



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

**POSGRADO EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**MODELADO Y SIMULACIÓN DE LAS ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE  
UN ROBOT AGRICOLA TIPO SKID STEER**

**Que como requisito parcial  
para obtener el grado de:**

**DR. EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

**Presenta:**

**LUIS GERARDO RUIZ GONZÁLEZ**

**Bajo la supervisión de: DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ**

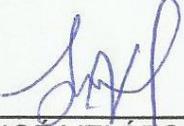


Chapingo, Estado de México, Diciembre de 2020.

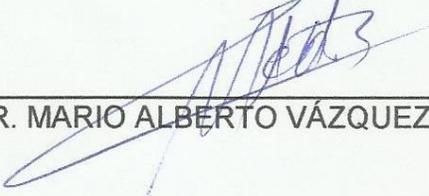


Tesis realizada por **LUIS GERARDO RUIZ GONZÁLEZ** bajo la supervisión del Comité Asesor indicado, aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DR. EN INGENIERÍA AGRÍCOLA Y USO INTEGRAL DEL AGUA**

DIRECTOR:   
DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

ASESOR:   
DR. AGUSTÍN RUIZ GARCÍA

ASESOR:   
DR. MARIO ALBERTO VÁZQUEZ PEÑA

# CONTENIDO

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
1.1. Referencias .....	20
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	22
2.1. ¿Qué es la robótica? .....	22
2.2. Robots móviles. ....	22
2.3. Tipos de robots móviles.....	23
2.3.1. Vehículos guiados automáticamente.....	24
2.3.2. Robots de servicio.....	24
2.3.3. Robots sociales.....	24
2.3.4. Robots de campo.....	24
2.4. Capas de autonomía.....	25
2.5. Robots holonómicos y no holonómicos.....	26
2.6. Historia de la robótica.....	27
2.7. Referencias .....	32
3. UN ACERCAMIENTO DE LA ROBÓTICA EN LA AGRICULTURA .....	35
3.1. Resumen .....	35
3.2. Abstract .....	35
3.3. Introducción .....	36
3.4. Materiales y métodos.....	37
3.5. Resultados y discusión .....	38
3.5.1. Visión tecnológica.....	38
3.5.2. Plataformas robóticas.....	39
3.5.3. Mecatrónica y electrónica.....	39
3.5.4. Locomoción.....	40
3.5.5. Manipuladores.....	41
3.5.6. Censado y percepción.....	41

3.5.7. Localización y mapeo.....	41
3.5.8. Monitoreo de cultivos.....	43
3.5.9. Visión robótica.....	44
3.5.10. Planificación y coordinación.....	45
3.5.11. Manipulación.....	46
3.5.12. Aprendizaje y adaptación.....	47
3.5.13. Conclusiones.....	47
3.5.14. Referencias.....	48
<b>4. INSTRUMENTACIÓN Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y GEOMÉTRICOS DE UN ROBOT AGRÍCOLA.....</b>	<b>51</b>
4.1. Resumen.....	51
4.2. Abstract.....	52
4.3. Introducción.....	52
4.3.1. Odometría.....	53
4.3.2. Encoder.....	54
4.3.3. Encoders absolutos.....	55
4.3.4. Encoders lineales.....	55
4.3.5. Arduino Mega 2560.....	56
4.3.6. Módulo microSD.....	56
4.3.7. Fricción.....	57
4.4. Materiales y métodos.....	59
4.5. Resultados y discusión.....	65
4.6. Referencias.....	72
<b>5. MODELO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DEL ROBOT VOLTAN TIPO SKID STEER.....</b>	<b>74</b>
5.1. Resumen.....	74
5.2. Introducción.....	75
5.2.1. Modelado de robots.....	75
5.2.2. Introducción a los robots skid steer.....	79

5.2.3. Modelo matemático del robot tipo skid steer. ....	80
5.2.4. Cinemática de los vehículos tipo skid steer. ....	84
5.2.5. Fuerzas y momentos de las llantas. ....	85
5.2.6. Materiales y métodos .....	88
5.2.7. Resultados y conclusiones .....	92
5.2.8. Referencias .....	96

## LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Velocidades medidas con encoders a diferente valor de PWM. ....	65
Cuadro 2. Distancia recorrida y ángulo de entrada y salida medidos a cada PWM. .....	66
Cuadro 3. Distancia recorrida del robot a diferentes PWM. ....	68
Cuadro 4. parámetros físicos y geométricos del robot Voltan.....	71
Cuadro 5. Coeficientes promedio de adhesión al suelo. (Fuente: Taborek, 1957). .....	87

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Principios de funcionamiento de vehículos skid steer (Fuente: Wong 2001, modificado por autor 2020). .....	18
Figura 2. El sistema móvil completo se puede describir en términos de tres bucles anidados: percibir, pensar y actuar (Fuente: Kelly 2013, modificado por autor 2019).....	25
Figura 3. Diagrama eléctrico interno del optoacoplador.....	55
Figura 4. Principio de funcionamiento de encoder para determinar distancias.	56
Figura 5. Arduino ATMEGA 2560 (Fuente: autor 2018).....	56
Figura 6. Módulo microSD (Fuente: autor 2020).....	57
Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del rozamiento estático.....	57
Figura 8. Diagrama de cuerpo libre del rozamiento dinámico.....	58
Figura 9. Diagrama de conexión del módulo microSD a Arduino mega (Fuente: autor 2019).....	60
Figura 10. Encoders acoplados a las ruedas del robot Voltan (Fuente: autor 2019).....	60
Figura 11. Medición de la masa de las ruedas del robot (Fuente: autor 2018).	62
Figura 12. Plano X-Z para determinar el centro de gravedad del robot en dirección longitudinal (Fuente: autor 2018). .....	62
Figura 13. Plano Y-Z para determinar el centro de gravedad del robot en dirección lateral (Fuente: autor 2018). .....	63
Figura 14. Medición de la fuerza de fricción (Fuente: autor 2020).....	64
Figura 15. Medición de la fuerza de resistencia a la rodadura (Fuente: autor 2020).....	64
Figura 16. Medición de la fuerza de resistencia lateral (Fuente: autor 2020). ..	65
Figura 17. Error de orientación a un valor de 180 PWM (Fuente: autor 2020).	67
Figura 18. Error de orientación a un valor de 200 PWM (Fuente: autor 2020).	67

Figura 19. Error de orientación a un valor de 220 PWM (Fuente: autor 2020).	68
Figura 20. Radio de giro del robot medido experimentalmente (Fuente: autor 2020).....	69
Figura 21. Distribución de las masas de las ruedas del robot (Fuente: autor 2020).	70
Figura 22. Robot tipo skid steer Voltan con sensores (Fuente: autor 2017). ....	71
Figura 23. Esquema general de un robot móvil (Fuente: Guerra 2016, modificado por autor 2019).	76
Figura 24. Robot skid steer Voltan (Fuente: autor 2019).	79
Figura 25. Diagrama de cuerpo libre del robot tipo skid steer Voltan. (Fuente: Wong 2001; modificado por autor 2017).....	82
Figura 26. Sistema de coordenadas de la llanta, (Fuente: Wong 2001, modificado por autor 2019).	86
Figura 27. Velocidad lineal simulada y medida físicamente del robot a diferentes valores de PWM durante 10 segundos. ....	92
Figura 28. Distancia recorrida simulada del robot skid steer a diferentes valores de PWM durante 10 segundos.....	93
Figura 29. Velocidad lineal simulada y medida físicamente del robot a diferentes valores de PWM durante 20 segundos. ....	93
Figura 30. Distancia recorrida simulada vs distancia recorrida experimental a diferentes valores de PWM durante 20 segundos. ....	94
Figura 31. Velocidad angular del robot cuando realiza giros a diferentes PWM en 10 segundos. ....	95
Figura 32. Comparación entre el radio simulado y medido experimentalmente. Rueda izquierda 94.57 rpm y rueda derecha 46.95 rpm.....	95
Figura 33. Comparación entre el radio simulado y medido experimentalmente. Rueda izquierda 94.57 rpm y rueda derecha 38.47 rpm.....	96

## DEDICATORIAS

A mi esposa Juana María Marín Vázquez por el amor, la paciencia y el apoyo para continuar con esta etapa de mi vida. Por todo lo que hemos pasado juntos.

A mis padres: Joaquín Ruiz Arenas y Luz María González Laguna.

A mis hermanos: Lux y Albert.

A mis sobrinos: Rodolfo, Fernanda, Rodrigo e Ethan.

A mi director: Ph. D. Noé Velázquez López.

A mis compañeros de Posgrado: Orbelin, Marín, Josué, Don Villa, Ochoa (recuerdo los torneos de basket ganados, las finales que perdimos que fueron pocas y que no querían enfrentarse a Posgrado porque teníamos buen equipo), Maestra Lulú.

A mis compañeros de equipo: Armand, Iván, Memo, Vidal y Pablo.

A todas las personas que han colaborado para llevar a cabo esta gran tarea.

¡¡¡Mi admiración y respeto para mis tres asesores, muchas gracias!!!

¡Gracias a Dios!!!

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico para desarrollar mis estudios de posgrado.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua por darme la oportunidad de realizar los estudios de Posgrado.

A mi asesor Ph.D. Noé Velázquez López por su amistad y apoyo, por brindarme de su tiempo en las tareas que fueron asignadas durante la investigación; de la misma manera por invitarme a participar en este gran proyecto.

Al Dr. Agustín Ruiz García por su apoyo brindado en la elaboración de esta investigación y por la enseñanza de temas que no había explorado a profundidad.

Al Dr. Mario Alberto Vázquez Peña por los conocimientos enseñados en el área de Probabilidad y Estadística.

## **DATOS BIOGRÁFICOS**

### **Datos personales**

Nombre Luis Gerardo Ruiz González.

Fecha de nacimiento 7 de julio de 1979.

Lugar de nacimiento Tlalnepantla Estado de México.

No. Cartilla militar C-3978028

CURP RUGL790707HMCZNS02

Profesión Ingeniero Mecánico Agrícola.



### **Desarrollo académico**

Bachillerato Escuela Preparatoria Texcoco (2000).

Licenciatura Universidad Autónoma Chapingo, Ingeniero Mecánico Agrícola (2005). Cédula profesional 09284757.

Maestría Universidad Autónoma Chapingo, Maestría en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua (2015). Cédula profesional 11049790.

## RESUMEN GENERAL

### MODELADO Y SIMULACIÓN DE LAS ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE UN ROBOT AGRICOLA TIPO SKID STEER

Conocer la posición de un vehículo autónomo es de gran importancia para saber su comportamiento, dirección, sentido y velocidad en cada momento que realiza sus tareas. Con esta información se pueden hacer mapas y generar trayectorias que ayuden a evitar obstáculos que haya en el camino, de la misma manera ayuda a determinar la cantidad de energía que consume y en qué momento se acabara su batería para poder recargarla. La navegación autónoma en la agricultura es de gran importancia para realizar diferentes labores culturales, como fertilización, control de malezas, plagas y enfermedades, monitoreo del cultivo e incluso cosecha. Es por ello la necesidad de conocer la posición del vehículo y generar trayectorias de acuerdo a la forma de las hileras o surcos del cultivo. En ocasiones las trayectorias de los surcos suelen ser curvas por lo que el robot debe ser capaz seguirlas. En el presente trabajo se revisaron conceptos de robótica móvil y sobre su uso en la agricultura. Además, Este trabajo se enfoca en deducir el modelo matemático de un robot agrícola tipo skid steer mediante el análisis y deducción de sus ecuaciones de movimiento para auxilio en la generación de trayectorias en navegación autónoma.

Se midieron de manera experimental los principales parámetros físicos y geométricos, los cuales son las condiciones de entrada para el modelo matemático. La máxima velocidad medida con los encoders es de  $1.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la masa total del vehículo es de 30 kg, los valores de los coeficientes de fricción medidos son: estático 0.8, dinámico 0.13 y lateral 0.4. Como resultado se obtuvo un modelo matemático que describe el movimiento de un robot skid steer utilizado en la agricultura. Se realizaron las simulaciones de trayectorias con giro horario y antihorario, así como trayectorias rectas. La distancia simulada promedio en 10 segundos fue de 4.5 m, 5.28 m, 6.7 m, 7.6 m, 8.5 m, 9.85 m, 11.34 m y 12.26 m asociada a los valores de PWM (pulse width modulation) de 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 y 240 respectivamente.

**Palabras clave: robot agrícola, skid steer, sensores, modelo matemático, simulación.**

## GENERAL ABSTRACT

### MODELING AND SIMULATION OF THE EQUATIONS OF MOTION OF AN AGRICULTURAL ROBOT TYPE SKID STEER

Knowing the position of an autonomous vehicle is of great importance in order to know its behavior, direction, orientation and speed at all times when it performs its tasks. With this information you can make maps and generate trajectories that help avoid obstacles on the way, in the same way it helps to determine the amount of energy you consume and when your battery will run out in order to recharge it. Autonomous navigation in agriculture is of great importance to perform different cultural tasks, such as fertilization, control of weeds, pests and diseases, monitoring the crop and even harvesting. That is why the need to know the position of the vehicle and generate trajectories according to the shape of the rows or rows of the crop. Sometimes the paths of the grooves are usually curved so the robot must be able to follow them. In the present work, mobile robotics concepts and their use in agriculture were reviewed. In addition, this work focuses on deducing the mathematical model of a skid steer type agricultural robot through the analysis and deduction of its equations of motion to aid in the generation of trajectories in autonomous navigation.

The main physical and geometric parameters were experimentally measured, which are the input conditions for the mathematical model. The maximum speed measured with the encoders was  $1.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the total mass of the vehicle is 30 kg, the values of the friction coefficients measured were: static 0.8, dynamic 0.13 and lateral 0.4. As a result, a mathematical model was obtained that describes the movement of a skid steer robot used in agriculture. The simulations of trajectories with clockwise and anticlockwise rotation as well as straight trajectories were carried out. The average simulated distance in 10 seconds was 4.5 m, 5.28 m, 6.7 m, 7.6 m, 8.5 m, 9.85 m, 11.34 m and 12.26 m associated with the PWM (pulse width modulation) values of 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 and 240 respectively.

**Keywords: agricultural robot, skid steer, mathematical model, sensors, simulation.**

## 1. INTRODUCCIÓN GENERAL

La robótica es la ciencia de percibir y manipular el mundo físico a través de dispositivos mecánicos controlados por computadora. Los ejemplos de sistemas robóticos exitosos incluyen plataformas móviles para exploración planetaria, brazos robóticos en líneas de montaje, autos que viajan de manera autónoma en carreteras, brazos activados que asisten a los cirujanos. Los sistemas robóticos tienen en común que están situados en el mundo físico, perciben el entorno a través de sensores y manipulan su entorno a través de dispositivos que permiten su movimiento (Thrun, Burgard, & Fox, 2000).

Aunque gran parte de la robótica todavía está en su infancia, la idea de manipulación inteligente tiene un enorme potencial para cambiar la sociedad. ¿No sería genial si todos nuestros coches fueran capaces de dirigirse con seguridad? ¿No sería genial si los robots, y no la gente, limpiaran los sitios de desastres nucleares como Chernóbil? Los dominios de aplicación de los robots del mañana difieren del de ayer, como los manipuladores en las líneas de ensamble que llevan a cabo la misma tarea día a día. La característica más llamativa de los sistemas de robots es que operan en ambientes cada vez menos estructurados, ambientes que son impredecibles. Como resultado, la robótica se está moviendo hacia áreas en las que el uso de sensores es cada vez más importante y donde el software de robot tiene que ser lo suficientemente robusto para hacer frente a una serie de situaciones (Thrun et al., 2000).

Un robot se define como un dispositivo mecánico que utiliza tecnología de inteligencia artificial para realizar tareas automatizadas bajo supervisión directa del ser humano, un programa predefinido o un conjunto de instrucciones generales (Kool, 2000). Los robots estaban destinados principalmente a reemplazar a los humanos en procesos monótonos, pesados y peligrosos. Hoy en día, estimulados por razones económicas, los robots industriales se utilizan intensivamente en una gran variedad de aplicaciones. La mayoría de los robots

industriales son estacionarios. Operan desde una posición fija y tienen un rango de operación limitado. El área circundante del robot generalmente se diseña en función de la tarea del robot y luego se protege de influencias externas. Estos robots completan de manera eficiente tareas como soldadura, taladrado, ensamble, pintura y embalaje (Goris, 2004).

En muchas aplicaciones puede ser útil construir un robot que se pueda operar con mayor movilidad. En contraste con la mayoría de los robots estacionarios, donde el espacio circundante se adapta a las tareas del robot, los robots móviles tienen que adaptar su comportamiento a su entorno. En lugar de realizar una secuencia fija de acciones, los robots móviles deben desarrollar cierta conciencia de su entorno a través de la interacción con todo tipo de sensores. Utilizan la inteligencia a bordo para determinar la mejor acción a tomar, y el desarrollo de sistemas de navegación inteligente en robots móviles, que garantice un movimiento eficiente y sin colisiones, sigue siendo el centro de varios proyectos de investigación (Defever, 2004).

Los robots móviles necesitan mecanismos de movimiento que les permitan desplazarse en todo el entorno sin restricciones. Hay muchas formas posibles de moverse, lo que hace que la elección de la forma de movimiento del robot sea un aspecto importante del diseño de un robot móvil. La mayoría de estos mecanismos de locomoción se han inspirado en sus homólogos biológicos que se adaptan a diferentes entornos y propósitos (Holmberg, 2000). Muchos robots de inspiración biológica caminan, se arrastran, se deslizan y saltan (Siegwart & Nourbakhsh, 2004).

Cada situación en la que un animal, humano o vehículo hace un trabajo útil hoy en día es una aplicación potencial para un robot móvil. En general algunas de las razones por las que puede ser una buena idea automatizar un proceso o tarea son para que sea (Kelly, 2013):

- Mejor.
- Más rápido.
- Más seguro.
- Accesible

La simulación por computadora aparece en muchas formas y en muchos campos diferentes; generalmente refiriéndose a algún método por el cual un sistema o fenómeno del mundo real puede ser modelado usando un sistema informático. Estas pueden ser simulaciones que se ejecutan sin interacción del usuario o salida visual (denominada simulación fuera de línea), o aquellas que proporcionan visualización o permiten al usuario interactuar con el sistema simulado en tiempo real. Es posible utilizar cualquiera de los enfoques en el campo de la robótica, sin embargo, a menudo es ventajoso proporcionar al usuario información visual en tiempo real. Esto permite observar el sistema en un entorno que imita el entorno del mundo real en el que se utilizará (Cook, 2017).

En los últimos años se ha observado un creciente interés en el área de la robótica móvil. Gran cantidad de investigación se concentra en la descripción de modelos cinemáticos de robots móviles y en el diseño de leyes de control de retroalimentación para sistemas no holonómicos. Los investigadores generalmente consideran que las plataformas con ruedas con restricciones no holonómicas suponen un rodamiento perfecto. Se puede encontrar una excelente visión general sobre los diferentes tipos de estos robots en Champion, Bastin, & D'Andrea-Novel (1996).

Los modelos de movimiento predicen cambios de estado dados en una secuencia de entradas. Todos los sistemas de navegación móvil con ruedas dependen de dichos modelos. Los sistemas de estimación dependen de ellos para la odometría, especialmente en ausencia de sistemas de posicionamiento global u otros sensores de localización. Los sistemas de planificación y control repetidamente simulan estos modelos para encontrar y seguir trayectorias óptimas. La complejidad del modelo de movimiento varía mucho. Estos modelos pueden ser cinemáticos, por lo que la velocidad del robot puede calcularse a través de la entrada de velocidad conjunta e integrarse para conocer su posición (Seegmiller & Kelly, 2014).

La construcción de robots autónomos ha sido un objetivo central de la investigación en inteligencia artificial. En décadas pasadas, los investigadores en

inteligencia artificial han desarrollado una gama de metodologías para desarrollar software robótico (Thrun, 2000).

Skid steer es un mecanismo de locomoción ampliamente utilizado para robots móviles. Para un robot con dirección deslizante, no hay un mecanismo de dirección. Se cambia la dirección de movimiento girando las ruedas laterales izquierda y derecha a diferentes velocidades. Debido a complejas interacciones rueda tierra y restricciones cinemáticas, sigue siendo una tarea difícil obtener un modelo cinemático y dinámico preciso para robots con dirección deslizante (Wang & Roberts, 1994).

La dirección de deslizamiento es un mecanismo de locomoción comúnmente utilizado para robots móviles y grandes vehículos industriales y agrícolas. Un sistema skid steer no tiene mecanismo de dirección; cambia la dirección del vehículo ajustando la velocidad de las ruedas o cadenas laterales izquierdo y derecho. La simplicidad, la robustez y la capacidad de giro de radio cero de la dirección de derrape la convierten en una excelente opción para todos los vehículos todo terreno y teleoperados. La compleja interacción entre la cadena y el terreno desarrollada durante una maniobra de dirección deslizante es difícil de modelar. Por lo tanto, en comparación con los robots de dirección o de dos ruedas, es bastante difícil predecir la posición futura de un robot de dirección deslizante (Pentzer & Brennan, 2014).

Un vehículo de dirección deslizante puede caracterizarse de la siguiente manera (Siegwart & Nourbakhsh, 2004) (Mandow, Martínez, Morales, Blanco, García-Cerezo & González, 2007). Primero, la dirección del vehículo depende del control de las velocidades relativas de las ruedas o pistas laterales izquierda y derecha. En segundo lugar, todas las ruedas o pistas permanecen paralelas al eje longitudinal del vehículo, y el giro del vehículo requiere el deslizamiento de las ruedas o pistas. Debido a los mecanismos de dirección idénticos, los vehículos con ruedas y orugas de dirección deslizante comparten muchas propiedades (Mandow et al., 2007), (Yi, Zhang, Song & Jayasuriya, 2007), (Song, Zweiri, Seneviratne & Althoefer, 2006), (Yi, Song, Zhang & Goodwin, 2007a). Muchas de

las dificultades asociadas con el modelado y el funcionamiento de ambas clases de vehículos de dirección deslizante surgen de la compleja rueda o pista y la interacción del terreno (Madow et al., 2007), (Yi et al., 2007a).

Sin embargo, el manejo de los vehículos con orugas tiene características únicas y son muy diferentes a las de los vehículos con ruedas. Por lo tanto, se requiere un tratamiento separado de la dirección de los vehículos sobre orugas. Hay una serie de métodos posibles que pueden lograr la dirección de un vehículo rastreado. Estos incluyen la dirección de deslizamiento, la dirección por articulación y la dirección de la trayectoria curva. En la dirección de deslizamiento, el empuje de una pista aumenta y el de la otra se reduce, a fin de crear un momento de giro para superar el momento de la resistencia del giro debido al deslizamiento de las pistas en el suelo y la inercia rotacional del vehículo cuando realiza giros, como se muestra en la figura 1. Dado que el momento de la resistencia al giro es considerable, se puede requerir una potencia mayor durante un giro que en un movimiento en línea recta. A menudo se requiere el frenado de la pista interior para hacer un giro. Esto da una reducción del empuje resultante máximo hacia adelante que el vehículo puede desarrollar (Wong, 2001).

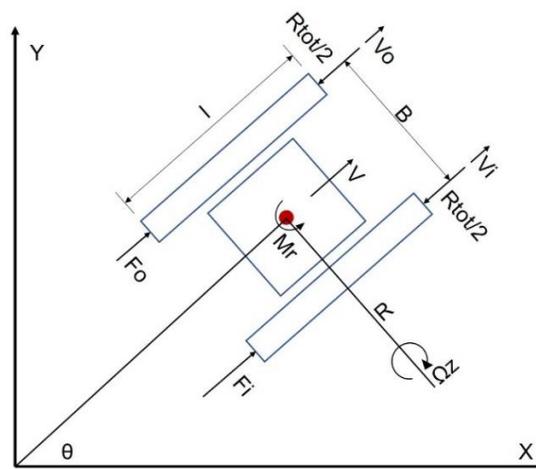


Figura 1. Principios de funcionamiento de vehículos skid steer (Fuente: Wong 2001, modificado por autor 2020).

El modelo propuesto por Wong en 2001 para determinar la posición de los vehículos tipo skid steer es retomado en este trabajo de investigación. Se basa

en la segunda Ley de Newton, donde es necesario conocer las fuerzas de empuje exterior, interior, el momento de resistencia al giro, el momento de inercia, parámetros geométricos y velocidades de avance de las ruedas.

