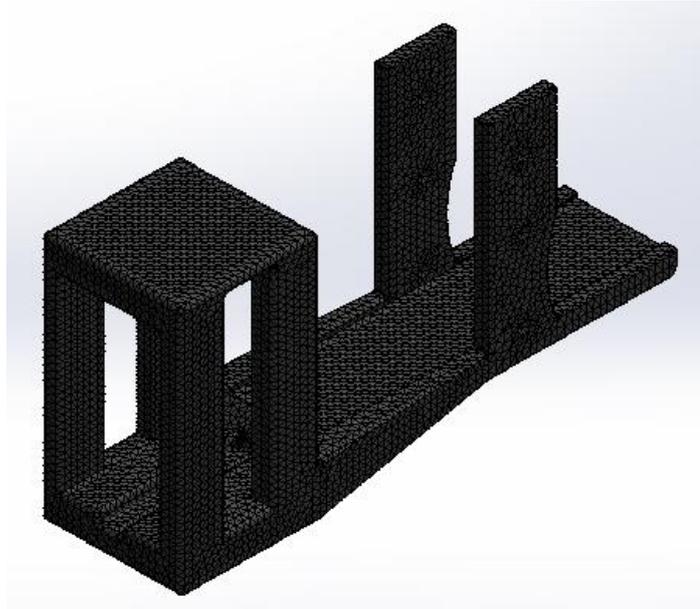


Figura 7-3 Malla solida generada sobre el diseño de la base

Fuente: Autor

Cada elemento de esta malla será sometido a un análisis individual, lo cual nos brindará información en distintos “puntos” del sólido. La herramienta de análisis se encarga de reconstruir el modelo y nos muestra en dos gráficas separadas el resultado del estudio.

Estudio de estrés o presión que sufre.

Los puntos en color rojo representarán el lugar en el cual, por efecto de la presión ejercida sobre la base, sufrirá un mayor estrés lo cual puede llegar a fracturarlo. Se debe tener en cuenta que las fuerzas consideradas han sido sobre dimensionadas a las presiones reales que soportará la plataforma, con el fin de que el diseño con el material especificado cumpliera con los requerimientos.

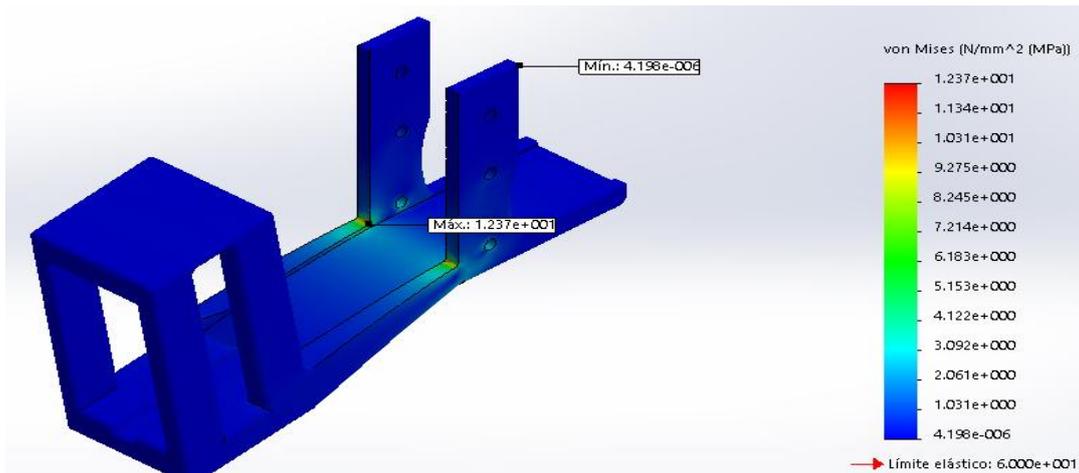


Figura 8-3 Presión que sufre la base al ser aplicada la fuerza sobre ella

Fuente: Autor

3.6 Análisis Geométrico Del Robot

Mediante un análisis geométrico sobre la estructura planteada (configuración tipo bicicleta), se obtuvieron las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de la plataforma móvil.

3.7 Modelo Matemático

En el desarrollo tecnológico, todo avance físico se ha plasmado matemáticamente por medio de modelamientos. Los cuales son fundamentales para la comprensión y respectivas simulaciones que se pueden llevar a cabo en ambientes determinados. En el caso particular de nuestra investigación, se busca determinar las bondades que nos brindará una nueva configuración de robot móvil que es orientado para su uso en interiores.

Para ello se realizó un análisis físico basado en la geometría de los componentes del sistema. El sistema está compuesto por dos ruedas traseras motrices y una rueda delantera que proveerá la dirección del movimiento del robot, tal como se indica en la figura 9-3.

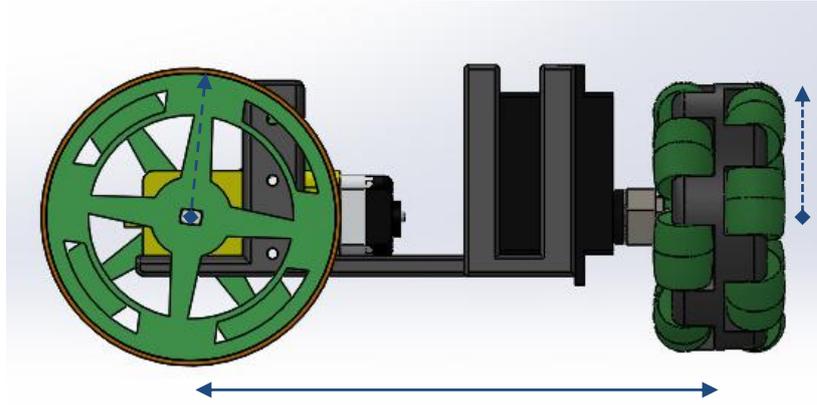


Figura 9-3 Análisis del Sistema

Fuente: Autor

Primer Caso: Si la Velocidad del Motor delantero es igual a 0 y la Velocidad del Motor Posterior es Diferente de 0.

En este caso existe una velocidad Lineal en el robot, que está dada por la aportación de la velocidad lineal de las llantas convencionales sin considerar la fricción que presenta la rueda omnidireccional, debido a los supuestos de diseño, dando como resultado la Ecuación 1-3. En la cual se describe que la velocidad lineal de la plataforma del móvil está dada por la velocidad lineal de las llantas convencionales, debido a que la llanta omnidireccional se desliza con el empuje de las llantas traseras, sin presentar oposición (debido a los supuestos), sin aportar a la velocidad lineal total

$$V_L = V_C + k$$

Ecuación 1-3: Velocidad Lineal del Robot

Fuente: Autor

En dónde V_L representa la velocidad lineal de la plataforma, V_C representa la velocidad del motor de las ruedas posteriores y k es una constante que se presenta por la forma de la rueda omnidireccional, debido a que al ser de forma cóncava hacia arriba presenta un área de contacto mínima entre la superficie y la rueda omnidireccional, lo que representa un cierto grado mínimo de inestabilidad en el punto de apoyo delantero de la plataforma que se ve reflejado en una desviación mínima.

Segundo Caso: Si la Velocidad del Motor delantero es diferente de 0 y la Velocidad del Motor Posterior es igual a 0.

Con estas condiciones existe una velocidad Angular en el extremo frontal del robot, y que tiene como centro las llantas posteriores fijas. Esta velocidad se calcula tomando en consideración la velocidad lineal de la rueda omnidireccional debido a la alimentación en el motor que está conectado a ella, dividida para la distancia entre los ejes de las llantas delanteras y las posteriores, obteniéndose la Ecuación 2-3.

$$\omega_L = \frac{V_L}{L}$$

Ecuación 2-3: Velocidad Angular de Robot.

Fuente: Autor

En dónde ω_L representa la velocidad angular del sistema y L representa la distancia entre el centro del eje posterior que une las dos llantas posteriores y el eje de la rueda omnidireccional delantera

Tercer Caso: Si las Velocidades de los Motores delantero y posterior son diferente de 0.

En este caso existe una velocidad Angular en el sistema completo. Esta velocidad se calcula tomando en consideración la velocidad angular que aporta la rueda omnidireccional más el aporte de velocidad que aparece debido a la alimentación del motor de las ruedas posteriores, el mismo que se incrementa en cada destaje de la rueda omnidireccional haciendo que la plataforma se desplace hacia afuera durante un pequeño instante de tiempo.

La variación de voltajes en cada motor hace que existan dos diferentes procesos. El primero que es generado cuando el voltaje de las ruedas posteriores es mayor que la rueda delantera, que indica que posiblemente en este caso la trayectoria generada tenga un diámetro interno mayor al segundo caso, que aparece cuando el voltaje de las ruedas posteriores es menor que el voltaje de la rueda delantera.

Con las ecuaciones presentadas se trabajó en el programa de simulación desarrollado en el software MATLAB, el mismo que indica las posibles trayectorias generadas por la plataforma.

3.8 Simulación

La simulación de generación de trayectorias fue realizada mediante código de MATLAB. El programa tiene como entradas los valores de velocidades lineal, angular y como salida la generación de trayectorias simuladas. El sistema necesario para realizar la simulación del funcionamiento de la plataforma se muestra en la figura 10-3.

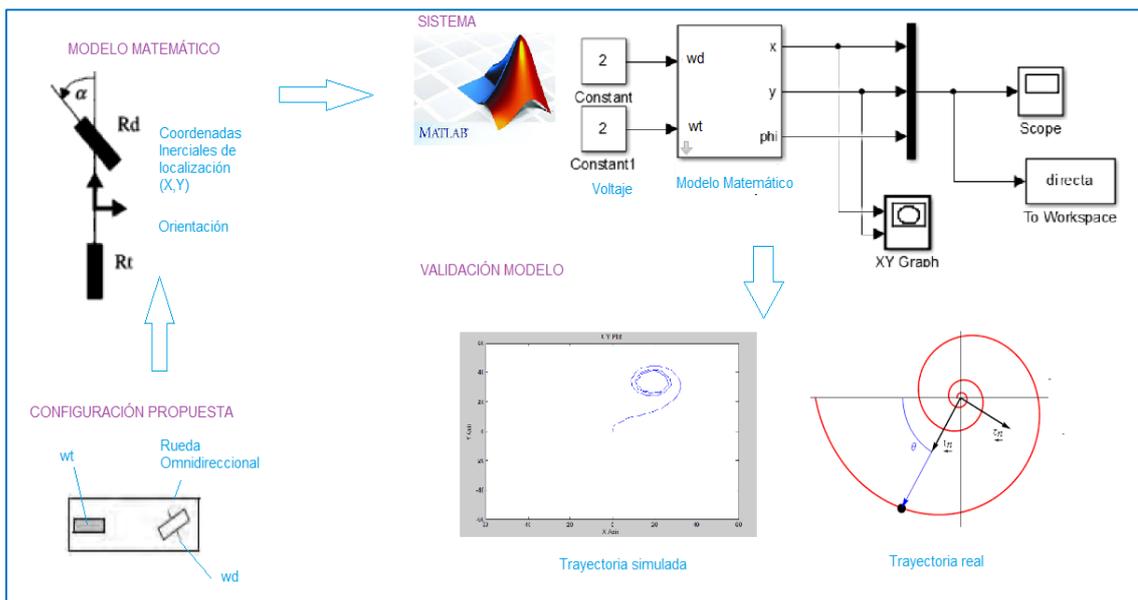


Figura 10-3 Diseño prototipo móvil para exploración de interiores usando una configuración tipo bicicleta.

Fuente: Autor

Para la Simulación de la trayectoria generada por la plataforma, se usaron las siguientes funciones del Programa MATLAB:

3.8.1 Robot Dimensión

Esta función sirve para configurar los parámetros físicos de las dimensiones de la plataforma planteada, tales como el número de caras laterales, frontales, inferiores y superiores, sus longitudes, colores y posiciones respecto al punto de referencia de la plataforma. Aquí también se puede definir el diámetro de las Ruedas y su posición con respecto a la plataforma. Los parámetros para trabajar en esta función están definidos por las posiciones en los ejes (X, Y, Z). Figura 11-3.

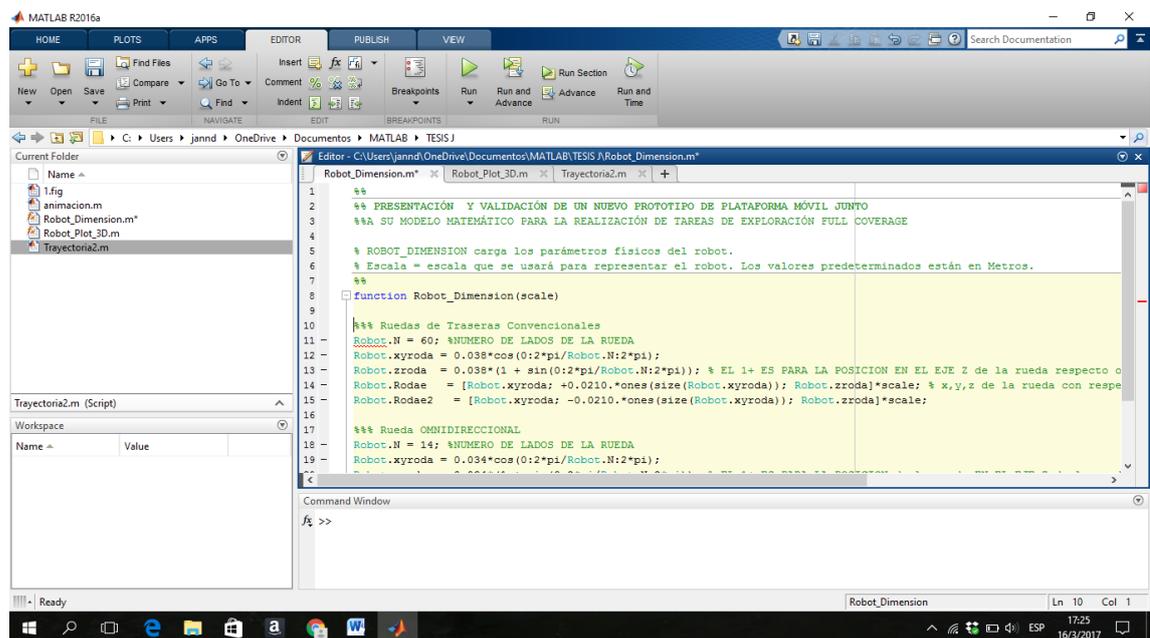


Figura 11-3 Código: Función Robot_Dimensión.

Fuente: Autor

La programación con las dimensiones físicas de la plataforma planteada, creadas para la simulación de la plataforma en el software se presentan en el ANEXO A.

3.8.2 Robot Plot 3d

La función Robot Plot 3D DE Matlab es propia de Matlab creada para dibujar el Robot Pioneer. («Simulación de robot con Simulink», 2014) “El Pioneer es uno de los robots móviles para investigación más populares del mundo. Su versatilidad, su fiabilidad y la durabilidad que presenta han hecho de esta plataforma, una referencia para la investigación robótica. Es totalmente programable y durará años de uso en el aula y en

el laboratorio.” («Pioneer 3 - D X», 2011) Se usó este robot debido a que presenta una configuración de tipo diferencial, que es similar a la que se plantea en el presente estudio, figura 12-3.

