



# **UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO**

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

## **IMPLEMENTACIÓN DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA PARA RECARGA ELÉCTRICA EN UN VEHÍCULO AGRÍCOLA**

**TESIS DE GRADO**

**QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE**

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

**PRESENTA:**

**GUILLERMO GARCÍA SÁNCHEZ**

**BAJO LA SUPERVISIÓN DE: DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ**

**DICIEMBRE DE 2020  
CHAPINGO, ESTADO DE MÉXICO**



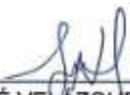
Chapingo, México, a 03 de diciembre del 2020

**DR. MAXIMINO HUERTA BRAVO**  
**COORDINADOR GENERAL DE ESTUDIOS DE POSGRADO**  
**PRESENTE**

Los abajo firmantes hemos revisado y aprobado la tesis de maestría de **Guillermo García Sánchez con matrícula 1812931-8**, estudiante de la maestría del posgrado en **Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua**. La tesis se titula **implementación de navegación autónoma para recarga eléctrica en un vehículo agrícola** y queda autorizada.

**ATENTAMENTE**

DIRECTOR DE TESIS:

  
\_\_\_\_\_  
DR. NOÉ VELÁZQUEZ LÓPEZ

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. PEDRO CRUZ MEZA

ASESOR:

  
\_\_\_\_\_  
DR. AGUSTIN RUIZ GARCÍA

## CONTENIDO

LISTA DE CUADROS .....	IV
LISTA DE FIGURAS .....	V
DEDICATORIAS .....	VII
AGRADECIMIENTOS .....	VIII
DATOS BIOGRAFICOS.....	IX
1. Introducción General .....	1
1.1 Literatura citada.....	3
2. Revisión de literatura.....	5
2.1 Robot .....	5
2.2 Clasificación de los robots.....	5
2.3 Robots móviles.....	6
2.5 Importancia de los robots en la agricultura.....	6
2.6 Los robots en la agricultura .....	7
2.7 Estimación de posición en robots móviles .....	7
2.8 Navegación inercial.....	8
2.9 Sistema de posicionamiento global .....	9
2.10 Componentes de un sistema de navegación satelital.....	10
2.11 Controlador de Navegación.....	10
2.12 Pixhawk, un controlador de navegación.....	11
2.13 Interfaces de comunicación entre elementos de sistema de navegación .....	12
2.13.1 UART.....	12
2.13.2 I2C .....	13
2.13.3 CAN .....	13
2.14 Telemetría.....	13
2.15 Estación terrena .....	13
2.16 Unidad controladora de motores .....	14
2.17 Literatura citada.....	14

3.	Implementación de navegación autónoma para recarga eléctrica en robot agrícola	18
3.1	Resumen .....	18
3.2	Abstract.....	19
3.3	Introducción.....	20
3.4	Materiales y métodos.....	21
3.4.1	Plataforma.....	21
3.4.2	Calibración y ajustes de control del vehículo .....	24
3.4.3	Verificación de sentido de giro.....	24
3.4.4	Conexión y calibración del radiocontrol.....	25
3.4.5	Arquitectura del sistema .....	26
3.4.6	Medición de velocidad angular en los neumáticos .....	27
3.4.7	Ajuste de velocidad y aceleración .....	27
3.4.8	Ajuste de valores PID .....	28
3.4.9	Extracción de puntos de control mediante estación Total .....	29
3.4.10	Curva de descarga de batería .....	30
3.4.11	Pruebas de campo y recolección de datos.....	30
3.4.12	Medición de corriente durante la navegación .....	33
3.5	Resultados y discusión .....	33
3.6	Conclusiones.....	46
3.7	Agradecimientos.....	47
3.8	Literatura citada.....	47
4.	Anexos .....	49
4.1	Manual para puesta en marcha del robot en cada uno de sus modos de operación	49
4.2	Ficha técnica de controlador de motores Sabertooth 2x60.....	51

## **INDICE DE CUADROS**

### **CAPITULO 2**

Cuadro 1: Datos técnicos de chip Ublox Neo-M8N.....	12
---	----

### **CAPITULO 3**

Cuadro 1: Conexión de microcontrolador y módulo receptor de RC .....	26
Cuadro 2: Datos técnicos de estación total Leica TS06 .....	30
Cuadro 3: Valores de parámetros de configuración para misiones autónomas .....	31
Cuadro 4: Precisión registrada en navegación sin ajuste de parámetros de velocidad y orientación.....	38
Cuadro 5: Consumo de corriente para 0.6 y 0.8 m/s sin ajuste de orientación y velocidad  .....	40
Cuadro 6: Precisión a 0.8 y 1.0 m/s con ajuste de velocidad y orientación .....	41
Cuadro 7: Consumo de corriente a 0.8 y 1.0 m/s con ajuste de velocidad y orientación.	43
Cuadro 8: Precisión durante navegación con carga de 8 kg.....	44
Cuadro 9: Consumo de corriente durante navegación con carga .....	45
Cuadro 10: Precisión registrada a punto objetivo .....	46

### **CAPITULO 4**

Cuadro 1: Puntos de control usados en la navegación. ....	64
---	----

## INDICE DE FIGURAS

### CAPÍTULO 2

Figura 1: Estimadores de posición de robots. ....	8
---	---

### CAPÍTULO 3

Figura 1: Robot agricultor “Voltan”. ....	21
Figura 2: Controladora de Vuelo Pixhawk con sus diferentes elementos.....	22
Figura 3: Componentes del sistema de navegación satelital.....	23
Figura 4: Esquema de conexión de componentes .....	23
Figura 5: Interfáz Mission Planner, se muestra la pantalla de configuración de motores. .....	24
Figura 6: Verificación del sentido de giro de los motores. ....	25
Figura 7: Pantalla de calibración de los canales de radiocontrol. ....	25
Figura 8: Diagrama de bloques de la composición del sistema implementado. ....	26
Figura 9: Medición de velocidad angular en neumáticos.....	27
Figura 10: Marcado de puntos de medición sobre la misión establecida.....	32
Figura 11: Robot durante navegación de ruta. ....	333
Figura 12: Diagrama de funcionamiento para realizar una misión autónoma con el robot .....	344
Figura 13: Velocidad angular de neumáticos de robot.....	355

Figura 14: Plano de puntos extraídos con estación total topográfica .....	365
Figura 15: Curva de descarga de batería Tenda .....	366
Figura 16: Navegación a 0.6 m/s sin ajuste de parametros de velocidad y orientación .....	36
Figura 17: Navegación a 0.8 m/s sin ajuste de parámetros de velocidad y orientación .....	377
Figura 18: Variación de velocidad con objetivo de 0.6 m/s.....	39
Figura 19: Variación de velocidad de navegación con objetivo de 0.8 m/s.....	39
Figura 20: Navegación a una velocidad de 0.8 m/s con parámetros de dirección y orientación ajustados.....	40
Figura 21: Navegación a una velocidad de 1.0 m/s con parámetros de dirección y orientación ajustados.....	41
Figura 22: variación de velocidad con objetivo de 0.8 m/s.....	422
Figura 23: Variación de velocidad con objetivo de 1 m/s.....	422
Figura 24: Navegación a 0.6 m/s con una carga distribuida de 8 kg. ....	433
Figura 25: Navegación a 0.6 m/s con carga de 8kg y parámetros de velocidad y orientación ajustados.....	444
Figura 26: Variación de velocidad con objetivo de 0.6 m/s y carga de 8kg .....	455

### **CAPÍTULO 3**

Figura 1: Establecimiento de conexión entre estación base y vehículo. ....	49
--	----

Figura 2: Características de Sabertooth 2x60.....	51
Figura 3: Modos de operación del controlador de motores.....	52

## DEDICATORIAS

*A mis queridos padres, Teofán García López y Rafaela Sánchez Cuevas.*

*A mi hermano Cristian Yair, a mis primos, Michel, Aldrin y Kelly por su apoyo y ayuda durante este tiempo.*

*A mi novia Aidé por siempre creer en mí y alentarme a seguir adelante.*

*A mis padrinos Elida y Vitalicio.*

*Al Dr. Noé Velázquez por ser un gran asesor y un ejemplo para mí.*

*A todos mis compañeros de maestría, en especial a:  
Merino, Vidal, Facu, Chai, Víctor y Beto.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo económico brindado para desarrollar mis estudios de maestría.

A la Universidad Autónoma Chapingo y al Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, por la oportunidad brindada para la realización de mis estudios de posgrado.

Al Dr. Noé por la guía y el tiempo dedicado a mi investigación. Así mismo, al Dr. Pedro Cruz Meza y al Dr. Agustín Ruíz García, por sus atinadas observaciones, correcciones y tiempo prestado para la culminación del trabajo

## **DATOS BIOGRAFICOS**

### **DATOS PERSONALES**

**Nombre:** Guillermo García Sánchez

**Fecha de nacimiento:** 25 de junio de 1995

**Lugar de nacimiento:** Santiago Yosondúa, Tlaxiaco, Oaxaca

**Curp:** GASG950625HOCRNL08

**Profesión:** Ingeniero Mecánico Agrícola

**Cedula profesional:** 10962212

### **DESARROLLO ACADÉMICO**

**Bachillerato:** Preparatoria Agrícola Universidad Autónoma Chapingo

**Licenciatura:** Ingeniería Mecánica Agrícola, UACH

## **1. Introducción general**

En los próximos 35 años, de acuerdo a la (FAO,2009), uno de los desafíos será el asegurar abasto de productos alimenticios, esto como consecuencia del crecimiento exponencial de la población. No obstante, los recursos naturales se encuentran cerca del límite (Sánchez-Albera,2004).

Una serie de factores han llevado a esta situación; un capital humano dedicado al trabajo agrícola cada vez más viejo, con las nuevas generaciones optando por carreras urbanas, el cambio de uso de las tierras para agricultura para la creación de biocombustibles y energías alternativas, entre otros. Se espera que estos factores vayan incrementando con el transcurso de los años, creando así alarmas socio-económicas alrededor del mundo (USDA Agricultural Projections to 2026 Interagency Agricultural Projections Committee USDA Long-term Projections, 2017).

Ante esto, es de gran importancia aprovechar de la mejor manera lo que se produce y a su vez evitar el desperdicio y optimizar el rendimiento de los recursos naturales que existen.

Con la mecanización agrícola en el siglo XIX y la llegada del motor de combustión interna para el siglo XX, se ha podido mantener un aumento de la producción agrícola esto a pesar de la fuerte disminución de la mano de obra dedicada a este sector la cual ha tenido un gran declive sobre todo durante la segunda mitad del siglo XX (Villares & Bahamonde,2012). En complemento, Roser (2016), enfatiza que el aumento de producción la mayoría de las veces se ha realizado con un notable derroche de lo cual tendrá consecuencias en el tiempo.