La hipótesis es que el modelo aquí propuesto nos permitirá comprender el principio de funcionamiento de los vehículos tipo skid steer, así como conocer la posición y orientación del robot en cualquier momento que se haya propuesto.

El objetivo general de esta investigación es deducir el modelo matemático del robot tipo skid steer Voltan. Simular el movimiento del robot en Matlab®. Se tienen cuatro objetivos secundarios. El primero es realizar una revisión de literatura sobre robots, su historia y robots aplicados en la agricultura. El segundo es determinar de manera experimental y/o analítica los parámetros físicos y geométricos del robot Voltan. El tercer objetivo es instrumentar con encoders e IMU (Inertial Measurement Unit, por sus siglas en inglés, unidad de medida inercial) el robot tipo skid steer. El último objetivo es que con los datos obtenidos de los encoders e IMU alimentar el modelo matemático.

La organización de la presente investigación es descrita por cinco capítulos: El capítulo uno presenta una introducción general del tema, la importancia, los antecedentes, la hipótesis y los objetivos de esta.

El capítulo dos presenta una revisión de literatura donde se abordan conceptos de robots, robótica, los tipos de robots y su uso, la diferencia entre robots holonómicos y no holonómicos e historia de la robótica.

El capítulo tres presenta un panorama general de robots aplicado a la agricultura. Se abordan los temas de robots en la ganadería, plataformas agrícolas, localización y mapeo de robots en campo. El monitoreo de cultivos con sensores y el uso de visión artificial para encontrar plagas y/o enfermedades.

El capítulo cuatro trata sobre la obtención de los parámetros físicos y geométricos del robot Voltan y la instrumentación del robot con encoders. Se muestran los

resultados de los experimentos obtenidos en campo sobre distancia recorrida, posición y tiempo recorrido en la navegación.

El capítulo cinco muestra los principios de los vehículos tipo skid steer, su modelado, las fuerzas que deben determinarse para conocer su posición. Se calculan las fuerzas y momentos necesarios para comenzar la simulación. A su vez se presentan las ecuaciones de movimiento del robot en espacio de estado para su programación en Matlab®. Se muestran los resultados de la simulación.

### **1.1. Referencias**

Campion, G., Bastin, G., & D'Andrea-Novell, B. (1996). Structural properties and classification of kinematic and dynamic models of wheeled mobile robots. *IEEE Transactions on robotics and automation*, Vol. 12, No. 1, pp. 47–62.

Cook, D. (2017). Tractable robot simulation for terrain leveling. Faculty of Engineering and Applied Science Memorial University. St. John's, Newfoundland and Labrador, Canada.

Defever, J. (2004). Mobile Robots with Shared Autonomy: Navigation Control, Vrije Universiteit Brussel, Brussels, Belgium.

Goris, K. (2004). Autonomous Mobile Robot Mechanical Design. Tesis, Vrije Universiteit Brussel.

Holmberg, R. (2000). Design and development of powered castor holonomic mobile robots. Stanford University.

Kelly, A. (2013). Mobile robotics. Cambridge University Press.

Kool, P. (2000). Robotica. Vrije Universiteit Brussel. Brussels, Belgium.

Mandow, A., Martínez, J. L., Morales, J., Blanco, J., García-Cerezo, A. J., & González, J. (2007). Experimental kinematics for wheeled skid-steer mobile

robots. IEEE/RSJ International Conference, Intelligent Robots and Systems, San Diego, CA, pp. 1222–1227.

Pentzer, P., Reichard, K., & Brennan, S. (2014). Model based prediction of skid-steer robot kinematics using online estimation of track instantaneous centers of rotation. *Journal of field robotics*. 31(3), 455–476.

Seegmiller, N., & Kelly, A. (2014). Enhanced 3D kinematic modeling of wheeled mobile robots. *Conference Papers, Proceedings of Robotics: Science and Systems*. Berkeley, USA.

Siegwart, R., & Nourbakhsh, I.R. (2004). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. The MIT Press, Massachusetts Institute of Technology. USA.

Song, Z., Zweiri, Y. H., Seneviratne, L. D., & Althoefer, K. (2006). Non-linear observer for slip estimation of skid-steering vehicles. *Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation*. Orlando FL, pp. 1499–1504.

Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2000). *Probabilistic Robotics*.

Wang, Y., & Roberts, J.W. (1994). Viabilidad de movimiento de un vehículo de ruedas con un límite de ángulo de dirección. *Robótica*. Vol. 12. págs. 217 – 226.

Wong, J.Y. (2001). *Theory of ground vehicles*. Published by John Wiley & Sons. New Jersey.

Yi, J., Song, D., Zhang J., & Goodwin, Z. (2007 a). Adaptive trajectory tracking control of skid-steered mobile robots, in *Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, Roma, Italy, 2007, pp. 2605–2610.

Yi, J., Zhang, J., Song, D., & Jayasuriya, S. (2007). IMU-based localization and slip estimation for skid-steered mobile robot. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*. San Diego, CA, pp. 2845–2849.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

### 2.1. ¿Qué es la robótica?

La tecnología robótica juega un papel fundamental y su desarrollo siempre está estrechamente relacionado con la construcción del deseo de lograr un trabajo conveniente (Camarena, 2009). Actualmente, la robótica se encuentra en las principales áreas de desarrollo tecnológico, tales como la industria, la minería, exploración planetaria, construcción, medicina, agricultura, entretenimiento, etc. Los primeros pasos de la robótica se dieron gracias al deseo humano de crear dispositivos capaces de emular el comportamiento de los seres vivos (Sosa, 2016).

Del Solar, J., & Ruiz, S.R. (2007) definen a la robótica como la rama de la inteligencia artificial que estudia, diseña, opera y mantiene los sistemas automáticos capaces de establecer una interacción directa con el medio físico. Es un campo de conocimiento que combina diferentes disciplinas, tales como: ingeniería eléctrica, ingeniería electrónica, ingeniería mecánica, informática, matemáticas, física, biología, neurociencia, etc. Las disciplinas relacionadas incluyen: visión por computadora, inteligencia artificial, mecatrónica, etc.

Vaquero, S.A. & Dormido, B.S. (2003) definen a un robot como un manipulador reprogramable multifuncional diseñado para mover materiales, piezas o dispositivos especializados, por tanto, un robot debe poseer inteligencia que provea movimientos programados variables para la realización de una diversidad de tareas asociados a un sistema de control y sensorial.

### 2.2. Robots móviles.

Aunque los brazos de robot que sueldan con autógena nuestros autos forman parte de la vida cotidiana, una nueva clase de robots, el robot móvil, ha crecido silenciosamente en importancia y capacidad. Desde hace varias décadas, en laboratorios de investigación de todo el mundo, los robots han evolucionado para moverse automáticamente de un lugar a otro. La movilidad permite una nueva

capacidad para interactuar con los seres humanos mientras nos libera de los trabajos que preferiríamos no hacer (Kelly, 2013).

Los robots móviles han entrado recientemente en la conciencia pública como resultado del espectacular éxito de los Mars Rovers. La movilidad de un robot lo cambia todo. El robot móvil se enfrenta a un entorno local diferente cada vez que se mueve. Tiene la capacidad de influenciar, y ser influenciado por un entorno mucho más grande que un robot estacionario. Más importante aún, el mundo es un lugar peligroso y, a menudo, no puede ser diseñado para adaptarse a las limitaciones del robot, por lo que la movilidad es un nivel de inteligencia requerido y necesario para hacer frente con éxito a las diferentes demandas y riesgos de cada lugar y situación, y representa un desafío importante incluso para el sistema biológico (Kelly, 2013).

Los robots móviles son generalmente aquellos que pueden moverse de un lugar a otro sobre una superficie. La movilidad le da a un robot una flexibilidad mucho mayor para realizar tareas nuevas, complejas y emocionantes. No es necesario modificar el mundo para que todos los elementos necesarios estén al alcance del robot. Los robots pueden moverse donde sea necesario. Pueden utilizarse menos robots. Los robots con movilidad pueden realizar tareas más naturales en las que el entorno no está diseñado para ellos. Estos robots pueden trabajar en un espacio centrado en el ser humano y cooperar con los hombres compartiendo un espacio de trabajo (Holmberg, 2000).

### **2.3. Tipos de robots móviles.**

Podemos clasificar las bases de robots móviles en función de sus características físicas y capacidades, el entorno para el que están diseñados o quizás el objetivo que tienen. Los siguientes son algunos ejemplos de algunas clases diferentes de robots móviles (Kelly, 2013):

### **2.3.1. Vehículos guiados automáticamente.**

Los vehículos guiados automáticamente están diseñados para mover materiales en fábricas, almacenes y áreas de envío tanto en interiores como en exteriores. Los vehículos guiados automáticamente son quizás el mercado más desarrollado para robots móviles. Las compañías existen para vender componentes y controles a muchos fabricantes de vehículos de diferentes marcas y los fabricantes de vehículos compiten entre sí para vender integradores de sistemas de valor agregado que dan solución para una aplicación en particular (Kelly, 2013).

### **2.3.2. Robots de servicio.**

Los robots de servicio realizan tareas que se considerarían trabajos de la industria de servicios si fueran realizados por humanos. Algunas tareas de servicio, como la entrega de correo, alimentos y medicamentos, se considera también manejo de material liviano, y son similares a los trabajos de vehículos guiados automáticamente. Sin embargo, muchas tareas de servicio se distinguen por niveles más altos de intimidad con los seres humanos, que van desde la forma en que se enfrentan a las multitudes hasta las preguntas (Kelly, 2013).

### **2.3.3. Robots sociales.**

Los robots sociales son robots de servicio que están diseñados específicamente para interactuar con humanos y, su propósito principal es transmitir información o entretener. Los robots sociales requieren movilidad por una u otra razón (Kelly, 2013).

### **2.3.4. Robots de campo.**

Los robots de campo realizan tareas en condiciones altamente desafiantes del terreno al aire libre. Casi cualquier tipo de vehículo que deba moverse y realizar un trabajo útil en un entorno exterior es candidato potencial para la

automatización. La mayoría de las tareas más difíciles se hacen al aire libre (Kelly, 2013).

## 2.4. Capas de autonomía.

Para los robots móviles, y para nosotros, los problemas que requieren un pensamiento profundo no se pueden resolver en un instante, por ejemplo hay problemas, tal como evitar al peatón que cruza la calle con descuido y que, debe detectarse y tener la habilidad de reaccionar en un instante, por lo tanto, es difícil ser inteligente y rápido, por lo que los robots tienden a usar una jerarquía de instrucciones de actos de pensamiento perceptivos para asignar los recursos de manera óptima (ver figura 2) (Kelly, 2013).

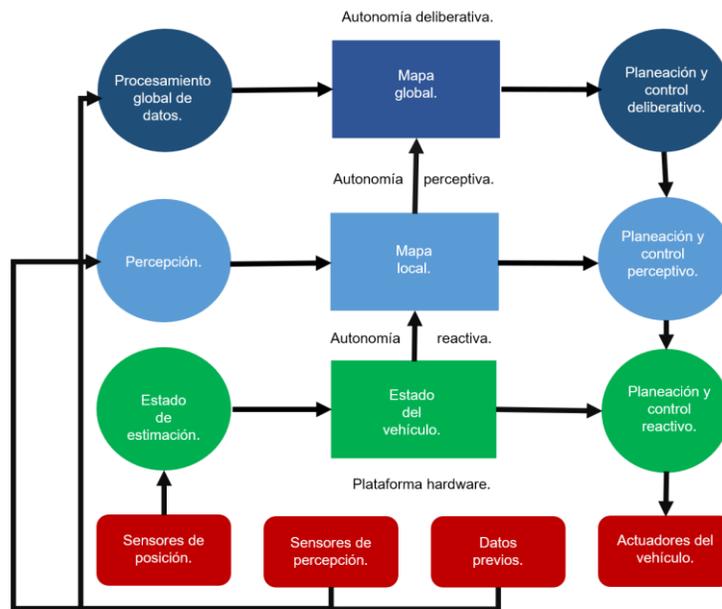


Figura 2. El sistema móvil completo se puede describir en términos de tres bucles anidados: percibir, pensar y actuar (Fuente: Kelly 2013, modificado por autor 2019).

Autonomía reactiva. Esta capa es responsable de controlar los movimientos del vehículo con respecto al entorno y cualquier articulación requerida. Si típicamente se requiere retroalimentación solo de la articulación y el estado de movimiento (posición, dirección y velocidad) del vehículo (Kelly, 2013).

Autonomía perceptiva. Esta capa es responsable de responder al entorno inmediatamente perceptible. Por lo general, requiere retroalimentación del estado del medio ambiente, que se deriva de la percepción. Esta capa requiere estimaciones únicamente del movimiento relativo a corto plazo y tiende a utilizar modelos de entorno que solo son válidos localmente (Kelly, 2013).

Autonomía deliberativa. Esta capa es responsable de lograr objetivos a largo plazo, a veces llamada misión. Estas capas requieren estimaciones de posición fija de la tierra y tienden a utilizar modelos de entorno que se extienden sobre grandes áreas (Kelly, 2013).

## **2.5. Robots holonómicos y no holonómicos.**

En robótica móvil, los términos: omnidireccional, holonómico y no holonómico se usan a menudo, una discusión acerca de su uso será útil (Holmberg, 2000).

Los términos holonómico y omnidireccional a veces se usan de manera redundante, a menudo para confusión de ambos. Omnidireccional es un término mal definido que simplemente significa la capacidad de moverse en cualquier dirección. Debido a la naturaleza plana de los robots móviles, el espacio operacional que ocupan contiene solo tres dimensiones que se consideran comúnmente como la posición global  $x$ ,  $y$  de un punto en el robot y la orientación global  $\theta$  del robot. Si un robot es omnidireccional generalmente no se acuerda si se trata de una dirección bidimensional,  $x$ ,  $y$  o una dirección tridimensional,  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$  (Goris, 2004).

En este contexto, un robot holonómico móvil tiene las siguientes propiedades (Goris, 2004):

- La configuración del robot está descrita por tres coordenadas. La geometría interna no aparece en las ecuaciones cinemáticas del robot móvil abstracto, por lo que puede ignorarse.
- El robot tiene tres grados de libertad sin singularidades.

- El robot puede desarrollar instantáneamente una combinación arbitraria de direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$ .
- El robot puede acelerar instantáneamente una combinación arbitraria de direcciones  $x$ ,  $y$ ,  $\theta$ .

En este contexto, un robot móvil no holonómico tiene las siguientes propiedades (Goris, 2004):

- La configuración del robot está descrita por más de tres coordenadas. Se necesitan tres valores para describir la ubicación y orientación del robot, mientras que otros son necesarios para describir la geometría interna.
- El robot tiene dos grados de libertad, o tres grados de libertad con singularidades.

Los robots no holonómicos son los más frecuentes debido a su diseño simple y fácil de control. Por su naturaleza, los robots móviles no holonómicos tienen menos grados de libertad que los robots móviles holonómicos. Estos pocos grados de libertad activados en robots móviles no holonómicos a menudo pueden controlarse independientemente o desacoplarse mecánicamente, lo que simplifica aún más el control de bajo nivel del robot. Como tienen menos grados de libertad, hay ciertos movimientos que no pueden realizar. Esto crea problemas difíciles para la planificación del movimiento y la implementación de comportamientos reactivos (Goris, 2004).

Los robots holonómicos ofrecen una movilidad total con la misma cantidad de grados de libertad que el entorno. Esto facilita la planificación del camino porque no hay restricciones que deban integrarse. Implementar comportamientos reactivos es fácil porque no hay restricciones que limiten las direcciones en las que el robot puede acelerar (Goris, 2004).

## **2.6. Historia de la robótica.**

Una vez relegadas a pisos de fábricas e instituciones de investigación debido a su inmenso tamaño y costo, las tecnologías robóticas en el siglo XXI están

mejorando rápidamente. Los robots son realmente un producto multidisciplinario y, como tal, los avances en computación, activación, detección y tecnologías de almacenamiento de energía están impulsando la investigación robótica a un ritmo fantástico. En particular, el área de los robots de tierra móviles ha experimentado un aumento increíble tanto en la investigación como en la producción desde principios de los años noventa. Las mejoras en las tecnologías de baterías permiten que los vehículos terrestres no tripulados operen durante largos períodos de tiempo, y las tecnologías de comunicación inalámbrica le brindan al operador del vehículo la capacidad de ejecutar el sistema desde largas distancias. Un punto en común entre la gran mayoría de los robots móviles de campo con éxito es el uso de un mecanismo de locomoción de dirección deslizante (Pentzer, 2014).

En la Segunda Guerra Mundial (1939-1945), aparecieron los primeros robots móviles debido a los avances tecnológicos en muchos campos de investigación relativamente nuevos (como la informática y la cibernética). Por ejemplo, bombas inteligentes que solo detonan dentro de un cierto rango del objetivo, el uso de sistemas de guía y control de radar. Los cohetes V1 y V2, entonces utilizados, tienen un sistema de conducción automática y también de detonación automática y son los predecesores de los modernos misiles de crucero (Wikipedia).

W. Gray Walter construyó Elmer y Elsie (1948-1949) Estos dos robots autónomos se llaman Machina Speculatrix porque a estos robots les gusta explorar sus alrededores. Elmer y Elsie están equipados con sensores de luz. Si encuentran la fuente de luz, se moverán hacia ella, evitando o moviendo obstáculos. Estos robots muestran que el comportamiento complejo puede deberse a un diseño simple (Wikipedia).

La Universidad Johns Hopkins desarrolló a Beast (1961–1963). Beast usaba un sonar para moverse en su entorno, cuando sus baterías se agotaban, encontraba una toma de corriente y se enchufaba (Wikipedia).

La aparición de robots móviles a finales de la década de 1960 y principios de la década de 1970 inició un nuevo campo de investigación: la navegación autónoma. Es interesante notar que los primeros sistemas de navegación se publicaron en las primeras Conferencias Internacionales Conjuntas sobre Inteligencia Artificial (IJCAI 1969). Estos sistemas se basaron en ideas que han sido muy fructíferas en el desarrollo de algoritmos de planificación de movimiento de robots. Por ejemplo, en 1969, el robot móvil Shakey utilizó un enfoque basado en la red para modelar y explorar el entorno (Nilson, 1969); en 1977 Jason usó un gráfico de visibilidad construido desde las esquinas de los obstáculos (Thompson, 1977); en 1979, Hilaré descompuso el medio ambiente en células convexas libres de colisión (Giralt, Sobek & Chatila, 1979). A fines de la década de 1970, los estudios de robots manipuladores popularizaron la noción del espacio de configuración de un sistema mecánico (Lozano, 1983). El problema de planificación de movimiento para un sistema mecánico se redujo así a encontrar una ruta para un punto en el espacio de configuración. El camino se abrió para ampliar ideas y desarrollar algoritmos nuevos y bien fundamentados (Latombe, 1991).

Una década más tarde, la noción de sistemas no holonómicos (también tomados de la mecánica) apareció en la literatura sobre la planificación del movimiento de robots a través del problema del estacionamiento de automóviles (Laumond, 1987). Este problema no había sido resuelto por los primeros trabajos en la navegación con robots móviles. La planificación del movimiento no holonómico se convirtió en un campo de investigación atractivo (Li & Canny, 1992).

Joseph Engelberge (1990), el padre de los brazos robóticos industriales trabajó con sus colegas para diseñar el primer robot móvil comercial automatizado vendido por Helpmate y el Departamento de Defensa de USA financió el proyecto MDARS-I basado en robots de seguridad para interiores Cybermotion (Wikipedia).

Edo Franzini, André Guignard y Francesco Mondada desarrollaron Khepera (1991), un pequeño robot móvil autónomo para actividades de investigación. El proyecto contó con el apoyo del laboratorio LAMI-EPFL (Wikipedia).

En 1994 mientras las personas se transportaban en automóvil, los autos robotizados de Daimler Benz VaMP y VITA-2, y Ernst Dikmans de UniBwM, condujeron en París más de 1000 kilómetros en una autopista de tres carriles. La velocidad máxima alcanzada fue de  $130 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Demostrando así la conducción autónoma en carriles libres, los cambios de carril de izquierda a derecha al conducir en un convoy y otros vehículos que pasaban automáticamente (Wikipedia).

En 1995, ALVINN condujo casi 50 millas de 2850 millas bajo control automático. Aunque el conductor controlaba el acelerador y los frenos (Wikipedia).

También en 1995 los robots móviles Pioneer se vendieron en el mercado a un precio asequible. Los robots móviles se convirtieron en parte de los cursos universitarios y la investigación sobre robótica en las universidades aumentó de forma considerable en la siguiente década (Wikipedia).

La Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA) envió el rover Sojourner Mars a Marte junto con el Mars Pathfinder (1996-1997). El rover que es controlado desde la Tierra escanea el suelo. El Sojourner está equipado con un sistema de prevención de accidentes que permitió al robot encontrar su camino de forma autónoma en el desconocido terreno marciano (Wikipedia).

Sony mostró a Aibo (1999), un perro robótico que puede ver, caminar e interactuar con su entorno. Se introduce el robot móvil militar de control remoto PackBot (Wikipedia).

Apareció Roomba (2002), que es un robot móvil automático doméstico utilizado para limpiar el suelo (Wikipedia).

Axxon Robotics adquirió Intellibot (2003), un fabricante de robots comerciales que pueden barrer, aspirar y limpiar pisos en hospitales, oficinas y edificios comerciales. El robot de cuidado de pisos Intellibot Robotics LLC funciona de manera completamente autónoma, mapeando el entorno circundante y utilizando una serie de sensores para navegar y evitar obstáculos (Wikipedia).

En 2005, Boston Dynamics crea un robot cuadrúpedo destinado a transportar cargas pesadas en terrenos demasiado difíciles para los vehículos (Wikipedia).

En 2006, Sony detuvo la producción de Aibo y HelpMate, pero a medida que los robots móviles continúan esforzándose por lograr la viabilidad comercial, se encuentra disponible un sistema de robot de servicio autónomo personalizable de bajo costo, PatrolBot. El Departamento de Defensa de EE. UU. abandonó el proyecto MDARS-I, pero financió el robot de campo autónomo MDARS-E. Se da la presentación de TALON-Sword, el primer producto comercial con lanzagranadas y otras opciones de armas integradas. Asimismo de Honda aprende a correr y subir escaleras (Wikipedia).

En el Desafío Urbano de DARPA (2007), seis vehículos completaron automáticamente una ruta compleja, incluidos vehículos tripulados y obstáculos. Empieza la distribución de los robots de Kiva Systems. Los remolcadores se convirtieron en un método popular para que los hospitales trasladaran los gabinetes de un lugar a otro, y el Speci-Minder motorizado comenzó a transportar muestras de sangre y otras muestras de pacientes a diferentes laboratorios. Seekur es el primer robot de servicio no militar al aire libre. Arrastra un vehículo de tres toneladas al estacionamiento, lo conduce de forma autónoma al interior y comienza a aprender a navegar al aire libre. PatrolBot aprende a seguir a las personas y es capaz de descubrir una puerta entreabierta (Wikipedia).

En 2008, Boston Dynamics lanzó un video sobre la nueva generación de BigDog, que puede restablecer el equilibrio al caminar sobre terreno helado y que es pateado desde el costado (Wikipedia).

En 2010, hubo un equipo de automóviles sin conductor en el International Robot Ground Challenge para mapear entornos urbanos dinámicos a gran escala, también para identificar y rastrear humanos y evitar objetos hostiles (Wikipedia).

En 2016, la policía de Estados Unidos utilizó por primera vez el robot ágil de control remoto multifuncional (MARCbot) para matar a un francotirador. El francotirador mató a 5 policías en Dallas, Texas, lo que provocó el uso de drones y robots como contramedida (Wikipedia).

En 2017, en el desafío ARGOS, se desarrolló un robot que puede trabajar en condiciones extremas de las instalaciones de petróleo y gas en alta mar (Wikipedia).

Además de este esfuerzo de investigación en la planificación de caminos, se inició el trabajo para hacer que los robots salieran de sus entornos inicialmente artificiales, donde el mundo era cilíndrico y estaba compuesto de tableros verticales de madera. Los robots comenzaron a moverse en los edificios, con gente caminando. La localización inexacta, los mapas inciertos e incompletos del mundo, y los movimientos inesperados u obstáculos estáticos hicieron que los investigadores en robótica se dieran cuenta de la brecha entre la planificación de un camino y la ejecución de un movimiento. Desde entonces, el dominio de la evitación de obstáculos ha estado muy activo (Minguez, Lamiroux, & Laumond, 2008).