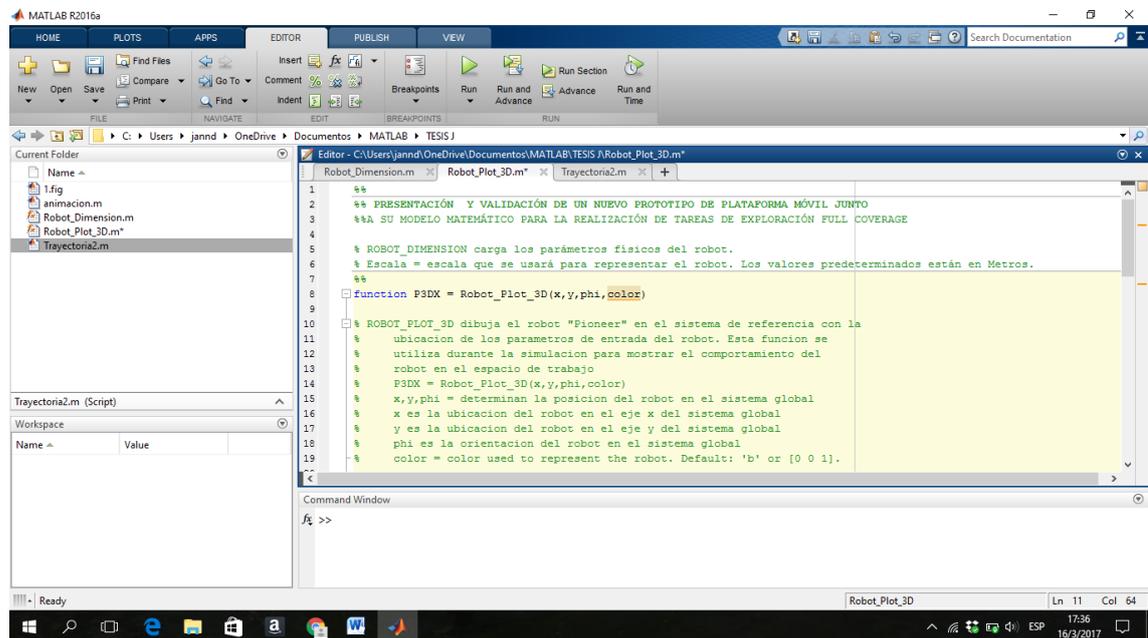


Figura 12-3 Código: Robot_Plot_3D

Fuente: Autor

La programación para la representación en 3D (simulación) de la plataforma planteada, creadas para la simulación de la plataforma en el software se presenta en el ANEXO B.

3.8.2.1 Programación de la TRAYECTORIA

En el programa generado para crear la trayectoria de la Plataforma Móvil, se creó un primer bloque de programación en el cual se configura el tiempo de simulación, las condiciones iniciales del sistema, las posiciones iniciales de la plataforma. Posteriormente se configuran como entradas al sistema las variables que rigen la trayectoria de la Plataforma, como son la Velocidad Lineal y angular con la cual se va a desplazar la Plataforma, figura 13-3.

```

1  %%
2  %% PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN NUEVO PROTOTIPO DE PLATAFORMA MÓVIL JUNTO
3  %% A SU MODELO MATEMÁTICO PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE EXPLORACIÓN FULL COVERAGE
4
5  % ROBOT_DIMENSION carga los parámetros físicos del robot.
6  % Escala = escala que se usará para representar el robot. Los valores predeterminados están en Metros.
7  %%
8
9  clear all; close all; clc; format long g
10 ts = 0.15; % tiempo de muestreo
11 tfin = 25; % 25-80 tiempo de simulación
12 t = 0:ts:tfin;
13 % CONDICIONES INICIALES DEL MÓVIL
14
15 %a) Condiciones iniciales
16 phi = zeros(size(t));
17 x = zeros(size(t));
18 y = zeros(size(t));
19 x(1) = 0; % posición en el eje x de la plataforma móvil EN METROS
20 y(1) = 0; % posición en el eje y de la plataforma móvil EN METROS

```

Figura 13-3: Código para generación de la TRAYECTORIA

Fuente: Autor

La programación para la simulación de la trayectoria de la plataforma planteada se presenta en el ANEXO C. El Diagrama de Flujo del programa desarrollado en Matlab se muestra en la figura 14-3.



Figura 14-3: Diagrama de Flujo del Programa en MATLAB

Fuente: Autor

3.10 PLANIFICACIÓN DE PRUEBAS.

Una vez ensamblados todos los componentes físicos y electrónicos que conforman la Plataforma Móvil, se realizaron las pruebas necesarias para verificar el funcionamiento del sistema. Existen cuatro posibles escenarios que se pueden presentar de acuerdo a la configuración de la plataforma, tomando en consideración las velocidades que presenten cada una de las llantas. Teniendo en cuenta que las velocidades de las ruedas están gobernadas por el voltaje que se les inyecte a los motores de cada una, se tiene:

Primer Caso

Si el Voltaje de las Ruedas convencionales son diferente de 0 y el Voltaje de la rueda Omnidireccional es igual a 0.

Segundo Caso

Si el Voltaje de las Ruedas convencionales es mayor que el Voltaje de la rueda Omnidireccional.

Tercer Caso

Si el Voltaje de las Ruedas convencionales es menor que el Voltaje de la rueda Omnidireccional.

Cuarto Caso

Si el Voltaje de las Ruedas convencionales son iguales a 0 y el Voltaje de la rueda Omnidireccional es diferente de 0.

Los parámetros que se medirán en las trayectorias generadas de acuerdo a cada uno de estos escenarios son:

- Desplazamiento lineal.
- Desviación.
- Tiempos de ejecución.
- Velocidades.
- Diámetros internos de las circunferencias generadas.

CAPITULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los planos del diseño de la plataforma realizada en Solid Works se presentan en el ANEXO D. En los cuales se indica las dimensiones de las piezas realizadas. Esta plataforma posteriormente fue impresa en una impresora 3D.

Para cubrir los cuatro casos planteados en la sección 3.8, se realizaron pruebas con la combinación de valores de voltajes de alimentación en las dos ruedas de la plataforma, obteniendo los siguientes resultados:

- a) Cuando el voltaje del motor de las ruedas posteriores es diferente de 0 y el voltaje del motor de la rueda delantera es igual a 0: Figuras 1-4, 2-4, 3-4, 4-4, 5-4 y 6-4.
- b) Cuando el voltaje del motor de las ruedas posteriores es igual a 0 y el voltaje del motor de la rueda delantera es diferente de 0: Figuras 7-4, 8-4, 15-4, 16-4, 23-4 y 24-4.
- c) Cuando el voltaje del motor de las ruedas posteriores es mayor o igual al voltaje del motor de la rueda delantera: Figuras 11-4, 12-4, 13-4, 14-4, 19-4, 20-4, 21-4, 22-4, 29-4 y 30-4.
- d) Cuando el voltaje del motor de las ruedas posteriores es mayor o igual al voltaje del motor de la rueda delantera: Figuras 9-4, 10-4, 17-4, 18-4, 25-4, 26-4, 27-4, y 28-4.

4.1 Prueba 1

Voltaje Rueda Delantera: 0 v

Voltaje Rueda Posterior: 1.5 v

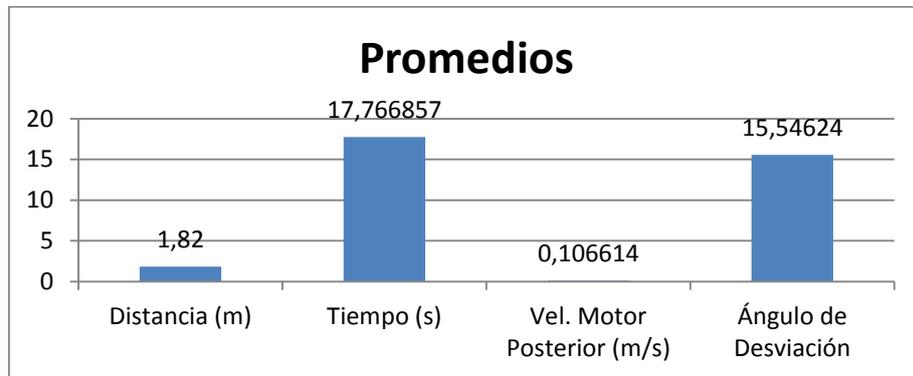


Figura 1-4 Prueba 1: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 1.5

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

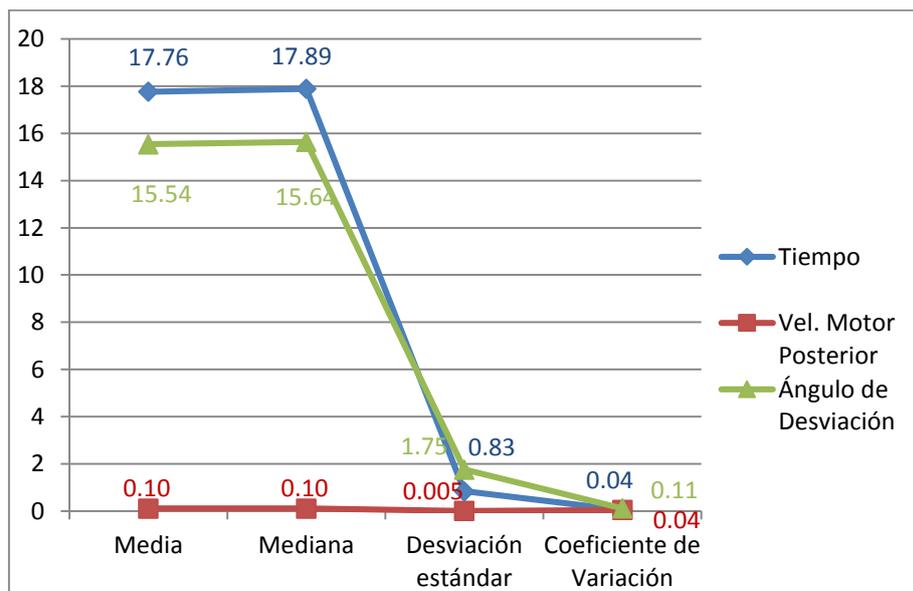


Figura 2-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 1.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 0 voltios en el motor de la rueda delantera y 1.5 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: recorre una distancia lineal de 1.82 metros en un tiempo de 17.76 segundos, alcanzando una velocidad de 0.102 metros por segundo, con un ángulo de desviación de 15.546240, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.047223 en la variable tiempo, 0.048129 en la variable velocidad del Motor, y 0.112987 en la variable ángulo de desviación; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.2 Prueba 2

Voltaje Rueda Delantera: 0 v

Voltaje Rueda Posterior: 3 v

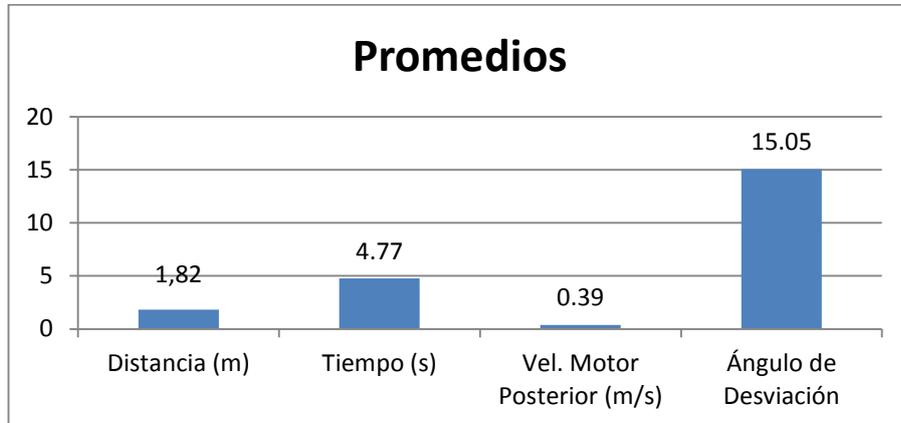


Figura 3-4 Prueba 2: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 3

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

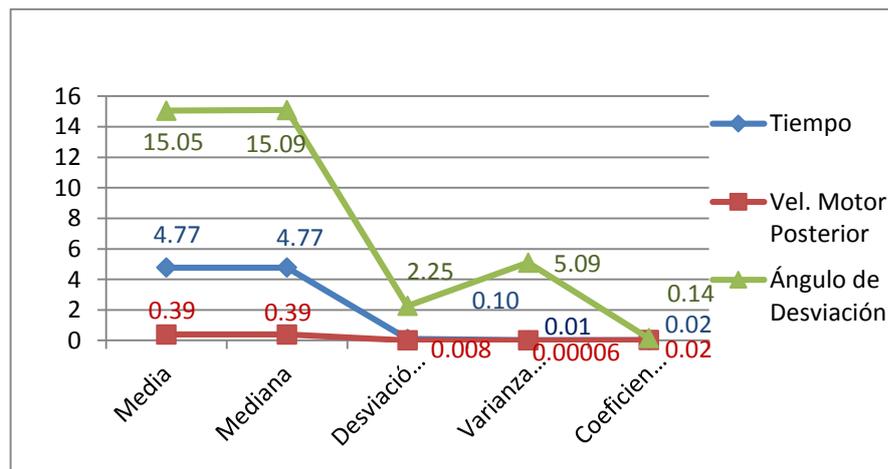


Figura 4-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 2.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 0 voltios en el motor de la rueda delantera y 3 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: recorre una distancia lineal de 1.82 metros en un tiempo de 4.77 segundos, alcanzando una velocidad de 0.3952 metros por segundo, con un ángulo de desviación de 15.0566, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.021492 en la variable tiempo, 0.020428 en la variable velocidad del Motor de las ruedas posteriores, y 0.149957 en la variable ángulo de desviación; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.3 Prueba 3

Voltaje Rueda Delantera: 0 v

Voltaje Rueda Posterior: 5 v

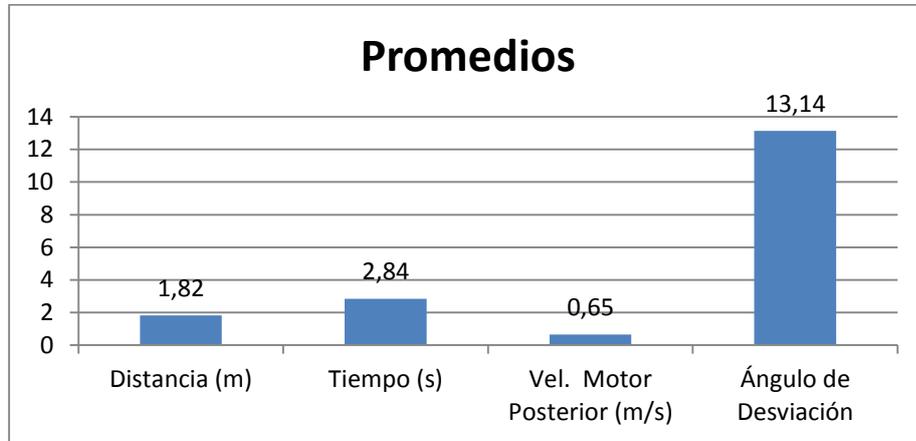


Figura 5-4 Prueba 3: Voltaje Omnidireccional 0 y Voltaje Convencional 5

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

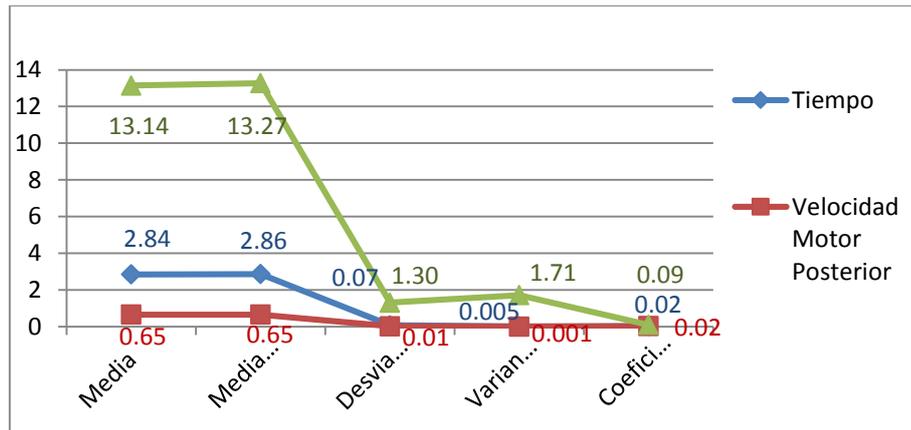


Figura 6-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 3.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 0 voltios en el motor de la rueda delantera y 5 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: recorre una distancia de 1.82 metros en un tiempo de 2.84 segundos, alcanzando una velocidad de 0.65 metros por segundo, con un ángulo de desviación de 13.14, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.026777 en la variable tiempo, 0.028379 en la variable velocidad del Motor de las ruedas posteriores, y 0.099660 en la variable ángulo de desviación; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.4 Prueba 4