La agricultura de precisión es particularmente útil para optimizar el uso de recursos e insumos. Su filosofía se centra en utilizar los recursos adecuados en el momento y lugar adecuados. El éxito de este modo de operación requiere una comprensión detallada de los requisitos del cultivo, de modo que se puedan tomar las acciones adecuadas con una resolución temporal y espacial adecuada (García y Flego, 2008). Cuando estas operaciones se realizan de forma manual a pequeña escala son fáciles de lograr, sin embargo, cuando se planean a escalas de producción requerida por el mercado, las tareas se vuelven difíciles

de conseguir a su vez que se carece de sistemas automáticos para el cumplimiento de estas (Barrientos y del Cerro, 2016). Es aquí donde los robots agrícolas, definidos como maquinas capaz de desplegarse en campos agrícolas y a su vez satisfacer necesidades agrícolas de manera personalizada encuentran su justificación (Cabrera y Barcia, 2018).

En complemento, Aldecoa-Quintana (2014) agrega que la robótica agrícola en tiempos actuales, se encuentra en fase de prototipo avanzado, con un nivel 7 de madurez tecnológica, con lo cual estos tienen la capacidad de demostración de sistema o prototipo en un entorno real, por lo que, salvo algunas excepciones como por ejemplo el caso del robot deshierbador (Bakker *et al.*, 2010) y el vehículo autónomo de apoyo para agricultura (Reid *et al.*, 2000) y algunos otros sobre todo de empresas especializadas con gran capital, aún no alcanza completamente la madurez necesaria como para abordar su implantación real y extendida en el sector.

En la Universidad Autónoma Chapingo se encuentra en desarrollo un vehículo agrícola el cual tiene como objetivo realizar labores agrícolas tanto en agricultura protegida como a cielo abierto, para ello, se trabaja en las tecnologías críticas que limitan la implantación de estos robots en los campos agrícolas. Siendo una de estas los sistemas de navegación (Aldecoa-Quintana, 2014). La navegación satelital ha sido abordada en diversos autores y usando técnicas diferentes de donde destacan diversos trabajos como el desarrollo de una plataforma de vehículo terrestre para la obtención de posicionamiento usando navegación cinética satelital (RTK, por sus siglas en inglés) (Rodríguez-Crespo, 2017), y algunos otros realizados por otros autores, Silva *et al.* (2008), Bechar (2016) y Jilek (2015) de los cuales se han obtenido resultados favorables.

Con respecto a lo anterior, el objetivo del proyecto es el desarrollo de un sistema de navegación autónoma mediante un sistema satelital para ubicar una estación de recarga de baterías e insumos.

El trabajo está dividido en dos etapas, en la primera se presenta la introducción general del proyecto planteándose el problema de estudio y su importancia, en la segunda, se aborda información referente al problema de investigación, induciendo a conceptos y los diferentes trabajos relacionados al tema en cuestión para así haya una mayor comprensión.

En la tercera etapa se presenta la instrumentación del robot con el sistema de navegación satelital, así como la evaluación

### **1.1 Literatura citada**

Aldecoa Quintana, J. M. I. (2014). Niveles de madurez tecnológica: Technology readiness levels: TRLS: una introducción. *Economía industrial*, (393), 165-171.

Bakker, T.; Asselt Vam, K.; Bontsema, J.; Müller, J.; Straten Van, G. (2010) “Systematic Desing of an Autonomous Platform for Robotic Weeding”. *Jornal of Terramchanics*, V.47, n.2, p.63-73..

Barrientos, A., & del Cerro, J. (2016). El uso del robot en tareas agrícola. Publicado online en *interempresas. net*. Recuperado de: <http://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/151745-El-uso-de-robots-en-tareas-agricolas.html/>

Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and components. *Biosystems Engineering*, 149, 94– 1.

Cabrera, F., & Barcia, R. (2018). Robótica en la agricultura. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*.

FAO (2009). “La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050”, en *Cómo alimentar al mundo en 2050*, Secretaría del Foro de Alto Nivel de Expertos, Italia, Roma, pp. 4.

García, E., & Flego, F. (2008). Agricultura de precisión. *Revista Ciencia y Tecnología*. Recuperado de [http://www.palermo.edu/ingenieria/Cienciaytecnologia/ciencia\\_y\\_tecno\\_8.html](http://www.palermo.edu/ingenieria/Cienciaytecnologia/ciencia_y_tecno_8.html).

Jilek, T. (2015). Autonomous field measurement in outdoor areas using a mobile robot with RTK GNSS. *IFAC-PapersOnLine*, 28(4), 480–485.

- Reid, J. F.; Zang, Q.; Noguchi, N.; Dickson, M. (2000), "Agricultural Automatic Guidance Research in North America". *Computers and Electronics in Agriculture*, V.25, n.1-2, p.155- 167.
- Rodríguez-Crespo, marco Antonio, Trejo-Macotela, Francisco, Espinoza-Quesada Eduardo, Frey Andreas. (2017). Instrumentación y desarrollo de una plataforma de vehículo terrestre para la obtención de posicionamiento RTK. *Revista del diseño innovativo*. 1-1:37-43
- Roser, M., & Ritchie, H. (2016). Land use in agriculture. *Our World in Data*, [Online]. Disponible en: <https://ourworldindata.org/land-use-in-agriculture>
- Sánchez-Albavera, F. (2004). El desarrollo productivo basado en la explotación de los recursos naturales. Cepal.
- Silva, M., Garrote, L., Moita, F., Martins, M., & Nunes, U. (2012, March). Autonomous electric vehicle: Steering and path-following control systems. In 2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (pp. 442-445). IEEE.
- USDA Agricultural Projections to 2026 Interagency Agricultural Projections Committee  
USDA Long-Term Projections. (2017). Disponible en [https://www.usda.gov/oce/commodity/projections/USDA\\_Agricultural\\_Projections\\_to\\_2026.pdf](https://www.usda.gov/oce/commodity/projections/USDA_Agricultural_Projections_to_2026.pdf)
- Villares, R., & Bahamonde, Á. (2012). El mundo contemporáneo: del siglo XIX al XXI. Taurus.

## **2. Revisión de literatura.**

### **2.1 Robot**

Un robot puede definirse como un dispositivo mecánico que realiza tareas automatizadas, ya sea con la supervisión humana directa, un programa predefinido o un conjunto de guías generales, utilizando técnicas de inteligencia artificial (Kool, 2000). Los robots estaban destinados principalmente a reemplazar a los humanos en procesos monótonos, pesados y peligrosos.

### **2.2 Clasificación de los robots**

Resulta complejo hacer una clasificación de los robots debido a la infinidad de parámetros sobre la cual se puede realizar. De acuerdo a la morfología de estos, Ruiz (2006) clasifica a los robots en los siguientes grupos:

- Industrial a manipulador
- Móviles
- Androides o humanoides
- Zoomórficos

Sobre lo mismo, Arrieta (2014) señala de que hoy en día, la mayoría de las tecnologías robóticas se centran en la automatización en entornos controlados, como fábricas automatizadas y brazos robóticos. Por otro lado, la tecnología de robótica móvil es muy escasa y está en desarrollo.

Otra forma de nombrar a los robots terrestres no tripulados es UGV (Unmanned Ground Vehicle), el cual se define como un grupo de sistemas electrónicos y mecánicos que se mueven en el suelo. Puede llevar sensores para analizar el entorno y sistemas de telemetría para comunicarse con las estaciones terrestres (Pareja-Estalrriich, 2014). El UGV puede ser operado de forma autónoma o manual por medio de un radio control el cual consta de un radiotransmisor y un radioreceptor, y se establece entre ellos una comunicación simplex, la cual es un tipo de comunicación unidireccional, es decir, se envía información en una sola dirección. El receptor de radio puede tener dos o más canales a través de los cuales se pueden recibir señales del transmisor de radio. La señal se transmite a través de dos o más interfaces, dependiendo del número de canales de la estación terrestre.

### **2.3 Robots móviles.**

De acuerdo con Garibay (2006), estos robots pueden moverse en tierra, en el aire, bajo el agua o incluso en el espacio exterior, y pueden usar su propia energía para moverse por sí mismos. Gracias a sus sensores y programación, son capaces de guiarse por sí mismos en el entorno, pero no es de extrañar que sus operaciones sean monitoreadas por humanos e incluso controladas de forma remota. En este último caso, el robot mantiene una comunicación continua con el operador por cable o inalámbrica. Su forma cambia según el entorno y la tarea a realizar.

En ese sentido, Alke (2016) argumenta que los UGV pueden ser utilizados en diferentes aplicaciones aprovechando los beneficios que pueden brindar en cuanto a eficiencia, tiempo de trabajo continuo, llegar a lugares de difícil acceso, trabajar en condiciones climáticas adversas, ser utilizados en situaciones de alto riesgo y en tareas con rutinas repetitivas.

### **2.5 Importancia de los robots en la agricultura.**

Hoy en día, la demanda de trabajadores calificados dedicados al trabajo agrícola se ha convertido en uno de los principales problemas. Además, debido al crecimiento de la población mundial, la demanda de alimentos ha aumentado, por lo que el sector se ve obligado a obtener mayores niveles de producción. Por ellos, 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 (GPS) y sistemas de información geográfica (SIG) ha permitido a los investigadores desarrollar nuevos vehículos autónomos para cultivos de alto gran valor en el sector de la agricultura y la horticultura, así como para el manejo del paisaje (Pedersen *et al.*, 2008).

A lo largo de los años, los sistemas robóticos se han utilizado ampliamente en la producción industrial y los almacenes para garantizar un entorno controlado. En los campos de la agricultura y la silvicultura, basada en la investigación básica de los sistemas de dirección automática y los proyectos de tractores automáticos, la investigación de los automóviles sin conductor ha sido un tema desde principios de la década de 1960 (Wilson,

2000). La preparación del suelo, la siembra, el cultivo, el riego, la aspersión y la cosecha están evidentemente incluidas (Billingsley *et al.*, 2008).

## **2.6 Los robots en la agricultura**

Hay algunas historias de éxito en estos campos de investigación. En los últimos diez años, los robots se han utilizado con éxito en campos agrícolas de todo el mundo; los robots trituran caucho (Simon, 2010) y realizan tareas múltiples en suelos agrícolas en India (Gollakota y Srinivas, 2011), Recogiendo cítricos en los Estados Unidos (Aloisio *et al.*, 2012), recolectando tomates y fresas en China (Qingchun *et al.*, 2012). Otros ejemplos incluyen robots con energía solar que recolectan datos de palmeras en Arabia Saudita (Shukla y Jibhakate, 2011), robots que cultivan arroz y transportan otras plantas en Japón (Tamaki, Nagasaka y Kobayashi, 2009), inspecciona el riego en Tailandia (Ruangwiset and Higashino 2012), para tareas de transporte de materiales pesados se desarrollan robots con la suficiente robustez (Sakai *et al.* 2007) además de esto los hay para tareas de cosecha de espárragos y demás productos en Grecia.