## **2.7. Referencias**

Camarena, G. J. F. (2009). Análisis cinemático, dinámico y control en tiempo real de un vehículo guiado automáticamente. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico Departamento de Mecatrónica. Cuernavaca, Morelos, México.

Del Solar, J., & Ruiz, S.R. (2007). Introducción a la robótica. Capítulo 1. Universidad de Chile.

Giralt, G., Sobek, R., & Chatila, R. (1979). A multi level planning and navigation system for a mobile robot: a first approach to HILARE. 6th International joint conference on artificial intelligence. Tokyo, pp. 335–337.

Goris, K. (2004). Autonomous Mobile Robot Mechanical Design. Thesis, Vrije Universiteit Brussel.

Holmberg, R. (2000). Design and development of powered castor holonomic mobile robots. Stanford University.

Kelly, A. (2013). Mobile robotics. Cambridge University Press.

Latombe, J.C. (1991). Robot motion planning. The Springer International Series in Engineering and Computer Science.

Laumond, J.P. (1987). Feasible trajectories for mobile robots with kinematic and environments constraints. Intelligent Autonomous System An International Conference, Amsterdam, The Netherlands pp 346-354.

Li, Z. & Canny, J.F. (1992). Nonholonomic Motion Planning. The Springer International Series in Engineering and Computer Science.

Lozano, P.T. (1983). Spatial planning: a configuration space approach. IEEE Transactions on Computers. 32(2), 08–120.

Minguez, J., Lamiroux, F. & Laumond, J.P. (2008). Motion Planning and Obstacle Avoidance. In: Siciliano B., Khatib O. (eds) Springer Handbook of Robotics. Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5\\_36](https://doi.org/10.1007/978-3-540-30301-5_36).

Nilson, N.J. (1969). A mobile automaton: an application of artificial intelligence techniques. 1st International joint on artificial intelligence. pp. 509–520.

Pentzer, J.L. (2014). Control and energy aware mission planning for skid steer vehicles, a Dissertation in Mechanical Engineering, The Pennsylvania State University.

Sosa, C. C. Y. (2016). Tecnologías de control automático para la tarea de seguimiento de trayectorias en robots móviles. Tesis de maestría. México.

Thompson, A. (1977). The navigation system of the JPL robot. Proceedings of the 5th international joint conference on artificial intelligence. pp. 749–757.

Vaquero, S.A. & Dormido, B.S. (2003). Robótica, control, detección, visión e inteligencia artificial. Editorial McGraw Hill.

Página de internet.

Wikipedia. Consultado el 10-10-19 en [https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_robot](https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_robot).

### **3. UN ACERCAMIENTO DE LA ROBÓTICA EN LA AGRICULTURA**

#### **AN APPROACH TO ROBOTICS IN AGRICULTURE**

Luis Gerardo Ruiz González<sup>1\*</sup>, Noé Velázquez López<sup>2</sup>, Agustín Ruiz García<sup>3</sup>,  
Mario Alberto Vázquez Peña<sup>4</sup>.

<sup>1\*</sup> Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

<sup>2, 3, 4</sup> Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

\* Autor para correspondencia: lgerug@hotmail.com

#### **3.1. Resumen**

Los robots han sido diseñados para ayudar en tareas laboriosas y pesadas para el ser humano o de difícil acceso para las personas. Esto se hace con la percepción del entorno a través de todo tipo de sensores. La información recolectada de los sensores por la interfaz del robot se analiza para posteriormente usar actuadores eléctricos, mecánicos, hidráulicos o neumáticos. Estos actuadores ejecutan la tarea que se ha ordenado de acuerdo con los datos analizados por el procesador del robot. El uso de robots en la agricultura es un tema que poco a poco ha ido ganando terreno a nivel mundial. No sólo comprende robots estacionarios en cuartos ordeñadores de leche. Es aún más complejo que eso, con el hecho que la mayoría de las labores son a campo abierto, los desafíos sobre robótica agrícola comprenden la caracterización y tipo de terreno, los cultivos a sembrar, plagas, enfermedades y aplicación de nutrientes.

**Palabras clave:** automatización, monitoreo, sensores, visión artificial, cultivos.

#### **3.2. Abstract**

Robots have been designed to help with laborious and heavy tasks for the human being or difficult for people to access. This is done with the perception of the environment through all kinds of sensors. The information collected from the sensors by the robot interface is analyzed to subsequently use electric, mechanical, hydraulic or pneumatic actuators. These actuators execute the task

that has been ordered according to the data analyzed by the robot processor. The use of robots in agriculture is a subject that has gradually gained ground worldwide. Not only does it include stationary robots in milking rooms. It is even more complex than that, with the fact that most of the work is open field, the challenges of agricultural robotics include the characterization and type of land, crops to be planted, pests, diseases and nutrient application.

**Key words: automation, monitoring, sensors, artificial visión, navigation.**

### **3.3. Introducción**

Durante muchos años los sistemas robóticos han sido ampliamente utilizados para la producción industrial y en almacenes, donde se puede garantizar un ambiente controlado. En la agricultura y la silvicultura, la investigación sobre vehículos sin operador ha sido un tema iniciado a principios de 1960 con investigación básica sobre proyectos de sistemas automáticos dirigidos y tractores autónomos (Wilson, 2000). La preparación del suelo, la siembra, el cultivo, el riego, la pulverización y la cosecha están evidentemente incluidas (Billingsley, Visala & Dunn, 2008).

En la agricultura y la silvicultura, la robótica ha tenido un impacto sustancial. Los agricultores son conscientes de la necesidad de orientación automática del vehículo para minimizar el daño a la zona de crecimiento de sus cultivos. La detección automática, manejo y procesamiento son actividades comunes, mientras que existe una instrumentación y mecanización sustancial en los procedimientos de ganadería. Se presentan algunos desarrollos impresionantes en las cosechadoras forestales, que incluye máquinas dirigidas en los difíciles terrenos de los bosques. Las cosechadoras más convencionales de corte longitudinal también son altamente automatizadas, mientras que las operaciones como el desbroce deben realizarse a grandes velocidades. La combinación de la visión de la máquina con el posicionamiento global por satélite permite que un tractor siga una hilera de cultivos, realizando una vuelta en la cabecera al final de la fila. La clasificación de color y clasificación de los productos no es una cuestión de detección aislada, sino que implica una medida de la manipulación de los productos que lo pone en el borde de la robótica. Aunque la robótica está haciendo rápidas incursiones en estas áreas, siguen siendo una fuente fructífera

de proyectos de aplicación, algunos suficientemente exigentes para exigir el desarrollo de nuevas técnicas teóricas (Billingsley et al., 2008). La aplicación de la automatización a la agricultura ha ayudado a crear varios avances en la industria mientras que ayuda a los agricultores a ahorrar dinero y tiempo (Tu, 2013).

Recientemente, el desarrollo de sistemas robóticos en la agricultura ha experimentado un creciente interés, lo que ha llevado a muchos expertos a explorar las posibilidades de desarrollar vehículos inteligentes y adaptables al medio que lo rodea. Una aplicación combinada de sistemas de sensores, tecnologías de comunicación, sistemas de posicionamiento global y sistemas de información geográfica ha permitido a los investigadores desarrollar nuevos vehículos autónomos para cultivos de gran valor en el sector de la agricultura y la horticultura, así como para el manejo del paisaje (Pedersen, Fountas & Blackmore, 2008).

Los robots agrícolas autónomos son capaces de recoger muestras de cultivos y de suelos porque son de tamaño pequeño, lo que les permite acumular datos cercanos a los cultivos (Wang, 2007). También son capaces de segar, aplicar plaguicidas (Chen, Li, Yeh & Chang, 2009; Zhang & Kovacs, 2012), encontrar enfermedades o parásitos. Los robots agrícolas están equipados con cámaras y sensores que se utilizan para cosechar frutas y verduras como las manzanas (Kataoka, Hiroma & Ota, 1998), melones (Edan & Miles, 1994) y espárragos. Sus sensores se utilizan para detectar malas hierbas y rociar sólo el área afectada por el parásito en lugar de toda la planta. Esto ha ayudado a proteger nuestro medio ambiente al reducir la cantidad de sustancias químicas nocivas liberadas en el aire (Tu, 2013).

### **3.4. Materiales y métodos**

Este estudio se realizó para conocer el acervo bibliográfico referente a robots y su uso en la agricultura alrededor del mundo. Se consultó en internet, artículos, libros y revistas la literatura existente sobre este tema.

### **3.5. Resultados y discusión**

Diversos sistemas se encuentran en uso y en desarrollo para monitorear de manera autónoma el ganado y recolectar datos de campo; todos son comercialmente útiles para tener una ganadería eficiente y productiva. Existen mayores oportunidades para aplicar tecnologías de sensores avanzadas, combinadas con sistemas autónomos, para realizar tareas en la granja. Esto se aplica tanto a la producción extensiva como a los sistemas intensivos. Otra aplicación para sistemas robóticos puede referirse al manejo de animales de granja, como ganado lechero, cerdos y pollos, donde la intervención a través de la provisión de datos apropiados y oportunos puede ayudar a reducir los desechos y la contaminación ambiental, así como mejorar el bienestar animal y la productividad en la granja. La agricultura de precisión, por otro lado, tiene el potencial de ofrecer salud y bienestar a los animales (Duckett, Pearson, Blackmore & Grieve, 2018).

Los agricultores deben monitorear constantemente a sus animales y su entorno para garantizar la salud de éstos y mantener un ambiente cómodo y libre de estrés para una producción óptima. Desafortunadamente, el monitoreo humano implica muchas limitaciones, incluida la contaminación y los riesgos para la salud de los trabajadores agrícolas. También es un proceso lento, costoso y laborioso. La automatización ofrece el potencial para la captura continua de datos, lo que permite una intervención más oportuna y efectiva, un mejor bienestar animal y menores costos de producción (Duckett et al., 2018).

#### **3.5.1. Visión tecnológica.**

Los robots eléctricos de granjas y fábricas con herramientas intercambiables, que incluyen soluciones de bajo nivel de labranza, nuevas tecnologías de agarre robótico suave y sensores apoyarán la intensificación sostenible de la agricultura e impulsarán la productividad de fabricación en toda la cadena alimenticia. Los sistemas agrobóticos del futuro desplegarán inteligencia artificial y técnicas de aprendizaje automático para aumentar su propia productividad. Mientras tanto, la investigación de sistemas alternativos para la producción de alimentos ayudará a abordar la intensificación sostenible de la agricultura, al tiempo que protege el

medio ambiente, la calidad de los alimentos y la salud. Un aspecto vital para hacer efectiva esta transición es la clara demostración de los beneficios económicos, que siempre ha sido el principal impulsor del cambio en la comunidad agrícola (Duckett et al., 2018).

Una gama amplia de tecnologías permitirá la transición de la robótica agrícola al campo. Algunas tecnologías deberán desarrollarse específicamente para la agricultura, mientras que otras tecnologías ya desarrolladas para otras áreas podrían adaptarse al dominio agrícola, por ejemplo, vehículos autónomos, inteligencia y visión artificiales (Duckett et al., 2018).

### **3.5.2. Plataformas robóticas.**

Las plataformas agrícolas se pueden dividir en 1) robots específicos de dominio diseñados para realizar una tarea específica en un cultivo determinado en un dominio predefinido, y 2) plataformas genéricas diseñadas para realizar varias tareas en diferentes dominios. Es probable que ambos desempeñen papeles importantes. Dado que las granjas en general tienen una infraestructura muy diferente, los primeros robots pueden operar solo en una determinada granja y solo de forma limitada en diferentes granjas. De manera similar a los vehículos agrícolas actuales, podemos ver, por lo tanto, una combinación de robots adaptados a una tarea específica y la aparición de robots multipropósito capaces de llevar a cabo una multitud de tareas diferentes, análogas a los innumerables casos de uso del tractor moderno. Un desafío común es que la mayoría de las plataformas robóticas actuales no son resistentes a las condiciones del mundo real, como lodo, lluvia, niebla, temperaturas bajas y altas. Por ejemplo, la mayoría de los manipuladores actuales no están equipados para lidiar con la humedad en invernaderos (Duckett et al., 2018).

### **3.5.3. Mecatrónica y electrónica.**

El uso de software integrado permite plataformas altamente configurables y específicas de la aplicación que pueden usar módulos de hardware comunes y adaptarse a una variedad de roles. Los problemas por abordarse para la migración de prototipos a plataformas comerciales deben incluir robustez y

confiabilidad, administración de energía: las plataformas deben poder operar todo el día (en algunos casos 24 horas 7 días, durante períodos prolongados); facilidad de uso: las plataformas deben poder ser utilizadas eficazmente por no especialistas, mantenimiento: autodiagnóstico e integración con comunicaciones móviles (Duckett et al., 2018).

Otros desafíos incluyen una mejor caracterización de las propiedades físicas y mecánicas del suelo relevantes para estos robots, plataformas robustas capaces de operar en condiciones climáticas adversas, algoritmos de detección y control en tiempo real para adaptar las estrategias de locomoción a un entorno en constante cambio y codiseño de locomoción con otras capacidades. Por ejemplo, ¿cómo afecta la recolección de cultivos y frutas a la locomoción? ¿Qué capacidad de locomoción necesitamos para permitir una detección eficiente de los cultivos? (Duckett et al., 2018).

#### **3.5.4. Locomoción.**

Los robots agrícolas deben moverse en entornos dinámicos y de estructuras desafiantes. Los robots terrestres deben viajar en suelos irregulares, poco homogéneos y fangosos, mientras que los vehículos aéreos deben operar durante largos períodos de tiempo, en diferentes condiciones climáticas. Los actuales agrorobots están diseñados principalmente a partir de tecnología prestada de otros sectores, por ejemplo: drones o como un complemento a las plataformas existentes, por ejemplo: tractores autónomos. Como tal, pueden no estar completamente optimizados para sus tareas, o pueden tener algunas de las limitaciones de las plataformas existentes (Duckett et al., 2018).

Un aspecto clave de cualquier plataforma robótica es el impacto del sistema de peso y locomoción en el suelo y los cultivos, y, por lo tanto, se han utilizado diferentes plataformas. Las plataformas también dependen de la tarea requerida, por ejemplo, la cosecha de cultivos pesados necesitará una plataforma más pesada que la recolección de frutos blandos. Los robots con patas tienen el potencial de minimizar su huella, al tiempo que maximizan la flexibilidad de la locomoción. Su agilidad, combinada con la posibilidad de llevar sensores

especializados, puede ayudar a desbloquear todo el potencial de la agricultura de precisión (Duckett et al., 2018).

#### **3.5.5. Manipuladores.**

Se necesitan manipuladores para una variedad de tareas en la agricultura, para reemplazar el trabajo humano, reduciendo costos y aumentando la calidad, o realizando operaciones de manera más selectiva que la maquinaria actual. El trabajo en esta dirección está en curso, con pinzas suaves utilizadas para el trabajo experimental en la cosecha selectiva de setas, pimientos, tomates, frambuesas y fresas. Otras aplicaciones, como la cosecha de brócoli, se pueden realizar con herramientas de corte, pero también requieren un manejo y almacenamiento suave del cultivo recogido. En campo abierto, y para cultivos protegidos, hay tareas complementarias a la cosecha donde los manipuladores también pueden jugar un papel importante. Esto incluye el desmalezado mecánico, la pulverización de precisión y otras formas de inspección y tratamiento (Duckett et al., 2018).

#### **3.5.6. Censado y percepción.**

Los avances significativos en las capacidades de detección remota basadas en satélites o drones abren oportunidades para monitorear el estado del crecimiento del cultivo con resoluciones temporales y espaciales sin precedentes a un costo asequible. Las plataformas robóticas ofrecen además la posibilidad de realizar pruebas del suelo con geoetiquetado y resultados inmediatos del muestreo. El uso de robots compactos y sistemas de recolección seguros a bordo permitirá un cambio radical en la eficiencia regulatoria y la confiabilidad de los sistemas de administración de tierras que usan robots (Duckett et al., 2018).

#### **3.5.7. Localización y mapeo.**

El uso de la navegación en la agricultura usando el sistema de posicionamiento global se ha vuelto casi omnipresente con el despliegue de la cinemática en tiempo real, que permite una precisión de centímetros para el posicionamiento automático de maquinaria agrícola grande, como tractores y cosechadoras combinadas. Recientemente, los enfoques que utilizan la manipulación de datos

del sistema de posicionamiento global han mostrado ser prometedores para ofrecer una precisión equivalente sin el costo de radiobalizas adicionales. Los datos de ubicación precisos no se limitan a vehículos no tripulados con el sistema de posicionamiento global, ya que los sistemas de localización precisos están disponibles utilizando marcadores fiduciales visuales y o balizas ópticas, acústicas o de radio, dependiendo de la velocidad y precisión requerida. La información del sensor también se requiere para detectar objetos y riesgos en el campo a fin de garantizar la operación segura de vehículos robóticos. Para minimizar el daño a los cultivos, la precisión del posicionamiento relativo y la navegación es más importante que la de la navegación absoluta y la posición, tal como lo proporciona la cinemática en tiempo real y el sistema de posicionamiento global. Por ejemplo, es conveniente conducir vehículos robóticos para seguir las líneas de cultivo con una precisión de centímetros o seguir las huellas dejadas por las operaciones anteriores del tractor. Los sistemas multimodales basados en una combinación del sistema de posicionamiento global, sistemas de navegación inercial, sensor de rayos láser, visión, etc. tienen un mayor potencial para proporcionar soluciones precisas y robustas, sin requerir infraestructura en el campo tal como balizas (Duckett et al., 2018). Se han realizado varios intentos para utilizar los conceptos de mapeo de semillas y malezas mediante el registro pasivo de su ubicación geoespacial utilizando el sistema de posicionamiento global y cinemática en tiempo real. Los robots agrícolas pueden equiparse con técnicas de clasificación de patrones que pueden predecir la densidad y las especies de diferentes malezas utilizando la visión por computadora. Otros métodos se centran en una clasificación semántica densa de malezas en imágenes multiespectrales capturadas por vehículos aéreos no tripulados (Zhang & Kovacs, 2012).

El concepto de precisión puede llevarse a otro nivel, con la incorporación de sistemas de visión avanzados, que incluyen la percepción de profundidad, sensores de escaneo laser e inteligencia artificial para la toma de decisiones y la clasificación, el concepto de precisión puede llevarse a otro nivel. La capacidad que ofrecen los robots terrestres para controlar con precisión la ubicación de los

sensores de escaneo, como los sensores laser, abre la posibilidad de devolver estimaciones cuantificadas de biomasa sobre cultivos completos, así como datos fenotípicos relacionados, como las tasas de crecimiento y la morfología, a través de la integración de datos de ubicación precisos con escaneos del telémetro utilizando técnicas de localización y mapeo simultáneas. Las plataformas de detección robóticas ofrecen el potencial para un análisis de gran superficie de plagas, de insectos o de polinizadores, utilizando micrófonos 3D solos o en combinación con mediciones de retrodispersión de luz para permitir mediciones de luz diurna de trayectorias de vuelo características. Se pueden construir mapas temáticos para enfermedades, plagas o malezas, que permiten tratamientos de tasa variable, un concepto clave en la agricultura de precisión (Duckett et al., 2018).

#### **3.5.8. Monitoreo de cultivos.**

El uso de plataformas terrestres y aéreas puede permitir que la tercera dimensión se agregue con precisión al manejo de los cultivos utilizando técnicas de fusión de datos y mapeo simultáneas. Esto se puede combinar con sistemas de realidad virtual o de realidad aumentada para proporcionar posibilidades de monitoreo e intervención a una escala de planta individual. Dichas plataformas robóticas terrestres y aéreas ofrecen perspectivas adicionales para permitir la detección localizada de señalización extremadamente alta y de alta resolución que no se puede lograr mediante tecnologías de detección pasivas remotas o semi remotas. En el nivel más simple, estas plataformas robóticas ofrecen el potencial de extraer proximidad, reflectancia y transmisión (Duckett et al., 2018).

Los datos de imágenes multiespectrales ayudan a compensar las medidas erróneas que se producen debido a la topología de la superficie y la orientación de los tejidos de cultivos individuales. A un nivel más avanzado, el uso de manipuladores robóticos que ubiquen sensores alrededor de los cultivos o el ganado podría permitir que las respuestas se prueben y examinen, mediante la aplicación de estímulos artificiales. Por ejemplo, mediante la aplicación de un haz de luz enfocado en áreas específicas del tejido del cultivo, y luego modulando el

espectro y la intensidad, es posible conducir fotoquímicas dentro de partes específicas de plantas, por ejemplo: tallos, hojas jóvenes, hojas viejas, etc., que luego pueden ser detectadas mediante imágenes multiespectrales. De esta manera, se puede recuperar información de fenotipo significativamente mayor de todas las plantas que la que se podría lograr solo con detectores de imagen. Los nutrientes y el estrés hídrico de los cultivos se pueden evaluar fusionando los datos de otras fuentes de datos. La combinación de estas evaluaciones con modelos de crecimiento de cultivos ofrece una mejor predicción del rendimiento y la pérdida, lo que conduce a una mejor gestión de la agricultura y una mejor gestión de la cadena de suministro de alimentos (Duckett et al., 2018).

### **3.5.9. Visión robótica.**

Los enfoques de visión artificial ofrecen oportunidades significativas para permitir la autonomía de los sistemas robóticos en la producción de alimentos. Las tareas basadas en la visión para el monitoreo de cultivos incluyen fenotipado (Pound et al., 2016), clasificación cuando las plantas individuales están listas para la cosecha (Kusumam, Krajník, Pearson, Duckett, & Cielniak, 2017) y análisis de calidad (Barnes, Duckett, Cielniak, Stroud, & Harper, 2010), por ejemplo: detectar la aparición de enfermedades, todas con datos de alto rendimiento. Los sistemas de visión también son necesarios para la detección, segmentación, clasificación y seguimiento de objetos como frutas, plantas, ganado, personas, etc., y segmentación semántica de cultivos frente a malezas (Haug, Michaels, Biber, & Ostermann, 2014; Lottes, Hörferlin, Sander & Stachniss, 2016; Bosilj, Duckett & Cielniak, 2018), etc. La visión robótica en la agricultura requiere solidez en cuanto a los cambios en la iluminación, las condiciones climáticas, el fondo de la imagen y la apariencia del objeto, por ejemplo: a medida que las plantas crecen, al tiempo que garantiza una precisión suficiente y un rendimiento en tiempo real para respaldar la toma de decisiones a bordo y el control guiado por visión de los sistemas robóticos. Es posible que se necesiten enfoques de visión activa que integren la planificación de una mejor vista para garantizar que toda la información relevante esté disponible para la toma y el control robótico de decisiones, por ejemplo: donde la fruta o parte cosechable de un cultivo está

cubierta por hojas o malezas. Enfoques basados en el análisis de nubes de puntos en tres dimensiones, por ejemplo: derivados de imágenes estéreo o cámaras RGB-D, ofrecen una promesa significativa para lograr una percepción sólida en entornos agrícolas desafiantes (Kusumam et al., 2017; Smith, Zhang, Hansen, Hales & Smith, 2018).

La visión artificial ya está teniendo un impacto temprano en el monitoreo de animales, por ejemplo: para la estimación del peso, el monitoreo del índice corporal (Hansen et al., 2018) y la detección de enfermedades (Jabbar, Hansen, Smith & Smith, 2017) en cerdos, bovinos y aves de corral. El uso de técnicas de reconocimiento facial adaptadas del trabajo en biometría facial humana (Hansen et al., 2018), permitirá una atención de precisión más específica e intervenciones oportunas para cada animal, asegurando así su salud y bienestar, así como la optimización de la producción agrícola (Duckett et al., 2018).

La visión robótica a menudo depende del aprendizaje automático de conjuntos de datos del mundo real, con enfoques como las redes neuronales (Sa et al., 2016; Pound et al., 2017; Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018). Un desafío en la visión robótica y la percepción de la máquina para la agricultura robótica es permitir el aprendizaje abierto, facilitando la adaptación en cada ciclo de crecimiento de la planta. Obteniendo información sobre nuevas enfermedades y plagas emergentes, nuevas variedades de cultivos, etc. Es un desafío abierto el desarrollo de interfaces de usuario para la verificación del terreno y el aprendizaje semi supervisado en sistemas de visión robótica para la agricultura (Duckett et al., 2018).