Voltaje Rueda Delantera: 2 v

Voltaje Rueda Posterior: 0 v

Tiempo: 3 minutos

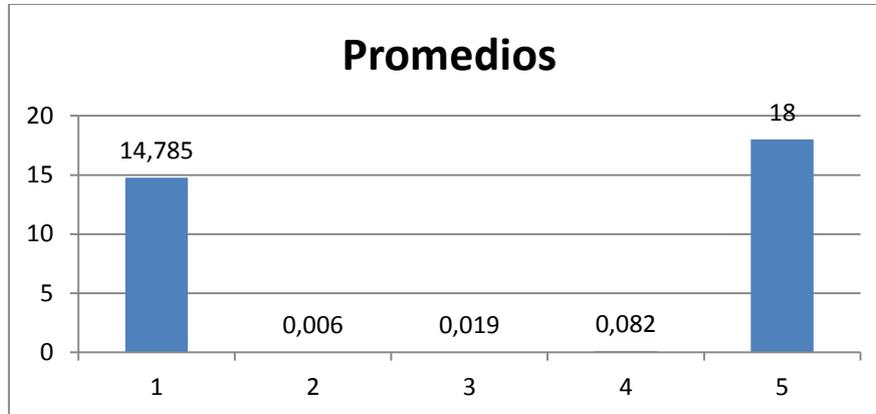


Figura 7-4 Prueba 4: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 0

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

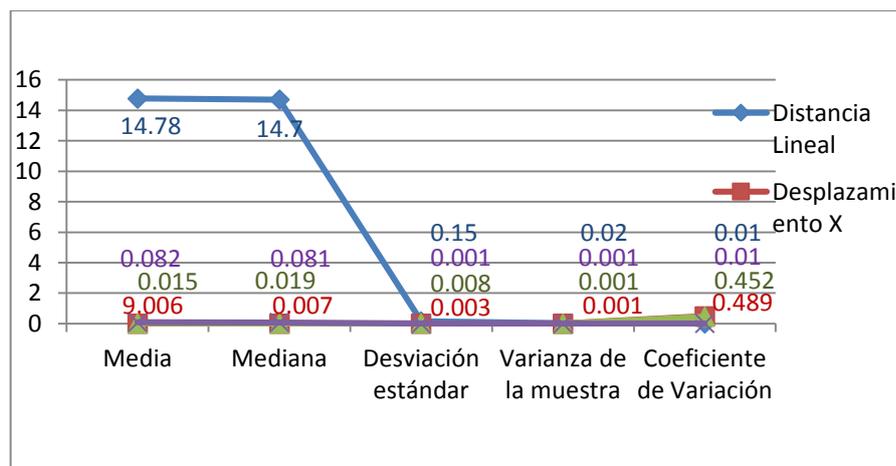


Figura 8-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 4.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 2 voltios en el motor de la rueda delantera y 0 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 18 circunferencias, recorriendo una distancia de 14.78 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.082 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.010285 en la variable distancia, 0.489389 en la variable desplazamiento en “X”, 0.452737 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.010285 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.5 Prueba 5

Voltaje Rueda Delantera: 2 v

Voltaje Rueda Posterior: 1.5 v

Tiempo: 3 minutos

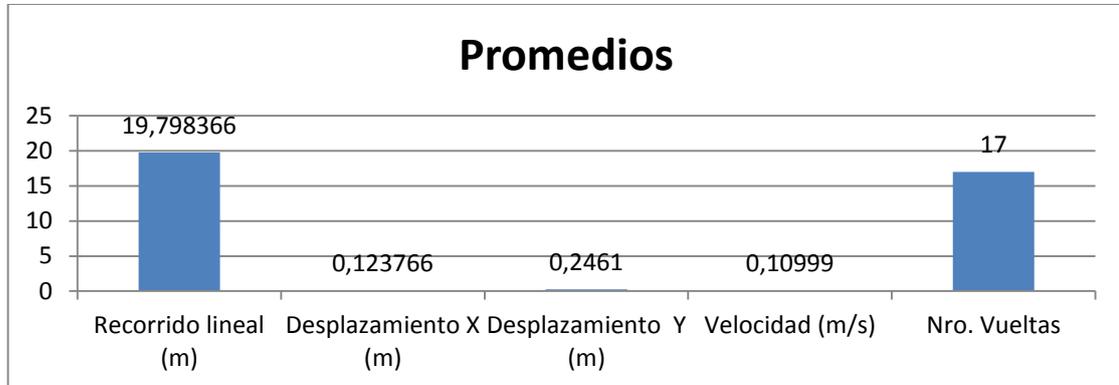


Figura 9-4 Prueba 5: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 1.5

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

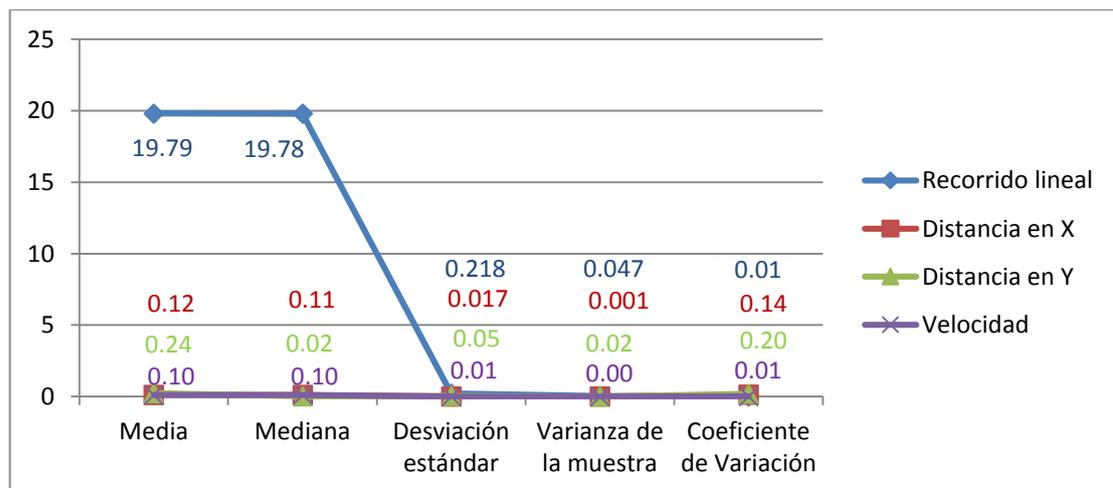


Figura 10-4 Análisis estadístico descriptivo prueba 5.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 2 voltios en el motor de la rueda delantera y 1.5 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 17 espirales tipo helicoidales, recorriendo una distancia de 19.79 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.10 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.011027 en la variable distancia, 0.141937 en la variable desplazamiento en “X”, 0.206193 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.011027 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.6 Prueba 6

Voltaje Rueda Delantera: 2 v

Voltaje Rueda Posterior: 3 v

Tiempo: 3 minutos

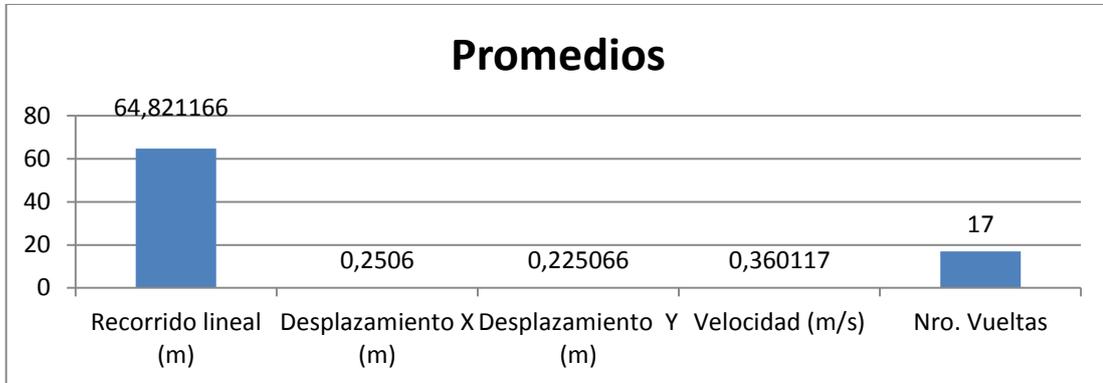


Figura 11-4 Prueba 6: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 3

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

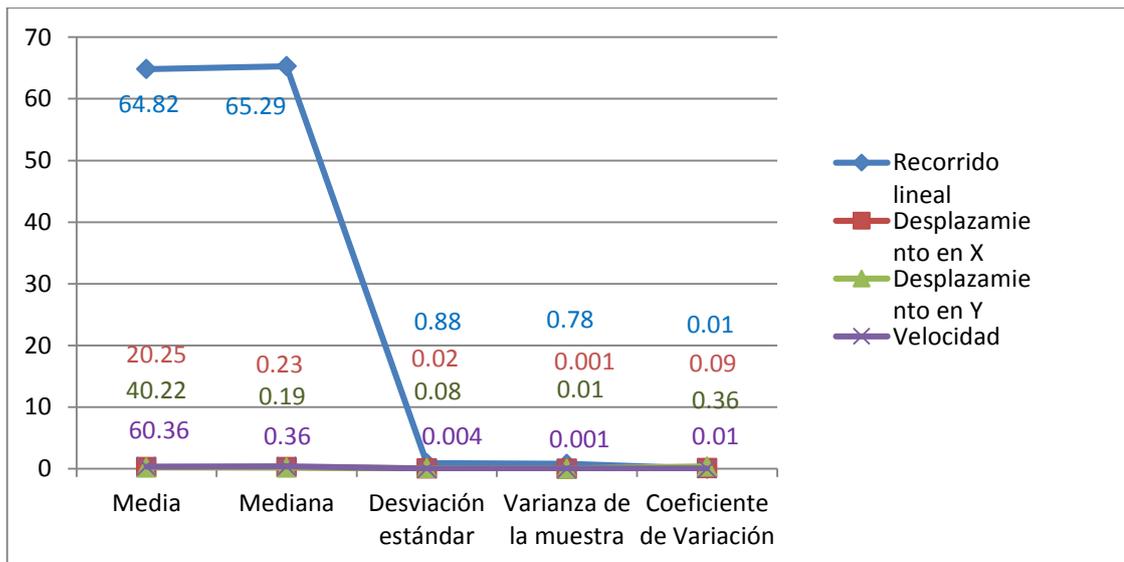


Figura 12-4 Análisis estadístico descriptivo prueba 6

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 2 voltios en el motor de la rueda delantera y 3 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 17 espirales tipo Helicoidales, recorriendo una distancia de 64.82 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.36 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.013682 en la variable distancia, 0.097235 en la variable desplazamiento en “X”, 0.367442 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.013682 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.7 Prueba 7

Voltaje Rueda Delantera: 2 v

Voltaje Rueda Posterior: 5 v

Tiempo: 3 minutos

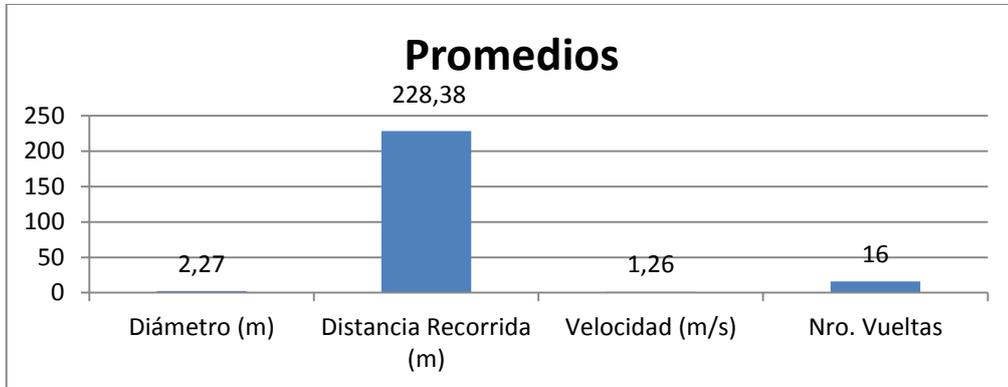


Figura 13-4 Prueba 7: Voltaje Omnidireccional 2 y Voltaje Convencional 5

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

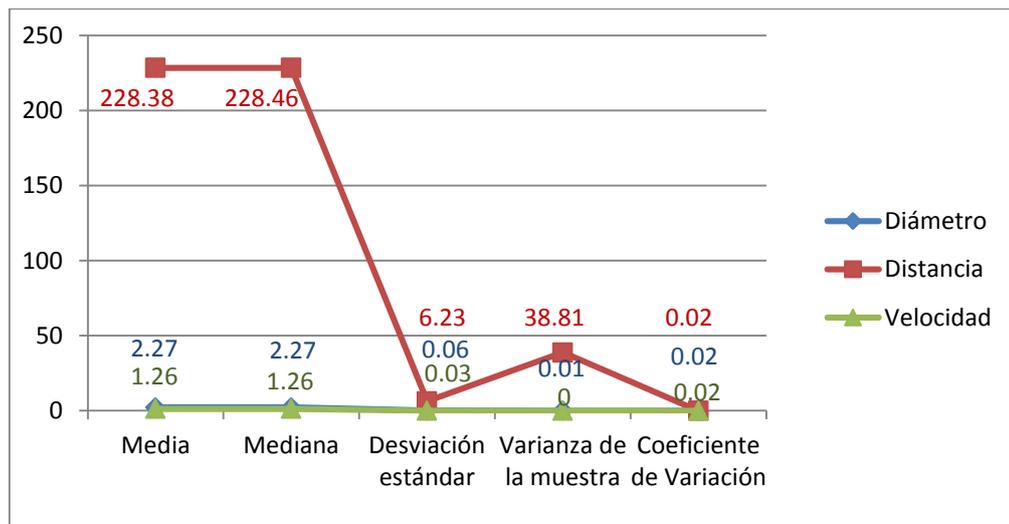


Figura 14-4 Análisis estadístico descriptivo de la Prueba 7.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 2 voltios en el motor de la rueda delantera y 5 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 16 espirales tipo Helicoidales, recorriendo una distancia de 228.381753 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 1.268787 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.027279 en la variable diámetro, 0.027279 en la variable distancia recorrida, y 0.027279 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.8 Prueba 8

Voltaje Rueda Delantera: 3 v

Voltaje Rueda Posterior: 0 v

Tiempo: 3 minutos

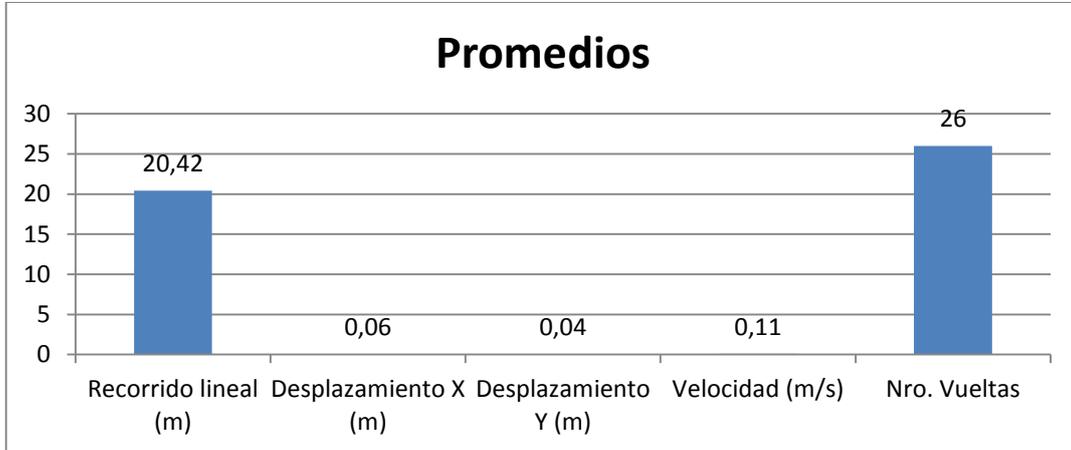


Figura 15-4 Prueba 8: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 0

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

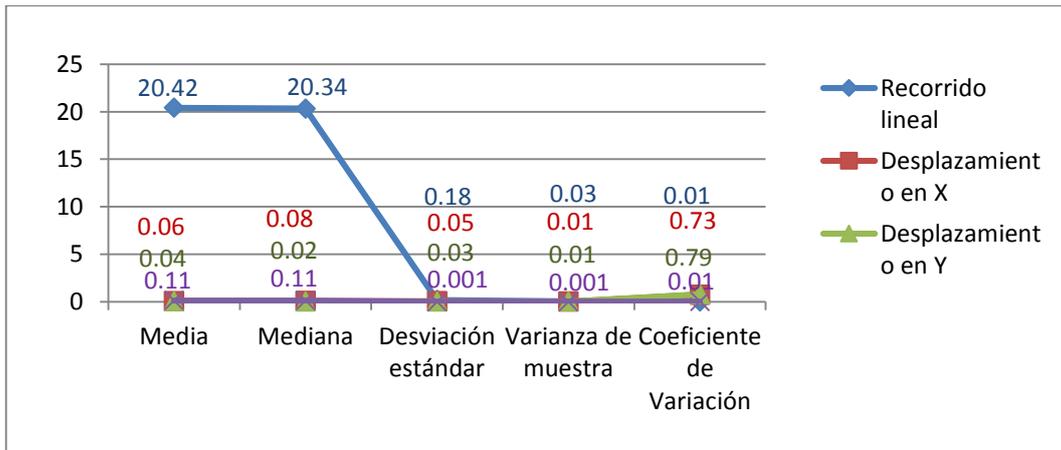


Figura 16-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 8.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 3 voltios en el motor de la rueda delantera y 0 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 26 circunferencias, recorriendo una distancia de 20.42 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.11 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.008996 en la variable distancia, 0.738755 en la variable desplazamiento en “X”, 0.795297 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.008996 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.9 Prueba 9