## **2.7 Estimación de posición en robots móviles**

Los robots móviles se caracterizan por la capacidad de moverse de forma autónoma en entornos desconocidos o solo parcialmente conocidos. Su aplicación cubre una amplia gama de campos. El adjetivo "autónomo" se refiere a percepción, modelado, planificación y toma de medidas para lograr los objetivos sin intervención o hay muy poca intervención de los supervisores humanos.

Un robot móvil es un sistema el cual debe contar con diversos subsistemas de percepción, los cuales darán la información requerida y así permitir al robot realizar tres tareas fundamentales: estimar su posición y orientación, mantener actualizado el mapa del entorno y detectar los posibles obstáculos. Los robots móviles rara vez están equipados con un solo sensor para realizar diversas tareas, lo más común es combinar varios sensores en el sistema y así se complementan entre sí.

La mayoría de los robots móviles están equipados con codificadores en su eje, los cuales permiten estimar el movimiento de su posición en cada momento. Sin embargo, esta estimación no es lo suficientemente precisa puesto que esta técnica presenta errores acumulativos asociada a la posición y orientación a medida que este se mueve, por lo cual es necesario algún sistema de posicionamiento para reducir esta incertidumbre.

Tal como se describe en la Figura 1, Etxeberria (2013) menciona que los estimadores se pueden clasificar en dos niveles: explícitos, los cuales son capaces de obtener la posición del vehículo sin necesidad de capturar información del entorno, por otro lado, se encuentran los estimadores basados en la percepción del entorno, los cuales son los que dotan a los robots móviles de un sistema sensorial para obtener información del entorno y así pueda de forma autónoma saber su posición.

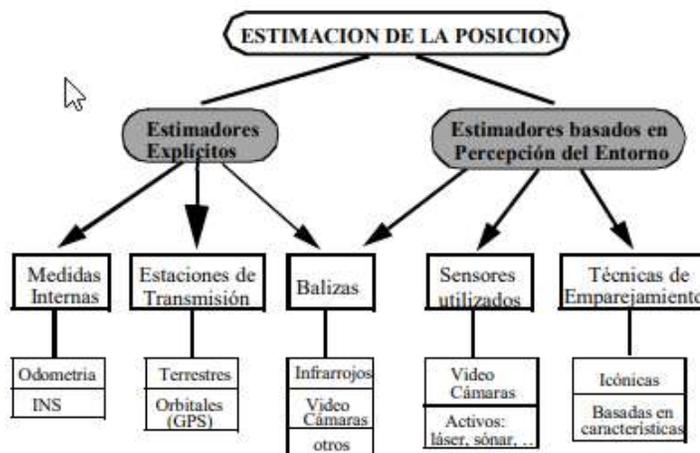


Figura 1: Estimadores de posición en robots.

## 2.8 Navegación inercial

De acuerdo con la clasificación de estimadores de posición, el sistema de navegación inercial (INS) es un estimador explícito, este tipo de navegación basa sus fundamentos en los principios de la cinemática que partiendo de un punto de posición inicial logra calcular posiciones futuras en todo momento, siempre y cuando conozca la velocidad, orientación y aceleración relativas (Cuenca-Sáenz & León-Cando, 2017).

Los acelerómetros suelen estar basados en sistemas pendulares. La precisión de este resulta crítica, ya que, debido a la doble integración de las aceleraciones, puesto que

pequeños errores cometidos por éste repercuten notablemente en la posición estimada. En numerosos robots móviles las aceleraciones son pequeñas con lo que la relación señal/ruido es también pequeña lo que complica la estimación.

## **2.9 Sistema de posicionamiento global**

El sistema GPS está basado en la constelación de satélites NAVSTAR (Navegación por Satélite en Tiempo y Distancia) que comenzó en 1978. Hay un total de 24 satélites ubicados en seis planos orbitales, con una inclinación de 55° con respecto al Ecuador, se encuentran a una distancia aproximada de 20.000 km de la Tierra y describen una órbita elíptica, casi circular, que tiene una duración de doce horas, con lo anterior, se garantiza que en cualquier lugar de la Tierra habrá al menos cuatro satélites sobre el horizonte en todo momento, número mínimo requerido para obtener una posición mediante un receptor GPS (Bongiovanni, 2006).

Sobre los dos métodos de estimación de posición, Kubrak, (2007) menciona que el GPS tiene la ventaja de dar una alta precisión de posición a largo plazo con errores residuales que afectan la solución final de posicionamiento a unos pocos metros. Estas señales también se verán obstruidas e interferidas. Por lo tanto, los receptores GPS no se pueden utilizar para la navegación continua. De lo contrario, la frecuencia de muestreo del sistema de navegación inercial debe ser de al menos 50 Hz y presentar un bajo nivel de ruido a corto plazo. También proporciona medidas efectivas de velocidad angular y aceleración, así como posición y velocidad. Sin embargo, la precisión de las soluciones de navegación inercial disminuirá con el tiempo.

Las ventajas del sistema de navegación inercial y el sistema de posicionamiento global GPS son complementarias, por lo que, al fusionarlos, las ventajas de las dos tecnologías se pueden combinar para proporcionar una solución de navegación completa continua y altamente precisa.

Pozo-Ruz (2000) describe las principales fuentes de error que afectan las señales de los sistemas y que afectan en gran medida las mediciones:

- Perturbación ionosférica. La ionosfera está formada por una capa de partículas que están cargadas eléctricamente las cuales modifican la velocidad de las señales de radio que la atraviesan.
- Fenómenos meteorológicos. En la troposfera, en la cual se manifiestan los fenómenos meteorológicos los cuales afectan las señales electromagnéticas disminuyendo su velocidad. Los errores generados son similares en magnitud a los causados por la ionosfera, sin embargo, su corrección es prácticamente imposible.
- Imprecisión en los relojes. Los relojes atómicos de los satélites muestran algunas desviaciones a pesar de su cuidadoso ajuste y control; lo mismo sucede con los relojes de los receptores.
- Error multisenda. Las señales provenientes de los satélites las cuales pueden sufrir reflexiones antes de alcanzar el receptor. Los receptores actuales usan técnicas avanzadas de proceso de señal y antenas especiales para minimizar este error, que resulta muy difícil de modelar al ser dependiente del entorno donde se ubique la antena GPS.
- Interferencia "disponibilidad selectiva". Constituye la mayor fuente de error y es introducida deliberadamente por el estamento militar.
- Topología receptor-satélites. Los receptores deben considerar la geometría receptor-satélites visibles usada en el cálculo de distancias, que una determinada configuración espacial puede aumentar o disminuir la precisión de las medidas. Los receptores más avanzados utilizan un factor multiplicativo que modifica el error de medición de la distancia (dilución de la precisión geométrica).

## **2.10 Componentes de un sistema de navegación satelital**

Basado en la instrumentación para navegación terrestre usada por Mera-Chamorro & Ruano-González (2019), se describen los elementos necesarios para hacer labores de navegación satelital.

## **2.11 Controlador de navegación**

Las placas controladoras son piezas electrónicas programables que cuentan con todo lo necesario para controlar un vehículo no tripulado. Son la parte más importante de la

electrónica y actúan como un cerebro capaz de gestionar todos los factores que intervienen en el vuelo e incluso pueden tomar decisiones de forma autónoma o pilotar automáticamente siguiendo un plan de ruta. La placa controladora se apoya de diversos elementos para cumplir su función, los elementos principales que la integran son: sensor magnético o brújula, acelerómetro, giroscopio, barómetro, interfaz para actuadores y un módulo gps. Estos sensores son los encargados de dar información sobre la dinámica del vehículo a continuación analizados por el procesador, y así realizar la toma de decisiones ejecutados por los actuadores (Papalini-Carro, 2020).

Con todo el hardware que integran este tipo de plataformas se puede desarrollar de una manera más sencilla el código de navegación autónoma sin preocuparse de integrar todo un conjunto de sensores, interfaces y microcontroladores.

### **2.12 Pixhawk, un controlador de navegación**

Pixhawk es una organización de desarrollo de placas controladoras las cuales son hardware libre para vehículos no tripulados más grande de la actualidad. Se originó a partir de un proyecto iniciado por Lorenz Meier, estudiante de la ETH de Zúrich. El objetivo original del proyecto era permitir que los aviones realizaran una conducción autónoma mediante el análisis de imágenes de cámaras (Meier, 2011). No obstante, Pixhawk se ha convertido en una plataforma universal para todo tipo de vehículos no tripulados.

Lorenz y su equipo han desarrollado algunos de los estándares de placas controladoras más usados a día de hoy. Al ser hardware libre, el diseño interno de los circuitos y los componentes necesarios para la fabricación de la placa son públicos y pueden ser utilizados comercialmente por cualquier fabricante.

Pixhawk combina la navegación satelital e inercial para realizar misiones de manera autónoma en el Cuadro 1 se describen las características de uno de los módulos más comunes usados en esos sistemas de navegación satelital.

Cuadro 1: Datos técnicos de chip Ublox Neo-M8N

<b>Chip Ublox Neo-M8N</b>	
<b>Sensibilidad de navegación</b>	-167 dBm
<b>Puertos</b>	UART/I2C/CAN
<b>Precisión de posicionamiento</b>	2.5 m
<b>Tiempo de arranque en frío</b>	26 s

Tal como se aprecia, la precisión que tiene el GPS es de 2.5 metros. Por lo cual, la posición usada por el vehículo para navegar no es directamente la da el GPS. Por lo cual se complementa con la calculada mediante el sensor inercial cuyos valores de aceleración y de velocidad angular se integran para obtener el desplazamiento respecto al origen de manera más precisa. Sin embargo, a pesar de ser preciso, este método presenta errores los cuales se acumulan y aumentan de manera exponencial en el tiempo. Por todo lo mencionado anteriormente, la solución es realizar estimaciones con los datos de las dos fuentes; GPS e IMU.

La estimación de la posición real que finalmente es aplicada en la navegación, se calcula mediante software con un filtro extendido de Kalman (EKF) el cual realiza la combinación de las dos fuentes de estimación. Con la fusión de ambos métodos se da solución a los problemas de precisión que presenta cada uno de los métodos

## **2.13 Interfaces de comunicación entre elementos de sistema de navegación**

### **2.13.1 UART**

*Universal Asynchronous receiver/transmitter* es un circuito integrado encargado de implementar comunicación serial, de manera general actúa como intermediario entre interfaces paralelas y seriales. Su comunicación es asíncrona, esto quiere decir que el envío y recepción de cada ráfaga no es controlada por un reloj y es necesario agregar bits de inicio y fin para recibir la información correctamente. UART utiliza dos conexiones para la comunicación Tx/Rx (Bloom, 2015)

### **2.13.2 I2C**

*Inter integrated circuit* es un bus desarrollado por Philips Chips en 1982. Este protocolo permite conectar en un solo bus varios dispositivos como esclavos y maestros, usando únicamente dos conexiones para la comunicación. Adicional, utiliza una señal de reloj la cual es generada por el dispositivo maestro y una señal de datos (Hord, 2016).