#### **3.5.10. Planificación y coordinación.**

La planificación, programación y coordinación son fundamentales para el control de los sistemas de robots múltiples en la granja y, en general, para aumentar el nivel de automatización en la agricultura y la ganadería. Por ejemplo, los sistemas de riego inteligentes pueden responder al cambio de las condiciones climáticas y el estado de crecimiento de los cultivos para optimizar automáticamente la estrategia de riego a fin de reducir el uso de agua sin pérdida de rendimiento. La

estrategia optimizada, por ejemplo, cuándo, dónde y la cantidad de agua se implementa mediante un equipo de riego controlado por computadora (Duckett et al., 2018).

### **3.5.11. Manipulación.**

La manipulación y el agarre automatizados de alimentos presenta una serie de desafíos únicos en comparación con otros sectores. Algunas áreas de recolección de alimentos se han automatizado con éxito, pero estas soluciones se adaptan mejor a situaciones en las que todo el contenido de un campo está listo para la cosecha al mismo tiempo, por ejemplo: granos o tubérculos. Las plantas fructifican durante un período prolongado de tiempo con solo algunas dificultades de automatización, listas para cosechar en un momento particular. Esto se debe a que algunos cultivos deben cosecharse de forma individual sin molestar a los que los rodean y, debido a la destreza, la percepción avanzada y la toma de decisiones requeridas, el trabajo humano todavía se usa ampliamente (Duckett et al., 2018).

Se espera que la robótica (Shepherd et al., 2011; Kim, Laschi, & Trimmer, 2013) juegue un papel importante. Se necesitan dispositivos finales suaves y pinzas para manipular de forma delicada frutas y verduras, por ejemplo: manos de robot suaves para la cosecha de lechuga y dispositivos de succión para recoger manzanas. Los robots se hacen cada vez más suaves también a nivel del actuador y articulación. Mientras que los brazos rígidos de robot son adecuados para la operación a ciegas en un entorno de fábrica, un manipulador agrícola requiere de sensores y actuadores para lograr su tarea. Algunas tareas también requieren que se aplique la cantidad de fuerza correcta, dictando un enfoque de control basado en la fuerza en lugar de la posición. En general, las aplicaciones de agarre y manipulación requieren robustez ante lo imprevisto, al tiempo que mantienen su capacidad de actuar con precisión. Una forma de lograr esto es a través de actuadores de rigidez de variables (Abeach, Nefti-Meziani, & Davis, 2017), que incorporan estructuras elásticas, al igual que los humanos.

### **3.5.12. Aprendizaje y adaptación.**

Se espera que las tecnologías de inteligencia artificial, especialmente en el aprendizaje automático, desempeñen un papel importante en la mayoría de las áreas tecnológicas anteriores, y serán habilitadores esenciales para los robots agrícolas. Los entornos agrícolas están sujetos a cambios a lo largo de la vida útil de un sistema robótico. Por ejemplo, puede haber nuevas variedades de cultivos, malezas, plagas, enfermedades, tratamientos, legislación, cambio climático, etc., así como nuevos implementos y tecnologías robóticas. En términos de inteligencia artificial, esto significa tratar con un mundo abierto, por lo que las técnicas para permitir la adaptación durante la operación en lugar de en la fase de diseño serán cruciales. Las técnicas que permiten que los robots aprendan de la experiencia incluyen el aprendizaje de refuerzo, el aprendizaje de la demostración y el aprendizaje de transferencia para explotar el conocimiento previo (Kamilaris & Prenafeta-Boldú, 2018).

### **3.5.13. Conclusiones**

En Europa se realiza cada año el evento denominado Field Robot Event, donde universidades como Universidad de Aalto de Finlandia, Harper Adams de Inglaterra, Wageningen de Holanda, Universidad de Heilbron, Universidad de Ciencias Aplicadas de Osnabruk, Instituto de Tecnología de Karlsruhe, Instituto de Máquinas Móviles y Vehículos Comerciales, Universidad de Hohenheim todas de Alemania. Presentan sus robots que son capaces de mapear un terreno, navegar de forma automática a través de surcos, detectar objetos en campo y realizar tareas agrícolas usando dispositivos de gran calidad, tales como encoders, sensores ultrasónicos, sensores infrarojos, unidad de medición inercial, LiDar, cámaras de estereovisión, etc.

En México, la Universidad Autónoma Chapingo está desarrollando un robot agrícola multitareas que es capaz de navegar de manera autónoma en surcos, sembrar, fertilizar, asperjar y detectar malezas entre otras actividades. El Instituto Tecnológico de Querétaro ha creado un prototipo de robot que mejora los trabajos de siembra y reforestación de los bosques.

### **3.5.14. Referencias**

Abeach, L. A. A., Nefti-Meziani, S., & Davis, S. (2017). Design of a variable stiffness soft dexterous gripper. *Soft Robotics*. Volume 4, Number 3, Mary Ann Liebert Inc, DOI: 10.1089/soro.2016.0044.

Barnes, M., Duckett, T., Cielniak, G., Stroud, G. & Harper, G. (2010). Visual detection of blemishes in potatoes using minimalist boosted classifiers. *Journal of food engineering*. Volume 98, Issue 3, pages 339-346. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2010.01.010>.

Billingsley, J., Visala, A., & Dunn, M. (2008). *Robotics in agriculture and forestry, Robots handbook*. Springer, Heidelberg, Germany. 1624 p.

Bosilj, P., Duckett, T., & Cielniak, G. (2018). Connected attribute morphology for unified vegetation segmentation and classification in precision agriculture. *Computers in Industry*. Volume 98, pages 226–240.

Chen, C. Y., Li, T. Z. S., Yeh, Y. C., & Chang, C.C. (2009). Design and implementation of an adaptive sliding-mode dynamic controller for wheeled mobile robots. *Mechatronics*. Volume 19, Issue 2, pages 156-166.

Duckett, T., Pearson, S., Blackmore, S., Grieve, B., Chen, Wen., Cielniak G., Cleaversmith J., Dai J., Davis S., Fox, C., From, P., Georgilas, I., Gill, R., Gould, I., Hanheide, M., Hunter, A., Iida, F., Mihalyova, L., Nefti-Meziani, S., Neumann, G., Paoletti, P., Pridmore, T., Ross, D., Smith, M., Stoelen, M., Swainson, M., Wane, S., Wilson, P., Wright, I., & Yang, G. (2018). *Agricultural Robotics: The Future of Robotic Agriculture*, UK-RAS Network Robotics & Autonomous System. United Kingdom. ISSN 2398-4414.

Edan, Y. & Miles, G. (1994). Systems engineering of agricultural robot design. *IEEE Transactions of Systems, Man, and Cybernetics*. Vol. 24, No. 8, 1259-1265.

Hansen, M. F., Smith, M. L., Smith, L. N., Salter, M. G., Baxter, E. M., Farish, M. & Grieve, B. (2018). Towards on-farm pig face recognition using convolutional

neural networks. *Computers in Industry*. Volume 98, pages: 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.016>.

Haug, S., Michaels, A., Biber, P., & Ostermann, J. (2014). Plant classification system for crop/weed discrimination without segmentation. *Conference IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV)*. DOI:10.1109/WACV.2014.6835733.

Jabbar, K. A., Hansen, M. F., Smith, M. L. & Smith, L. N. (2017). Early and non-intrusive lameness detection in dairy cows using 3-dimensional video. *Biosystems Engineering*. Volume 153, pages:63-69. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016.09.017>.

Kamilaris, A., & Prenafeta-Boldú, F. X. (2018). Deep learning in agriculture: A survey. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 147 pages :70-90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2018.02.016>.

Kataoka, T., Hiroma, T., & Ota, Y. (1998). Development of a harvesting hand for apples. *Advanced Robotics*. 13:3, 293-294. DOI: 10.1163/156855399X00612.

Kim, S., Laschi, C., & Trimmer, B. (2013). Soft robotics: a bioinspired evolution in robotics. *Trends in Biotechnology*. Volume 31, Issue 5, Pages:287-294. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.002>.

Kusumam, Keerthy, Krajnik, Tomas, Pearson, Simon, Duckett, Tom and Cielniak, & Grzegorz. (2017). 3D-vision based detection, localization, and sizing of broccoli heads in the field. *Journal of Field Robotics*, 34 (8). pp. 1505-1518. ISSN 1556-4959.

Lottes, P., Hörferlin, M., Sander, S., & Stachniss, C. (2016). Effective vision-based classification for separating sugar beets and weeds for precision farming. *Journal of Field Robotics*. 10.1002/rob.21675.

Pedersen, S.M., Spyros, F. & Blackmore, B.S. (2008). *Agricultural Robots Applications and Economic Perspectives*. 10.5772/6048.

Pound, M., Burgess, A. J., Wilson, M.H., Atkinson, J.A., Griffiths, M., Jackson, A.S., Bulat, A., Tzimiropoulos, Y., Wells, D.M., Murchie, E.H., Pridmore, T. & French, A. (2016). Deep Machine Learning provides state-of-the-art performance in image-based plant phenotyping. *GigaScience*. 6. 10.1101/053033.

Sa, I., Ge, Z., Dayoub, F., Upcroft, B., Perez, T. & McCool, C. (2016). DeepFruits: A Fruit Detection System Using Deep Neural Networks. *Sensors*. 16. 1222. 10.3390/s16081222.

Shepherd, R. F., Ilievski, F., Choi, W., Morin, S. A., Stokes, A. A., Mazzeo, A. D., Chen, X., Wang, M. & Whitesides, G. M. (2011). Multigait Soft Robot. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 108. 20400-3. 10.1073/pnas.1116564108.

Smith, L. N., Zhang, W., Hansen, M. F., Hales, I. J. & Smith, M. L. (2018). Innovative 3D and 2D machine vision methods for analysis of plants and crops in the field. *Computers in Industry*. 97. 10.1016/j.compind.2018.02.002.

Tu, X. (2013). Robust navigation control and headland turning optimization of agricultural vehicles. Digital Repository. Graduate Theses and Dissertations Paper 13188. Thesis Iowa State University. USA.

Wang, Y. (2007). Robot-assisted sensor network deployment and data collection. *Computational Intelligence in Robotics and Automation*. pp. 467-472.

Wilson, J.N. (2000). Guidance of agricultural vehicles - A historical perspective. *Computers and Electronics in Agriculture*. 25. 3-9. 10.1016/S0168-1699(99)00052-6.

Zhang, C. & Kovacs, J. M. (2012). The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: A review. *Precision Agriculture*. 13. 10.1007/s11119-012-9274-5.

## **4. INSTRUMENTACIÓN Y DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOS Y GEOMÉTRICOS DE UN ROBOT AGRÍCOLA**

Luis Gerardo Ruiz González<sup>1\*</sup>, Noé Velázquez López<sup>2</sup>, Agustín Ruiz García<sup>3</sup>,  
Mario Alberto Vázquez Peña<sup>4</sup>.

<sup>1\*</sup> Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

<sup>2, 3, 4</sup> Departamento de Irrigación. Universidad Autónoma Chapingo. Carretera México-Texcoco km 38.5, Texcoco, Estado de México, C. P. 56230, México.

\* Autor para correspondencia: lgerug@hotmail.com

### **4.1. Resumen**

Los sensores en los robots son una parte muy importante, a través de ellos perciben su entorno y envían las señales a dispositivos llamados actuadores para que realicen determinada tarea. Para conocer la posición de robots móviles existen tres categorías de sensores que pueden usarse, estos son: de articulación que miden ángulos y desplazamientos; de campo que miden la inclinación y la altitud de algún lugar y por último los inerciales que miden la aceleración y la velocidad. Para conocer la posición de un robot móvil es necesario instrumentarlo con un sensor llamado encoder que permite conocer velocidades angulares, velocidades lineales y distancia recorrida; con base en esto puede dar una instrucción a los motores del robot de detener el movimiento, dar una vuelta, hacer un giro, etc. En el diseño de un robot es necesario conocer las tareas que se realizarán, de acuerdo a esto se deben determinar las características físicas y geométricas del mismo. Estas propiedades de los robots también sirven para modelar su movimiento y posición. Al instrumentar el robot con el encoder también se usó el Arduino mega 2560® y un módulo lector de datos microSD. Las propiedades físicas son medidas con cinta métrica, basculas, dinamómetro de resorte entre otros. La máxima velocidad medida con los encoders es de  $1.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la masa total del vehículo es de 30 kg, los coeficientes de fricción medidos son: estático 0.8, dinámico 0.13 y lateral 0.4.

**Palabras clave:** skid steer, encoder, odometría, coeficiente de fricción.

## 4.2. Abstract

Sensors in robots are a very important part, through them they perceive their environment and send signals to devices called actuators to perform a certain task. To know the position of mobile robots there are three categories of sensors that can be used, these are: articulation that measure angles and displacements; of field that measure the inclination and the altitude of some place and finally the inertials that measure the acceleration and the speed. To know the position of a mobile robot it is necessary to instrument it with a sensor called an encoder that allows to know angular speeds, linear speeds and distance traveled; Based on this, you can instruct the robot's motors to stop movement, turn, make a turn, etc. In the design of a robot it is necessary to know the tasks that will be carried out, based on this the physical and geometric characteristics of it must be determined. These properties of robots also serve to model their movement and position. When instrumenting the robot with the encoder, the Arduino mega 2560® and a microSD data reader module are also used. The physical properties are measured with tape measure, scales, spring dynamometer among others. The maximum speed measured with the encoders is  $1.23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , the total mass of the vehicle is 30 kg, the friction coefficients measured are: static 0.8, dynamic 0.13 and lateral 0.4.

**Key words: skid steer, encoder, odometry, coefficient of friction.**

## 4.3. Introducción

Un componente básico de la automatización en la agricultura es la navegación autónoma. Los primeros sistemas de navegación en dominios agrícolas usaban una cámara como sensor y se basaban en técnicas de visión por computadora (Hiremath, Van der Heijden, Van Evert, Stein & Ter Braak, 2014). La navegación, la guía y el transporte incluyen tres niveles de autonomía: dirección convencional, un sistema automático o asistido por un operador y un sistema totalmente autónomo. La navegación y la guía pueden ser la tarea principal del sistema, por ejemplo, transportar el cultivo desde el campo a la planta de empaque, o ser una tarea de apoyo que permita al sistema realizar su tarea principal, por ejemplo, una tarea de apoyo para fumigar o transportar un robot de árbol en árbol durante su proceso de cosecha. El guiado automático ha sido el área de investigación más activa a lo largo de la historia de la automatización de la maquinaria agrícola (Nof, 2009).

Hay muchos sensores disponibles para la localización de robots móviles. Los más comunes son encoders de rueda, sistemas de posicionamiento global, unidad de medida inercial (IMU) y visión artificial (Reid, Zhang, Noguchi, & Dickson, 2000; Hague, Marchant, & Tillet, 2000). Todos estos sensores tienen algunos inconvenientes individuales que limitan el entorno en el que pueden operar. Un sensor GPS requiere que el robot esté al aire libre y que haya un camino despejado hacia los satélites. Los encoders de rueda asumen que el diámetro de la rueda es constante y que no se produce deslizamiento. Por lo tanto, estos se utilizan en combinación para proporcionar una estimación de la posición global que minimiza la limitación de cada sensor. La estimación de la posición puede ser bastante precisa si los encoders usados son de gran resolución. La posición global no siempre tiene que ser tan precisa, especialmente no para los robots que operan en un campo agrícola a escala de cultivo. En ese caso, la posición relativa a los cultivos es más importante. Esto requiere la habilidad de navegar localmente con alta precisión (Åstrand & Baerveldt, 2002).

La precisión de la posición determina qué tareas puede realizar un robot agrícola autónomo. El sistema de alta precisión puede realizar operaciones a escala de cultivo, mientras que los sistemas de baja precisión pueden operar en una sección de un campo. Tareas como la pulverización de precisión o el control mecánico de malezas requieren una alta precisión de la medición relativa al cultivo. Estos sistemas pueden beneficiarse del uso de medidas relativas en lugar de absolutas. Dado que muchos campos agrícolas están estructurados por filas, estas se pueden utilizar para la navegación. Al arar y cosechar, son útiles seguir las líneas entre el área tratada y no tratada. En el caso de cultivos que se siembran en hileras como patatas o remolacha azucarera, puede seguir estas hileras para el control de malezas y la cosecha (Ericson & Åstrand, 2008).

#### **4.3.1. Odometría**

Odometría es el cálculo de distancias. Es un método fundamental usado para la navegación de robots. Medir el tiempo es fácil usando un reloj que este dentro de

una computadora. Medir la velocidad es más difícil; en algunos robots educativos se usan ruedas con encoders para contar las vueltas de las ruedas, mientras que en otros se usan las características del motor para medir la velocidad. La distancia recorrida “s” es igual al producto de la velocidad por el tiempo, sabiendo esto, la nueva posición del robot puede ser calculada. En una dimensión el cálculo es trivial, pero en dos dimensiones el cálculo es más complejo cuando el movimiento implica dar vueltas. Una desventaja de la odometría (con o sin encoders) es que las medidas son indirectas, relativas a las características de los motores. Una manera de estimar la posición del robot puede ser usando un sistema de navegación inercial (IMU), que mide directamente la aceleración y la velocidad angular (Ben-Ari & Mondada, 2018).

#### **4.3.2. Encoder**

Los encoders ópticos proporcionan una medición de la rotación de un eje que existe en la carcasa del sensor. El principio básico es como el de las aspas de un helicóptero. Una rejilla (hoja de vidrio con orificios regularmente espaciados) se fija a la mitad móvil del mecanismo. A medida que la rejilla gira más allá de un fototransmisor (diodo láser), que se fija a la parte estacionaria del dispositivo, un fotodetector (fotodiodo) se expone alternativamente y se protege de la fuente de luz para que produzca un pulso por cada agujero que pasa en la rejilla. Los pulsos del detector se cuentan en el circuito de la interfaz, que luego genera una medición de la rotación total. En los robots móviles, normalmente se utilizan la llamada cuadratura de encoders. Para la medición de la rotación de la rueda, la medición de la rotación de alta precisión generalmente no se justifica porque la rueda se desliza en la superficie de todos modos (Kelly, 2013).

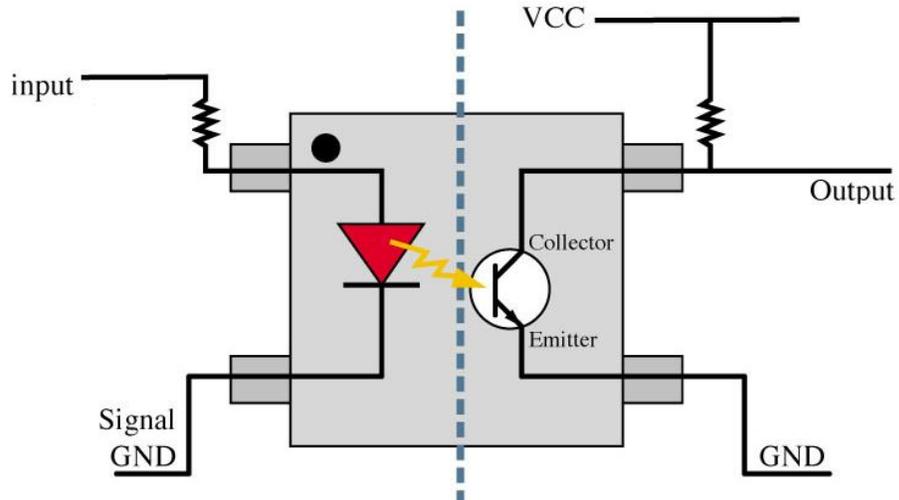


Figura 3. Diagrama eléctrico interno del optoacoplador.

#### 4.3.3. Encoders absolutos

Para las aplicaciones de puntería del sensor de percepción, generalmente es importante conocer el ángulo absoluto del sensor de percepción. El registro del movimiento almacenado en el contador se perderá cuando se apague el sensor. La única forma de utilizarlo como sensor absoluto es llevarlo físicamente a una posición inicial cuando se gira. Cuando esto no sea deseable, se puede utilizar un encoder absoluto (Kelly, 2013).

#### 4.3.4. Encoders lineales

Los encoders también están disponibles para medir el desplazamiento lineal. Algunos, llamados encoders de cadena, se basan en unir un carrete de cable delgado al eje. Por supuesto, también se puede utilizar un mecanismo de piñón y corona para convertir un codificador rotatorio en uno lineal (Kelly, 2013).

El principio de funcionamiento de los encoders para medir distancia recorrida se muestra en la figura 4. Se sabe que la circunferencia de un círculo es igual a dos veces el radio de la rueda multiplicado por el número pi, o el diámetro de la rueda por pi. La distancia recorrida por la rueda es igual a las vueltas de la rueda por la circunferencia.

$$\text{Distancia recorrida} = (\text{ticks del encoder} / 360) \times \text{circunferencia} \dots \dots \dots (1)$$

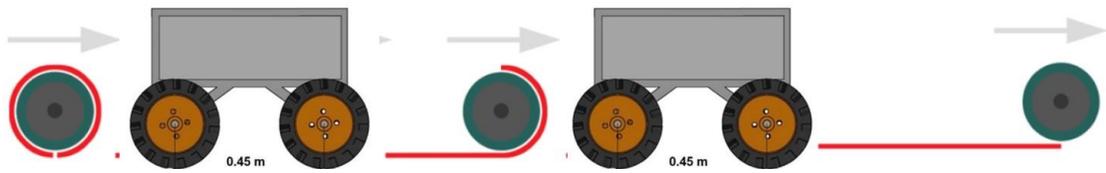


Figura 4. Principio de funcionamiento de encoder para determinar distancias.

#### 4.3.5. Arduino Mega 2560

El Arduino mega es un microprocesador de hardware libre que cuenta con 54 pines que pueden ser usados como entradas o salidas de señales analógicas o digitales. Cuenta con un sector de pines exclusivos para usar PWM. De igual manera cuenta con pines de voltaje, tierra y un botón de reinicio. Este microprocesador cuenta con su propio software de programación.



Figura 5. Arduino ATMEGA 2560 (Fuente: autor 2018).

#### 4.3.6. Módulo microSD.

Los módulos microSD son dispositivos que sirven para guardar información obtenida de los sensores, su programación y conexión se hace con cualquier versión de Arduino. Funcionan con 3.3 volts el protocolo de comunicación con Arduino es el de SPI. Los hay en diferentes versiones: microSD, mini SD y estándar SD.



Figura 6. Módulo microSD (Fuente: autor 2020).

#### 4.3.7. Fricción

La fricción es una fuerza que resiste el movimiento de dos superficies en contacto que se deslizan relativamente entre sí. Esta fuerza actúa siempre tangencialmente a la superficie en los puntos de contacto y está dirigida en sentido opuesto al movimiento posible o existente entre las superficies (Hibbeler, 2010).

Cuando dos objetos están sujetos a fuerzas de desplazamiento, pero aún no los han movido entre sí, se produce una fricción estática. Por eso también se menciona la fuerza adhesiva que debe superarse para mover el objeto. La adhesión es la fuerza de reacción. En un sistema determinado estáticamente, la fuerza de unión se puede determinar a partir de las condiciones de equilibrio. La figura 7 muestra la representación del rozamiento estático, en esta imagen  $F_G$  peso,  $F_H$  fuerza de adherencia,  $F_N$  fuerza normal,  $F$  fuerza externa,  $v$  velocidad y  $F_{Hmax}$  fuerza de adherencia máxima (Gaunt).

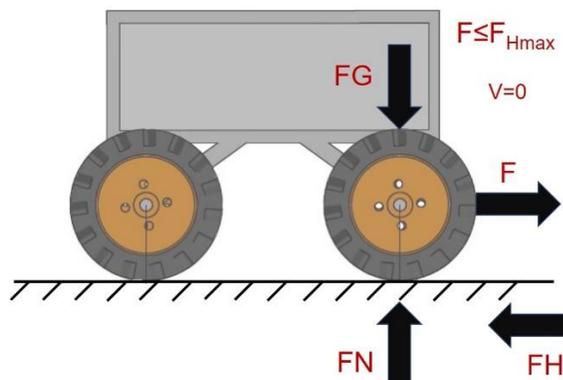


Figura 7. Diagrama de cuerpo libre del rozamiento estático.

La fricción dinámica se refiere a la situación en la que un objeto causa fricción cuando se mueve sobre otro objeto. Cuanto mayor sea la rugosidad de las dos superficies que se frotan entre sí, mayor será la fricción y mayor será la fuerza que las superficies ejercen entre sí. La fricción dinámica es una fuerza física (la fuerza principal), que es proporcional a la fuerza normal FN. La figura 8 muestra la representación del rozamiento dinámico, en esta imagen FG peso, FR fuerza de rozamiento dinámico, FN fuerza normal, F fuerza externa, v velocidad y FR fuerza de rozamiento dinámico (Gaunt).