Voltaje Rueda Delantera: 3 v

Voltaje Rueda Posterior: 1.5 v

Tiempo: 3 minutos

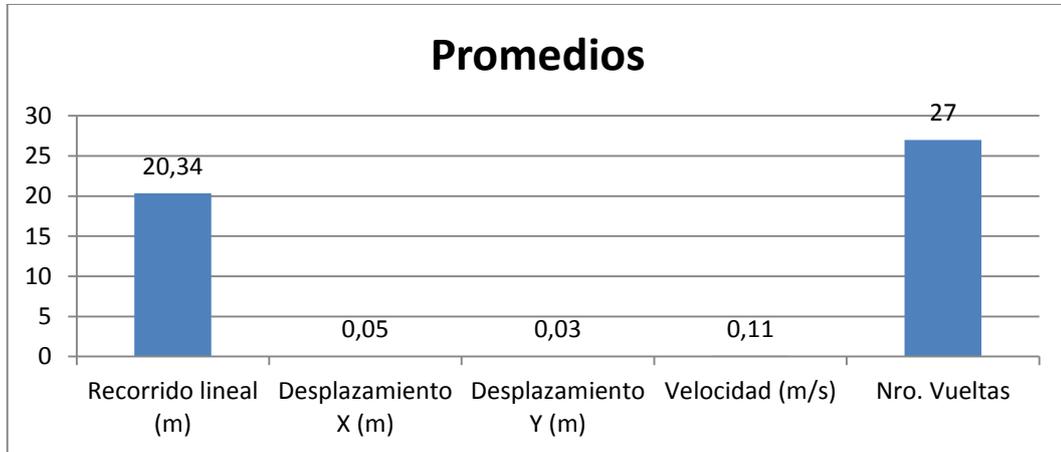


Figura 17-4 Prueba 9: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 1.5

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

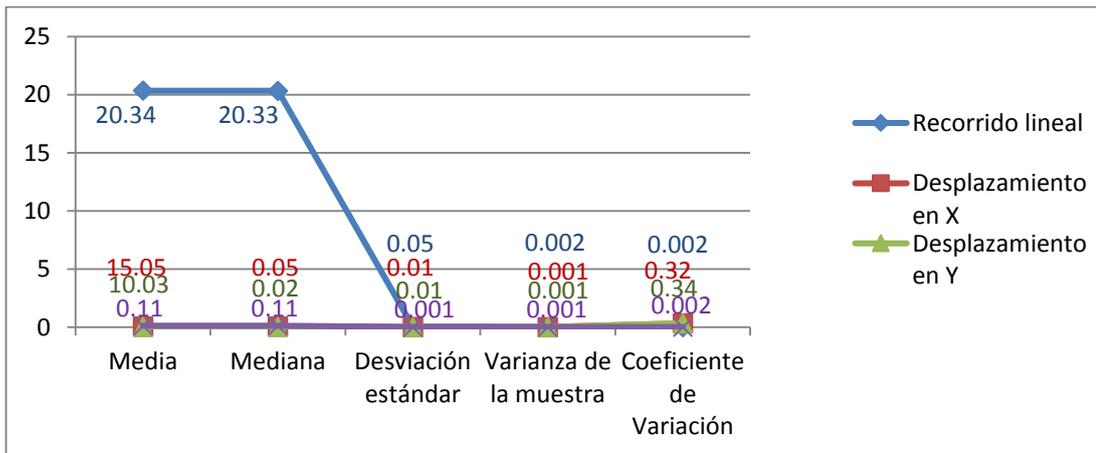


Figura 18-4 Análisis estadístico descriptivo Prueba 9.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 3 voltios en el motor de la rueda delantera y 1.5 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 27 espirales tipo Helicoidales, recorriendo una distancia de 20.34 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.11 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.002671 en la variable distancia, 0.321098 en la variable desplazamiento en “X”, 0.345317 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.002671 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.10 Prueba 10

Voltaje Rueda Delantera: 3 v

Voltaje Rueda Posterior: 3 v

Tiempo: 3 minutos

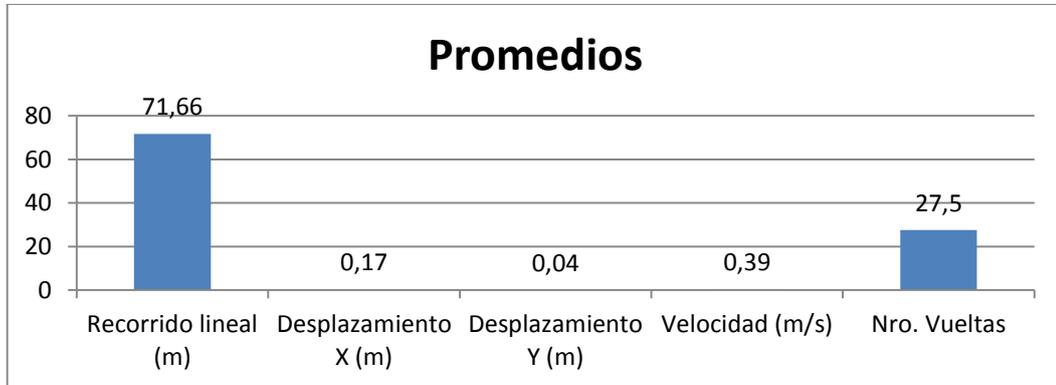


Figura 19-4 Prueba 10: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 3

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

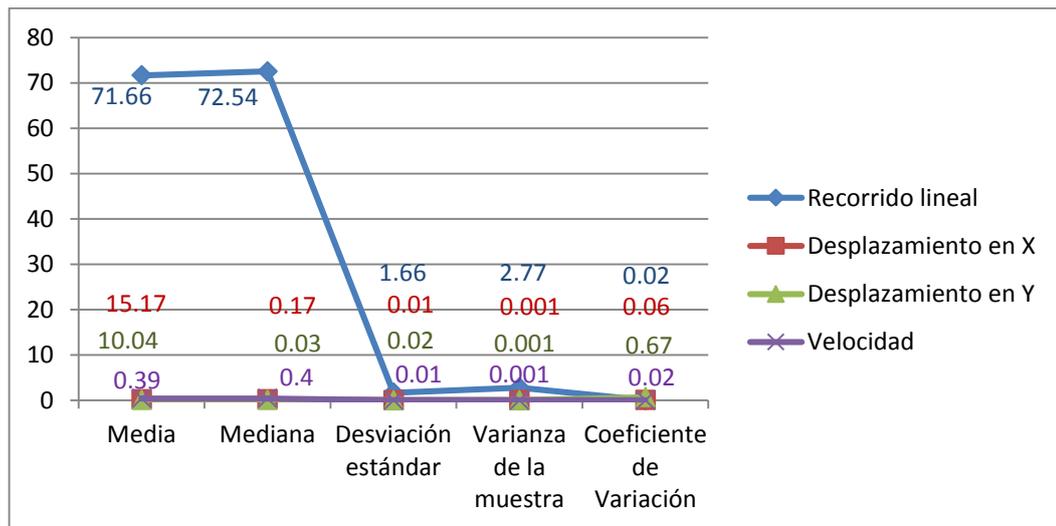


Figura 20-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 10.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 3 voltios en el motor de la rueda delantera y 3 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 27.5 espirales tipo Helicoidales, recorriendo una distancia de 71.66 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.39 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.023249 en la variable distancia, 0.066468 en la variable desplazamiento en “X”, 0.673986 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.023249 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.11 Prueba 11

Voltaje Rueda Delantera: 3 v

Voltaje Rueda Posterior: 5 v

Tiempo: 3 minutos

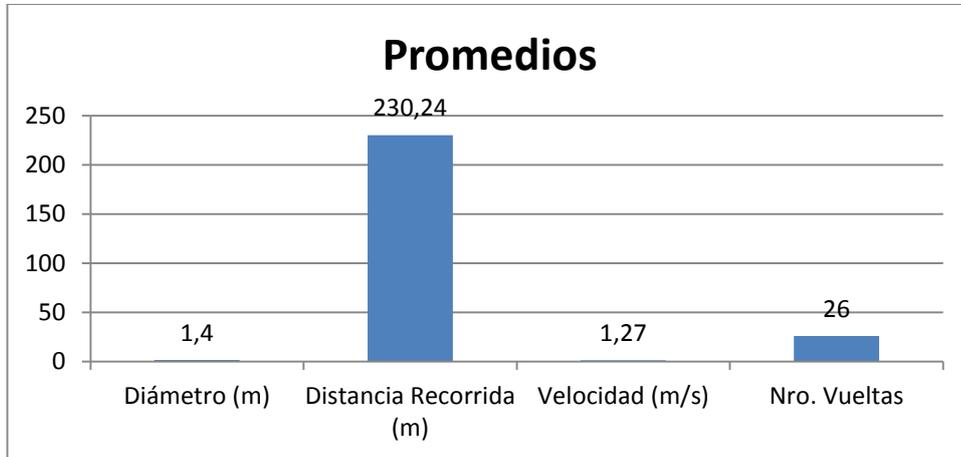


Figura 21-4 Prueba 11: Voltaje Omnidireccional 3 y Voltaje Convencional 5

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

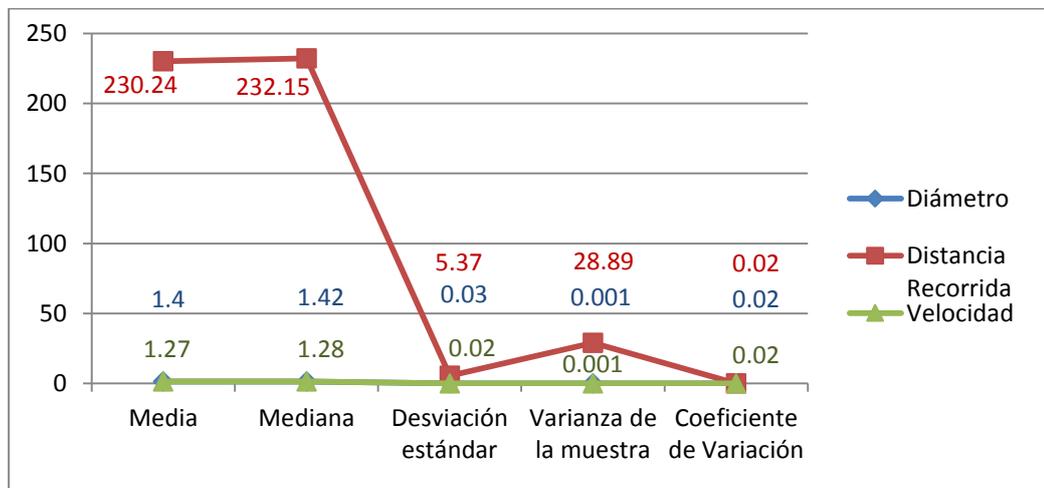


Figura 22-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 11.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 3 voltios en el motor de la rueda delantera y 5 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 26 espirales tipo Helicoidales, recorriendo una distancia de 230.24 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 1.27 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.023345 en la variable diámetro, 0.023345 en la variable distancia recorrida, y 0.023345 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.12 Prueba 12

Voltaje Rueda Delantera: 5 v

Voltaje Rueda Posterior: 0 v

Tiempo: 3 minutos

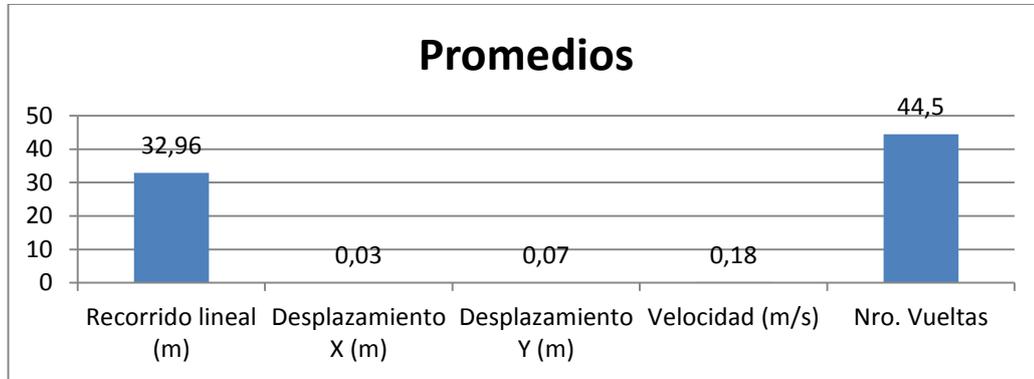


Figura 23-4 Prueba 12: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 0

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

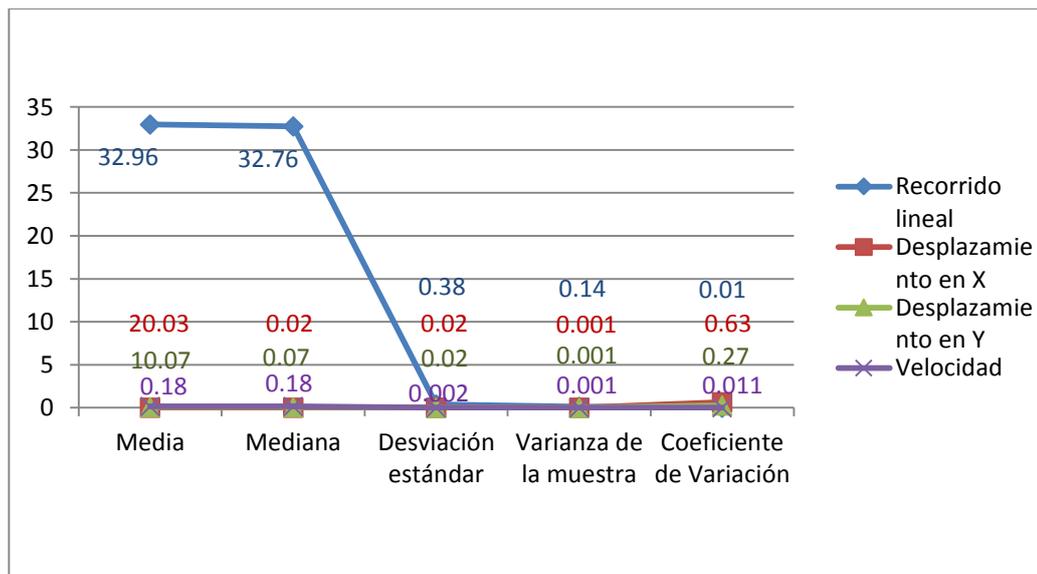


Figura 24-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 12.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 5 voltios en el motor de la rueda delantera y 0 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 44.5 circunferencias, recorriendo una distancia de 32.96 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.18 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.011685 en la variable distancia, 0.638238 en la variable desplazamiento en “X”, 0.274058 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.011685 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.13 Prueba 13