### **2.13.3 CAN**

Este protocolo fue desarrollado propiamente para aplicaciones en vehículos, sin embargo, puede satisfacer una variedad de aplicaciones gracias a su alta velocidad y bajo costo. El protocolo CAN permite la transmisión simultánea de todos los nodos (Huang, 2009)

### **2.14 Telemetría**

La telemetría proporciona un enlace de comunicación remota entre la estación terrena y el vehículo no tripulado, para la recolección de datos y envío de instrucciones mediante un protocolo de comunicación MAVLink. El uso de telemetría permite enviar instrucciones, configurar parámetros, recibir datos y operar el vehículo desde la estación terrestre en tiempo real (Team, 2016). La comunicación entre las estaciones se realiza mediante la emisión de ondas de radio.

### **2.15 Estación terrena**

Es una software que se ejecuta en algún dispositivo móvil, ya sea, computadora, tablet o celular, sobre diversos sistemas operativos como lo son Windows, Linux, Android o MacOS. Se comunica con el vehículo móvil mediante la telemetría. La estación terrena se usa para configurar parámetros, establecer rutas y así como para obtener información de sensores abordo y controlar el vehículo (Team, 2016).

Existen diversas aplicaciones de estaciones terrenas, entre ellas: Mission Planner, QGroundControl, APM Planner, MAVProxy, AndroPilot, UgCS, Tower, MAVPilot. La decisión de seleccionar una aplicación de estación terrena depende de las actividades que se busquen realizar, la compatibilidad con la pila de piloto automático y que se adapte a las necesidades requeridas (Team, 2016).

## **2.16 Unidad controladora de motores**

Una unidad controladora de motores es una placa basada en un microcontrolador que realiza varias tareas siendo una de estas el suministro de potencia hacia los motores. Con esto, los motores no reciben la alimentación directa de las baterías, con esto, si las baterías tienen una tensión menor a la que trabajan los motores, estos no dejarán de funcionar simplemente no podrán alcanzar su potencia máxima. Por el contrario si la tensión es mayor a la indicada, es necesario que la unidad controladora tenga elementos de protección contra sobretensión para no dañar los circuitos o los motores (Velasco *et al.*, 2014)

En la actuación, la controladora Pixhawk utiliza señales PWM comprendidas entre 1000 y 2000 microsegundos para poder controlar el servo de los timones y las revoluciones del motor. Estos pulsos están pensados para los motores sin escobillas (Brushless Motor), pero estos motores consumen demasiada potencia para el objetivo de este proyecto, por lo que se ha optado por utilizar un motor DC (Direct Current) convencional con escobillas. Realmente un motor sin escobillas es más eficiente ya que tiene menos fricción, pero suelen estar diseñados para generar más potencia que uno con escobillas, de modo que realiza un gasto innecesario para esta aplicación. Adicionalmente, los motores DC con escobillas maniobran con más suavidad porque desarrollan menos potencia y los picos de corriente no son tan elevados.

## **2.17 Literatura citada**

Alke. (2016). UGV – Vehículos autónomos controlados en forma remota. Recuperado el 26 de mayo de 2018 de <https://www.alke.eu/es/ugvvehiculos-autonomos>

Aloisio, Christopher, Ranjan Kumar Mishra, Chu-Yin Chang, & James English. (2012). “Next Generation Image Guided Citrus Fruit Picker.” In 2012 IEEE International Conference on Technologies for Practical Robot Applications (TePRA), IEEE, 37–41. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6215651/>

Arrieta, F. R. C. P. F., Tejera, G., & Andrade, F. (2014). ESTUDIO DEL ESTADO DEL ARTE NAVEGACION EN ROBOTS AGRÍCOLAS.

- Billingsley, J., Visala, A. & Dunn, M. (2008). Robotics in agriculture and forestry, Robots handbook, Sprinkler.
- Bloom, J. (2015). Serial Communication. Recuperado el 11 de septiembre de 2018 de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/serial-communication>
- Bongiovanni, R., Mantovani, E., Best, S., & Roel, Á. (2006). Agricultura de precisión: integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable. Procisur/IICA.
- Cuenca Sáenz, L. E., & León Cando, J. A. (2017). Implementación de un sistema de navegación inercial, para mejorar la precisión de posicionamiento de un prototipo GPS en una trayectoria dentro de la ESPOCH (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Garibay Pascual, J. R. (2006). Robótica: Estado del arte. Tesis doctoral en Sistemas de la Información. Universidad de Deuston. Número. Fecha, 54.
- Etxeberria, J. A. (2013). Algoritmo de reconocimiento de forma y color para una plataforma robótica (Doctoral dissertation, Tesis de Master. Universidad del País Vasco. Departamento de Ciencia de la Computación e Inteligencia Artificial. En: [http://www.ccia-kzaa.ehu.es/s0140-con/es/contenidos/informacion/tesis\\_master/es\\_t\\_master/adjuntos/10jaristondo.pdf](http://www.ccia-kzaa.ehu.es/s0140-con/es/contenidos/informacion/tesis_master/es_t_master/adjuntos/10jaristondo.pdf). Consulta: Julio de).
- Gollakota, A. y Srinivas, MB (2011). Agribot: un robot agrícola multipropósito. En 2011 Annual IEEE India Conference (págs. 1-4). IEEE.
- Hord, M. (2016). I2C. Recuperado el 11 de septiembre de 2018 de <https://learn.sparkfun.com/tutorials/i2c>
- Huang, H. (2009). The HCS12/9S12: An Introduction to Software and Hardware Interfacing. Recuperado el 25 de noviembre de 2018 de [https://books.google.com.ec/books?id=5atwJG7D\\_HMC&pg=PR1&hl=es&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=5atwJG7D_HMC&pg=PR1&hl=es&source=gbs_selected_pages&cad=2#v=onepage&q&f=false)

- Kool, P. (2000). Robotica. Vrije Universiteit Brussel. Brussels, Belgium
- Kubrak, D. (2007). Etude de l'hybridation d'un récepteur GPS avec des capteurs bas-coûts pour la navigation personnelle en milieu urbain (Doctoral dissertation).
- Meier, Lorenz & Tanskanen, Petri & Fraundorfer, Friedrich & Pollefeys, Marc. "PIXHAWK:
- Mera Chamorro, A. M., & Ruano González, D. A. (2019). Implementación de un robot de navegación autónoma terrestre para evasión de obstáculos usando el dispositivo Pixhawk (Bachelor's thesis, Quito: Universidad de las Américas, 2019).
- Papalini Carro, J. (2020). Análisis y comparativa de autopilotos de código abierto para sistemas no tripulados (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- Pareja Estalrich, J. (2014). Algoritmo para optimizar los ángulos de ataque de un UGV en función del terreno discretizando (Master's thesis).
- Pedersen, S. M., Fountas, S. & Blackmore, S. (2008). Agricultural Robots Applications and Economic Perspectives. Service Robot Applications, Yoshihiko Takahashi (Ed.), ISBN: 978-953-7619-00-8, InTech
- Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M. C., García, L., Guinea, D., & Sandoval, F. (2000). Sistema de posicionamiento global (GPS): Descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. ETS ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Malaga.
- PX4 Dev Team. (2018). User Guide - PX4 Open Source Autopilot. Recuperado el 2 de diciembre de 2018 de <https://px4.io/user-guide-2/>
- Qingchun, F., Wengang, Z., Quan, Q., Kai, J., & Rui, G. (2012). Study on strawberry robotic harvesting system. In 2012 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE) (Vol. 1, pp. 320-324). IEEE.

- Ruangwiset, Annop, and Shin-Ichiro Higashino. (2012). “Development of an UAV for Water Surface Survey Using Video Images.” In 2012 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII), IEEE, 144–47. <http://ieeexplore.ieee.org/document/6427349/>
- Sakai, Satoru, Koichi Osuka, Takahiro Maekawa, and Mikio Umeda. (2007). Robust Control Systems of a Heavy Material Handling Agricultural Robot: A Case Study for Initial Cost Problem. *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 15(6): 1038–48. <http://ieeexplore.ieee.org/document/4343976/> (April 30, 2018).
- Shukla, Abhishek, and Suraj S. Jibhakate. (2011). “Design and Implementation of Real Time Pollution Free Autonomous Vehicle for Harvesting on VI Platform.” In 2011 3rd International Conference on Electronics Computer Technology, IEEE, 335–39. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5941618/>
- Simon, Santhosh. (2010). “Autonomous Navigation in Rubber Plantations.” In 2010 Second International Conference on Machine Learning and Computing, IEEE, 309–12. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5460720/> (April 30, 2018).
- Tamaki, Katsuhiko, Yoshisada Nagasaka, and Kyo Kobayashi. (2009). “A Rice Transplanting Robot Contributing to Credible Food Safety System.” In 2009 IEEE Workshop on Advanced Robotics and Its Social Impacts, IEEE, 78–79. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5587071/> (April 30, 2018).
- Team, A. D. (2016). Ardupilot. URL: [www.ardupilot.org](http://www.ardupilot.org).
- Velasco, V., Pilicita, E., Salazar, F., & Quiroz, J. (2014). Diseño y construcción de un vehículo eléctrico autobalanceado personal (VEAP) de dos ruedas en paralelo estilo SEGWAY (Doctoral dissertation, Tesis). Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de Ingeniería Automotriz. Recuperado a partir de <http://repositorio.espe.edu.ec:8080/jspui/handle/21000/9178>).

### **3. Implementación de navegación autónoma para recarga eléctrica en un robot agrícola**

García S., G.<sup>1</sup>; Velázquez L., N.<sup>2</sup>; Ruiz G., A.<sup>2</sup>; Cruz M., P<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.<sup>2</sup>Departamento de Irrigación, Universidad Autónoma Chapingo.

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Mecánica Agrícola, Universidad Autónoma Chapingo. Carr. México - Texcoco, Km 38.5. Chapingo, Estado de México. C.P. 56230. México.

Correo autor de correspondencia: nvelazquez@taurus.chapingo.mx

#### **3.1 Resumen**

El objetivo de este trabajo fue aproximar un robot agrícola hacia una posición conocida en la cual se pueda establecer una estación de recarga o cambio de baterías y así reducir tiempos muertos durante las labores agrícolas, para lograrlo se implementó y evaluó un sistema de navegación satelital en el vehículo, y se instrumentó con una controladora de vuelo Pixhawk 2.4.8, un controlador de motores, un sensor inercial, un módulo GPS y algunos elementos complementarios. Se evaluó el sistema implementado realizando navegaciones autónomas pasando por 17 puntos de control extraídos por una estación total, se tomaron datos de velocidad de avance, precisión de recorrido, y de llegada al punto objetivo y el consumo de corriente. Las pruebas se realizaron a tres velocidades diferentes: 0.8 m/s, 1.0 m/s, y una prueba con una carga distribuida de 8 kg a 0.6 m/s. El robot se acercó a una distancia media al punto objetivo fue de 77, 90 y 92 cm para las velocidades de 0.6, 0.8 y 1.0 m/s respectivamente. El error está por debajo de la precisión del GPS (+2.5 m). La velocidad no tuvo efectos en la precisión de la trayectoria no en el acercamiento al punto objetivo, sin embargo, cuando se agregó peso fue necesario modificar parámetros para el control de velocidad y orientación. El consumo de corriente fue mayor a medida que añadió peso y se incrementó la velocidad.