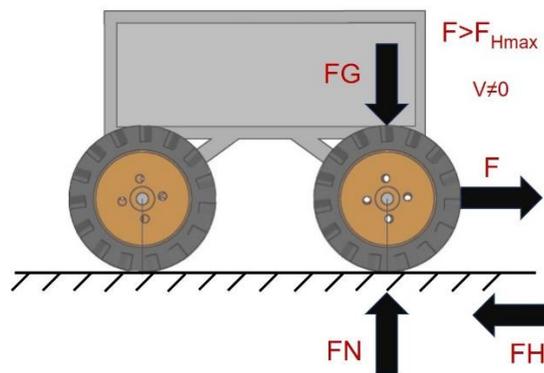


Figura 8. Diagrama de cuerpo libre del rozamiento dinámico.

El coeficiente de fricción se determina con la siguiente ecuación (Arcot, 2008):

$$\mu = \frac{F_f}{F_N} \dots\dots\dots(2)$$

Donde:

$\mu$  = Coeficiente de fricción [adimensional].

$F_f$  = Fuerza de fricción [N].

$F_N$  = fuerza normal [N].

La resistencia a la rodadura ocurre cuando una llanta gira sobre una superficie. El coeficiente de resistencia a la rodadura se mide de igual forma que el coeficiente de fricción (Arcot, 2008).

$$\mu_r = \frac{F_r}{FN} \dots\dots\dots(3)$$

Donde:

$\mu_r$ = Coeficiente de resistencia a la rodadura [adimensional].

$F_r$  = Fuerza de resistencia [N].

$FN$ = Fuerza normal [N].

El coeficiente de resistencia lateral se determina con la siguiente ecuación (Arcot, 2008):

$$\mu_l = \frac{F_l}{FN} \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

$\mu_l$ = Coeficiente de resistencia lateral [adimensional].

$F_l$  = Fuerza lateral [N].

$FN$ = Fuerza normal [N].

#### **4.4. Materiales y métodos**

Para hacer el sistema que leerá y guardara los datos del encoder, se selecciona el Arduino mega 2560® por su versatilidad para realizar proyectos y en particular por contar con pines exclusivos para PWM (pulse width modulation) y que resulta ideal para el control de velocidades de los motores para esta aplicación.

La conexión del módulo microSD en Arduino mega 2560® se da de la siguiente manera: gnd a tierra, vcc a 5 volts, MISO a pin 50, MOSI a pin 51, SCK a pin 52 y CS a pin 53.

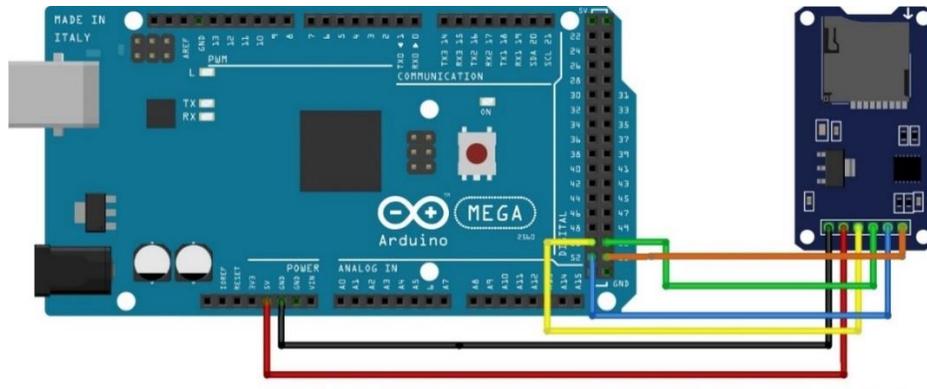


Figura 9. Diagrama de conexión del módulo microSD a Arduino mega (Fuente: autor 2019).

Los encoders utilizados son de la marca Autonics®, el modelo es E50S-8-5000-3-T-5; que cuenta con las siguientes características técnicas: diámetro de flecha 8 mm, resolución de 5000 pulsos por revolución, alimentación 5 volts y conexión de salida de señales tipo tótem pole a 5 volts.

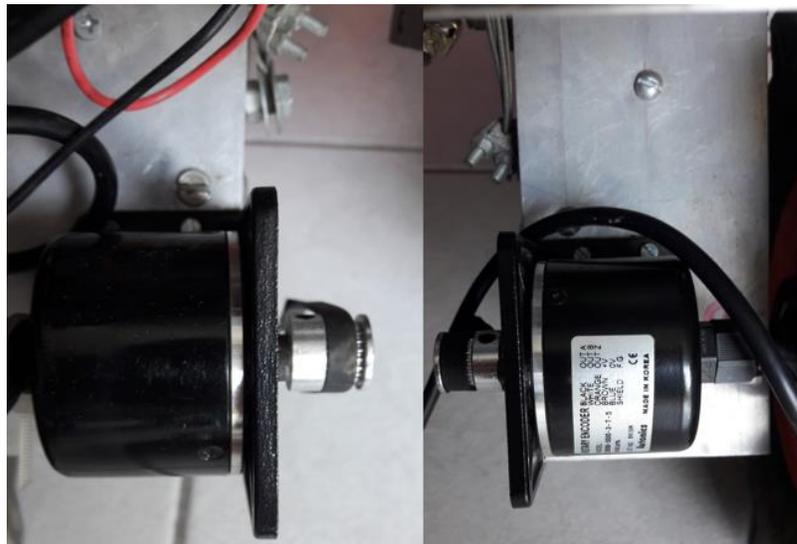


Figura 10. Encoders acoplados a las ruedas del robot Voltan (Fuente: autor 2019).

Para leer los pulsos del encoder, las señales se conectaron a Arduino mega 2560® y un programa en el mismo, donde se activaron las interrupciones. Los encoders se conectan de la siguiente manera en Arduino mega 2560®: cable

negro del encoder 1 a pin 2, cable blanco del encoder 1 a pin 3, cable café del encoder 1 a 5 volts, cable azul del encoder 1 a tierra; cable blanco del encoder 2 a pin 18, cable negro del encoder 2 a pin 19, cable café del encoder 2 a 5 volts y cable azul del encoder 2 a tierra.

Una vez instalados los encoders junto con el módulo microSD y el Arduino se puso el robot a funcionar en un tiempo de 10 segundos. Para que el robot avanzará en línea recta se programaron los dos motores del robot a un mismo PWM (modulación de ancho de pulso), esto da como resultado que las velocidades angulares de las dos ruedas del robot sean iguales. Se midieron las velocidades angulares y lineales del robot, la distancia recorrida, el ángulo de entrada y salida del robot (se midieron con la brújula de un smartphone). Estos datos se midieron cada 20 unidades de PWM, empezando en 100 y terminando en 240. Se realizaron 10 repeticiones en cada valor de PWM.

El diseño del robot da los parámetros geométricos del robot. Otros parámetros deben ser obtenidos de forma experimental. Los parámetros físicos del vehículo que se determinarán de forma experimental y analítica son:

- Distribución de la masa del vehículo en las ruedas.
- Masa total.
- Posición del centro de masa “CG”.
- Momento de inercia.
- Coeficiente de fricción y coeficiente de resistencia lateral.

Para obtener la distribución de la masa en las ruedas, éstas se ponen sobre cuatro básculas analógicas de la marca Taurus®; la suma de cada una de estas masas da la masa total del vehículo. La figura 11 muestra la manera en que se obtuvo la masa de las ruedas del robot.



Figura 11. Medición de la masa de las ruedas del robot (Fuente: autor 2018).

Para obtener la posición del centro de gravedad de la masa del vehículo en el eje horizontal X y el eje vertical Y, se usan los planos X-Z y Y-Z.

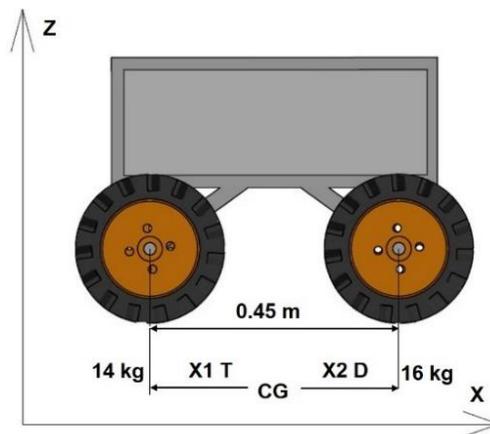


Figura 12. Plano X-Z para determinar el centro de gravedad del robot en dirección longitudinal (Fuente: autor 2018).

Para obtener la posición del centro de masa del robot en el eje horizontal, se cuenta con este sistema de dos ecuaciones que al resolverse dan el punto buscado. Estas ecuaciones son:

$$X_1 + X_2 = 0.45 \text{ m} \dots\dots\dots (5)$$

$$14X_1 = 16X_2 \dots\dots\dots (6)$$

De la misma manera se determina la posición del centro de masa en la anchura del robot.

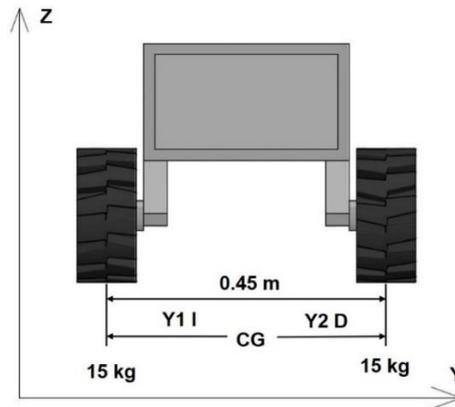


Figura 13. Plano Y-Z para determinar el centro de gravedad del robot en dirección lateral (Fuente: autor 2018).

En este caso, se tiene el sistema ecuaciones siguientes:

$$Y_1 + Y_2 = 0.45 \text{ m} \dots\dots\dots (7)$$

$$15Y_1 = 15Y_2 \dots\dots\dots (8)$$

Para obtener el momento de inercia de masa se utilizará la siguiente ecuación (Meriam & Kraige, 1998):

$$I_z = \int r^2 dP \dots\dots\dots (9)$$

Donde:

$I_z$  = Momento de inercia [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ].

$r$  = Distancia de cada rueda al centro de gravedad del vehículo [m].

$dP$ = Masa de cada una de las ruedas del vehículo [kg].

El coeficiente de fricción entre las llantas del robot y el suelo se calcula con la ecuación 2. Para realizar este experimento, las ruedas del robot deben bloquearse y jalar el robot con la ayuda de una cadena y un dinamómetro para así medir la fuerza. La fuerza de fricción  $F_f$  es medida en el momento en que el robot comienza a deslizarse sobre la superficie.



Figura 14. Medición de la fuerza de fricción (Fuente: autor 2020).

Para medir el coeficiente de resistencia a la rodadura de las llantas del robot se utiliza la ecuación 3. El robot se desplaza a una velocidad constante, con ayuda de una cadena y el dinamómetro se mide la fuerza de resistencia.



Figura 15. Medición de la fuerza de resistencia a la rodadura (Fuente: autor 2020).

Para medir el coeficiente de resistencia lateral se procede de la misma manera que para el coeficiente de fricción. En este caso, se jala la rueda hasta que

empiece a deslizarse sobre la superficie y con ayuda de un dinamómetro se mide la fuerza aplicada para provocar el deslizamiento.



Figura 16. Medición de la fuerza de resistencia lateral (Fuente: autor 2020).

#### 4.5. Resultados y discusión

El cuadro 1 muestra el promedio de velocidad angular y lineal de las ruedas del robot a cada 20 unidades de PWM. Cuando el valor de PWM incrementa, los valores de velocidad lineal y angular también lo hacen, esto se debe a que el PWM funciona como un regulador de potencia de los motores eléctricos del robot.

Cuadro 1. Velocidades medidas con encoders a diferente valor de PWM.

PWM.	Velocidad angular [rpm].	Velocidad lineal [m·s <sup>-1</sup> ].
100	32.14	0.42 (0.05) <sup>σ</sup>
120	38.47	0.50 (0.33) <sup>σ</sup>
140	46.95	0.61 (0.07) <sup>σ</sup>
160	55.33	0.72 (0.03) <sup>σ</sup>
180	65.54	0.85 (0.02) <sup>σ</sup>
200	76.47	0.99 (0.17) <sup>σ</sup>
220	86.42	1.12 (0.04) <sup>σ</sup>
240	94.57	1.23 (0.07) <sup>σ</sup>

<sup>σ</sup> desviación estándar del total de repeticiones.

El cuadro 2 muestra el promedio de 10 repeticiones de los datos de distancia recorrida del robot en 10 segundos, de igual manera se midieron los ángulos de entrada y de salida (fin de recorrido) con la brújula de un smartphone. La información de los ángulos ayuda a conocer el error de orientación del robot.

Cuadro 2. Distancia recorrida y ángulo de entrada y salida medidos a cada PWM.

PWM.	Tiempo [s].	Distancia recorrida [m].	∠ ent [°].	∠ sal [°].	dif ∠ ent ∠ sal [°].
100	10	4.20 (0.05) <sup>σ</sup>	181.00	182.10	-1.10 (1.14) <sup>σ</sup>
120	10	5.00 (0.33) <sup>σ</sup>	181.00	182.20	-1.20 (1.40) <sup>σ</sup>
140	10	6.10 (0.07) <sup>σ</sup>	181.00	180.40	0.60 (3.44) <sup>σ</sup>
160	10	7.20 (0.03) <sup>σ</sup>	181.00	180.10	0.90 (2.66) <sup>σ</sup>
180	10	8.50 (0.02) <sup>σ</sup>	181.00	182.70	-1.70 (2.57) <sup>σ</sup>
200	10	9.94 (0.17) <sup>σ</sup>	181.00	181.00	0.00 (1.28) <sup>σ</sup>
220	10	11.24 (0.04) <sup>σ</sup>	181.00	179.90	1.10 (2.95) <sup>σ</sup>
240	10	12.30 (0.07) <sup>σ</sup>	181.00	175.30	5.70 (3.41) <sup>σ</sup>

<sup>σ</sup> Desviación estándar del total de repeticiones.

El robot generalmente trabaja a velocidades asociadas a valores de 180, 200 y 220 de PWM. Para estos valores de PWM se realizaron 30 pruebas midiendo distancia recorrida, ángulos de entrada y salida de la trayectoria del robot.

La figura 17 muestra el error de orientación de la distancia recorrida del robot a una velocidad asociada a un valor de 180 de PWM, la componente horizontal tiene un promedio de 8.45 m con desviación estándar de 0.12, la componente vertical tiene un promedio de 0.0047 m y tiene 0.0056 de desviación estándar. La diferencia promedio entre el ángulo de entrada y el de salida es de -0.63° con desviación estándar de 3.88. Estos resultados indican que el robot genera una trayectoria horizontal.

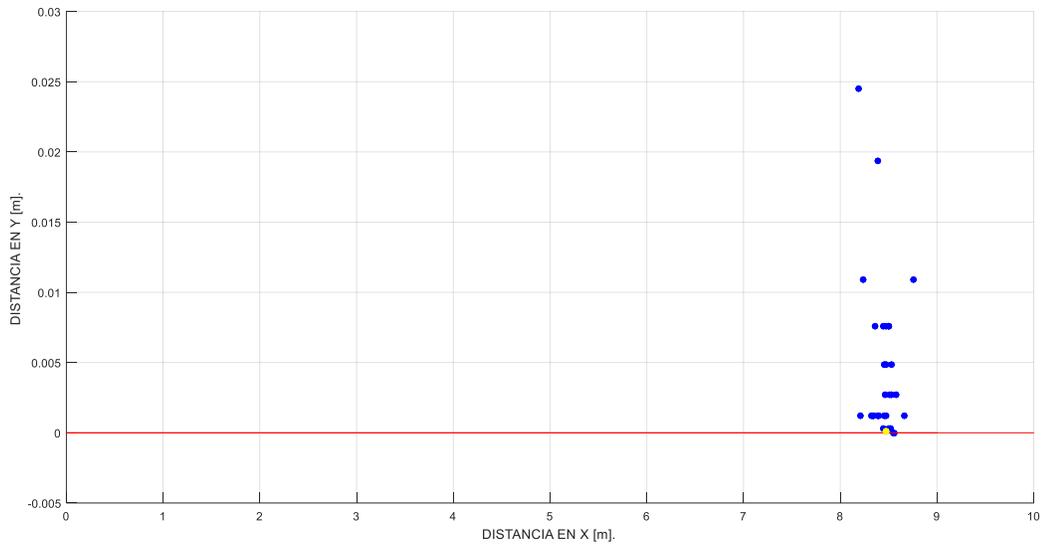


Figura 17. Error de orientación a un valor de 180 PWM (Fuente: autor 2020).

La figura 18 muestra el error de orientación de la distancia recorrida del robot a una velocidad asociada a un valor de 200 de PWM, la componente horizontal tiene un promedio de 9.62 m con desviación estándar de 0.18, la componente vertical tiene un promedio de 0.0029 m y tiene 0.0045 de desviación estándar. La diferencia promedio entre el ángulo de entrada y el de salida es de  $0.0^\circ$  con desviación estándar de 3.09. Estos resultados indican que el robot genera una trayectoria horizontal.

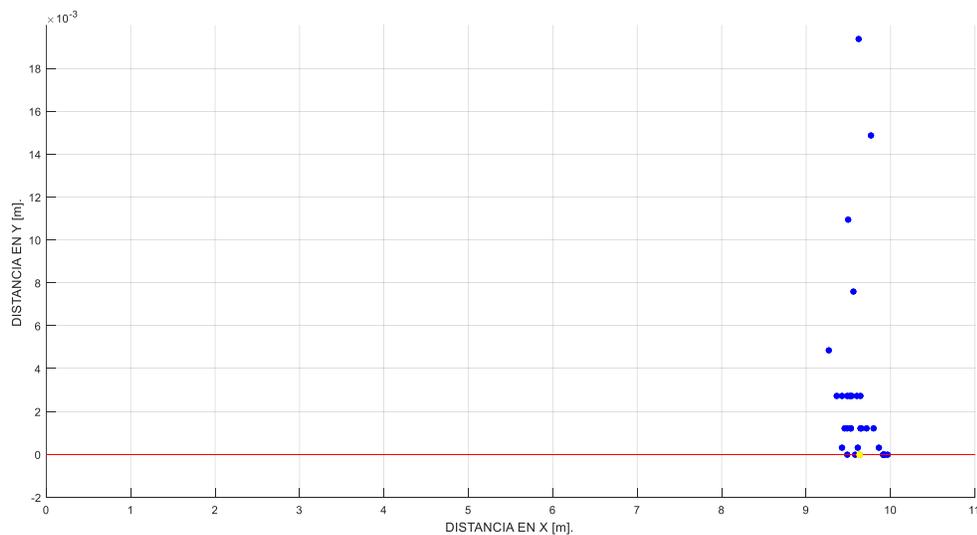


Figura 18. Error de orientación a un valor de 200 PWM (Fuente: autor 2020).

La figura 19 muestra el error de orientación de la distancia recorrida del robot a una velocidad asociada a un valor de 220 de PWM, la componente horizontal tiene un promedio de 11.15 m con desviación estándar de 0.12, la componente vertical tiene un promedio de 0.0073 m y tiene 0.0079 de desviación estándar. La diferencia promedio entre el ángulo de entrada y el de salida es de -2.10 con desviación estándar de 4.84. Estos resultados indican que el robot genera una trayectoria horizontal.

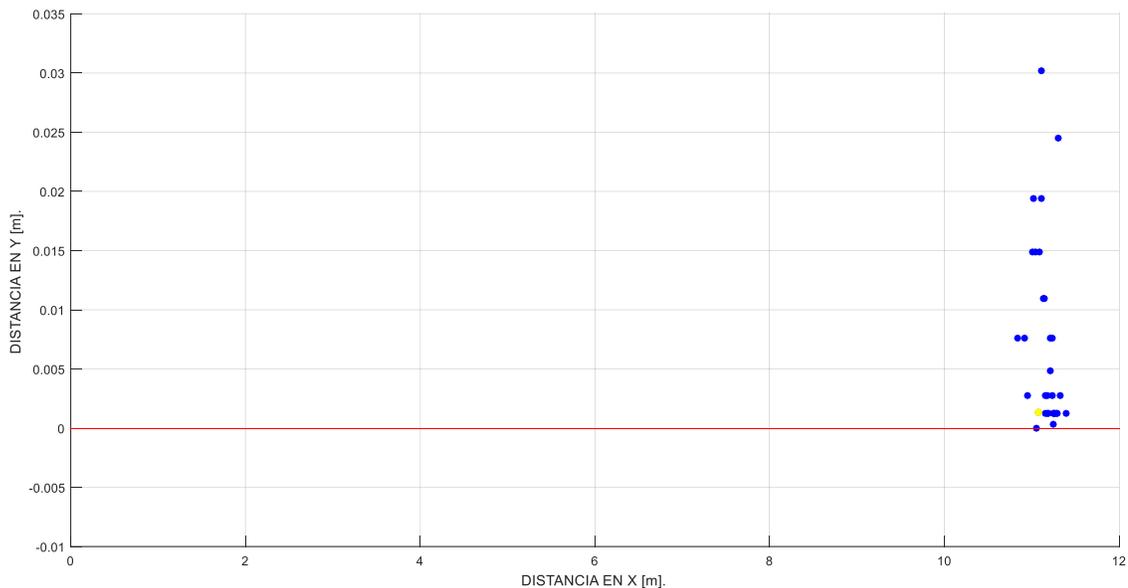


Figura 19. Error de orientación a un valor de 220 PWM (Fuente: autor 2020).

El cuadro 3 muestra el promedio de hacer 30 repeticiones y medir la distancia recorrida del robot.

Cuadro 3. Distancia recorrida del robot a diferentes PWM.

PWM.	Tiempo [s].	Distancia recorrida [m].
180	10	8.47 (0.1) $\sigma$
200	10	9.64 (0.18) $\sigma$
220	10	11.08 (0.12) $\sigma$

$\sigma$  Desviación estándar del total de repeticiones.

La figura 20 muestra los radios de giros medidos experimentalmente. Para realizar el primer experimento, se programó el lado izquierdo del robot a una velocidad angular de 94.57 revoluciones por minuto, el lado derecho a una velocidad angular de 46.95 revoluciones por minuto. Para el segundo experimento se programó el lado izquierdo del robot a una velocidad angular de 94.57 revoluciones por minuto, el lado derecho a una velocidad angular de 38.47 revoluciones por minuto. La diferencia entre los radios de giro medidos experimentalmente es de 0.05 m.

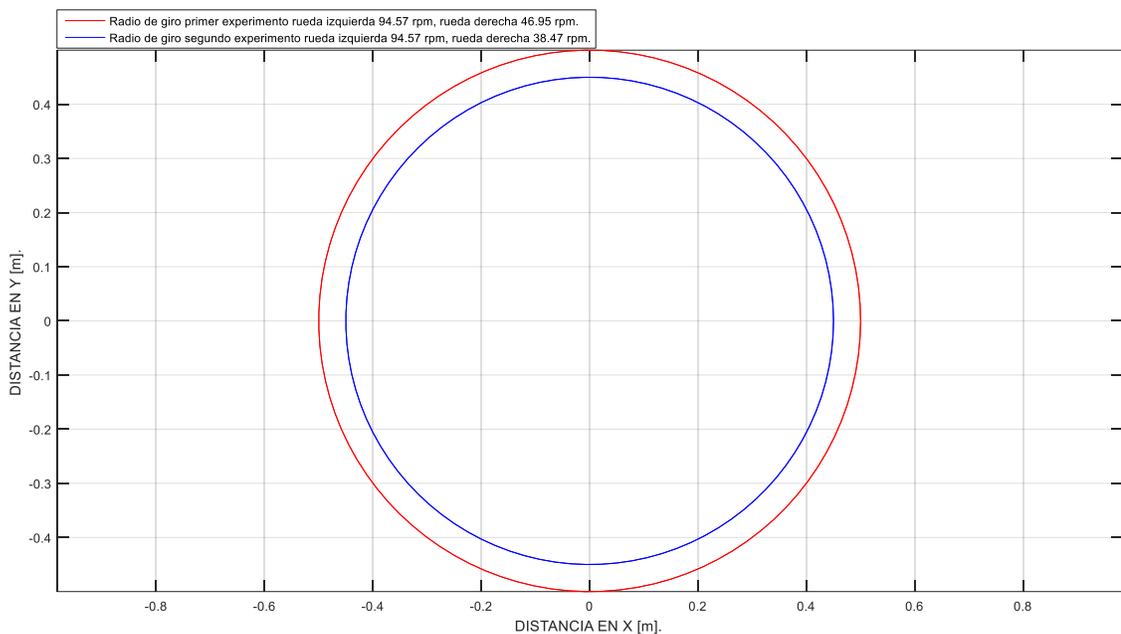


Figura 20. Radio de giro del robot medido experimentalmente (Fuente: autor 2020).