Voltaje Rueda Delantera: 5 v

Voltaje Rueda Posterior: 1.5 v

Tiempo: 3 minutos

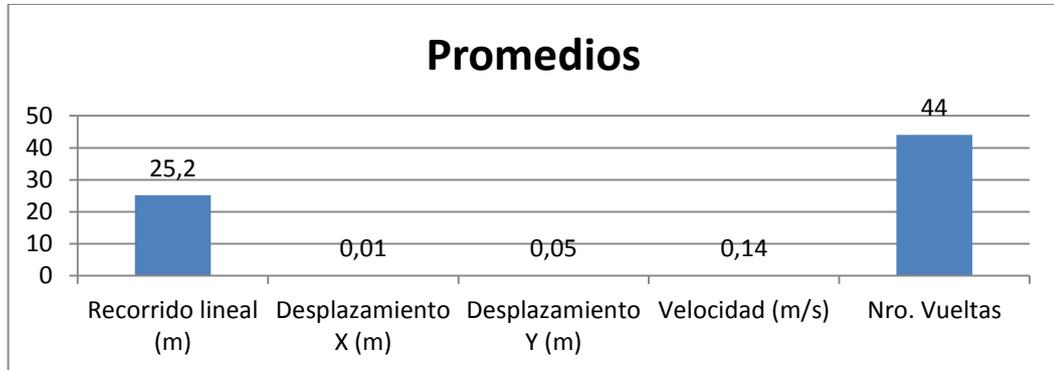


Figura 25-4 Prueba 13: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 1.5

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

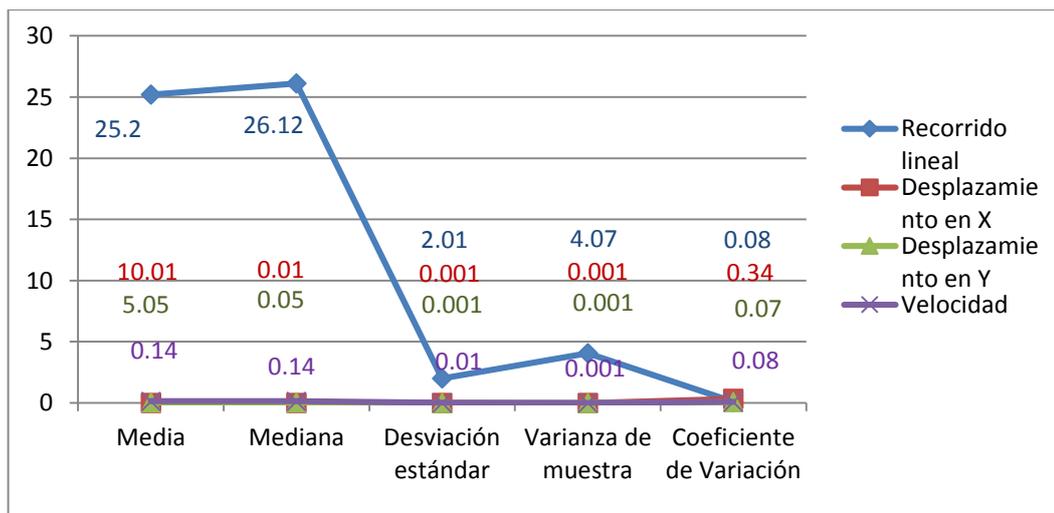


Figura 26-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 13.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 5 voltios en el motor de la rueda delantera y 1.5 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 44 espirales tipo Helicoidales, recorriendo una distancia de 25.20 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.14 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.080079 en la variable distancia, 0.346534 en la variable desplazamiento en “X”, 0.076967 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.080079 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.14 Prueba 14

Voltaje Rueda Delantera: 5 v

Voltaje Rueda Posterior: 3 v

Tiempo: 3 minutos

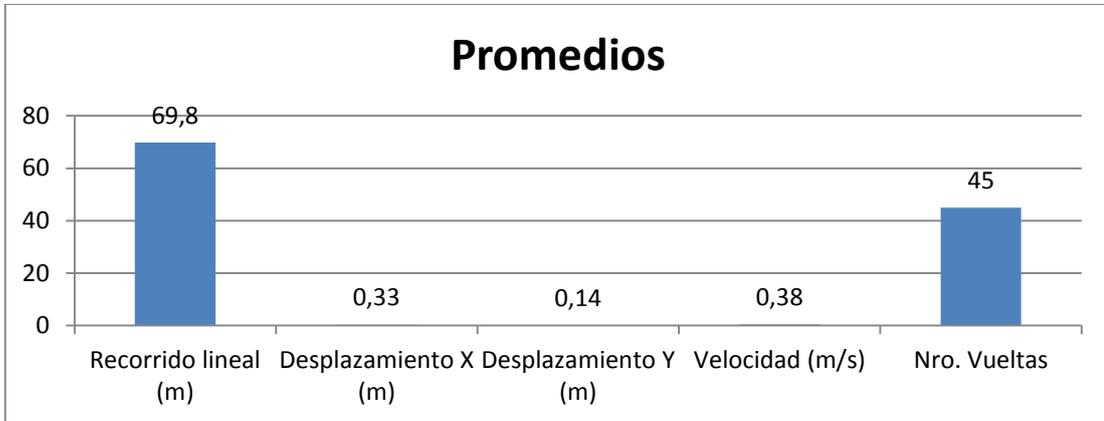


Figura 27-4 Prueba 14: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 3

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

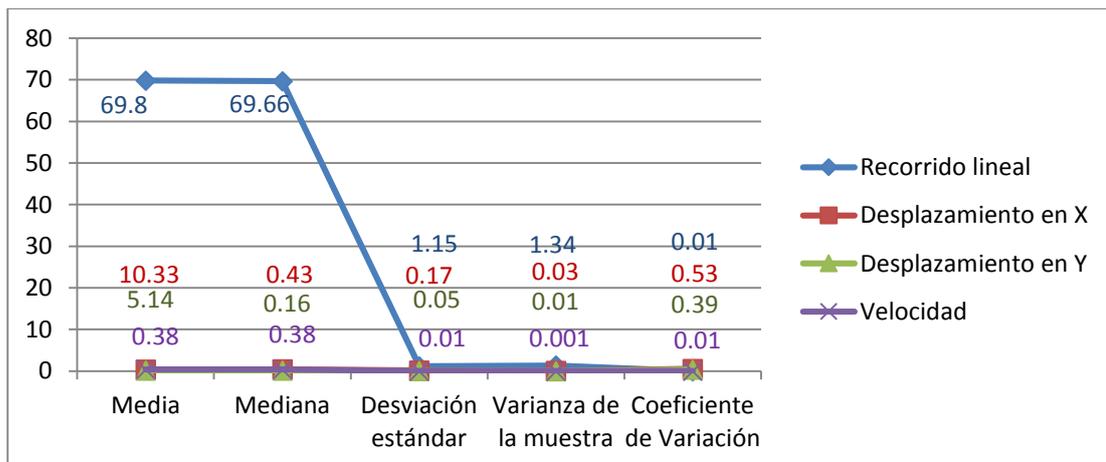


Figura 28-4 Análisis estadístico descriptivo de la prueba 14.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 5 voltios en el motor de la rueda delantera y 3 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 45 espirales tipo Helicoidales, recorriendo una distancia de 69.80 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.38 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.016612 en la variable distancia, 0.539956 en la variable desplazamiento en “X”, 0.393457 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.016612 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

4.15 Prueba 15

Voltaje Rueda Delantera: 5 v

Voltaje Rueda Posterior: 5 v

Tiempo: 3 minutos

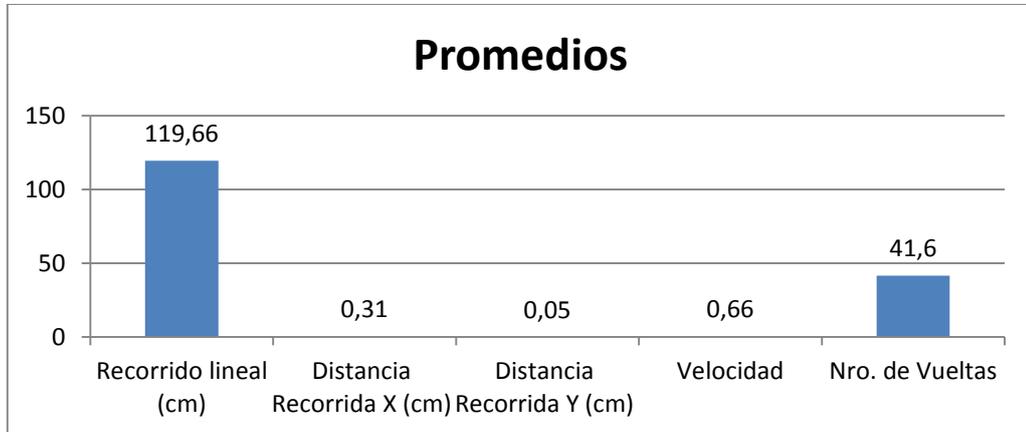


Figura 29-4 Prueba 15: Voltaje Omnidireccional 5 y Voltaje Convencional 3

Fuente: Autor

Análisis Estadístico:

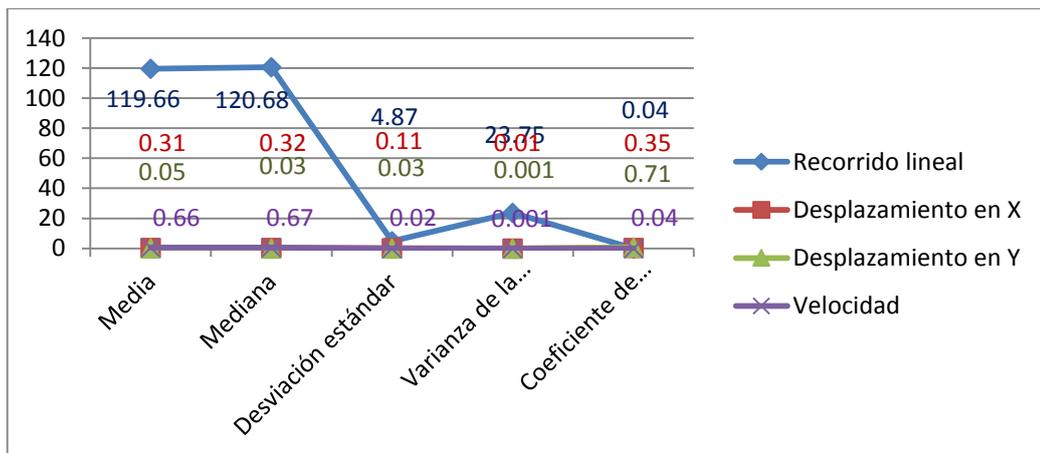


Figura 30-4 Resumen estadístico descriptivo. Prueba 15.

Fuente: Autor

Al aplicar un voltaje de 5 voltios en el motor de la rueda delantera y 5 voltios en el motor de las ruedas de atrás, la plataforma presenta los siguientes promedios: realiza 41.6 espirales tipo Helicoidales, recorriendo una distancia de 119.66 metros en un tiempo de 3 minutos, alcanzando una velocidad de 0.66 metros por segundo, mostrando los siguientes coeficientes de variación: 0.040727 en la variable distancia, 0.351617 en la variable desplazamiento en “X”, 0.712989 en la variable desplazamiento en “Y” y 0.040727 en la variable velocidad de la plataforma; lo que indica que los datos se encuentran agrupados hacia el valor medio calculado.

Análisis de Resultados.

Los resultados obtenidos en las pruebas permiten observar que la plataforma TORI, creada con la unión de dos ruedas convencionales y una rueda omnidireccional permite realizar desplazamientos en ambientes internos, sin obstáculos, cubriendo las siguientes trayectorias:

- *Trayectoria tipo Línea Recta:* Pruebas 1, 2 y 3, figura 31-4.



Figura 31-4: Trayectoria tipo línea Recta

Fuente: El Autor

Este caso se produce cuando se alimenta el motor de las ruedas posteriores con un valor de voltaje diferente de cero, al mismo tiempo que se mantiene el motor de la rueda Omnidireccional sin alimentación de voltaje.

La estructura física de la rueda omnidireccional permite que la plataforma realice un desplazamiento en líneas “rectas” con un ángulo de desviación máximo de 15,54 grados centígrados, mismo que aparece cuando se alimenta el motor posterior con un voltaje

mínimo y que disminuye a medida que se aumenta el voltaje de alimentación del motor, como se muestra en la figura 32-4.

Al ingresar las mismas condiciones de voltaje en el programa desarrollado en Matlab de obtiene el siguiente resultado:

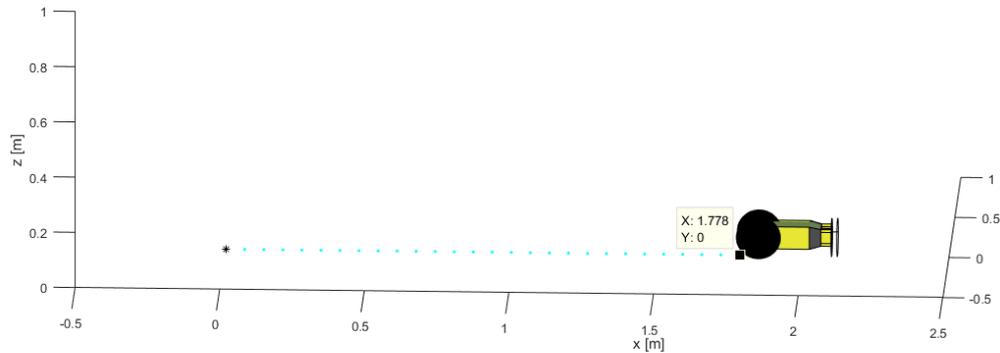


Figura 32-4: Simulación de Matlab de la trayectoria tipo línea Recta.

Fuente: El Autor

- *Trayectoria tipo Circunferencia:* Pruebas 4, 8 y 12, figura 33-4.



Figura 33-4: Trayectoria tipo Circunferencia

Fuente: El Autor

Este caso se produce cuando se alimenta el motor de la rueda Omnidireccional con un valor de voltaje diferente de cero al mismo tiempo que se mantiene el motor de las ruedas posteriores sin alimentación de voltaje. La plataforma realiza un desplazamiento

en forma de “circunferencias” con un diámetro promedio de 0,012 metros, y con un centro que se mantiene fijo, como se indica en la figura 34-4.

Con las mismas condiciones de voltaje en el programa desarrollado en Matlab de obtiene el siguiente resultado:

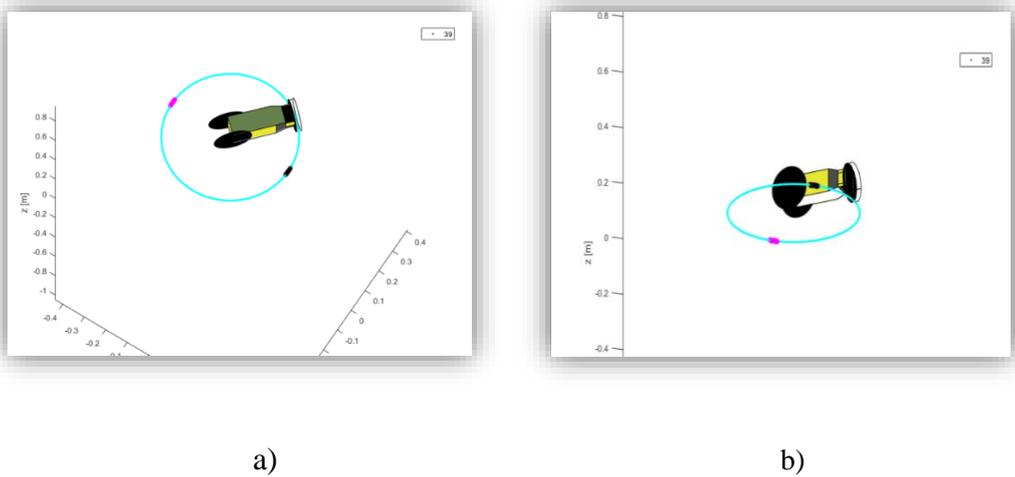


Figura 34-4 a) y b) Simulación de Matlab de la trayectoria tipo Circunferencia.

Fuente: El Autor

- *Tipo Espiral de tipo Helicoidales*: Pruebas 5, 6, 7, 9, 10, 11, 13, 14 y 15, figura 35-4.