**Palabras clave:** Robot agrícola, Pixhawk, Navegación Satelital, GPS, Sensor Inercial

---

Tesis de Maestría en Ingeniería, Posgrado en Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, Universidad Autónoma Chapingo.

Autor: Guillermo García Sánchez

Director de Tesis: Dr. Noé Velázquez López

## **Implementation of autonomous navigation for electric recharge in an agricultural robot**

### **3.2 Abstract**

The objective of this work was to bring an agricultural robot closer to a known position in which a recharging station or battery change can be established and thus reduce downtime during agricultural work, to achieve this, a satellite navigation system was implemented and evaluated in the vehicle, and it was instrumented with a Pixhawk 2.4.8 flight controller, a motor controller, an inertial sensor, a GPS module and some complementary elements. The implemented system was evaluated by performing autonomous navigations, passing through 17 control points extracted by a total station, data on speed of advance, precision of travel, and arrival at the target point and current consumption were taken. The tests were carried out at three different speeds: 0.8 m / s, 1.0 m / s, and a test with a distributed load of 8 kg at 0.6 m / s. The robot approached a mean distance to the target point was 77, 90 and 92 cm for speeds of 0.6, 0.8 and 1.0 m / s respectively. The error is below the accuracy of the GPS (+2.5 m). speed had no effect on the precision of the trajectory or on the approach to the target point, however, when weight was added it was necessary to modify the parameters for speed and orientation control. Current draw was higher as weight was added and speed increased.

**Key words: Agricultural Robot, Pixhawk, Satelital Navigation, GPS, Inertial Sensor**

---

Master's Thesis in Engineering, Graduate Program in Agricultural and Water Engineering, Universidad Autonoma Chapingo.

Author: Guillermo Garcia Sánchez

Advisor: Dr. Noé Velázquez López

### 3.3 Introducción

El propósito de la agricultura de precisión es mejorar las condiciones de producción agrícola haciendo uso de herramientas tecnológicas avanzadas, con lo cual se pretende disminuir costos de producción y aumentar la eficiencia en la inspección, riego y fertilización, además de distintos tipos de análisis en los cultivos. Por lo tanto, es de notar el creciente desarrollo de vehículos para este tipo de tareas, algo que se puede observar en trabajos como en Bechar (2016). Jilek, 2015; Mane, 2016; Bergerman *et al.*, 2012). En ese sentido, Gil (2010) agrega que el conocimiento de la posición exacta es el elemento clave de esta modalidad de agricultura de precisión. En la mayoría de los casos el conocimiento de dos coordenadas x-y (longitud y latitud) es suficiente. Sin embargo, en algunas ocasiones es necesario conocer una tercera z (elevación). La necesidad de precisión en la determinación de la posición depende principalmente del tipo de actividad a realizar.

Otras técnicas sobre este tópico, son las que se han presentado en trabajos como el Isrobot con navegación autónoma referenciándose a partir de marcas magnéticas presentado por Silva *et al.* (2008) o bien el robot con sistema posicionamiento satelital y conexión 3G desarrollado por Ball *et al.* (2013). Otro método donde aborda seguimiento de rutas usando GPS y sensor inercial, y se han tenido resultados favorables son los que se describen Cuesta *et al.* (2004).

De acuerdo Banta (2000), hay tres conceptos básicos para que un vehículo autónomo que pueda seguir una ruta diseñada: navegación, orientación y control. Para lograr buenos resultados, en primer lugar, se debe solucionar un posicionamiento preciso y la localización. En muchos casos, la fusión de diversos sensores es necesario y así obtener datos confiables.

En la Universidad Autónoma Chapingo se encuentra en desarrollo un vehículo agrícola el cual tiene como objetivo realizar labores agrícolas tanto en agricultura protegida como a cielo abierto, para ello, se ha trabajado en las tecnologías críticas que limitan la implantación de estos robots en los campos agrícolas. Una de esas tecnologías críticas son los sistemas de navegación (Aldecoa-Quintana, 2014), donde se tiene que diferenciar la

agricultura de interiores o exteriores ya que es diferente la tecnología a utilizar en cada uno de estos casos.

Con respecto a lo anterior, el objetivo de este trabajo es instrumentar el robot agrícola con un sistema de navegación para agricultura exterior, mediante un sistema satelital y una controladora de navegación para realizar recorridos de manera autónoma hacia un punto de referencia y así se tenga el primer acercamiento a la navegación autónoma satelital.

### **3.4 Materiales y métodos.**

Se trabajó con dos elementos principales a interactuar. El primer elemento es el vehículo móvil con su respectiva instrumentación para la navegación satelital, el cual establece una comunicación con el segundo elemento que es una estación tierra, que sirve como interfaz PC para los elementos de hardware que trabajan a distancia.

#### **3.4.1 Plataforma.**

El vehículo utilizado para los experimentos es una plataforma robótica tipo skid steer desarrollado en el Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua de la Universidad Autónoma Chapingo para ejecutar diversas tareas agrícolas (Figura 1).



Figura 1: Robot agricultor "Voltan"

La potencia es proporcionada por un par de motores eléctricos los cuales son alimentados por una batería de litio de la marca Battery Tender de 12 V y 35 Ah, se usa un sistema de transmisión por cadena para mover las ruedas. La velocidad del vehículo se controla mediante la Modulación de Ancho de Pulso (PWM, por sus siglas en inglés), en donde hay una relación directa entre la velocidad y el valor PWM. En cuanto a la dirección, se

realiza mediante la diferencia de velocidad de las ruedas o bien al hacerlas girar en sentido opuesto para giros del vehículo sobre su mismo eje. El vehículo cuenta con un par de controladores de motor modelo ibt4, los cuales se sustituyeron por un controlador modelo sabertooth 2x60, ya que, puede suministrar un máximo de 60 A para cada motor y picos hasta de 120 A por algunos segundos, cuando se sobrepasa los límites de corriente, cuenta con sistema de auto-bloqueo y así evitar daños, cuando los valores nuevamente se encuentran por debajo de los límites el auto-bloqueo se desactiva.

Este tipo de controlador permite operar bajo tres modos diferentes: analógico, R/C y serial, estos modos son elegibles mediante el interruptor DIP (Dual In-line Package) puesto que se incluirá un radiocontrol para diversos modos de manejo del vehículo.

Para controlar los motores del vehículo y manejar los sensores se usó una controladora de piloto automático Pixhawk en su versión 2.4.8. Este dispositivo sirve como enlace a bajo nivel para servir de interfaz entre los actuadores, sensores externos, y computadora central, puesto que este dispositivo cuenta con una gran cantidad de librerías, tal como se muestra en la Figura 2, ésta contiene una IMU central, un giroscopio, magnetómetro, y admite hardware como GPS, dispositivos de comunicación, motores, servomotores, protocolos como SPI, i2C, CAN, Serial, así como lectura y escritura de pulsos PWM (Rodríguez-Crespo *et al.*, 2017).

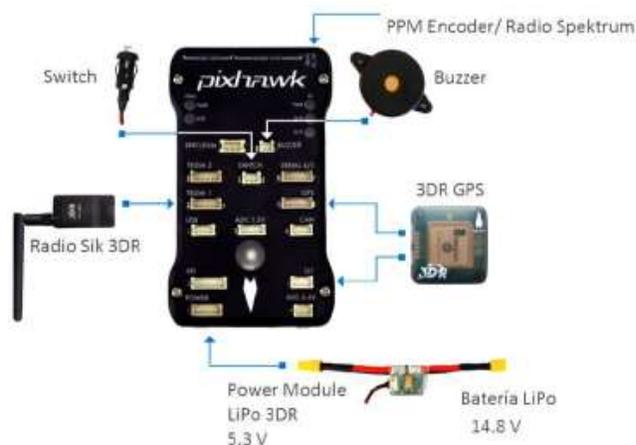


Figura 2: Controladora de vuelo Pixhawk con sus diferentes elementos.

Se conectó cada uno de los componentes del sistema (Figura 3), el cual consta de un a) GPS, b) salidas de señal PWM, c) módulo de poder, d) módulo de telemetría, e) led RGB visor de estado, f) interruptor, g) buzzer y h) microcontrolador como se muestra en la Figura 3. El buzzer es una bocina que indica mediante tonos las acciones realizadas por el vehículo. El interruptor es un botón que se utiliza para activar o desactivar las salidas PWM del Pixhawk vía hardware, y así mantener un control de seguridad sobre el vehículo al momento de estar realizando pruebas. El GPS 3DR es un receptor GNSS que cuenta con un magnetómetro para obtener medidas de posición y orientación.



Figura 3: Componentes del sistema de navegación satelital

Se realizó la conexión entre Pixhawk, el controlador Sabertooth 2x60, motores y la batería principal del robot (Figura 4), y así, mediante los cables de señal provenientes del Pixhawk enviar pulsos eléctricos, los cuales van a determinar tanto la velocidad como la dirección de giro de los motores.

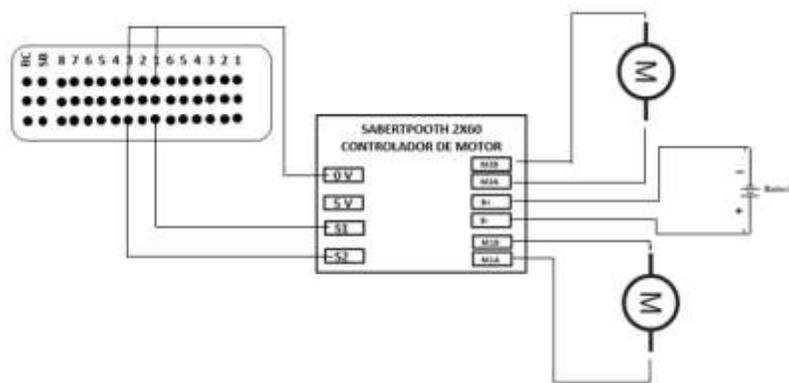


Figura 4: Esquema de conexión de componentes

Se utilizó el software Mission Planner versión 1.3.73 (Figura 5) para ser la estación base la cual funciona como un interfaz en donde se planificó cada una de las misiones o rutas a seguir por el vehículo, de igual manera se monitorean en tiempo real diversos parámetros de interés durante la misión tales como, nivel de carga de la batería, posicionamiento, rumbo, velocidad. La estación base y el controlador se comunican por medio de dos radios de telemetría por un protocolo de comunicación llamado MAVLink, estos módulos trabajan a 900 Mhz y tienen una potencia de transmisión de 100mW (Rodríguez-Crespo *et al.*, 2017).