La figura 21 muestra los valores obtenidos de medir la masa que soporta cada llanta del robot. Las ruedas 1 y 2 son la parte delantera del robot, las ruedas 3 y 4 son la parte trasera. El valor es mayor en la parte delantera porque ahí se encuentra la batería del robot. La masa total del vehículo es de 30 kg.



Figura 21. Distribución de las masas de las ruedas del robot (Fuente: autor 2020).

Resolviendo los sistemas de ecuaciones (5), (6), (7) y (8) se tiene como resultado  $X_1=0.24$  m,  $X_2=0.21$  m,  $Y_1=0.225$  m y  $Y_2=0.225$  m. Esto indica que el centro de gravedad del robot se encuentra a 0.24 m de las ruedas traseras del robot en dirección a las ruedas delanteras y a 0.225 m de la rueda izquierda del robot en dirección a la rueda derecha.

El robot skid steer Voltan, está integrado de los siguientes componentes y dispositivos:

- Chasis de aluminio.
- Cuatro ruedas.
- Transmisión por cadenas.
- Dos motores eléctricos de corriente directa 180W.
- Una cámara web Logitech C920.
- Dos encoders E50S8-5000-3-T-5 marca Autonics®.
- Una IMU MPU9250®.
- Dos arduino mega 2560®.
- Una laptop a bordo DELL®.
- Una batería de litio.
- Módulo lector de tarjeta microSD®.
- Es un vehículo 4x4.



Figura 22. Robot tipo skid steer Voltan con sensores (Fuente: autor 2017).

El cuadro 4 muestra los valores obtenidos de medir las masas de cada una de las llantas del robot, la masa total, las medidas de diseño del robot y los coeficientes de fricción entre otros.

Cuadro 4. Parámetros físicos y geométricos del robot Voltan.

Símbolo.	Variable.	Valor.	Unidad.
m1	Masa rueda 1.	8	kg
m2	Masa rueda 2.	8	kg
m3	Masa rueda 3.	7	kg
m4	Masa rueda 4.	7	kg
m	Masa total del robot.	30	kg
B	Ancho entre ruedas del robot.	0.45	m
L	Largo entre ruedas del robot.	0.45	m
r	Radio de la rueda del robot.	0.125	m
Iz	Momento de inercia.	1.52	kg·m <sup>2</sup>
F <sub>f</sub>	Fuerza de fricción.	24	kgf
F <sub>r</sub>	Fuerza de resistencia a la rodadura.	4	kgf
F <sub>l</sub>	Fuerza lateral.	12	kgf
v	Velocidad lineal máxima.	1.2	m·s <sup>-1</sup>
μ	Coefficiente de fricción.	0.8	
μ <sub>r</sub>	Coefficiente de resistencia a la rodadura.	0.13	
μ <sub>l</sub>	Coefficiente de resistencia lateral.	0.4	

#### 4.6. Referencias

Arcot, K.D. (2008). Modeling and Simulation of Skid Steered Robot Pioneer 3AT. Florida State University Libraries. Electronic Theses, Treatises and Dissertations.

Åstrand, B. & Baerveldt, A. (2002). An Agricultural Mobile Robot with Vision-Based Perception for Mechanical Weed Control. *Autonomous Robots* 13, 21–35. <https://doi.org/10.1023/A:1015674004201>.

Ben-Ari, M. & Mondada, F. (2018). Elements of robotics. Springer Open, Switzerland.

Ericson, S. & Åstrand, B. (2008). Stereo Visual Odometry for Mobile Robots on Uneven Terrain. *World Congress on Engineering and Computer Science, Advances in Electrical and Electronics Engineering - IAENG Special Edition of the*. 150-157. 10.1109/WCECS.2008.26.

Hague, T., Marchant, J.A., & Tillett, N.D. (2000). Ground based sensing systems for autonomous agricultural vehicles. *Computers and Electronics in Agriculture*, 25, 11-28.

Hibbeler R.C. (2010). *Ingeniería Mecánica. Estática. Décimo segunda edición.* Pearson Educación. México.

Hiremath, S., Van der Heijden, G., Van Evert, F., Stein, A. & ter Braak, C.J.F (2014). Laser range finder model for autonomous navigation of a robot in a maize field using a particle filter. *Computers and Electronics in Agriculture*. 100. 41–50. 10.1016/j.compag.2013.10.005.

Kelly, A. (2013). *Mobile robotics.* Cambridge University Press.

Meriam, J.L., & Kraige L. G. (1998). *Mecánica para ingenieros. Estática. Tercera edición,* Editorial Reverté.

Nof, S. Y. (2009). *Handbook of automation (1st ed.).* Springer.

Reid, J.F., Zhang, Q., Noguchi, N. & Dickson, M. (2000). Agricultural automatic guidance research in North America. *Computers and Electronics in Agriculture*. 25. 155-167. 10.1016/S0168-1699(99)00061-7.

Página de internet.

Gunt. Consultado el 15-7-2020 en <https://www.gunt.de/en/products/engineering-mechanics-and-engineering-design/statics/glct-1:pa-148:ca-3>.

## 5. MODELO MATEMÁTICO Y SIMULACIÓN DEL ROBOT VOLTAN TIPO SKID STEER

Luis Gerardo Ruiz González<sup>1\*</sup>

Correo: lgerug@hotmail.com, (\*Autor para correspondencia).

Noé Velázquez López<sup>2</sup>

Agustín Ruiz García<sup>2</sup>

Mario Alberto Vázquez Peña<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua. Carretera México Texcoco, km 38.5, Chapingo Estado de México, C.P. 56230, México.

<sup>2</sup>Universidad Autónoma Chapingo, Departamento de Irrigación. Carretera México Texcoco, km 38.5, Chapingo Estado de México, C.P. 56230, México.

### 5.1. Resumen

Conocer la posición de un vehículo autónomo es de gran importancia para saber su comportamiento, dirección, sentido y velocidad en cada momento que realiza sus tareas. Con esta información se pueden hacer mapas y generar trayectorias que ayuden de igual forma a determinar la cantidad de energía que consume y en qué momento se acabara su batería.

El objetivo de la presente investigación es obtener el modelo matemático de los vehículos tipo skid steer y aplicarlo al robot móvil no tripulado. Al mismo tiempo realizar simulaciones para conocer su posición en diferentes tiempos y a diferentes velocidades lineales usando sensores llamados encoders. En el modelo matemático intervienen fuerzas y momentos que se determinan conociendo la masa de cada rueda del vehículo y la masa total, así como algunos parámetros geométricos. Al modelar el robot, el sistema se supone un cuerpo rígido sin aceleraciones angulares, lineales y bajas velocidades, de otra forma se usarían otras ecuaciones.

La mayor velocidad que puede alcanzar el vehículo es de  $1.23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a esta velocidad el robot se desplazara 12.3 metros en 10 segundos.

Las limitaciones del presente trabajo son de carácter físico, ya que en la construcción de robots o vehículos tipo skid steer los diseños son muy variados en cuanto a tamaño, materiales utilizados y dimensiones.

**Palabras clave: Skid steer, vehículo autónomo no tripulado, robótica agrícola, sensores.**

## **5.2. Introducción**

### **5.2.1. Modelado de robots.**

El modelado matemático y las simulaciones son muy útiles en la ingeniería robótica, y existen varias formas tanto para construir un modelo dinámico como para interferir con estos modelos. Los modelos dinámicos y cinemáticos se utilizan ampliamente para desarrollar y ampliar la comprensión del manejo y la estabilidad del vehículo en tierra. Los modelos dinámicos y cinemáticos deben incluir diferentes parámetros involucrados en la dirección del vehículo, como la masa, la inercia de las ruedas, el ángulo de la dirección, el deslizamiento del vehículo y los efectos de tracción en los vehículos terrestres. La dinámica básica del vehículo involucra movimientos laterales, direccionales y longitudinales. La dinámica direccional y lateral se refiere a las respuestas del vehículo, que incluyen movimientos de orientación y giro. La dinámica longitudinal implica la respuesta de la velocidad debido a las fuerzas de los neumáticos longitudinales y verticales según lo produce la potencia del motor y el frenado. La formación de un modelo matemático ayuda a comprender los efectos de tracción que existen entre el neumático del vehículo y la superficie sobre la trabaja, lo que constituye la base del modelo de simulación teórica (Malhotra, 2006).

El modelado de robots móviles con ruedas es un aspecto crucial cuando se trata de la enorme cantidad de tareas que han dedicado en los últimos treinta años. Saber cómo reacciona el sistema y sus propiedades, permite diseñar soluciones específicas para realizar la tarea de la mejor manera. La difusión de la robótica

móvil debido a las innovaciones técnicas y las características interesantes de este tipo de robots alentaron a muchos investigadores, de diferentes campos, a dar una formulación formal que podría utilizarse para representar estos sistemas (Guerra, 2016).

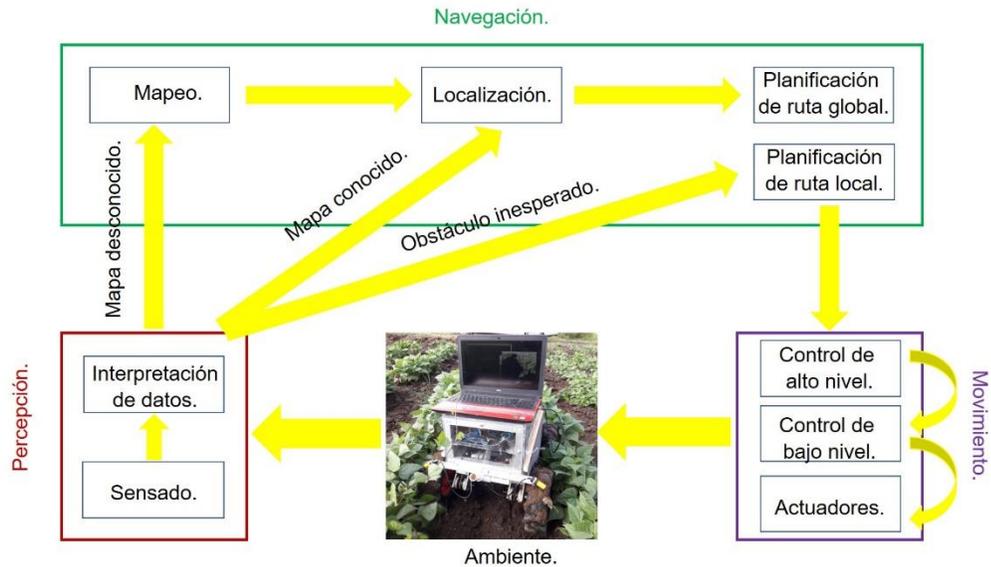


Figura 23. Esquema general de un robot móvil (Fuente: Guerra 2016, modificado por autor 2019).

La complejidad de los modos de movimiento varía mucho. El modelo puede ser cinemático para calcular la velocidad del robot en función de la velocidad de entrada. Esta velocidad se integra una vez y se obtiene la posición. Los modelos también pueden ser dinámicos, de modo que la aceleración se calcula a partir de las entradas de fuerza y torque y se integra dos veces. Los modelos pueden tener en cuenta las desviaciones de la suspensión en un plano tridimensional o descuidarlas en una representación plana. Por varias razones, la mayoría de los robots móviles con ruedas de campo hoy en día se conforman con trayectorias básicas de modelos cinemáticos bidimensionales (Seegmiller & Kelly, 2014).

Primero, los modelos cinemáticos bidimensionales son fáciles de derivar en forma cerrada. Derivar la dinámica tridimensional completa de un robot móvil con ruedas desde cero es laborioso. Se podría modelar el robot móvil con ruedas en

un simulador de física de propósito general (por ejemplo, Open Dynamics Engine, Bullet), pero la mayoría solo aplica la ley de fricción de Coulomb en los puntos de contacto, mientras que la interacción real entre la rueda y el terreno es una trayectoria mucho más compleja (Seegmiller & Kelly, 2014).

Segundo, los modelos cinemáticos bidimensionales son fáciles computacionalmente. La planificación predictiva del modelo de horizonte de retroceso requiere que los modelos simulen muchas órdenes de mayor magnitud más rápido que el tiempo real, ya que se evalúan numerosas trayectorias posibles en cada paso de tiempo. A menudo, solo se asigna una fracción de un procesador para tales trayectorias de planificación (Seegmiller & Kelly, 2014).

Finalmente, los modelos cinemáticos bidimensionales a menudo son suficientes, pero solo porque los robots móviles con ruedas se usan de forma conservadora. La mayoría de los robots móviles con ruedas están restringidos a conducir lentamente en terreno plano; los caminos empinados o ásperos se evitan como obstáculos. Es posible una mayor movilidad con la locomoción con ruedas, por ejemplo: atravesar escombros en sitios de desastre, subir laderas empinadas o competir mientras se queda dentro del área de fricción de los neumáticos. Sin embargo, para superar con seguridad los límites de la movilidad, los sistemas de navegación de los robots móviles con ruedas requieren modelos de movimiento rápidos y de alta fidelidad (Seegmiller & Kelly, 2014).

Se necesitan modelos dinámicos de vehículos terrestres autónomos para permitir una planificación de movimiento real (Howard & Kelly, 2007). En entornos al aire libre no estructurados que tienen cambios sustanciales en elevación, consisten en una variedad de superficies de terreno y o requieren aceleraciones y desaceleraciones frecuentes. Se pueden realizar al menos cuatro tareas de planificación de movimiento diferentes utilizando modelos dinámicos apropiados (Yu et al., 2010).

1. Planificación de movimiento óptimo en el tiempo: un modelo dinámico puede generar buenas predicciones de la velocidad de un vehículo a

medida que atraviesa una colina o barranca de un terreno en particular, incluida la velocidad máxima de ascenso de una colina dada, la estimación de las velocidades de entrada necesarias para subir colinas empinadas, y la predicción de si un vehículo es capaz de subir una colina. Estas predicciones son clave para calcular las trayectorias de tiempo óptimo y, por lo tanto, el modelo dinámico es importante para la planificación del movimiento en un entorno ondulado.

2. Planificación del movimiento con eficiencia energética: este tipo de planificación es importante, ya que la disponibilidad de energía finita es una restricción crítica que debe tenerse en cuenta al planificar el movimiento de los vehículos. Un modelo dinámico proporciona predicciones de torque y velocidad y, por lo tanto, la potencia y el consumo de energía. Las capacidades relacionadas son la capacidad de predecir si una tarea determinada se puede completar con el suministro de energía actual del vehículo y las estimaciones de cuándo repostar o recargar.
3. Reducción en la frecuencia de replanificación: una de las razones principales por las que es necesaria la replanificación se debe a las discrepancias entre el movimiento previsto y real del vehículo. Dado que un modelo dinámico puede conducir a predicciones de movimiento más precisas en la planificación, puede reducir la frecuencia de replanificación.
4. Planificación en presencia de una falla, como una llanta desinflada o un motor defectuoso: un modelo dinámico incluye las propiedades del motor y la interacción de la llanta y el suelo. Las fallas comunes del vehículo son motores defectuosos o llantas pinchadas. Su influencia en el movimiento del vehículo puede ser capturada por el modelo dinámico utilizado para planificar las trayectorias del vehículo. El modelo dinámico permitirá una movilidad más eficiente en presencia de estas fallas.

### 5.2.2. Introducción a los robots skid steer

El robot móvil con ruedas es una plataforma de control integrada que consta de una computadora a bordo, motores eléctricos, sistema de control del motor, sistema de comunicación, sensores sonares, cámara, sistema láser y sensores como giroscopios, encoders y acelerómetros (Furlas et al., 2015).

Las tareas de navegación de los robots autónomos al aire libre se pueden realizar con eficacia por los vehículos skid steer, la figura 24 muestra este tipo de robot. Estos robots con ruedas, llamados robots móviles de dirección deslizante, se consideran vehículos todo terreno debido a la robustez de su estructura mecánica. Pueden trabajar en duras condiciones ambientales y pueden utilizarse, por ejemplo, para explorar el espacio (Mathew, 2013). Pero debido al bajo costo también se utilizan en aplicaciones interiores (Bares, et al., 1991).



Figura 24. Robot skid steer Voltan (Fuente: autor 2019).

Robots móviles tipo skid steer constituyen un género de vehículos no holonómicos que carecen de una columna de dirección y están controlados por un mecanismo de dirección diferencial. La ausencia de una columna de dirección los hace mecánicamente robustos y fáciles de controlar (Terupally, et al., 2007).

Un vehículo con dirección deslizante no tiene ejes que conecten las ruedas izquierda y derecha. En su lugar, todas las ruedas de un lado están conectadas

por medio de cadenas u otros mecanismos similares (Golconda, 2005). Las ruedas en un lado se pueden girar independientemente del otro lado. El vehículo se puede girar haciendo que las ruedas en un lado giren más rápido que las del otro lado. La diferencia de rotación hace que el vehículo patine y gire en la dirección de las ruedas lentas; de ahí el término skid steer (Mathew, 2013).

Los robots móviles con dirección deslizante se han utilizado ampliamente en muchas aplicaciones, como la navegación y exploración del terreno, el manejo de residuos, la defensa, la seguridad y los servicios domésticos. Para un robot con dirección deslizante, no existe un mecanismo de dirección y la dirección de movimiento se proporciona girando las ruedas laterales izquierda y derecha a diferentes velocidades. La ausencia de un sistema de dirección hace que el robot sea mecánicamente robusto y simple para la navegación en terrenos exteriores o en interiores. Debido a las diferentes interacciones entre el neumático y el suelo y el contacto excesivamente restringido, es bastante difícil obtener modelos cinemáticos y dinámicos precisos, y por lo tanto un esquema de control de seguimiento robusto, para tales robots móviles. Aunque hay una gran cantidad de investigaciones sobre el modelado dinámico y el control de seguimiento de los robots móviles accionados por diferencial que están bajo la restricción no holonómica de la velocidad lateral cero, como los monociclos o los robots tipo automóvil (Oriolo et al., 2002; Khalil & Dombre, 2002; Canudas et al., 1996), la investigación sobre robots móviles con dirección deslizante se informa con menos frecuencia. Sin embargo, debido a la similitud entre la dirección de derrape de los vehículos con orugas y con ruedas, el método de modelado de la interacción en tierra de la pista para los vehículos con oruga se puede utilizar para los robots con ruedas con dirección deslizante (Stefano, 2012).

### **5.2.3. Modelo matemático del robot tipo skid steer.**

Análisis simplificado de la dinámica de los vehículos tipo skid steer.

El modelo dinámico del vehículo se desarrolla despreciando algunos efectos. Se hacen los siguientes supuestos:

- El vehículo viaja a baja velocidad.
- Se desprecia el patinaje longitudinal.
- La fuerza lateral sobre el neumático es directamente proporcional a su carga vertical.
- El vehículo se mueve sobre una superficie plana local, es decir, no existen obstáculos en el camino.

El comportamiento de giro de un vehículo con oruga que usa la dirección de deslizamiento depende de los empujes de las vías exteriores e interiores  $F_o$  y  $F_i$  la fuerza de resistencia resultante  $R_{tot}$ , el momento de resistencia de giro  $M_r$ , ejercido en la pista por el suelo y los parámetros del vehículo como se muestra en la figura 25. A bajas velocidades, se puede ignorar la fuerza centrífuga y el comportamiento del vehículo se puede describir mediante las siguientes dos ecuaciones diferenciales de movimiento (Wong, 2001):

$$m \frac{d^2s}{dt^2} = F_o + F_i - R_{tot} \dots \dots \dots (10)$$

$$I_z \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{B}{2} (F_o - F_i) - M_r \dots \dots \dots (11)$$

Donde  $s$  es el desplazamiento del centro de gravedad del vehículo,  $\theta$  es el desplazamiento angular del vehículo,  $B$  es la banda de rodadura del vehículo (es decir, el ancho entre las dos ruedas),  $I_z$  es el momento de inercia de la masa del vehículo sobre el eje vertical que pasa a través de su centro de gravedad y  $m$  la masa del vehículo. Con las condiciones iniciales conocidas, las dos ecuaciones diferenciales anteriores pueden integrarse, y la trayectoria del centro de gravedad y la orientación del vehículo se pueden determinar (Bekker, 1956).

Las ecuaciones 10 y 11 son la forma general para representar el movimiento de los vehículos skid steer. Para este robot, se deben deducir las ecuaciones que rigen su comportamiento. La figura muestra el diagrama de cuerpo libre de las fuerzas actuantes en el robot con ruedas skid steer.

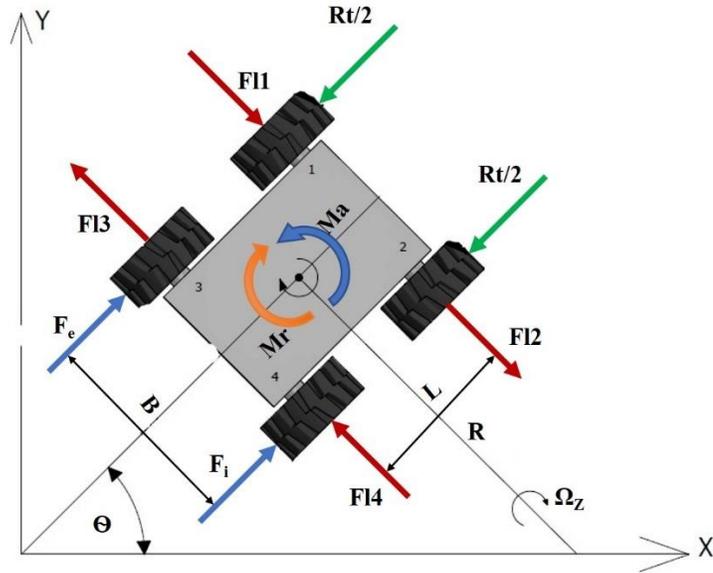


Figura 25. Diagrama de cuerpo libre del robot tipo skid steer Voltan. (Fuente: Wong 2001; modificado por autor 2017).

Realizando un análisis físico de estas fuerzas, se tienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{m} \left\{ (\cos\theta \cdot (F_e + F_i)) - \left( \mu \cdot F_N \cdot \frac{dx}{dt} \right) + (\cos(90-\theta)) \cdot (F_{11} + F_{12} - F_{13} - F_{14}) \cdot \frac{dx}{dt} \right\} \dots \dots \dots (12)$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{1}{m} \left\{ (\sin\theta \cdot (F_e + F_i)) - \left( \mu \cdot F_N \cdot \frac{dy}{dt} \right) + (\sin(90-\theta)) \cdot (F_{13} + F_{14} - F_{11} - F_{12}) \cdot \frac{dy}{dt} \right\} \dots \dots \dots (13)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{I} \left\{ M_r - \left[ \mu_t \cdot \left( \frac{L}{2} \right) \cdot (F_{11} + F_{12} + F_{13} + F_{14}) \cdot \frac{d\theta}{dt} \right] \right\} \dots \dots \dots (14)$$

Donde:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \text{Aceleración lineal en el eje X [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{].}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \text{Aceleración lineal en el eje Y [m} \cdot \text{s}^{-2}\text{].}$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \text{Aceleración angular [rad} \cdot \text{s}^{-2}\text{].}$$

$\frac{dx}{dt}$  = Velocidad lineal horizontal [ $m \cdot s^{-1}$ ].

$\frac{dy}{dt}$  = Velocidad lineal vertical [ $m \cdot s^{-1}$ ].

$\frac{d\theta}{dt}$  = Velocidad angular [ $rad \cdot s^{-1}$ ].

x= Posición en el eje X [m].

y= Posición en el eje Y [m].

$\theta$ = Posición en el eje angular [rad].

$F_e$ = Fuerza de empuje exterior o lado izquierdo [N].

$F_i$ = Fuerza de empuje interior o lado derecho [N].

$F_{l1}, F_{l2}, F_{l3}, F_{l4}$ = Fuerzas laterales [N].

$F_N$ = Fuerza normal [N].

$R_t$ = Fuerza de resistencia resultante [N].

$M_a$ = Momento causado por las fuerzas laterales [N·m].

$M_r$ = Momento de resistencia al giro [N·m].

I= Momento de inercia del vehículo [ $kg \cdot m^2$ ].

B= Distancia entre ruedas de la base del robot [m].