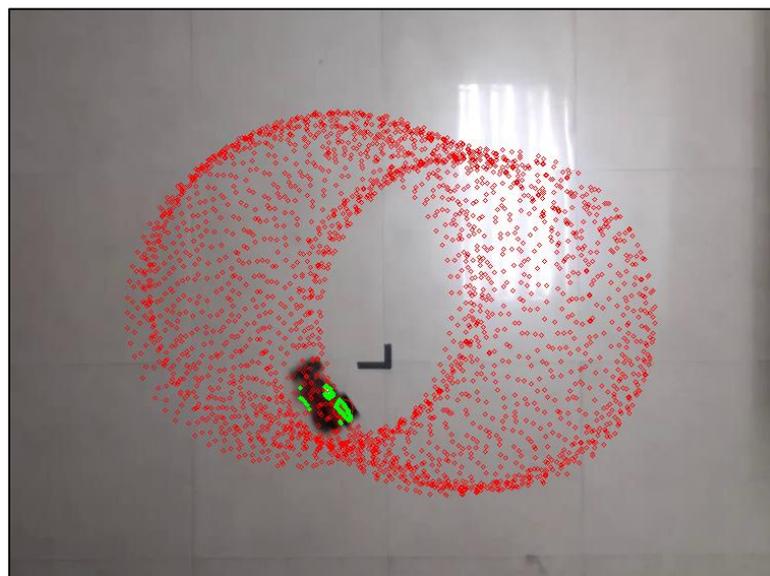
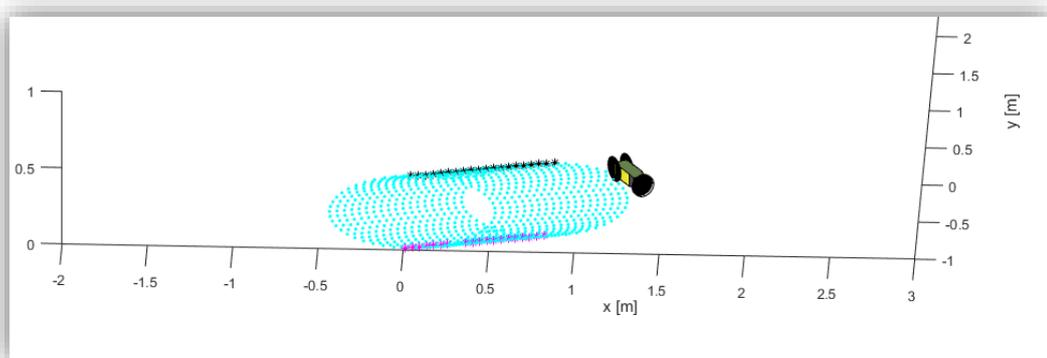


Figura 35-4 Espiral de tipo Helicoidal

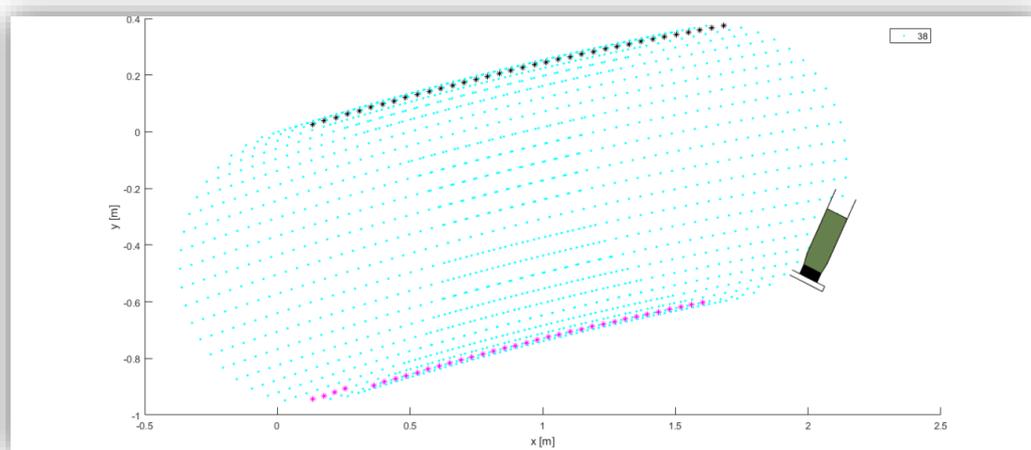
Fuente: El Autor

Este caso se produce cuando se alimentan los dos motores, tanto de las ruedas posteriores como de la rueda delantera con un valor de voltaje diferente de cero. La plataforma realiza un desplazamiento en forma de “*Espiral de tipo Helicoidal*” con un diámetro promedio de 2,27 metros, que es el máximo alcanzado y que se produce cuando se alimenta el motor de las ruedas posteriores con un valor de voltaje de 5 voltios, que es el máximo dado en las pruebas realizadas mientras que se aplica un voltaje de 2 voltios a la rueda omnidireccional, que es el mínimo aplicado a esa rueda. La trayectoria generada se puede observar en la Figura 36-4.

Al ingresar las mismas condiciones de voltaje en el programa desarrollado en Matlab de obtiene el siguiente resultado:



a)



b)

Figura 36-4 a) y b) Simulación de Matlab de la trayectoria tipo espiral tipo helicoides.

Fuente: El Autor

CONCLUSIONES.

- El diseño de las llantas planteado responde a un diseño nuevo en cuanto a la configuración de llantas en una plataforma, mismo que se ha evidenciado luego de una investigación bibliográfica sobre el tema.
- El modelo presentado e implementado mediante un programa de software describe el comportamiento de la trayectoria de la plataforma esperada, de acuerdo a los parámetros físicos de la plataforma, así como también de acuerdo a los voltajes ingresados a los motores de las llantas posteriores y delanteros del Tori, correspondientemente.
- El programa desarrollado en Matlab permite una simulación satisfactoria a través de las herramientas ROBOT DIMENSIÓN, que es la función de Matlab que permite crear la estructura física de la plataforma, y ROBOT PLOT 3D, que es la herramienta que desarrolla el comportamiento de la trayectoria de la plataforma, de acuerdo al modelo matemático desarrollado; obteniendo de esta manera los resultados esperados.
- La plataforma diseñada e implementada permite realizar exploración FULL COVERAGE en un ambiente controlado y sin obstáculos, ya que puede desplazarse en “línea recta”, realizar circunferencias, y también en forma de Espirales de tipo Helicoidales.
- El análisis estadístico realizado sobre los resultados obtenidos en las pruebas realizadas con la nueva configuración de llantas en la plataforma Tori, muestra un comportamiento similar en cada una, comprobando que el funcionamiento del Tori responde aceptablemente.
- La plataforma realiza trayectorias elípticas de tipo helicoides sin la necesidad de un controlador, realizando exploración full coverage, cubriendo un diámetro máximo de 2.27 m, por lo que esta configuración sería muy útil en reconocimiento de terreno para la detección de minas antipersonas por ejemplo, debido a que pasa por un mismo punto más de una vez.

- Como resultado de la Investigación al momento se está realizando el trámite de solicitud de patente de la configuración de llantas TORI como modelo de utilidad por ser pionero en cuanto a este tipo de configuración de llantas para plataformas móviles.
- Las pruebas de funcionamiento realizadas, con la plataforma diseñada, confirman la afirmación de la hipótesis planteada, indicando que es verdadera.

RECOMENDACIONES.

- Realizar investigaciones aplicadas a esta nueva configuración de Ruedas TORI, tales como planificación de trayectoria y Control de Trayectoria.
- Se recomienda el uso de una rueda omnidireccional delantera que disponga una mayor cantidad de rodillos que permitan realizar el desplazamiento de la plataforma con la menor cantidad de deslizamiento posible, disminuyendo el posible error, que se presenta por los destajes existentes entre cada rodillo de la rueda omnidireccional.
- Diseñar e implementar un Sistema de Control de Velocidad para las Ruedas en laso cerrado, el mismo que permita tener un control en tiempo real sobre las velocidades requeridas en la plataforma.
- Implementar un microcontrolador para el desarrollo de planificación de trayectorias, de manera que la plataforma pueda cubrir con las trayectorias que el usuario requiera.
- En caso de requerirse una adquisición de imagen durante el funcionamiento de la plataforma se recomienda usar una cámara fija, ya que debido a la configuración de la plataforma no es necesario usar una cámara que gire en su propio eje.

BIBLIOGRAFÍA

Adamowski, J., Simoes, G., & Gozman, F. (1990). Desarrollo de un robot móvil.

Alexander, J. C., & Maddocks, J. H. (1989). On the Kinematics of Wheeled Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research*, 8(5), 15-27.
<https://doi.org/10.1177/027836498900800502>

Arias, A. (2009). Utilizando flujo óptico a partir de imágenes panorámicas. Recuperado a partir de <http://www.bdigital.unal.edu.co/2470/1/71726659.2009.pdf>

Azcon, A. (2003, junio). Análisis y diseño del control de posición de un robot móvil con tracción diferencial. Recuperado a partir de <http://deeea.urv.cat/public/PROPOSTES/pub/pdf/333pub.pdf>

Barrientos, A., Peñin, L., Blaguer, C., & Aracil, R. (2014, octubre 28). Fundamentos de Robótica | 2da Edición | Antonio Barrientos, Luis Felipe Peñin, Carlos Balaguer, Rafael Aracil Santoja. Recuperado 17 de noviembre de 2016, a partir de <http://librosysolucionarios.net/fundamentos-de-robotica-2da-edicion-antonio-barrientos-luis-felipe-penin-carlos-balaguer-rafael-aracil-santoja/>

Baturone, A. (2001). *Robótica Manipuladores y robots móviles*. Barcelona: GyERSA.

Bolaños, D. (2011, agosto 1). Control de motores CC. Recuperado a partir de <http://www.bolanosdj.com.ar/MOTORES/CONTROLPWM.PDF>

Braunl, T. (2006). *Embedded Robotics - Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*. Recuperado a partir de <http://www.springer.com/la/book/9783540343196>

Campion, G., Bastin, G., & D'Andrea-Novell, B. (1993). Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. En *ResearchGate* (Vol. 12, pp. 462-469 vol.1). <https://doi.org/10.1109/ROBOT.1993.292023>

Canudas de Wit, C., Siciliano, B., & Bastín, G. (1996). *Theory of Robot Control*. Recuperado a partir de <http://www.springer.com/la/book/9781447115038>

Connell, J., & Viola, P. (1990). Cooperative Control of a Semi-Autonomous Mobile Robot.

Cox, I. (1991). Blanche—An experiment in guidance and navigation of an autonomous mobile Robot. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7, 193-204.

<https://doi.org/10.1109/70.75902>

Cuatitlán, E. (2015). Manual de prácticas de CAD utilizando el programa SOLIDWORKS 2014.

De Lope, J., Maravall, J., & Zato, J. (2013). Estrategias de Exploración para la Construcción Autónoma de Modelos Topológicos en Robots Móviles. Recuperado a partir de <http://www.dia.fi.upm.es/~jdllope/docs/delope99.pdf>

DeSouza, G. N., & Kak, A. C. (2002). Vision for mobile robot navigation: A survey. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 24(2), 237–267.

Doroftei, I., Grosu, V., & Spinu, V. (2007). Omnidirectional Mobile Robot – Design and Implementation. Recuperado a partir de <http://cdn.intechopen.com/pdfs-wm/465.pdf>

Escrivá, J. (2013). Control de velocidad de un motor DC mediante la utilización de un sensor magnético y microcontrolador. Recuperado a partir de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/28783/Control%20de%20velocidad%20de%20un%20motor%20DC%20mediante%20la%20utilizaci%C3%B3n%20de%20un%20sensor%20magn%C3%A9tico%20y%20microcontrol.pdf?sequence=1>

eXtreme Electronics - Best free Microcontroller Tutorials and Projects. (2015). Recuperado 28 de abril de 2017, a partir de <http://extremeelectronics.co.in/>

García, D. (2012). Modelado y simulación de un robot móvil autónomo omni-direccional. Recuperado a partir de <http://ri.uaq.mx/bitstream/123456789/1015/1/RI000255.pdf>

- Garcia, J. (2016). *Introduccion al solidworks rev02*. Ingeniería. Recuperado a partir de <https://es.slideshare.net/JesusGarcia68/introduccion-al-solidworks-rev02>
- Gracia, L. (2015). Modelado Cinemático y Control de Robots Móviles con Ruedas. Recuperado a partir de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/1840/tesisUPV2519.pdf>
- Granosik, G., & Borenstein, J. (2005). Integrated joint actuator for serpentine robots. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 10(5), 473-481. <https://doi.org/10.1109/TMECH.2005.856222>
- Guitierrez, M., & Silva, G. (2013, mayo 5). Control de vibraciones en estructuras tipo edificio usando actuadores piezoeléctricos y retroalimentación positiva de la aceleración. Recuperado a partir de <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/rt/prINTERfriendly/30733/45333>
- Kim, W., Yi, B.-J., & Lim, D. J. (2004). Kinematic modeling of mobile robots by transfer method of augmented generalized coordinates. *Journal of Field Robotics*, 21(6), 301-322. <https://doi.org/10.1002/rob.20015>
- MakeItFrom.com :: Material Properties Database. (2015). Recuperado a partir de <http://www.makeitfrom.com/>
- Muir, P. F., & Neuman, C. P. (1986). Kinematic modeling of wheeled mobile robots. Recuperado a partir de <http://repository.cmu.edu/robotics/583>
- Muñoz Martínez, V. ., Gil-Gómez, G., & García Cerezo, A. (2015). MODELADO CINEMATICO Y DINAMICO DE UN ROBOT MÓVIL OMNI-DIRECCIONAL. Recuperado a partir de <http://intranet.ceautomatica.es/old/actividades/jornadas/XXIV/documentos/ro/201.pdf>
- NatureWorks. (2016). Ingeo Biopolymer 3D850 Technical Data Sheet. Recuperado a partir de http://www.natureworkslc.com/~media/Files/NatureWorks/Technical-Documents/Technical-Data-Sheets/TechnicalDataSheet_3D850_monofilament_pdf.pdf?la=en

Oliveira, H. P., Sousa, A. J., Moreira, A. P., & Costa, P. J. (2008). Dynamical Models for Omnidirectional Robots with 3 and 4 Wheels. En *ResearchGate* (Vol. 1). Recuperado a partir de

https://www.researchgate.net/publication/256089847_Dynamical_Models_for_Omnidirectional_Robots_with_3_and_4_Wheels

Pioneer 3 - DX. (2011). Recuperado a partir de

<http://www.mobilerobots.com/ResearchRobots/PioneerP3DX.aspx>

Pérez, L., & Eraso, M. (2014). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT TERRESTRE QUE SIRVA DE PLATAFORMA PARA DESARROLLO DE INVESTIGACIONES EN EL ÁREA DE ROBÓTICA MÓVIL EN AMBIENTES ABIERTOS Y CERRADOS.

Plan Nacional del Buen vivir. (2013, 2017). Recuperado a partir de

<http://www.buenvivir.gob.ec/>

Pulido, J. (2012). Exploración y reconstrucción tridimensional de entornos mediante robots móviles. Recuperado 18 de noviembre de 2016, a partir de

https://www.academia.edu/23031195/Exploraci%C3%B3n_y_reconstrucci%C3%B3n_tridimensional_de_entornos_mediante_robots_m%C3%B3viles

Rajagopalan, R. (1997). A generic kinematic formulation for wheeled mobile robots. *Journal of Robotic Systems*, 14(2), 77-91. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4563\(199702\)14:2<77::AID-ROB3>3.0.CO;2-Q](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4563(199702)14:2<77::AID-ROB3>3.0.CO;2-Q)

Rajamani, R. (2012). *Vehicle Dynamics and Control* (Segunda).

Rojas, R., & Gloye, A. (2006). Holonomic Control of a robot with an omnidirectional drive.

Secchi, H. (2008). *Una Introducción a los Robots Móviles* (p. 86). Universidad de San Juan.