Figura 5: Interfaz Mission Planner, se muestra la pantalla de configuración de motores.

### 3.4.2 Calibración y ajustes de control del vehículo

El primer paso obligatorio en la puesta a punto del robot es la calibración de los sensores de la placa, algo que es necesario para poder armarlo y hacer que funcione.

### 3.4.3 Verificación de sentido de giro.

Para verificar la correcta conexión y sentido de giro de los motores se realizó el motor test incluido en el software, Figura 6, en él se realizaron las pruebas de acuerdo al tipo de vehículo para el que se está usando, para un rover de dirección deslizante o skid steer al realizar la prueba C el motor izquierdo debe girar hacia adelante, mientras que para la prueba D, el motor derecho debe girar hacia adelante. Si alguno de esta gira en sentido opuesto, se invierte la polaridad de los motores en la conexión con el controlador

de motores.



Figura 6: Verificación del sentido de giro de los motores.

### 3.4.4 Conexión y calibración del radiocontrol.

Para calibrar el radiocontrol, una vez realizada la conexión entre el módulo de modulación por posición de pulso (PPM, por sus siglas en inglés) y el modulo receptor, se conectó el Pixhawk a la computadora mediante cable USB y así alimentar el PPM, de igual manera se encendió el RC, a continuación desde el menú calibración de radio de Mission Planner, Figura 7, se verifica que se esté reconociendo el RC moviendo cualquiera de las palancas, posteriormente se seleccionó la opción calibrar radio seguido por hacer el moviendo de cada una las palancas secuencialmente hacia cada una de los límites, para finalizar se seleccionó la opción Done.



Figura 7: Pantalla de calibración de los canales de radiocontrol.

Se establecieron dos modos de operación del vehículo: manual, autónomo, los cuales pueden cambiar de acuerdo a la posición de palanca del radio control Skyfly i6. El primer

modo es el modo manual, por medio del cual se controla el movimiento del vehículo directamente con el radio control. el segundo modo auto, al entrar en este modo el vehículo recorre una serie de puntos previamente definidos con coordenadas GPS por medio del software Mission Planner.

Se realizó la conexión para la comunicación entre el controlador y el radiocontrol de la marca Sky modelo i-7 para esto se usó el codificador PPM, el cual permite codificar las señales PWM (modulación de ancho de pulso) del receptor del radiocontrol en una sola señal PPM.

Cuadro 1: Conexión de microcontrolador y modulo receptor de RC.

Pin PPM Encoder	Color de cable	Pin receptor RC
GND	Negro	Negativo
5V	Rojo	Positivo
IN1	Blanco	Canal 1
IN2	Naranja	Canal 2
IN3	Amarillo	Canal 3
IN4	Verde	Canal 4
IN5	Azul	Canal 5
IN6	Morado	Canal 6
IN7	Café	NC
IN8	Blanco	NC

### 3.4.5 Arquitectura del sistema

En la Figura 8 se representa mediante un diagrama de bloques cada uno de estos elementos, así como el protocolo de comunicación que usan para su interacción.

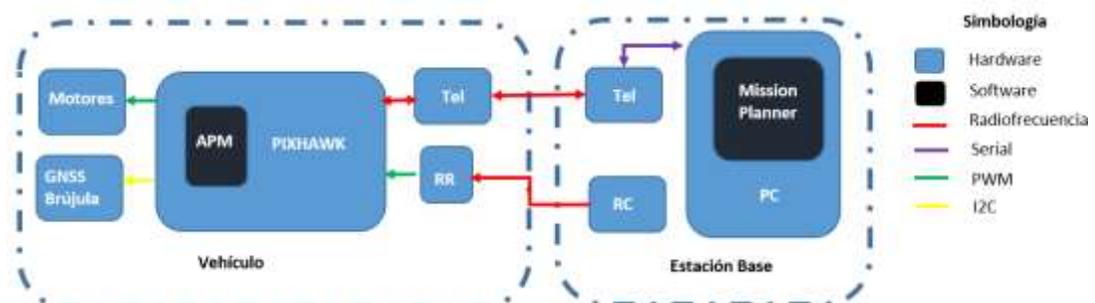


Figura 8: Diagrama de bloques de la composición del sistema implementado.

### 3.4.6 Medición de la velocidad angular en los neumáticos

Se realizaron mediciones de velocidad angular de cada uno de los neumáticos del robot agrícola y de esta manera corroborar que cada una de estas giren de manera uniforme, para esto, se utilizó un tacómetro de digital de luz láser modelo **DT-2234C<sup>+</sup>**, se colocó cinta reflejante en los neumáticos, a continuación, se realizaron las mediciones en donde se varió la potencia de los motores a 20%, 40%,60%,80% y 100%, la potencia se estableció mediante Mission Planner en el menú motor test (Figura 9).



Figura 9: Medición de velocidad angular en neumáticos

### 3.4.7 Ajuste de la velocidad y aceleración

El primer paso necesario para calibrar el robot y conseguir que siga con más precisión la ruta es regular el controlador de velocidad y la respuesta del acelerador. Para esto se siguieron los pasos siguientes:

- Configurar un canal auxiliar del radiocontrol a la función “Learn Cruise Speed”
- Poner en marcha el robot en modo de manejo manual.
- Conducir el vehículo a una velocidad cercana a la velocidad a la se desea que se desplace el vehículo en el modo automático.
- Activar la función auxiliar mediante el radiocontrol.
- conectarse con la estación terrestre y verificar que los valores de los parámetros cruise speed y cruise throttle se hayan actualizado, de lo contrario los valores se muestran en la pantalla y se deben actualizar manualmente en la lista de parámetros.

### **3.4.8 Ajuste de valores PID**

Para el guiado del vehículo el firmware usa un control proporcional-integral-derivativo (PID, por sus siglas en inglés), el cual es un método ampliamente usado en la electrónica basado en la corrección de la desviación del error deseado usando la retroalimentación.

Internamente en el código del rover incorpora los valores de las constantes PID, se usa uno para el control de velocidad y otro para control de dirección. Durante la calibración se han manipulado las constantes que multiplican los términos P, I y D, estas modificaciones se han hecho desde la estación base hasta lograr el control adecuado de acuerdo con la geometría y características de vehículo.

Es importante señalar que la modificación de estos parámetros no se realizó de forma analítica, esto como consecuencia que desconocen las funciones de transferencia del propio vehículo. Por lo cual, se han modificado los valores de modo manual hasta observar una respuesta correcta de la dirección y de la velocidad.

#### **Control de velocidad**

Para conseguir una buena precisión la navegación de las rutas, es importante hacer una serie de calibraciones para regular el controlador de velocidad, así como la respuesta del acelerador. Además del sistema PID el cual es principal para la regulación de la respuesta del acelerador, existen otros parámetros los cuales ajustan más aspectos del control de velocidad. Algunos de los parámetros más relevantes se describen a continuación, los cuales fueron modificados durante la calibración:

- **Cruise\_speed:** Velocidad de cruceo a la que se realizan las misiones autónomas.
- **Cruise\_Throttle:** Indica en tanto por ciento la entrada del acelerador que hay que dar para alcanzar la velocidad de cruceo deseada.
- **ATC ACCEL MAX:** Es el máximo valor de aceleración permitido.
- **Controlador PID**

#### **Control de dirección**

El control de dirección es más complejo que el de velocidad, para este control existe una combinación del control PID con un controlador L1 los cuales deben ser calibrados hasta obtener una respuesta aceptable.

El controlador L1 es un modelo teórico desarrollado por Park et al. (2004). En el cual describen detalladamente el funcionamiento de este método. A continuación, se describen los parámetros principales, los cuales fueron modificados durante la calibración del sistema.

- **FF (Feed Forward)**: Esta ganancia relaciona la velocidad de giro deseada con la respuesta del servomotor de dirección y va directamente vinculado al PID.
- **TURN RADIUS**: Debe ajustarse a el radio de giro máximo del Rover.
- **TURN MAX G**: Este parámetro limita la fuerza g en las curvas reduciendo la velocidad si es necesario.
- **Controlador L1**: Se ajusta principalmente con el parámetro NAVL1 PERIOD que determina el periodo (en segundos) que dura la maniobra de compensación tras un giro. A valores más altos se tiene una respuesta muy lenta y con periodos más cortos los giros se toman de forma mucho más agresiva. También puede ajustarse NAVL1 DAMPING, que determina el coeficiente de amortiguamiento de la oscilación.
- **WP RADIUS**: Determina la distancia máxima a la que el Rover pasará de cada punto de ruta.
- **WP OVERSHOOT**: Es la máxima distancia que el vehículo puede recorrer pasado un punto de ruta antes de girar hacia el siguiente punto. Limita el exceso de giro en las curvas más cerradas llegando a reducir la velocidad si es necesario.
- **Controlador PID**

#### **3.4.9 Extracción de puntos de control mediante estación total**

Se usó una estación total de la marca Leica modelo TS-06, en el Cuadro 2 se describen sus características técnicas, se estaciono la base en un punto fijo y se realizó la configuración inicial, a continuación, usando el prisma topográfico se realizó la toma de puntos sobre la calle siguiendo la línea central de esta para así sirviera como referencia de la ruta a seguir por el robot agrícola. De igual manera se tomaron puntos aleatorios estratégicos y así verificar que los puntos extraídos y estén bien referenciados.

Cuadro 2: Datos técnicos de estación total Leica TS06

<b>Precisión angular</b>	7,5,3,2,1 segundos
<b>Alcance sin prisma</b>	500m,1000m
<b>Alcance con prisma</b>	3500m
<b>Precisión en distancia</b>	2mm+ 2ppm
<b>Aumentos de visor</b>	30x
<b>Enfoque mínimo</b>	1.7m
<b>Plomada</b>	Laser
<b>Compensador</b>	Cuádruple eje
<b>Teclado</b>	Alfanumérico, B/N
<b>Programas de trabajo</b>	Topografía, construcción
<b>Peso</b>	5.1 kg
<b>Batería</b>	Recargable Li-ion, 30 horas de uso

#### 3.4.10 Curva de descarga de batería

Para la obtención de la curva de descarga de la batería, se cargó completamente, a continuación, se conectaron dos motores de 12v y 250w de manera directa a la batería, se midió el consumo de corriente con un multímetro Steren modelo MUL-100, como resultado se obtuvo un consumo constante de 5.5 A, se realizó registro de el voltaje de batería cada 2 minutos para la construcción de la curva.

#### 3.4.11 Pruebas de campo y recolección de datos.

Las pruebas se realizaron en la Universidad Autónoma Chapingo, en el Posgrado de Ingeniería Agrícola y Uso Integral del Agua, localizada geográficamente en las siguientes coordenadas LN: 19.4729 y LW: -99.2059 a una altitud 2142 msnm.