L= Distancia longitudinal entre centros de las ruedas [m].

$\mu$ = Coeficiente de fricción estático [adimensional].

$\mu_t$ = Coeficiente de fricción al giro [adimensional].

En condiciones de estado estable, no hay aceleraciones lineales y angulares:

$$F_o + F_i - R_t = 0 \dots\dots\dots(15)$$

$$\frac{B}{2} (F_o - F_i) - M_r = 0 \dots\dots\dots(16)$$

Suponiendo que el coeficiente a la resistencia lateral es una constante  $\mu_t$  el momento resultante de la resistencia lateral alrededor de los centros de las ruedas puede ser expresado como:

$$M_r = \frac{\mu_t W l}{4} \dots\dots\dots(17)$$

Donde  $M_r$  es el momento de resistencia al giro,  $\mu_t$  es el coeficiente de resistencia lateral,  $W$  es el peso total del vehiculo,  $l$  es la distancia longitudinal entre centros de las ruedas.

**5.2.4. Cinemática de los vehículos tipo skid steer.**

La cinemática es el estudio de la matemática del movimiento sin considerar las fuerzas que afectan el movimiento. La cinemática del robot describe sus movimientos. Es necesario entender el comportamiento mecánico del robot tanto para diseñar el robot móvil para las tareas deseadas como para crear un software de control para el hardware del robot móvil. La pregunta principal que debe responderse en este contexto es: dado un cierto ángulo de giro y un número de giros de las ruedas, ¿dónde terminará el robot y en qué dirección estará apuntado? Este problema es relativamente simple. Se trata de las relaciones geométricas que influyen en el sistema y de la relación entre los parámetros de control y el comportamiento de un sistema en el espacio de estado (Goris, 2004).

La figura 25 muestra el giro de vehículos con orugas alrededor del centro O. Si la rueda dentada de la pista exterior gira a una velocidad angular  $\omega_o$  y la pista interior gira a una velocidad angular  $\omega_i$  y en las pistas no hay patinaje, el radio de giro  $R$  y la velocidad angular cuando gira el vehículo  $\Omega_z$  puede expresarse como:

$$R = \frac{B(r\omega_o + r\omega_i)}{2(r\omega_o - r\omega_i)} = \frac{B(K_s + 1)}{2(K_s - 1)} \dots\dots\dots(18)$$

$$\Omega_z = \frac{r\omega_o + r\omega_i}{2R} = \frac{r\omega_i(K_s - 1)}{B} \dots\dots\dots(19)$$

Donde:

R= Radio de giro [m].

$\Omega_z$ = Velocidad de cabeceo del vehículo [rad·s<sup>-1</sup>].

r= Radio de la rueda [m].

$K_s$  = Radio de la velocidad angular  $\omega_o/\omega_i$  [adimensional].

### 5.2.5. Fuerzas y momentos de las llantas.

Aparte de las fuerzas aerodinámicas y gravitacionales, todas las demás fuerzas y momentos importantes que afectan el movimiento de un vehículo en tierra se aplican a través del contacto del tren de rodaje. El tren de rodaje de un vehículo terrestre generalmente debe cumplir las siguientes funciones (Wong, 2001):

- Soportar el peso del vehículo.
- Amortiguar el vehículo sobre irregularidades de la superficie.
- Proporcionar suficiente tracción para la conducción y el frenado.
- Proporcionar adecuado control de la dirección y estabilidad de la dirección.

Los neumáticos pueden realizar estas funciones con eficacia y eficiencia; por lo tanto, se utilizan universalmente en vehículos de carretera, y también se usan ampliamente en vehículos de carretera. Por lo tanto, el estudio de la mecánica de los neumáticos es de fundamental importancia para la comprensión del rendimiento y las características de los vehículos terrestres (Wong, 2001).

Un neumático es una estructura flexible en forma de anillo llena de aire comprimido. El elemento estructural más importante de un neumático es la carcasa. Consiste en una serie de capas de cordón flexible de alto módulo envueltas en una matriz compuesta de caucho de bajo módulo (Wong, 2001).

Para describir las características de un neumático, las fuerzas y momentos que actúan sobre él, es necesario definir un sistema de ejes que sirva como referencia para la definición de varios parámetros. Uno de los sistemas de ejes de uso común recomendados por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE), la figura 26 muestra la distribución de fuerzas y momentos (Vehicle Dynamics Terminology, 1978).

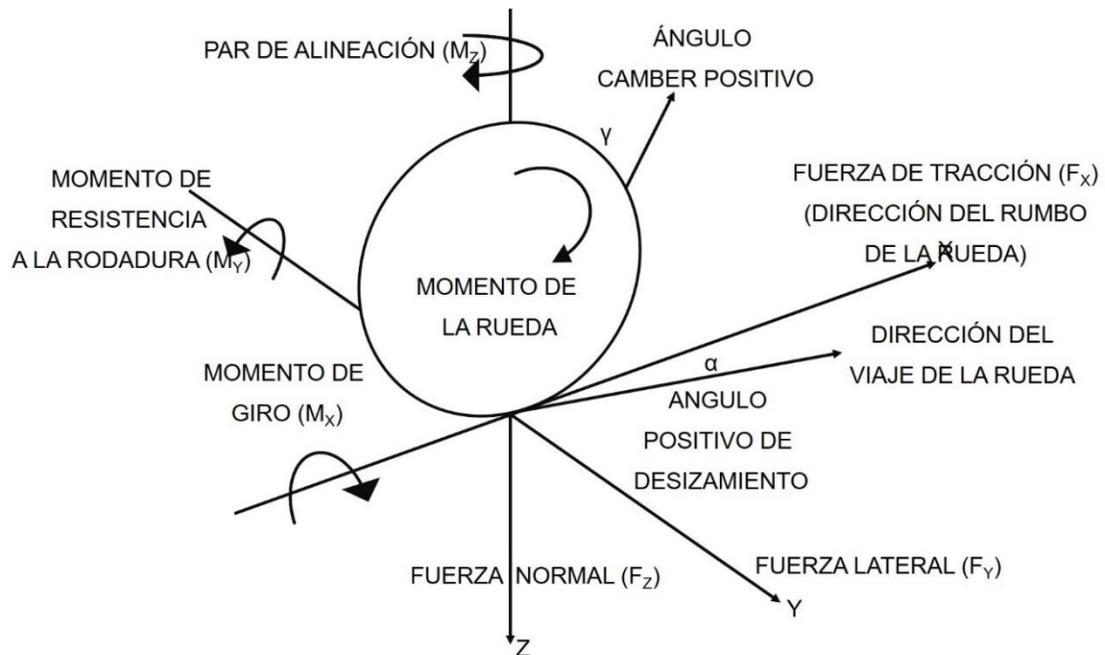


Figura 26. Sistema de coordenadas de la llanta, (Fuente: Wong 2001, modificado por autor 2019).

El origen del sistema de ejes es el centro de contacto del neumático. El eje X es la intersección del plano de la rueda y el plano de tierra con una dirección positiva hacia adelante. El eje Y está en el plano del suelo, y su dirección se elige para que el sistema de ejes sea ortogonal y se use la regla de la mano derecha. El eje

Z es perpendicular al plano del suelo con una dirección positiva hacia abajo. (Wong, 2001).

Hay tres fuerzas y tres momentos actuando sobre el neumático desde el suelo. La fuerza de tracción (o fuerza longitudinal)  $F_x$ , es el componente en la dirección X de la fuerza resultante ejercida sobre el neumático por el camino. La fuerza lateral  $F_y$ , es el componente en la dirección Y, y la fuerza normal  $F_z$ , es el componente en la dirección Z,  $M_x$  es el momento sobre el eje X ejercido sobre el neumático por la carretera. El momento de resistencia a la rodadura  $M_y$  es el momento sobre el eje Y, y el par de alineación  $M_z$  es el momento sobre el eje Z (Wong, 2001).

La fuerza longitudinal  $F_x$  y la fuerza lateral  $F_y$  están dadas por:

$$F_x = \mu_k * m_i * g \dots \dots \dots (20)$$

$$F_y = (\mu_k * m_i * g) / 2 \dots \dots \dots (21)$$

Donde  $F_x$  es la fuerza longitudinal,  $F_y$  es la fuerza lateral,  $\mu_k$  es el coeficiente de adhesión a la carretera,  $m$  es la masa del neumático,  $g$  es una constante gravitacional.

Cuadro 5. Coeficientes promedio de adhesión al suelo. (Fuente: Taborek, 1957).

Superficie.	Valor pico $\mu_k$ .	Valor de patinaje $\mu_s$ .
Asfalto y concreto (seco).	0.8-0.9	0.75
Asfalto (húmedo).	0.5-0.7	0.45-0.6
Concreto (húmedo).	0.8	0.7
Grava.	0.6	0.55
Camino de terracería (seco).	0.68	0.65
Camino de terracería (húmedo).	0.55	0.4-0.5
Nieve (compactada).	0.2	0.15
Hielo.	0.1	0.07

### 5.2.6. Materiales y métodos

Para realizar la simulación de las ecuaciones de movimiento del robot es necesario calcular las fuerzas de empuje exterior e interior que se ejercen en el robot, la fuerza de reacción total, las fuerzas laterales, el momento de resistencia al giro debido a las fuerzas de empuje y debido a las fuerzas laterales.

La ecuación 20 ayudará a calcular las fuerzas de empuje exterior (izquierda) e interior (derecha), de esta forma la ecuación 8 queda de la siguiente manera:

$$F_e = \mu_d \cdot g \cdot (m_1 + m_3) \dots \dots \dots (22)$$

Donde:

$F_e$  = Fuerza de empuje exterior (izquierda) [N].

$\mu_d$  = Coeficiente de fricción dinámico = 0.36 [adimensional].

$g$  = Constante gravitacional = 9.8 [m·s<sup>-2</sup>].

$m_1$  = Masa de la rueda 1 [kg].

$m_3$  = Masa de la rueda 3 [kg].

$$F_i = \mu_d \cdot g \cdot (m_2 + m_4) \dots \dots \dots (23)$$

Donde:

$F_i$  = Fuerza de empuje interior (derecha) [N].

$\mu_d$  = Coeficiente de fricción dinámico = 0.36 [adimensional].

$g$  = Constante gravitacional = 9.8 [m·s<sup>-2</sup>].

$m_2$  = Masa de la rueda 2 [kg].

$m_4$  = Masa de la rueda 4 [kg].

La ecuación 21 ayudará a calcular las fuerzas laterales, de esta manera se tiene lo siguiente:

$$F_{li} = (\mu_i \cdot m_i \cdot g) / 2 \dots \dots \dots (24)$$

Donde:

$F_{li}$  = Fuerza lateral de las ruedas  $i=1,2,3$  y  $4$  [N].

$\mu_i$  = Coeficiente de fricción al giro =  $0.4$  [adimensional].

$m_i$  = Masa iésima de las ruedas  $i=1,2,3$  y  $4$  [kg].

$g$  = Constante gravitacional =  $9.8$  [ $m \cdot s^{-2}$ ].

La fuerza normal ejercida por la masa total del robot se calcula de la siguiente manera:

$$F_N = g \cdot m \dots \dots \dots (25)$$

Donde:

$F_N$  = Fuerza normal [N].

$g$  = Constante gravitacional =  $9.8$  [ $m \cdot s^{-2}$ ].

$m$  = Masa total del vehículo =  $30$  kg.

Para conocer el momento de giro debido a las fuerzas de empuje del lado izquierdo y derecho del robot se resuelve la ecuación 23 para  $M_r$ , teniéndose lo siguiente:

$$M_r = \frac{B}{2} (F_e - F_i) \dots \dots \dots (26)$$

El momento de giro debido a las fuerzas laterales se calcula con la siguiente ecuación:

$$Ma=(L/2) \cdot (F_{I1}+F_{I2}+F_{I3}+F_{I4}) \dots \dots \dots (27)$$

Donde:

Ma= Momento de giro debido a las fuerzas laterales [N·m].

L= Distancia longitudinal entre ruedas del robot 0.45m.

F<sub>I1</sub>, F<sub>I2</sub>, F<sub>I3</sub>, F<sub>I4</sub>=Fuerzas laterales [N].

Las ecuaciones 12, 13 y 14 se presentan en espacio de estados con sus parámetros, variables de entrada, variables de estado y variables salida.

El vector de parámetros se presenta en la siguiente matriz:

$$\varphi = \begin{bmatrix} \mu \\ \mu_t \\ m \\ B \\ I \\ L \end{bmatrix} \dots \dots \dots (28)$$

Lo que representa cada variable ha sido definido anteriormente.

El vector de entrada se presenta en la siguiente matriz:

$$u(t) = \begin{bmatrix} F_r \\ F_l \\ FN \\ F_{I1} \\ F_{I2} \\ F_{I3} \\ F_{I4} \\ Mr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (29)$$

Lo que representa cada variable ha sido definido anteriormente.

El vector de estado se presenta en la siguiente matriz:

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1 \\ y \\ \theta \\ \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (30)$$

Lo que representa cada variable ha sido definido anteriormente.

El vector de salida es:

$$y(t) = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \end{bmatrix} \dots \dots \dots (31)$$

Donde:

$y_1$ = Posición horizontal [m].

$y_2$ = Posición vertical [m].

$y_3$ = Posición angular [rad].

$y_4$ = Velocidad horizontal [ $m \cdot s^{-1}$ ].

$y_5$ = Velocidad vertical [ $m \cdot s^{-1}$ ].

$y_6$ = Velocidad angular [ $rad \cdot s^{-1}$ ].

El modelo en espacio de estados se presenta a continuación:

$$\dot{x}_1 = x_4 \dots \dots \dots (32)$$

$$\dot{x}_2 = x_5 \dots \dots \dots (33)$$

$$\dot{x}_3 = x_6 \dots \dots \dots (34)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{m} \{ (\cos x_3 * (u_1 + u_2)) - (\mu * u_3 * x_4) + (\cos(90 - x_3)) * (u_4 + u_5 - u_6 - u_7) * x_4 \} \dots (35)$$

$$\dot{x}_5 = \frac{1}{m} \{ (\sin x_3 * (u_1 + u_2)) - (\mu * u_3 * x_5) + (\sin(90 - x_3)) * (u_6 + u_7 - u_4 - u_5) * x_5 \} \dots (36)$$

$$\dot{x}_6 = \frac{1}{I} \left\{ u_8 - \left[ \mu_t * \left( \frac{L}{2} \right) * (u_4 + u_5 + u_6 + u_7) * x_6 \right] \right\} \dots (37)$$

Estas ecuaciones de movimiento del robot en espacio de estados se pueden programar en Matlab® en un sketch tipo function o usar Simulink®. El método de solución que se utilizó fue ODE45. Las condiciones iniciales son la velocidad lineal del vehículo y su posición inicial, está velocidad depende del PWM de los motores eléctricos del robot y el ángulo de orientación (si lo hay). Las velocidades pueden consultarse en el cuadro 1.

### 5.2.7. Resultados y conclusiones

Los datos obtenidos de la instrumentación y determinación de parámetros físicos sirven de condiciones iniciales para alimentar el modelo matemático y realizar la simulación de movimiento del robot. La figura 27 muestra la velocidad lineal del robot simulada en Matlab® y la velocidad lineal medida físicamente a cada valor de PWM en un periodo de 10 segundos. El rango de las velocidades simuladas se encuentra entre 0.44 y 1.21 m·s<sup>-1</sup>.

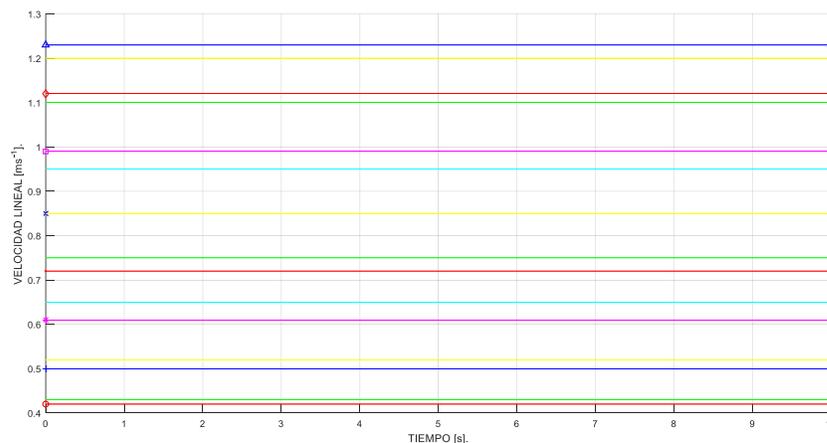


Figura 27. Velocidad lineal simulada y medida físicamente del robot a diferentes valores de PWM durante 10 segundos.

La figura 28 muestra la distancia recorrida simulada del robot a cada valor de PWM durante 10 segundos. La diferencia de distancia recorrida por el robot medida de manera experimental a cada valor de PWM, respecto a la distancia simulada a cada valor de PWM son las siguientes: -0.2 m, -0.4 m, -0.4 m, -0.2 m, 0.2 m, 0.2 m, 0 m y 0 m, las distancias están asociadas a los siguientes valores de PWM respectivamente: 100, 120, 140, 160, 180, 200, 220 y 240).

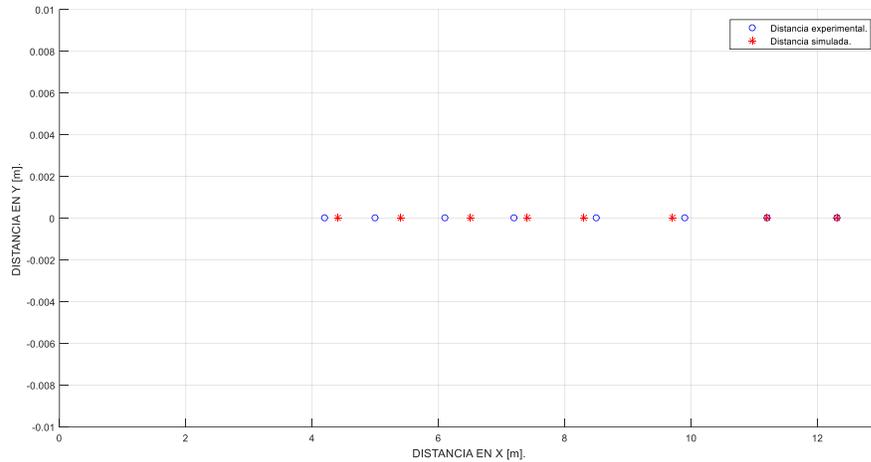


Figura 28. Distancia recorrida simulada del robot skid steer a diferentes valores de PWM durante 10 segundos.

La figura 29 muestra las velocidades lineales simuladas y reales del robot en un periodo de 20 segundos.

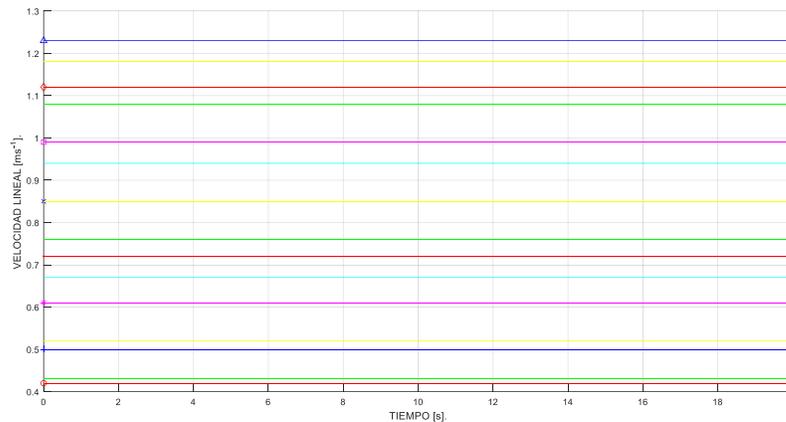


Figura 29. Velocidad lineal simulada y medida físicamente del robot a diferentes valores de PWM durante 20 segundos.

La figura 30 muestra la distancia simulada del robot contra la distancia recorrida del robot medida experimentalmente en un periodo de 20 segundos.

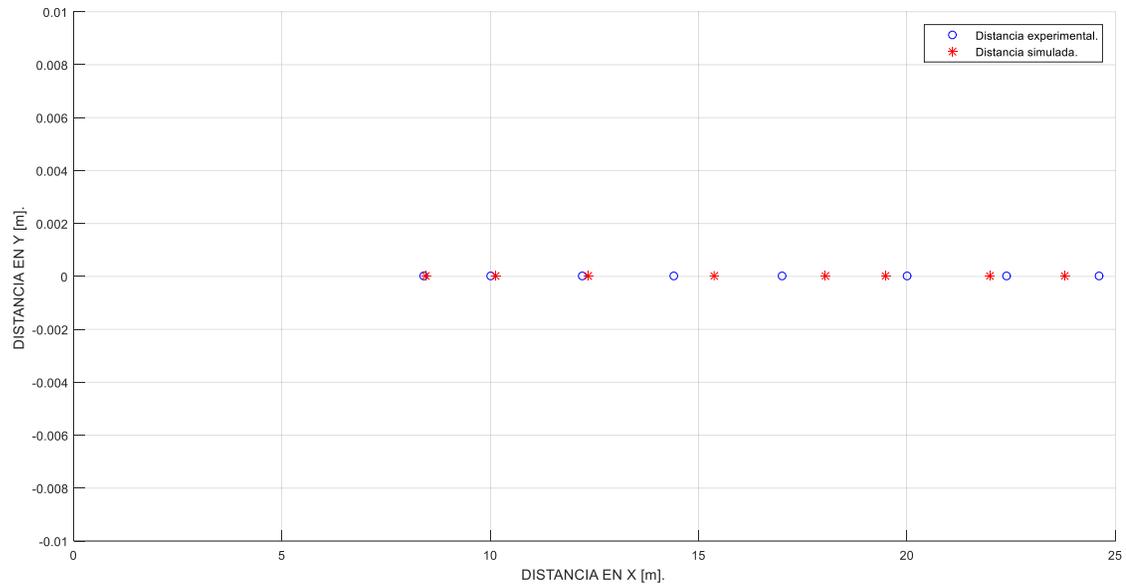


Figura 30. Distancia recorrida simulada vs distancia recorrida experimental a diferentes valores de PWM durante 20 segundos.

La figura 31 muestra las velocidades angulares del robot cuando hace giros en un tiempo de 10 segundos. Para realizar la primera simulación se programó el lado izquierdo del robot a una velocidad angular de 94.57 revoluciones por minuto, el lado derecho a una velocidad angular de 46.95 revoluciones por minuto, la línea en color rojo presenta la esta simulación. Para la segunda simulación se programó el lado izquierdo del robot a una velocidad angular de 94.57 revoluciones por minuto, el lado derecho a una velocidad angular de 38.47 revoluciones por minuto la línea en color azul presenta la esta simulación. De esta manera se producen los giros del robot.

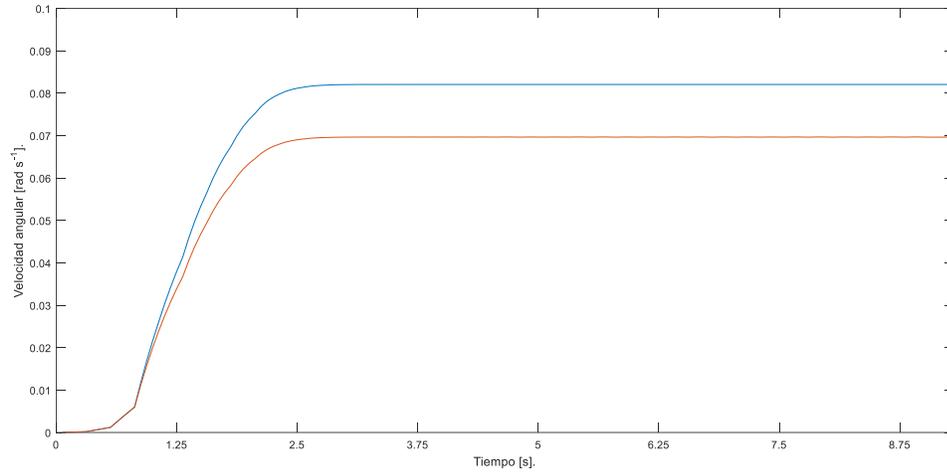


Figura 31. Velocidad angular del robot cuando realiza giros a diferentes PWM en 10 segundos.

La figura 32 y 33 muestra los giros simulados del robot y los medidos físicamente. Este es el principio de funcionamiento de los vehículos tipo skid steer. Su movimiento, posición y control se basa en la diferencia o igualdad de las velocidades angulares de sus ruedas.