Recuperado a partir de

http://www.aadeca.org/pdf/CP_monografias/monografia_robot_movil.pdf

- Shin, D. ., & Park, K. . (2001). Velocity kinematic modeling for wheeled mobile robots. *Proc of the 2001 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, .
- Silva Ortigoza, R., García Sánchez, R., Barrientos Sotelo, R., Molina Vilchis, M. A., Hernández Guzmán, V. M., & Silva Ortigoza, G. (2010). Una panorámica de los robots móviles. *TELEMATIQUE*, 6(3), 1-14.
- Simulación de robot con Simulink. (2014, noviembre 5). Recuperado a partir de <https://es.mathworks.com/videos/simulation-of-collision-avoidance-for-mobile-robots-97765.html>
- Song, J.-B., & Byun, K.-S. (2006). Design and Control of an Omnidirectional Mobile Robot with Steerable Omnidirectional Wheels. <https://doi.org/10.5772/4723>
- Suárez, A., & Sánchez, A. (2015). Recuperado a partir de http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/8392/Tesis_Perfect.pdf?sequence=1
- Texas Instruments. (2016, enero). L293x Quadruple Half-H Drivers. Recuperado a partir de <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/l293.pdf>
- Todd, D. J. (1985). *Walking machines: an introduction to legged robots*. London: Kogan Page. Recuperado a partir de <https://catalog.hathitrust.org/Record/000654477>
- Una introducción a los Robots móviles. (2008). Recuperado a partir de http://www.aadeca.org/pdf/CP_monografias/monografia_robot_movil.pdf
- Wada, M., & Mori, S. (1996). Holonomic and Omnidirectional Vehicle with Conventional Tires. *International Conference on Robotics and Automation*.
- West, M., & Asada, H. (1992). Design of a Holonomic Omnidirectional Vehicle (p. 7). Presentado en International Conference on Robotics and Automation, France. Recuperado a partir de <http://ftp.math.fu-berlin.de/pub/Rojas/omniwheel/00220328.pdf>

ANEXOS

ANEXO A. PROGRAMA EN MATLAB PARA EL ANÁLISIS DE PRUEBAS REALIZADAS

```
%% PROGRAMA CONFIGURACIÓN TORI
%% AUTOR: Gladys Urquizo
%% SISTEMAS DE CONTROL Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

close all; clear; clear;
format long g; clc;
%% Lectura de datos
% cd 'E:\Documents\Practicas\robot moviles'
% load datos4.txt          %Lectura de Datos archivo TXT
% lon = length(datos4);    %Cantidad de datos almacenados
% en el archivo
% ruta_x = zeros(size(lon/2));    %Cantidad en X
% ruta_y = zeros(size(lon/2));    %Cantidad en Y
% for i=1:lon                %Secuencia FOR para dividir los
%   if mod(i,2) == 0        %-datos en dos vectores
%       ruta_y(i/2) = datos4(i);    % Vector de valores en Y
%   else
%       ruta_x(floor(i/2)+1) = datos4(i); %Vector de valores en X
%   end
% end
%% Valores iniciales
% load dato.mat            %Conjunto de datos ya separados
vuelta_fil = 0;           %Contador de vueltas datos filtrados
vuelta_sfil = 0;         %Contador de vueltas datos sin filtrar
con = 0;                 %Contador global
xf = medfilt1(ruta_x,5);  %Filtrado de datos de X
yf = medfilt1(ruta_y,5);  %Filtrado de datos de Y
Num_Datos = length(ruta_x); %Cantidad de posiciones
%% Primera Grafica - Posiciones en X e Y separadas
figure
subplot(2,1,1)           %Grafica de posiciones en X
plot(ruta_x,'Color',[0.1, 0.4, 0.7]); hold on
plot(xf,'-','Color',[0.7, 0.1, 0.4])
legend('Datos Originales','Datos Filtrados')
subplot(2,1,2)           %Grafica de posiciones en Y
```

```

plot(ruta_y,'Color',[0.4, 0.7, 0.1]); hold on
plot(yf,'--','Color',[0.1, 0.4, 0.7])
legend('Datos Originales','Datos Filtrados')
%% Segunda Grafica - Recorrido segun los datos originales
figure; hold on
for i=1:(Num_Datos-5) %Grafica con datos originales
    if (con < 1) && (ruta_y(i)<255) && (ruta_y(i)<ruta_y(i+1)) && ...
        (ruta_y(i)<ruta_y(i+2)) && (ruta_y(i)<ruta_y(i+3)) && ...
        (ruta_y(i)<ruta_y(i+4)) && (ruta_y(i)<ruta_y(i+5))
        plot(ruta_x(i),ruta_y(i),'*','Color',[0.4, 0, 0.3])
        vuelta_sfil = vuelta_sfil+1; %Contador de numero de vueltas
        p_misf(vuelta_sfil) = yf(i); %Vector de Puntos Minimios
        ymi(vuelta_sfil) = i; %Vector de posiciones de minimios
        con = 15;
    elseif (con < 1) && (ruta_y(i)>330) && (ruta_y(i)>ruta_y(i+1)) &&...
        (ruta_y(i)>ruta_y(i+2)) && (ruta_y(i)>ruta_y(i+3)) && ...
        (ruta_y(i)>ruta_y(i+4)) && (ruta_y(i)>ruta_y(i+5))
        plot(ruta_x(i),ruta_y(i),'*','Color',[0, 0.3, 0.4])
        p_masf(vuelta_sfil+1) = yf(i); %Vector de Puntos Maximios
        yma(vuelta_sfil+1) = i; %Vector de posiciones de maximios
        con = 18;
    else
        plot(ruta_x(i),ruta_y(i),'+','Color',[1, 0.3, 1])
        con = con-1; %Grafica de todos los demas puntos
    end
    pause(0.005)
end
%% Calculo de diametros con puntos de datos originales
dif_p_o = zeros(size(vuelta_sfil));
for i=1:vuelta_sfil
    dif_p_o(i) = p_masf(i) - p_misf(i); %Vector de diametros de cada vuelta
end
%% Tercera Grafica - Recorrido segun los datos filtrados
figure; hold on
for i=1:(Num_Datos-2) %Grafica con datos filtrados
    if (con < 1) && (yf(i)<255) && (yf(i)<yf(i+1)) && (yf(i)<yf(i+2))
        plot(xf(i),yf(i),'*','Color',[0.8, 0.3, 0])
        vuelta_fil = vuelta_fil+1; %Contador de vueltas
        p_min(vuelta_fil) = yf(i); %Vector de puntos minimios
        pmin(vuelta_fil) = i; %Vector de posiciones de minimios
    end
end

```

```

con = 15;
elseif (con < 1) && (yf(i)>320) && (yf(i)>yf(i+1)) && (yf(i)>yf(i+2))
    plot(xf(i),yf(i),'*','Color',[0.3, 0, 0.8])
    p_max(vuelta_fil+1) = yf(i); % Vector de puntos maximos
    pmax(vuelta_fil+1) = i; % Vector de posiciones de maximos
    con = 20;
else
    plot(xf(i),yf(i),'+','Color',[1, 1, 0.5])
    con = con-1; % Grafica de los demas puntos
end
pause(0.005)
end
%% Calculo de diametros con puntos de datos filtrados
dif_p_f = zeros(size(vuelta_fil));
for i=1:vuelta_fil
    dif_p_f(i) = p_max(i) - p_min(i); % Vector de diametros de cada vuelta
end
%% Diferencia entre los diametros con datos originales y filtrados
dif_p = zeros(size(vuelta_fil)); % Vector de diferencia de los
for i=1:vuelta_fil % -diametros de cada tratamiento
    dif_p(i) = dif_p_f(i) - dif_p_o(i);
end

```

ANEXO B. FUNCION DE MATLAB: Robot_Dimension

```
%% FUNCION ROBOT_DIMENSION
%% PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN NUEVO PROTOTIPO DE PLATAFORMA MÓVIL
JUNTO A SU MODELO MATEMÁTICO PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE
EXPLORACIÓN FULL COVERAGE

% ROBOT_DIMENSION carga los parámetros físicos del robot.
% Escala = escala que se usará para representar el robot. Los valores predeterminados están en Metros.
%%

function Robot_Dimension(scale)

if nargin < 1
    scale = 2;
end

et = 1.4;    % Factor de error para estimaciones de parámetros

Robot.theta = [0.26038*et 0.25095*et -0.00049969*et 0.99646*et 0.002629*et 1.0768*et];
Robot.theta_est = [0.26038 0.25095 -0.00049969 0.99646 0.002629 1.0768];
%Robot.theta_est = Robot.theta; % Exact parameters

% Distancia entre el eje virtual y el punto de interés
Robot.a = 0.0;

% Límites de aceleración y velocidad para el robot Pioneer
Robot.up_max = 0.3; % [m/s^2]
Robot.wp_max = 1.745; % [rad/s^2]
Robot.u_max = 0.75; % [m/s]
Robot.w_max = 1.745; % [rad/s]

% Período de muestreo de los servos y sensores del robot.
Robot.Ta = 0.1;    % [s]

%% Dimensiones físicas del robot
%-----
```

```
Robot.Ci = [0.108 0.108 0.088 0 0 0.088;  
           -0.018 0.018 0.021 0.021 -0.021 -0.021;  
           0.023 0.023 0.018 0.018 0.018 0.018]*scale;  
% chasis inferior angosto x,y,z antihorario inicia delante rueda derecha  
%-----
```

```
Robot.Fi = [0.108 0.126 0.126 0.108;  
           -0.018 -0.018 0.018 0.018;  
           0.028 0.028 0.028 0.028]*scale;  
% chasis inferior ancho x,y,z antihorario inicia delante rueda derecha  
%-----
```

```
Robot.Cs = [0.108 0.108 0.088 0 0 0.088;  
           -0.018 0.018 0.021 0.021 -0.021 -0.021;  
           0.053 0.053 0.058 0.058 0.058 0.058]*scale;  
% chasis superior angosto x,y,z antihorario inicia delante rueda derecha  
%-----
```

```
Robot.Fs = [0.108 0.126 0.126 0.108;  
           -0.018 -0.018 0.018 0.018;  
           0.048 0.048 0.048 0.048]*scale;  
% chasis superior ancho x,y,z antihorario inicia delante rueda derecha
```

```
%% Caras del Robot  
%-----  
%PARTE DELANTERA del vehculo izq sentido horario
```

```
Robot.Fa1 = [0.108 0.108 0.108 0.108;  
            -0.018 0.018 0.018 -0.018;  
            0.053 0.053 0.023 0.023]*scale;  
%-----  
% vdfz izquierda del acople a rueda omnidireccional
```

```
Robot.Fa2 = [0.126 0.108 0.108 0.126;  
            0.018 0.018 0.018 0.018;  
            0.053 0.053 0.023 0.023]*scale;  
%-----  
% vdfz derecha del acople a rueda omnidireccional
```

```
Robot.Fa3 = [0.108 0.088 0.088 0.108;
```

```

0.018 0.021 0.021 0.018;
0.053 0.058 0.018 0.023]*scale;
%-----
% VDFR DERECHA lateral al motor servo
Robot.Fa4 = [0.088 0 0 0.088;
0.021 0.021 0.021 0.021;
0.058 0.058 0.018 0.018]*scale;
%-----
% VDFR IZQUIERDA lateral al motor servo
Robot.Fa5 = [0 0 0 0;
0.021 -0.021 -0.021 0.021;
0.058 0.058 0.018 0.018]*scale;
%-----
% VDFR DERECHA lateral lado angosto
Robot.Fa6 = [0.088 0 0 0.088;
-0.021 -0.021 -0.021 -0.021;
0.058 0.058 0.018 0.018]*scale;
%-----
% VDFR IZQUIERDA lateral lado angosto
Robot.Fa7 = [0.108 0.088 0.088 0.108;
-0.018 -0.021 -0.021 -0.018;
0.053 0.058 0.018 0.023]*scale;
%-----
% VDFR ATRAS
Robot.Fa8 = [0.126 0.108 0.108 0.126;
-0.018 -0.018 -0.018 -0.018;
0.053 0.053 0.023 0.023]*scale;
% VDFR izq omni

%% Ruedas de Traseras Convencionales
Robot.N = 60; %NUMERO DE LADOS DE LA RUEDA
Robot.xyroda = 0.038*cos(0:2*pi/Robot.N:2*pi);
Robot.zroda = 0.038*(1 + sin(0:2*pi/Robot.N:2*pi));

%% EL 1+ ES PARA LA POSICION EN EL EJE Z de la rueda respecto o hacia arriba del plano
Robot.Rodae = [Robot.xyroda;
+0.0210.*ones(size(Robot.xyroda));
Robot.zroda]*scale;
%-----
% x,y,z de la rueda con respecto a la plataforma

```

```
Robot.Rodae2 = [Robot.xyroda;  
-0.0210.*ones(size(Robot.xyroda));  
Robot.zroda]*scale;
```

```
%% Rueda de adelante OMNI
```

```
Robot.N = 14; %NUMERO DE LADOS DE LA RUEDA
```

```
Robot.xyroda = 0.034*cos(0:2*pi/Robot.N:2*pi);
```

```
%-----
```

```
% EL 1+ ES PARA LA POSICION de la rueda EN EL EJE Z de la rueda respecto o hacia arriba del  
plano
```

```
Robot.zroda = 0.034*(1 + sin(0:2*pi/Robot.N:2*pi));
```

ANEXO C. FUNCIÓN DE MATLAB: Robot_PLOT 3D

```
%% FUNCIÓN ROBOT_PLOT_3D
%% PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN NUEVO PROTOTIPO DE PLATAFORMA MÓVIL
JUNTO
%% A SU MODELO MATEMÁTICO PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE EXPLORACIÓN
FULL COVERAGE

% ROBOT_DIMENSION carga los parámetros físicos del robot.
% Escala = escala que se usará para representar el robot. Los valores predeterminados están en Metros.
%%
function P3DX = Robot_Plot_3D(x,y,phi,color)

% ROBOT_PLOT_3D dibuja el robot "Pioneer" en el sistema de referencia con la
% ubicación de los parámetros de entrada del robot. Esta función se
% utiliza durante la simulación para mostrar el comportamiento del
% robot en el espacio de trabajo
% P3DX = Robot_Plot_3D(x,y,phi,color)
%
% x,y,phi = determinan la posición del robot en el sistema global
% x es la ubicación del robot en el eje x del sistema global
% y es la ubicación del robot en el eje y del sistema global
% phi es la orientación del robot en el sistema global
% color = color used to represent the robot. Default: 'b' or [0 0 1].

global Robot
if nargin < 4
    color = 'y';
end

%Matriz de Rotación, sirve para cambiar las coordenadas de los ejes x, y
% cuando phi ha sido modificado
Rot = [cos(phi) -sin(phi) 0;
       sin(phi) cos(phi) 0;
       0 0 1]; %TODO NUEVOS ANGULOS

Cir = Rot*Robot.Ci; %dibuja todo excepto poligono azul
Fir = Rot*Robot.Fi; %dibuja TODO
```

```

Csr = Rot*Robot.Cs; %techo sin negro +ruedas+laterales y no mov
Fsr = Rot*Robot.Fs; %parte negra del techo +ruedas+laterales y no mov

Fa1r = Rot*Robot.Fa1; % parte delantera
Fa2r = Rot*Robot.Fa2; % vdfdr derecha de la omni
Fa3r = Rot*Robot.Fa3; % vdfdr derecha de la omni pasando uno
Fa4r = Rot*Robot.Fa4; % vdfdr derecha de la rueda normal
Fa5r = Rot*Robot.Fa5; % parte trasera
Fa6r = Rot*Robot.Fa6; % vdfdr izq de la rueda normal
Fa7r = Rot*Robot.Fa7; % sobre rueda derecha
Fa8r = Rot*Robot.Fa8; % lateral delante rueda derecha

Rodadr = Rot*Robot.Rodad; % dibuja las ruedas del robot
Rodaer = Rot*Robot.Rodae; % vdfdr atras izquierda
Rodaer2 = Rot*Robot.Rodae2; % vdfdr atras derecha

% parte inferior servo negro
P3DX(1) = patch(Fir(1,:) +x, Fir(2,:) +y, Fir(3,:), [0 0 0]);
% parte inferior suelo chasis
P3DX(2) = patch(Cir(1,:) +x, Cir(2,:) +y, Cir(3,:), [1 1 1]);
% parte superior servo negro
P3DX(3) = patch(Fsr(1,:) +x, Fsr(2,:) +y, Fsr(3,:), [0 0 0]);
% parte superior techo chasis
P3DX(4) = patch(Csr(1,:) +x, Csr(2,:) +y, Csr(3,:), [0.4 0.5 0.3]);
% parte delantera
P3DX(5) = patch(Fa1r(1:)+x, Fa1r(2:)+y, Fa1r(3,:), [0.3 0.3 0.3]);
% vdfdr derecha de la omni
P3DX(6) = patch(Fa2r(1:)+x, Fa2r(2:)+y, Fa2r(3,:), [0.9 0.9 0.2]);
% vdfdr derecha de la omni pasando uno LATERAL
P3DX(7) = patch(Fa3r(1:)+x, Fa3r(2:)+y, Fa3r(3,:), [0.3 0.3 0.3]);
% vdfdr derecha de la rueda normal-
P3DX(8) = patch(Fa4r(1:)+x, Fa4r(2:)+y, Fa4r(3,:), [0.9 0.9 0.2]);
% parte trasera
P3DX(9) = patch(Fa5r(1:)+x, Fa5r(2:)+y, Fa5r(3,:), [0.9 0.9 0.2]);
% vdfdr izq de la rueda normal
P3DX(10) = patch(Fa6r(1:)+x, Fa6r(2:)+y, Fa6r(3,:), [0.9 0.9 0.2]);
% vdfdr izq de la omni pasando uno
P3DX(11) = patch(Fa7r(1:)+x, Fa7r(2:)+y, Fa7r(3,:), [0.3 0.3 0.3]);
% vdfdr izquierda de la omni
P3DX(12) = patch(Fa8r(1:)+x, Fa8r(2:)+y, Fa8r(3,:), [0.9 0.9 0.2]);