Basado en la metodología descrita por Bakker *et al.*, (2008) se trazó una ruta en una superficie de concreto, se hizo funcionar le robot una distancia de 15 metros para estabilizar la velocidad de prueba., la ruta de prueba consintió primera en una trayectoria recta de 24 metros, un giro hacia la derecha de 85° y finalmente un tramo recto de 10

metros

Se realizaron pruebas a tres velocidades 0.6 m/s, 0.8 m/s y 1 m/s, inicialmente se ejecutaron bajo los parámetros predeterminados del software para las primeras dos velocidades, y posteriormente se realizaron los ajustes en parámetros de velocidad y dirección y así se continuó con las pruebas para 0.8 m/s y 1 m/s. Adicionalmente, se realizó una prueba agregando una carga de 8 kg al vehículo agrícola, esta carga se distribuyó de manera uniforme para así finalmente realizar la evaluación bajo esta condición a una velocidad de 0.6 m/s.

Los puntos de control para la prueba, se extrajeron de los datos reportados por la estación total. Estos puntos de control son cada dos metros, es decir, en toda la trayectoria de recorrido se cuenta con 17 puntos de control. El sistema de coordenadas geográfica usada durante la evaluación fue el Universal Transverse Mercator (UTM). En el Cuadro 3 se muestran los parámetros que se cambiaron durante cada una de las pruebas realizadas al vehículo.

Cuadro 3: Valores de parámetros de configuración para misiones autónomas.

	Sin calibración PID		PID calibrado		Con carga
	V1	V2	V2	V3	V1
<b>Parámetros de velocidad</b>					
Cruise_speed	0.6	0.8	0.8	1	0.6
Cruise_Throttle	50	70	75	100	60
ATC_ACC_MAX	1.6	1.6	2	2	1.6
PID	0.2,0.125,3	0.2,0.125,3	0.2,0.25,0	0.2,0.25,0	0.2,0.25,0
<b>Parámetros de dirección</b>					
FF	0.2	0.2	2.5	2.5	4.5
PID	0.2,0.2,0	0.2,0.2,0	2.5,0.4,0		2.5,0.4,0
TURN_RADIUS	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
TURN_MAX_G	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
NAVL1_PERIOD	25	25	15	15	25
NAVL1_DAMPING	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75

WP_RADIUS	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
WP_OVER_SHOOT	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
WP_SPEED	0	0	0	0	0
ACRO_TURN_RATE	90	90	90	90	90

---

Para evaluar la precisión de la navegación durante la ruta, se marcó un punto a cada metro de distancia sobre la ruta esperada (Figura 10), a partir de los cuales se midió el desfase en metros entre las rutas.

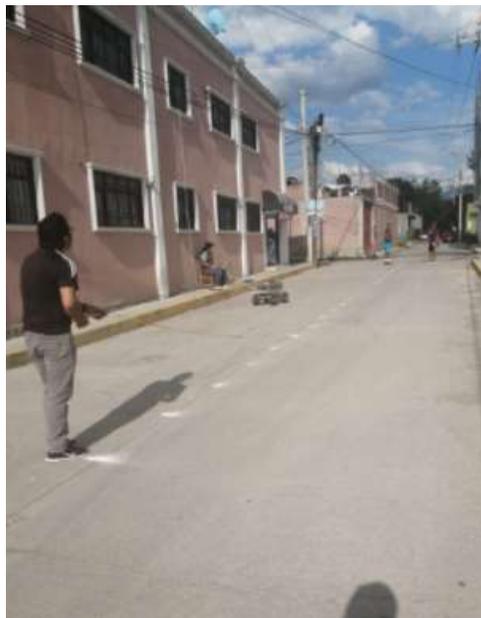


Figura 10: Marcado de puntos de medición sobre la misión establecida.

De igual manera al ser los puntos de control los creadores de la ruta de comparación debido a la precisión del instrumento que se usó para su extracción, se marcaron de manera física la ruta por la cual el robot se desplazó durante el recorrido (Figura 11) para de manera física el desfase entre el recorrido esperado y el realizado.



Figura 11: Robot durante navegación de ruta.

#### **3.4.12 Medición de corriente durante la navegación**

Durante las pruebas de navegación se monitoreó el consumo de corriente usando un multímetro de gancho de la marca Steren modelo MUL-100 se realizó un muestreo cada dos segundos, se calculó la media y desviación estándar para conocer la autonomía energética de acuerdo a la curva de descarga, estas mediciones permitieron conocer los picos de corrientes máximos y validar el uso de la controladora usada.

#### **3.5 Resultados y discusión**

Con el sistema implementado se consiguió la interacción entre la estación y el vehículo móvil, el modo de operación para misiones autónomas entre estos dos elementos es descrito en el diagrama de flujo de la Figura 12, primero se realiza la comprobación del sistema, en el cual se verifica que los componentes se encuentren trabajando de manera correcta, a continuación, se espera a que el led RGB muestre parpadeos de color verde, si se muestra un color diferente, en la estación base se muestran los fallos que se deben corregir. Como siguiente paso, se debe establecer la comunicación entre el vehículo y estación base mediante los módulos de telemetría.

Desde el software Mission Planner se establece la ruta a recorrer mediante puntos de control, posteriormente usando el radiocontrol se realiza el armado del vehículo con esto, Pixhawk empieza a enviar señales PWM a la controladora de motores por lo cual las

palancas deberán estar es la posición central. Como paso final con radiocontrol, se selecciona el modo auto. Cuando el robot finaliza la misión, emite sonidos a partir de ahí se establecen nuevas misiones o se cambia a modo manual

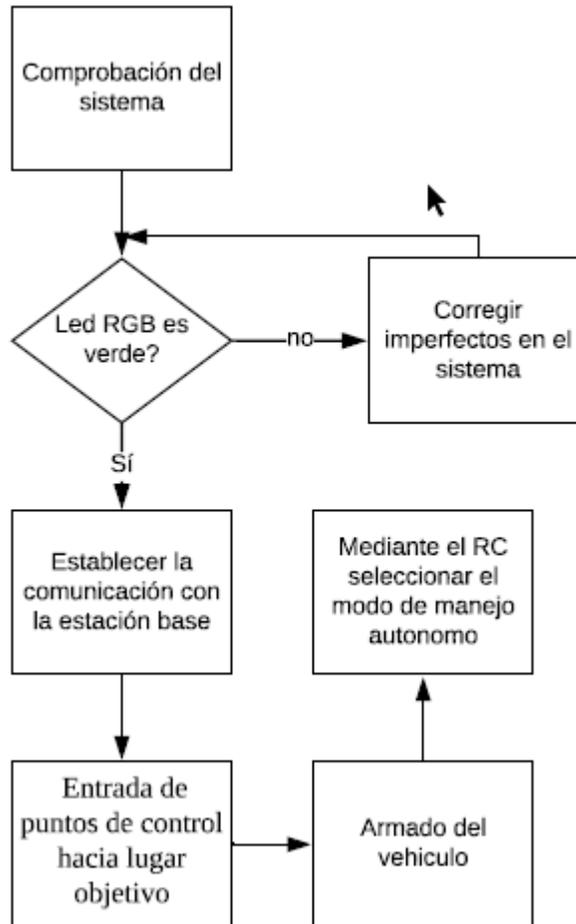


Figura 12: Diagrama de funcionamiento para realizar una misión autónoma con el robot.

Los resultados de la evaluación de la velocidad angular, se muestran en la Figura 13, en estos se observa que no existe variación entre las llantas del mismo lado, izquierda delantera (ID) e izquierda trasera (IT) o bien entre la derecha delantera (DD) y derecha trasera (DT), sin embargo, hay una variación mínima entre las velocidades de los neumáticos derechos comparados con los izquierdos.

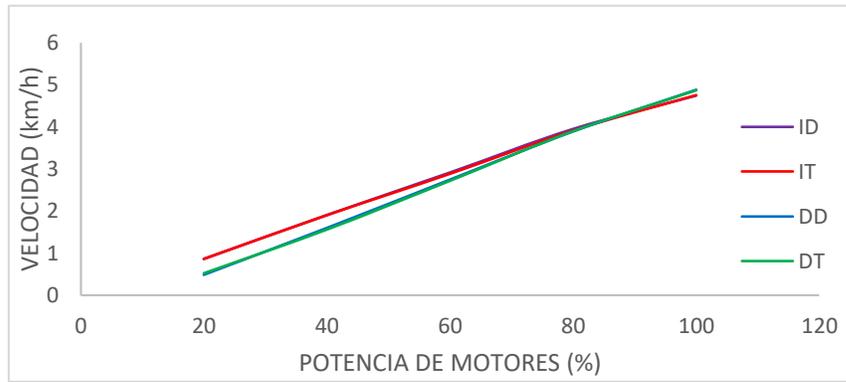


Figura 13: Velocidad angular de los neumáticos del robot.

La Figura 14 muestra plano de puntos tomados con la estación total de los cuales se tomaron algunos para ser los puntos de referencia de la misión establecida.

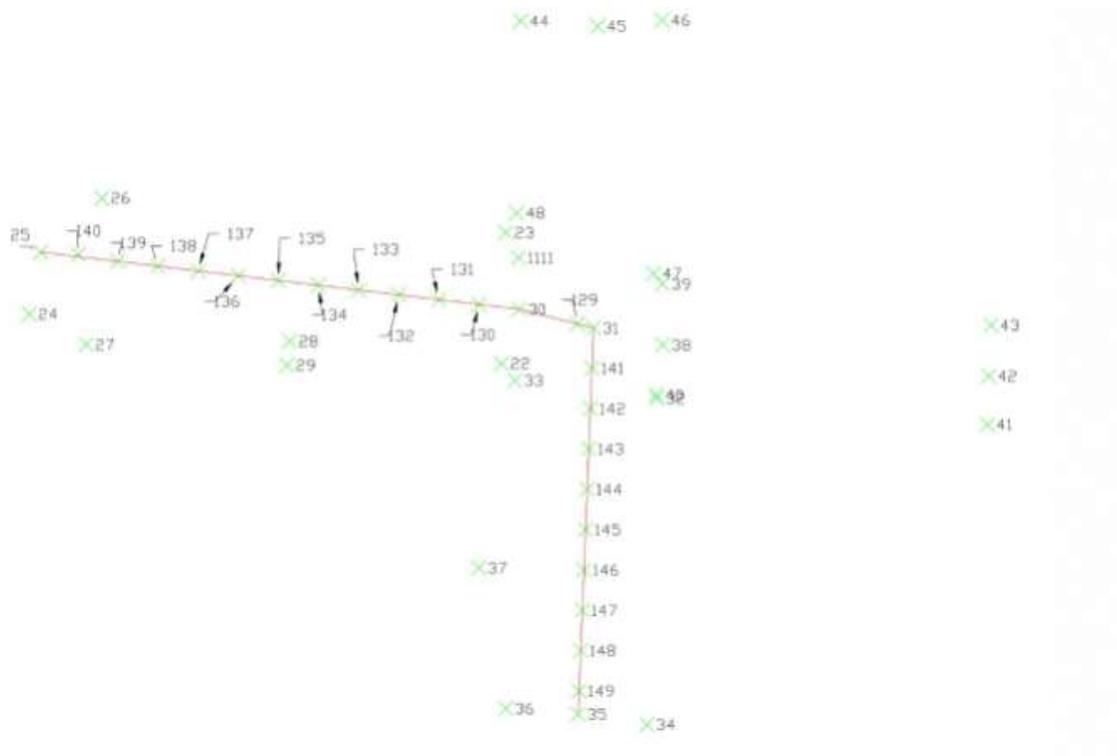


Figura 14: plano de puntos extraídos con estación total topográfica.