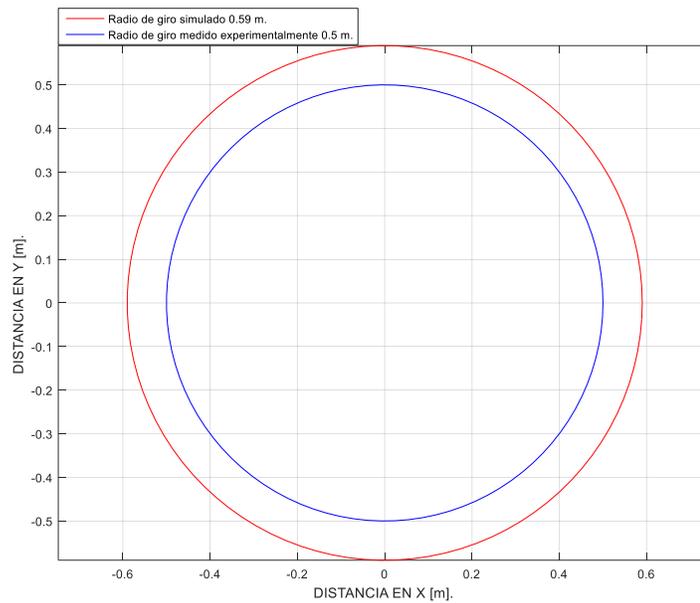


Figura 32. Comparación entre el radio simulado y medido experimentalmente. Rueda izquierda 94.57 rpm y rueda derecha 46.95 rpm.

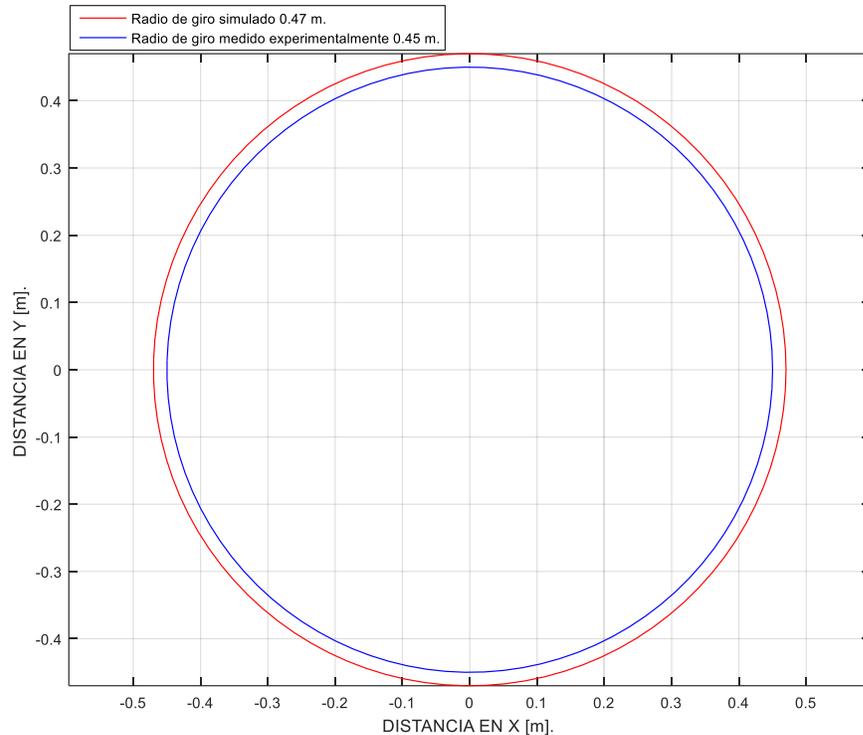


Figura 33. Comparación entre el radio simulado y medido experimentalmente. Rueda izquierda 94.57 rpm y rueda derecha 38.47 rpm.

### 5.2.8. Referencias

Bares, C. L., Coppersmith, S. & Dowling, K. (1991). El robot móvil Terregator. Reporte técnico. Universidad de Carnegie Mellon.

Bekker, M. G. (1956). Theory of land locomotion. Ann Arbor, MI: University of Michigan Press.

Canudas, C., Siciliano, B. & Bastin, G. (1996). Theory of Robot Control. Springer.

Fourlas, G. K., Karras, G.C., & Kyriakopoulos K.J. (2015). Control de tolerancia a errores para un robot móvil de dirección 4-Wheel Skid. Actas de la 26a Taller Internacional sobre los principios de Diagnóstico. París Francia.

Golconda, S. (2005). Steering controller for a skid steered autonomous ground vehicle at varying speed. PhD Thesis Osmania University.

Goris, K. (2005). Autonomous Mobile Robot Mechanical Design. Universidad de Vrije. Brusuelas Bélgica.

Guerra, M. (2016). Finite time deployment and collision avoidance for wheeled mobile robots. Signal and Image processing. Ecole Centrale de Lille.

Howard, T.M. & Kelly, A. (2007). Optimal rough terrain trajectory generation for wheeled mobile robots, *Int. J. Robot. Res.*, vol. 26, no. 2, pp. 141–166.

Khalil, W., & Dombre, E., (2002), *Modelling, identification and control of robots*. Kogan page Science.

Malhotra, S. (2006). Simulation of steering systems for robotic vehicles, Thesis, Florida State University.

Mathew, S.M. (2013). Modelado de Skid Steered Wheeled Vehicle. *Revista Internacional de Investigación Avanzada en Ingeniería Informática y Tecnología (IJARCET)*. Volumen 2. Número 11.

Oriolo, G., De Luca, A. & Vendittelli, M., (2002). Wmr control via dynamic feedback linearization: design, implementation, and experimental validation, *IEEE Transactions contribution system technology*, pp. 835–852, 2002.

Seegmiller, N., & Kelly, A. (2014). Enhanced 3D kinematic modeling of wheeled mobile robots. *Proceedings of Robotics: Science and Systems*. Berkeley, USA.

Stefano M. (2012). Advance modelling of a skid steer mobile robot for remote telepresence, Thesis, Università degli Studi di Genova, Roger Williams University.

Terupally, C.R., Zhu J.J., & Williams, R.L. (2007). Trajectory tracking and stair climbing capability assessment for a skid steered mobile robot. *American Control Conference*. New York USA.

Wong, J.Y. (2008). Theory of ground vehicles. Published by John Wiley & Sons. New Jersey.

Yu, W., Ylaya, C. O., Collins, E. G. & Hollis, P. (2010). Analysis and experimental verification for dynamic modeling of a skid-steered wheeled vehicle. IEEE Transactions on robotics, Vol. 26, No. 2.

## PROGRAMA DE ARDUINO PARA LEER LOS PULSOS DEL ENCODER.

```
/*Conectar encoder derecho: cable negro a 2 y blanco a 3*/
/*Conectar encoder izquierdo: cable negro a 21 y blanco a 20*/

/*Librerias incluidas*/

#include <digitalWriteFast.h> //Carga libreria para leer de manera rapida los
pulsos de los encoders

#include <SD.h> //Carga libreria de la memoria SD

#include <SPI.h>

#include <Wire.h>

/*Librerias incluidas*/

/*Definicion de pines y variables*/

float gradI,gradD=0.00;

float lrl,lrD=0.00;

float t=0;

int LPWM3 = 6; //rueda izq hacia adelante
int RPWM4 = 8; //rueda der hacia adelante
int RPWM1 = 9; //rueda der hacia atras
int LPWM2 = 7; //rueda izq hacia atras

/*Definicion de pines y variables*/

/*Nombre del archivo donde se guardaran los datos.*/

File DIST87; // nombre del archivo donde se escribiran los datos

File dataFile; // el archivo sensores es un archivo de datos

/*Nombre del archivo donde se guardaran los datos.*/

/*Cuadratura de Encoders*/

#define encoderIzq

#define encoderDer

volatile bool EncoderSetIzq;
```

```

volatile long ticksEncoderIzq=0;
volatile bool EncoderSetDer;
volatile long ticksEncoderDer=0;
/*Cuadratura de Encoders*/
void setup(void)
{
  Serial.begin(115200);
  // Cuadratura encoder
  // Encoder izquierdo
  pinMode(21 , INPUT_PULLUP); //INPUT
  digitalWrite(21, LOW);
  pinMode(20, INPUT_PULLUP); // INPUT
  digitalWrite(20, LOW);
  attachInterrupt(2, EncoderIzq, RISING);
  pinMode(6,OUTPUT);
  pinMode(7,OUTPUT);
  pinMode(8,OUTPUT);
  pinMode(9,OUTPUT);
  pinMode(3 , INPUT_PULLUP); //INPUT
  digitalWrite(3, LOW);
  pinMode(2, INPUT_PULLUP); // INPUT
  digitalWrite(2, LOW);
  attachInterrupt(1, EncoderDer, RISING);
  digitalWrite(LPWM3,LOW);//LOW
  analogWrite(RPWM4,240.0);//150 IZQ
  analogWrite(LPWM2,000.0); //180 DER
  digitalWrite(RPWM1,LOW); //LOW
  /*Setup de la sd.*/

```

```

    pinMode(7, OUTPUT);
pinMode(8, OUTPUT);
Serial.print("Inicializando SD card...");
    pinMode(53, OUTPUT);
    if (!SD.begin(53)) {
        Serial.println("Inicializacion fallida!");
        return;
    }
    Serial.print("Inicializacion hecha.");
    Serial.println("Hecho!");
/*Setup de la sd.*/
}
void loop(void)
{
/*Loop de la escritura en el archivo.*/
    dataFile = SD.open("DIST87.txt", FILE_WRITE);
/*Loop de la escritura en el archivo.*/
/*Imprimimos el valor de los encoders en el monitor serial*/
gradl=(ticksEncoderIzq*0.072); // 360/pulsos del encoder
gradD=(ticksEncoderDer*0.072); // 360/pulsos del encoder
Irl=-gradl*0.002181; //distancia recorrida rueda izquierda; 0.002181 es igual a
circunferencia entre 360
Ird=gradD*0.002181; //distancia recorrida rueda derecha; 0.002181 es igual a
circunferencia entre 360
//Irl=(ticksEncoderIzq/360)*0.7854; //distancia recorrida rueda izquierda;
0.002181 es igual a circunferencia entre 360
//Ird=(ticksEncoderDer/360)*0.7854; //distancia recorrida rueda derecha;
0.002181 es igual a circunferencia entre 360
Serial.print("pulsosl,");
Serial.print(ticksEncoderIzq);

```

```

Serial.print(" ");
Serial.print(",pulsosD,");
Serial.print(ticksEncoderDer);
Serial.print(" ");
Serial.print(",gradosl, ");
Serial.print(gradl);
Serial.print(" ");
Serial.print(",gradosD, ");
Serial.print(gradD);
Serial.print(" ");
Serial.print(",distancial, ");
Serial.print(lrl);
Serial.print(" ");
Serial.print(",distanciaD, ");
Serial.print(lrD);
Serial.println(" ");
delay(1000);
/*Imprime el valor de los encoders en el monitor serial*/
/*Guarda el valor del encoder y distancias recorridas por las ruedas en la sd*/
dataFile.print("pulsosl,");
dataFile.print(ticksEncoderl);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(",pulsosD,");
dataFile.print(ticksEncoderDer);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(",gradosl, ");
dataFile.print(gradl);
dataFile.print(" ");

```

```

dataFile.print(",gradosD, ");
dataFile.print(gradD);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(",distancial, ");
dataFile.print(lrI);
dataFile.print(" ");
dataFile.print(",distanciaD, ");
dataFile.print(lrD);
dataFile.println(" ");
delay(1000);
dataFile.close();
/*Guarda el valor del encoder y distancias recorridas por las ruedas en la sd*/
if ( lrD>0 & lrI>0)
{
  t=millis();
}
if ( t >= 60000)
{
  analogWrite(LPWM3,LOW);
  digitalWrite(RPWM4,LOW);
  analogWrite(LPWM2,LOW);
  digitalWrite(RPWM1,LOW);
  delay(5000);
}
}
/*Interrupciones para la cuadratura de encoders*/
/*Interrupción para la cuadratura de encoder izquierdo*/
void EncoderIzq()

```

```

{
EncoderSetlq=digitalReadFast(20);
#ifdef encoderlq
ticksEncoderlq -= EncoderSetlq ? -1 : +1;
#else
ticksEncoderlq += EncoderSetlq ? -1 : +1;
#endif
}
/*Interrupción para la cuadratura de encoder izquierdo*/
/*Interrupción para la cuadratura de encoder derecho*/
void EncoderDer()
{
EncoderSetDer=digitalReadFast(2);
#ifdef encoderDer
ticksEncoderDer -= EncoderSetDer ? -1 : +1;
#else
ticksEncoderDer += EncoderSetder ? -1 : +1;
#endif
}
/*Interrupción para la cuadratura de encoder derecho*/
/*Interrupciones para la cuadratura de encoders*/

```

## ECUACIONES DE MOVIMIENTO DEL ROBOT PROGRAMADAS EN MATLAB®.

```

function dy=VOLTAN2820SED(t,y)
global MMT FY1 FY2 FY3 FY4 INERTIA FEIZQ FEDER B L SFR aa bb cc
%LEFS RIGS FRS BAS % VLR %% MA CFL SFR B MR VLRI VLRD VLR
% LEFS=FEIZQ*(aa+(B/2)*cc);%%FEIZQ
% RIGS=FEDER*(aa-(B/2)*cc);%%FEDER
% FRS=(FY1+FY2)*(bb+(L/2)*cc); %%FY1+FY2
% BAS=(FY3+FY4)*(bb-(L/2)*cc); %%FY3-FY4
% if y(4)>0&&y(4)<=0.6;
%   y(1)=y(1)*0.75;
% end
dy = zeros(6,1);
dy(1) = y(4);
dy(2) = y(5);
dy(3) = y(6);
% dy(6)=(1/INERTIA)*(((B/2)*(LEFS-RIGS))-(y(6)*(L/2)*((FRS+BAS))));
dy(4)=(1/MMT)*(((cos(y(3))*(180/pi))*(FEIZQ+FEDER))-
((y(4)*(SFR)))+(y(4)*(cos(90-(y(3))*(180/pi)))*(FY1+FY2-FY3-FY4))));
dy(5)=(1/MMT)*(((sin(y(3))*(180/pi))*(FEIZQ+FEDER))-
((y(5)*(SFR)))+(y(5)*(sin(90-(y(3))*(180/pi)))*(FY4+FY3-FY2-FY1))));
dy(6)=(1/INERTIA)*(((B/2)*(FEIZQ-FEDER))-
(y(6)*(L/2)*((FY1+FY2+FY3+FY4))));
end

```

## PROGRAMA DE COMANDOS EN MATLAB® QUE CALCULA LAS FUERZAS DEL ROBOT Y RESUELVE LAS ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE ROBOT POR EL MÉTODO ODE45.

```
clc;
clear all;
global MM1 MM2 MM3 MM4 MMT CG FE1 FE2 FE3 FE4 CRR FR1 FR2 FR3
FR4 CFL FY1 FY2 FY3 FY4 RLL RPMRI RPMRD
global VARI VARD VLRI VLRD VLR INERTIA B L FEIZQ FEDER SFL SFR MA
MR x0 y0 ang0 dx0 dy0 dand0
global VOLT AMP PM TRQL TRQR eff EL ER CAS R OZ OMEGA aa bb cc %
LEFS RIGS FRS BAS aa bb cc
```

```
VOLT=12; %% Voltaje máximo de la batería V
AMP=20; %% Corriente máxima de cada motor eléctrico A
% PM=0.185; %%Potencia máxima de motor eléctrico kW
PM=(VOLT*AMP)/1000; %%Potencia máxima de motor eléctrico kW
RPMRI=94.57; %%Revoluciones por minuto rueda izquierda
RPMRD=94.57; %%Revoluciones por minuto rueda derecha
VARI=0.105*RPMRI; %%Velocidad angular rueda izquierda rad/s
VARD=0.105*RPMRD; %%Velocidad angular rueda derecha rad/s
TRQL=PM*VARI; %% Torque motor izquierdo N*m
TRQR=PM*VARD; %% Torque motor derecho N*m
eff=0.82; %% eficiencia motor eléctrico
RLL=0.125; %% Radio de la rueda m
% EL=TRQL/RLL;
% ER=TRQR/RLL;
EL=2*pi*eff*(TRQL/RLL*0.01); %% Fuerza de empuje del motor izquierdo N
ER=2*pi*eff*(TRQR/RLL*0.01); %% Fuerza de empuje del motor derecho N
VLRI=RLL*VARI; %%Velocidad lineal rueda izquierda m/s
VLRD=RLL*VARD; %%Velocidad lineal rueda derecha m/s
VLR=sqrt((VLRI*VLRI)+(VLRD*VLRD)); %%Velocidad lineal resultante
B=0.40; %%Ancho de base de robot m
L=0.46; %%dimension longitudinal de robot m
OMEGA=(RLL)*((VARD-VARI)/B);
MM1=8; %%masa rueda delantera izquierda kg
MM2=8; %%masa rueda delantera derecha kg
MM3=7; %%masa rueda trasera izquierda kg
MM4=7; %%masa rueda trasera derecha kg
MMT=MM1+MM2+MM3+MM4; %%Masa total del robot kg
CG=9.8; %% Constante gravitacional m/s^2
CAS=1.0; %% Coeficiente de adhesión al suelo [0.1-0.35] para fuerzas de
reaccion
```

```

CFL=0.4; %% Coeficiente de fricción lateral [0.65-0.66] fuerzas laterales 0.4 valor
medido de pruebas robot
CRR=0.8; %% Coeficiente de resistencia a la rodadura [0.68-0.9] 0.68, tierra
seca 0.8-0.9 asfalto fuerzas de empuje valor medido de pruebas robot
FE1=CRR*CG*MM1; %% Fuerza de empuje rueda delantera izquierda N
FE2=CRR*CG*MM2; %% Fuerza de empuje rueda delantera derecha N
FE3=CRR*CG*MM3; %% Fuerza de empuje rueda trasera izquierda N
FE4=CRR*CG*MM4; %% Fuerza de empuje rueda trasera derecha N
FR1=CAS*CG*MM1; %% Fuerza de resistencia rueda delantera izquierda N
FR2=CAS*CG*MM2; %% Fuerza de resistencia rueda delantera derecha N
FR3=CAS*CG*MM3; %% Fuerza de resistencia rueda trasera izquierda N
FR4=CAS*CG*MM4; %% Fuerza de resistencia rueda trasera derecha N
FY1=(CFL*CG*MM1)/2; %% Fuerza lateral rueda delantera izquierda N
CFL*CG*MM2
FY2=(CFL*CG*MM2)/2; %% Fuerza lateral rueda delantera derecha N
CFL*CG*MM2
FY3=(CFL*CG*MM3)/2; %% Fuerza lateral rueda trasera izquierda N
CFL*CG*MM2
FY4=(CFL*CG*MM4)/2; %% Fuerza lateral rueda trasera derecha N
CFL*CG*MM2
% FEIZQ=FE1+FE3; %% Fuerza resultante lado izquierdo N
% FEDER=FE2+FE4; %% Fuerza resultante lado derecho N
FEIZQ=FE1+FE3+EL; %% Fuerza resultante lado izquierdo N
FEDER=FE2+FE4+ER; %% Fuerza resultante lado derecho N
SFL=FY1+FY2+FY3+FY4; %% Suma de fuerzas laterales N
SFR=FR1+FR2+FR3+FR4; %% Suma de fuerzas de resistencia fuerza normal N
%SFR=(FR1+FR2+FR3+FR4)/4; %% Suma de fuerzas de resistencia fuerza
normal N
%SFR=(FR1+FR2+FR3+FR4)/2; %% Suma de fuerzas de resistencia fuerza
normal N
MA=((B/2)*(FEIZQ-FEDER));
MR=((L/2)*(SFL));
INERTIA=1.52;
R=(B/2)*((RLL*VARI+RLL*VARD)/(RLL*VARI-RLL*VARD));
OZ=(RLL*VARI+RLL*VARD)/(2*R);

% Condiciones iniciales
x0 = 0.0; y0 = 0.0; ang0 = 0;
dx0 =VLR*cos(ang0); dy0 =VLR*sin(ang0); dand0=0; %%dand0=0
% dx0 =VLRD*cos(ang0); dy0 =VLRI*sin(ang0); dand0 =0; %%dand0=0
% dx0 =VLRD; dy0 =VLRI; dand0 =0;

Options = odeset('RelTol',1e-3);
[t,x] = ode45(@VOLTAN2820SED,[0 10],[x0 y0 ang0 dx0 dy0 dand0],Options);
P=[EL, ER, FE1, FE2, FE3, FE4,FEDER, FEIZQ, FR1, FR2, FR3, FR4, FY1, FY2,
FY3, FY4, MR, RPMRI, RPMRD, SFL, SFR, VARD, VARI,VLR, VLRI, VLRD, R,
OZ];

```

```

% xlswrite('DATOSSIM7530PWM.xlsx',P);
% xlswrite('DATOSSIM7530PWM.xlsx',x,'Hoja2');

figure(1);
subplot(1,1,1)
plot(t,x(:,1),t,x(:,2));
title('POSICIÓN DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL ROBOT.')
xlabel('TIEMPO [s].')
ylabel('DISTANCIA [m].')
legend({'Posición en el eje X.', 'Posición en el eje Y.'}, 'Location', 'northwest')
grid on
pause (1);
% saveas(figure(1), 'PCGR.fig');
%
figure(2);
subplot(1,1,1)
plot(t,x(:,4),t,x(:,5));
title('VELOCIDAD LINEAL DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL ROBOT.')
xlabel('TIEMPO [s].')
ylabel('VELOCIDAD [ms-1].')
legend({'Velocidad lineal en X.', 'Velocidad lineal en Y.'}, 'Location', 'southeast')
grid on
pause (1);
% saveas(figure(2), 'VCGR.fig');
%
figure(3);
subplot(1,1,1)
plot(t,x(:,3));
title('POSICIÓN ANGULAR DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL ROBOT.')
xlabel('TIEMPO [s].')
ylabel('RADIANES.')
legend({'Posición angular.'}, 'Location', 'northeast')
grid on
pause (1);
% saveas(figure(3), 'PACGR.fig');
%
figure(4);
subplot(1,1,1)
plot(t,x(:,6));
title('VELOCIDAD ANGULAR DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL ROBOT.')
xlabel('TIEMPO [s].')
ylabel('rad s-1.')
legend({'Velocidad angular.'}, 'Location', 'northeast')
grid on
pause (1);
% saveas(figure(4), 'VACGR.fig');

```

```

figure(5);
% X100P=linspace(0,4.2982);
% Y100P=linspace(0,0.0004);
% X120P=linspace(0,4.9999);
% Y120P=linspace(0,0.0004);
% X140P=linspace(0,6.1032);
% Y140P=linspace(0,0.0001);
% X160P=linspace(0,7.1921);
% Y160P=linspace(0,0.0002);
% X180P=linspace(0,8.5167);
% Y180P=linspace(0,0.0009);
% X200P=linspace(0,9.7948);
% Y200P=linspace(0,0.0000);
% X220P=linspace(0,11.2329);
% Y220P=linspace(0,0.0004);
% X240P=linspace(0,12.2337);
% Y240P=linspace(0,0.0099);
% subplot(1,1,1)
plot(x(:,1),x(:,2));
% plot(x(:,1),x(:,2),X100P,Y100P);
% axis([0 20 -0.01 0.01])
% plot(x(:,1),x(:,2),X120P,Y120P);
% axis([0 20 -0.01 0.01])
% plot(x(:,1),x(:,2),X140P,Y140P);
% axis([0 20 -0.01 0.01])
% plot(x(:,1),x(:,2),X160P,Y160P);
% axis([0 20 -0.01 0.01])
% plot(x(:,1),x(:,2),X180P,Y180P);
% axis([0 20 -0.01 0.01])
% plot(x(:,1),x(:,2),X220P,Y220P);
% axis([0 20 -0.0005 0.0005])
% plot(x(:,1),x(:,2),X240P,Y240P);
% axis([0 20 -0.01 0.01])
title('DISTANCIA RECORRIDA DEL CENTRO DE GRAVEDAD DEL ROBOT.')
xlabel('DISTANCIA HORIZONTAL [m].')
ylabel('DISTANCIA VERTICAL [m].')
% legend({'Simulado.','Medido con encoders.'},'Location','northwest')
grid on
pause (1);
% saveas(figure(5),'DRCGR.fig');

```