```

```
% rueda omnidirecc
P3DX(13) = patch(Rodadr(1,:)+x,Rodadr(2,:)+y,Rodadr(3,:),[0 0 0]);
% rueda normal atras izq vdfv
P3DX(14) = patch(Rodaer(1,:)+x,Rodaer(2,:)+y,Rodaer(3,:),[0 0 0]);
% rueda normal atras derecha
P3DX(15) = patch(Rodaer2(1,:)+x,Rodaer2(2,:)+y,Rodaer2(3,:),[0 0 0]);
xlabel('x [m]'); ylabel('y [m]'); zlabel('z [m]');
```

ANEXO D. SIMULACIÓN DE TRAYECTORIA DEL ROBOT EN MATLAB

%PROGRAMA LINEAS RECTAS Y TRAYECTORIAS TIPO ELICOIDAL

%% PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN NUEVO PROTOTIPO DE PLATAFORMA MÓVIL
JUNTO A SU MODELO MATEMÁTICO PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE
EXPLORACIÓN FULL COVERAGE

clear; close all; clc; format long g

ts = 0.1; %Tiempo de muestreo acorde a los datos obtenidos

tfin = 180; %Tiempo de simulación en segundos

t = [0:ts:tfin]';

%% *****

% ***** CONDICIONES INICIALES DEL MÓVIL *****

% *****

% a) Variables que almacenaran datos

x = zeros(size(t)); %Posición en el eje x de la plataforma móvil EN METROS

y = zeros(size(t)); %Posición en el eje y de la plataforma móvil EN METROS

phi = zeros(size(t)); % Dirección del robot EN RADIANESII

gra = 0; % Direccion siguiente en grados

p_min_y = zeros(size(t)); % Vector de posiciones minimas en Y

p_min_x = zeros(size(t)); % Vector de posiciones maximas en X

p_max_y = zeros(size(t)); % Vector de posiciones minimas en Y

p_max_x = zeros(size(t)); % Vector de posiciones maximas en X

% b) Valores iniciales

lon = 0.135; % Distancia entre eje trasero y llanta frontal

u1 = 0.658417051091992; % Velocidad lineal del robot en METROS/s

u2 = -0.113461296296296; % Velocidad lineal de llanta omni en METROS/s

w = u2/lon; % Velocidad angular del robot inicial en RAD/s

ban = 0; % Contador bandera

num_vuelta = 0; % Contador de número de vueltas

n_vuelta = 0; % Contador de numero de vueltas en la grafica

%% *****

% ***** CONTROLADOR*****

% *****

```

for k=1:length(t)
% Cinemática del robot móvil
xp = u1*cos(phi(k));    % Posicion en actual de X
yp = u1*sin(phi(k));    % Posicion en actual de Y

phi(k+1) = w*ts +phi(k); % euler-Direccion siguiente
x(k+1) = xp*ts+x(k);    % euler-Posicion siguiente en X
y(k+1) = yp*ts+y(k);    % euler-Posicion siguiente en Y
% Acciones de control
gra = phi(k+1)*(180/pi); % Direccion siguiente en grados

if (mod(gra,360) < 10) && (ban>10) % Correccion por vuelta del desvio
    phi(k+1) = ((w*ts)/3) + phi(k); % generado por la irregularidad de
    ban = 0; %la rueda omnidireccional
else
    ban = ban + 1;
end
end
% Contador de vueltas
for k=2:length(t)
if (y(k)<y(k+1)) && (y(k)<y(k-1))
    num_vuelta = num_vuelta+1; %Contador de numero de vueltas
    p_min_y(num_vuelta) = y(k); % Vector de Puntos Minimios
    p_min_x(num_vuelta) = x(k); % Vector de Puntos Minimios
elseif (y(k)>y(k+1)) && (y(k)>y(k-1))
    p_max_y(num_vuelta) = y(k); % Vector de Puntos Maximios
    p_max_x(num_vuelta) = x(k); % Vector de Puntos Maximios
end
end
% Calculo del recorrido
dif_p_ox = zeros(num_vuelta-1,1); % Vector de diametros en X de cada vuelta
dif_p_oy = zeros(num_vuelta-1,1); % Vector de diametros en Y de cada vuelta
dif_p_o = zeros(num_vuelta-1,1);% Vector de diametros totales de cada vuelta
for i=1:num_vuelta
    dif_p_ox(i) = abs(p_max_x(i) - p_min_x(i));
    dif_p_oy(i) = abs(p_max_y(i) - p_min_y(i));
    dif_p_o(i) = sqrt((dif_p_ox(i)^2)+(dif_p_oy(i)^2));
end
dist_p_y = zeros(num_vuelta-1,1); % Vector de distancias entre puntos Y

```

```

dist_p_x = zeros(num_vuelta-1,1); % Vector de distancias entre puntos X
for i=2:num_vuelta
    dist_p_y(i) = abs(p_max_y(i) - p_max_y(i-1));
    dist_p_x(i) = abs(p_max_x(i) - p_max_x(i-1));
end

perimetro = zeros(num_vuelta-1,1); % Perimetro de cada vuelta
for i=1:num_vuelta
    perimetro(i) = dif_p_o(i) * pi;
end

dist_reco = sum(perimetro); % Recorrido lineal total por vuelta

fprintf('Se han dado %d vueltas en total.\n',num_vuelta);
fprintf('Se ha recorrido %d metros en total.\n',dist_reco);

%% *****
%% *****ANIMACIÓN*****
%% *****

paso = 1;
fig = figure;
set(fig,'position',[10 60 980 600]); axis equal; cameratoolbar
Robot_Dimension

H1 = Robot_Plot_3D(x(1),y(1),phi(1)); hold on % Figura de Robot
H2 = plot(x(1),y(1),'k*'); % Trayectoria de recorrido

view(0,90); axis([-2 2 -3 1 0 5]) % Visualizacion de la grafica

for nn=2:paso:length(t)
    drawnow % Comando para realizar las graficas
    delete(H1) % Borrado de la figura del robot
    H1 = Robot_Plot_3D(x(nn),y(nn),phi(nn)); hold on
    if (y(nn)<y(nn+1)) && (y(nn)<y(nn-1)) % Punto maximo
        H2 = plot(x(nn),y(nn),'m*');
    elseif (y(nn)>y(nn+1)) && (y(nn)>y(nn-1)) % Punto minimo
        H2 = plot(x(nn),y(nn),'k*');
    end
    n_vuelta = n_vuelta + 1; % Contador de vueltas para la grafica
    num_v = int2str(n_vuelta);
    legend(num_v)
end

```

```

else                                % Resto de puntos
    H2 = plot(x(nn),y(nn),'c. ');    % Trayectoria que hace
end
end

%PROGRAMA CIRCUNFERENCIAS EN SU PROPIO EJE

%% PRESENTACIÓN Y VALIDACIÓN DE UN NUEVO PROTOTIPO DE PLATAFORMA MÓVIL
% JUNTO A SU MODELO MATEMÁTICO PARA LA REALIZACIÓN DE TAREAS DE
EXPLORACIÓN
% FULL COVERAGE

clear; close all; clc; format long g
ts = 0.1;        %Tiempo de muestreo acorde a los datos obtenidos
tfin = 180;      %Tiempo de simulación en segundos
t = [0:ts:tfin]';

%% *****
%% ***** CONDICIONES INICIALES DEL MÓVIL *****
%% *****

% a) Variables que almacenaran datos
x = zeros(size(t)); %Posición en el eje x de la plataforma móvil EN METROS
y = zeros(size(t)); %Posición en el eje y de la plataforma móvil EN METROS

x_r = zeros(size(t)); %Posición en el eje x de la rueda omni EN METROS
y_r = zeros(size(t)); %Posición en el eje y de la rueda omni EN METROS

phi = zeros(size(t)); %Direcciones del robot EN RADIANES

p_min_y = zeros(size(t)); % Vector de posiciones minimas en Y
p_min_x = zeros(size(t)); % Vector de posiciones maximas en X
p_max_y = zeros(size(t)); % Vector de posiciones minimas en Y
p_max_x = zeros(size(t)); % Vector de posiciones maximas en X

%% b) Valores iniciales
lon = 0.135;    % Distancia entre eje trasero y llanta frontal

u1 = 0;        % Velocidad lineal atras del robot en METROS/s
u2 = -0.082144259; % Velocidad lineal de llanta omni en METROS/s

```

```

w = u2/lon; % Velocidad angular del robot inicial en RAD/s

ban = 0; % Contador bandera
num_vuelta = 0; % Contador de número de vueltas
n_vuelta = 0; % Contador de numero de vueltas en la grafica
*****
% ***** CONTROLADOR *****
% *****
% Cinemática del robot móvil
for k=1:length(t)
    xp = lon*cos(phi(k)); % Posicion actual de X
    yp = lon*sin(phi(k)); % Posicion actual de Y

    phi(k+1) = w*ts + phi(k); % euler - Direccion siguiente
    x_r(k+1) = xp+x(k); % euler - Posicion siguiente de X
    y_r(k+1) = yp+y(k); % euler - Posicion siguiente de Y
end
% Contador de vueltas
for k=1:length(t)
    if (y_r(k)<y_r(k+1)) && (y_r(k)<y_r(k-1))
        num_vuelta = num_vuelta+1; %Contador de numero de vueltas
        p_min_y(num_vuelta) = lon*sin(phi(k)); % Vector de Puntos Minimios y
        p_min_x(num_vuelta) = lon*cos(phi(k)); % Vector de Puntos Minimios x
    elseif (y_r(k)>y_r(k+1)) && (y_r(k)>y_r(k-1))
        p_max_y(num_vuelta) = lon*sin(phi(k)); % Vector de Puntos Maximios
        p_max_x(num_vuelta) = lon*cos(phi(k)); % Vector de Puntos Maximios
    end
end
% Calculo del recorrido
dif_p_ox = zeros(num_vuelta-1,1); % Vector de diametros en X de cada vuelta
dif_p_oy = zeros(num_vuelta-1,1); % Vector de diametros en Y de cada vuelta
dif_p_o = zeros(num_vuelta-1,1);% Vector de diametros totales de cada vuelta
for i=1:num_vuelta
    dif_p_ox(i) = abs(p_max_x(i) - p_min_x(i));
    dif_p_oy(i) = abs(p_max_y(i) - p_min_y(i));
    dif_p_o(i) = sqrt((dif_p_ox(i)^2)+(dif_p_oy(i)^2));
end

dist_p_y = zeros(num_vuelta-1,1); % Vector de distancias entre puntos Y
dist_p_x = zeros(num_vuelta-1,1); % Vector de distancias entre puntos X

```

```

for i=2:num_vuelta
    dist_p_y(i) = abs(p_max_y(i) - p_max_y(i-1));
    dist_p_x(i) = abs(p_max_x(i) - p_max_x(i-1));
end

perimetro = zeros(num_vuelta-1,1); %Perimetro de cada vuelta
for i=1:num_vuelta
    perimetro(i) = dif_p_o(i) * pi;
end
dist_reco = sum(perimetro); %Recorrido lineal total por vuelta

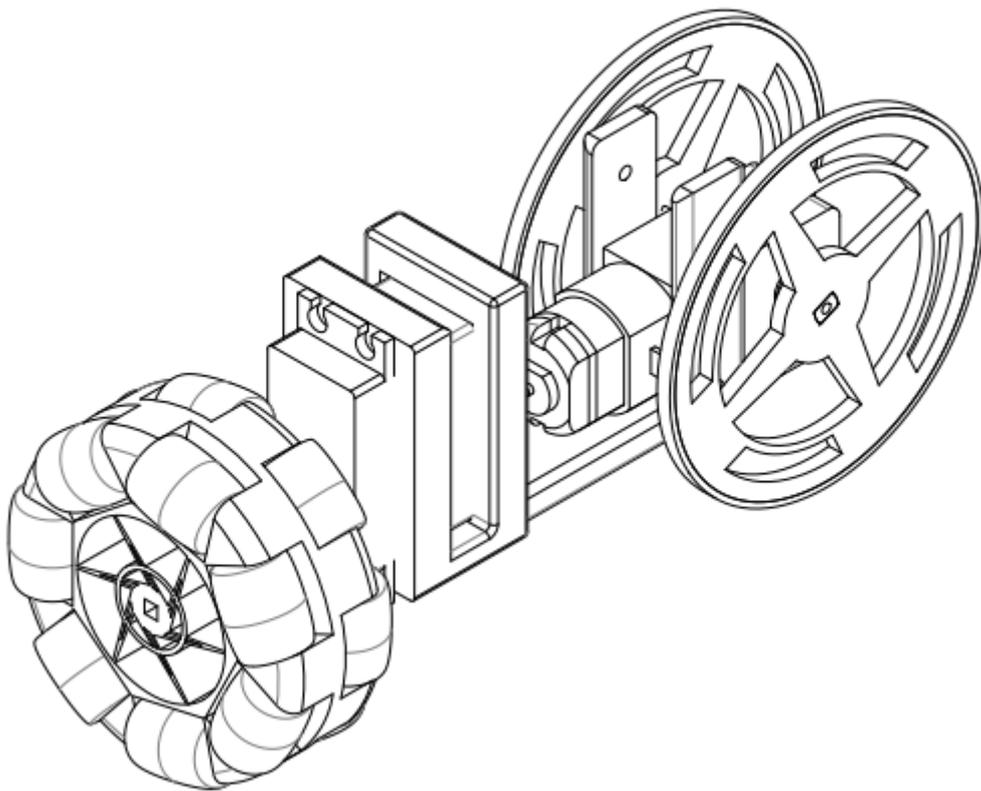
fprintf('Se han dado %d vueltas en total.\n',num_vuelta);
fprintf('Se ha recorrido %d metros en total.\n',dist_reco);

*****
% *****ANIMACIÓN*****
% *****
paso = 1;
fig = figure;
set(fig,'position',[10 60 980 600]); axis equal; cameratoolbar
Robot_Dimension

H1 = Robot_Plot_3D(x(1),y(1),phi(1)); hold on % Figura de Robot
H2 = plot(x_r(1),y_r(1),'k'); % Trayectoria de recorrido
view(0,90); axis([-5 .5 -5 .5 -1 1]) % Visualizacion de la grafica
for nn=2:paso:length(t)
    drawnow % Comando para realizar las graficas
    delete(H1); % Borrado de la figura del robot
    H1 = Robot_Plot_3D(x(nn),y(nn),phi(nn)); hold on
    if (x_r(nn)<x_r(nn+1)) && (x_r(nn)<x_r(nn-1)) % Punto maximo
        H2 = plot(x_r(nn),y_r(nn),'m*');
    elseif (x_r(nn)>x_r(nn+1)) && (x_r(nn)>x_r(nn-1)) % Punto minimo
        H2 = plot(x_r(nn),y_r(nn),'k*');
    end
    n_vuelta = n_vuelta + 1; % Contador de vueltas para la grafica
    num_v = int2str(n_vuelta);
    legend(num_v)
else % Resto de puntos
    H2 = plot(x_r(nn),y_r(nn),'c'); % Trayectoria que hace
end
end
end

```

ANEXO E. PLANO EN SOLID WORKS



ANEXO F. CUADRO DE COSTOS:

Materiales y Equipos			
Cantidad	Detalle	P. Unitario	P. Total
2	Rueda Omnidireccional 2.7"	24,29	24,29
2	Servomotor mg 995 Torque 15 Kg.	15	30
1	Pasta para soldar	4	4
1	Estaño	5	5
1	Baquelita	2,4	2,4
1	Batería Lipo 7.4 Vcc. de 1200 mah	13	13
1	ATTINY 85	5	5
Costos Generales			
Cantidad	Detalle	P. Unitario	P. Total
1	Impresión 3D	40	40
TOTAL			123.69