Los resultados de la descarga de batería a una tasa de descarga constante de 5.5 A se muestran en Figura 15, se observa que hay un punto de velocidad crítico donde el voltaje tiene una caída drástica y empieza a disminuir más rápido. Para este caso, el robot tendría una autonomía energética de 80 minutos, esta autonomía será menor cuando el consumo de corriente sea mayor.

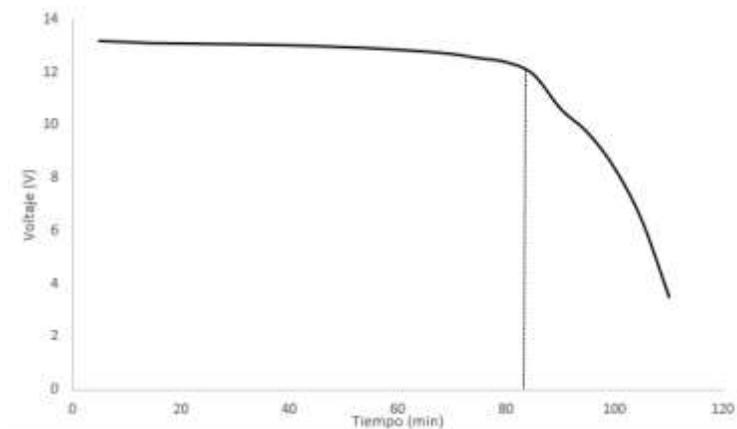


Figura 15: Curva de descarga de la batería Tenda

En la Figura 16 se muestran los resultados del recorrido en las 5 pruebas a la velocidad de 0.6 m/s con parámetros de dirección dados por el sistema y con parámetros de velocidad ya calibrados. Se observa que en la parte inicial del gráfico que a pesar de que en cada una de las pruebas el robot se colocaba sobre al inicio de la ruta real, éste realizó una

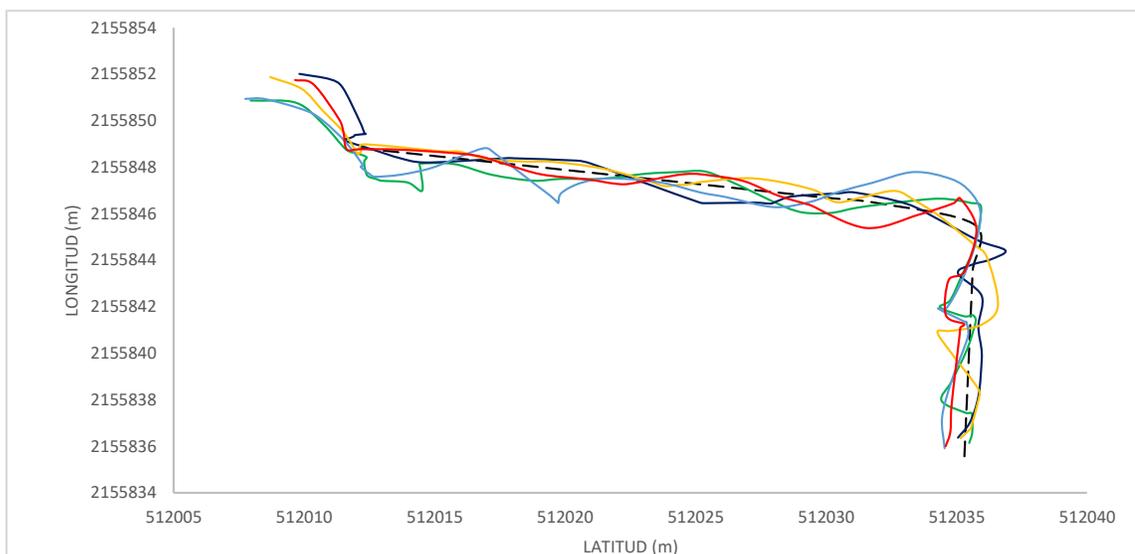


Figura 16: Navegación a 0.6 m/s sin ajuste de parámetros de velocidad y orientación.

corrección, esto como consecuencia de la precisión del receptor GPS el cual marcaba una posición diferente a la real. Para el resto de la ruta, el robot osciló sobre la trayectoria programada con variaciones menores a los dos metros.

En la Figura 17 se representan los recorridos realizados para la velocidad de 0.8 m/s, de similar a la anterior bajo parámetros de orientación y velocidad dados por defecto por el sistema y los de velocidad ya calibrados, se observa que las oscilaciones del vehículo sobre la ruta trazada fueron mayores a los observados para la velocidad de 0.6 m/s, esto sugiere que se deben realizar el ajuste parámetros de la dirección y así mitigar estas oscilaciones.

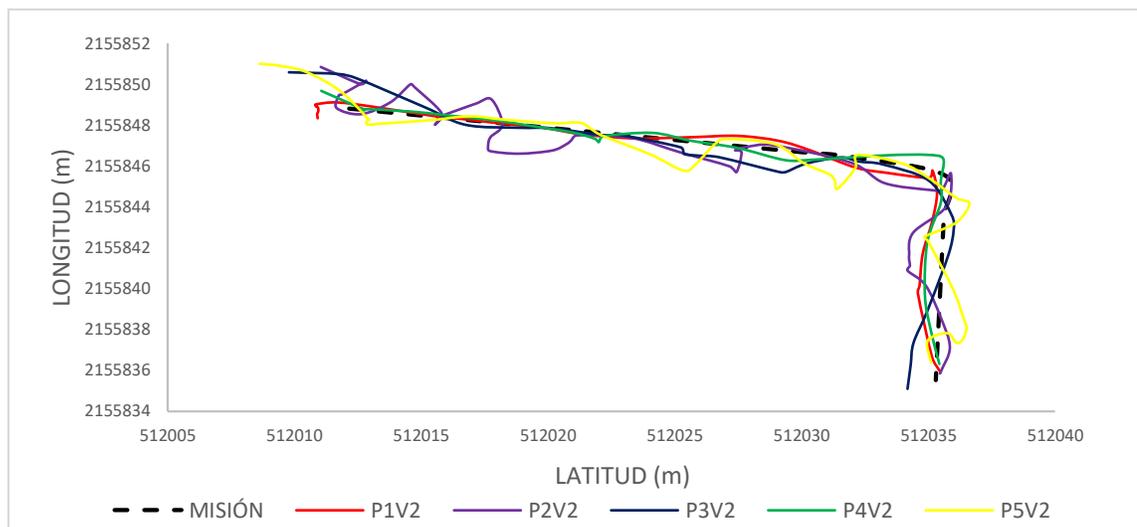


Figura 17: Navegación a 0.8 m/s sin ajuste de parámetros de velocidad y orientación

De acuerdo a los resultados mostrados en las Figuras 16 y 17, en cada una de las pruebas realizadas el robot se colocó sobre el inicio de la ruta dada, sin embargo, en el interfaz de la estación base la posición se aprecia desfasado algunos metros de la ruta, por lo que el vehículo hizo una corrección ya sea hacia la izquierda o derecha para contrarrestar ese desfase.

Por lo anterior, se realizaron mediciones para medir el desfase para cada una de las velocidades evaluadas, las mediciones se encuentran resumidas en el Cuadro 4. se observa que el error por desfase va de 91.4 cm hasta un máximo de 124.3 cm para la

velocidad 1 (V1) de 0.6 m/s, el error medio para esta velocidad fue de 147.12 cm con una desviación estándar de 56.03 cm, que está dentro del rango de precisión del GPS. También se encuentran resumidas las mediciones para la velocidad 2 (V2) el error va de 101.87 en la prueba 5 hasta un máximo de 176.25 en la prueba 3, el error medio para esta velocidad fue de 147.86 con desviación estándar de 31.5cm, todas las mediciones dentro del rango de precisión del GPS.

Cuadro 4: Precisión registrada en navegación sin ajuste de parámetros de velocidad y orientación.

	<b>Media (cm)</b>	<b>D. Estándar (cm)</b>	<b>Mínimo (cm)</b>	<b>Máximo (cm)</b>
<b>V1P1</b>	120.50	69.82	0	267
<b>V1P2</b>	163.00	74.14	0	270
<b>V1P3</b>	236.40	76.36	25	430
<b>V1P4</b>	91.40	51.22	0	250
<b>V1P5</b>	124.30	51.03	0	205
<b>V2P1</b>	129.92	87.47	0	340
<b>V2P2</b>	168.25	69.66	0	270
<b>V2P3</b>	176.25	84.37	0	360
<b>V2P4</b>	163.00	83.19	0	260
<b>V2P5</b>	101.87	81.94	90	250

La velocidad del robot (0.6m/s y 0.8 m/s) varió con el tiempo debido a las oscilaciones para corregir la trayectoria las cuales fueron de manera frecuente (Figura 18 y 19).

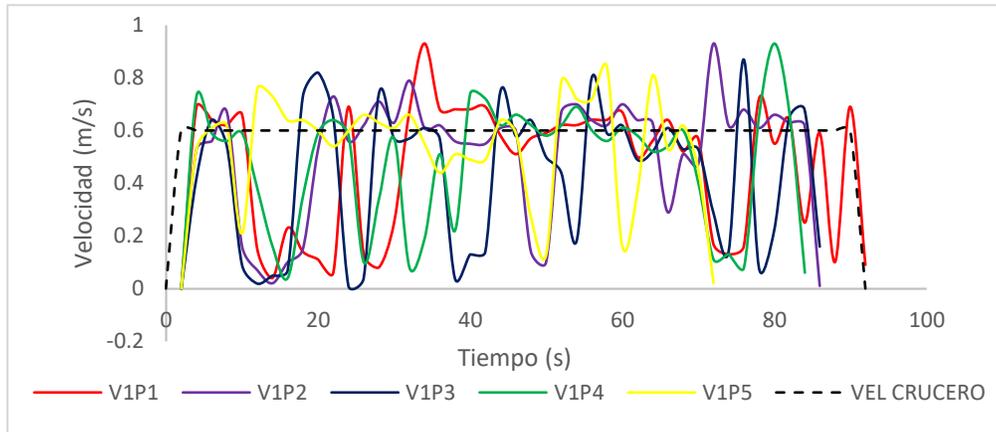


Figura 18: Variación de velocidad de navegación con objetivo de 0.6 m/s

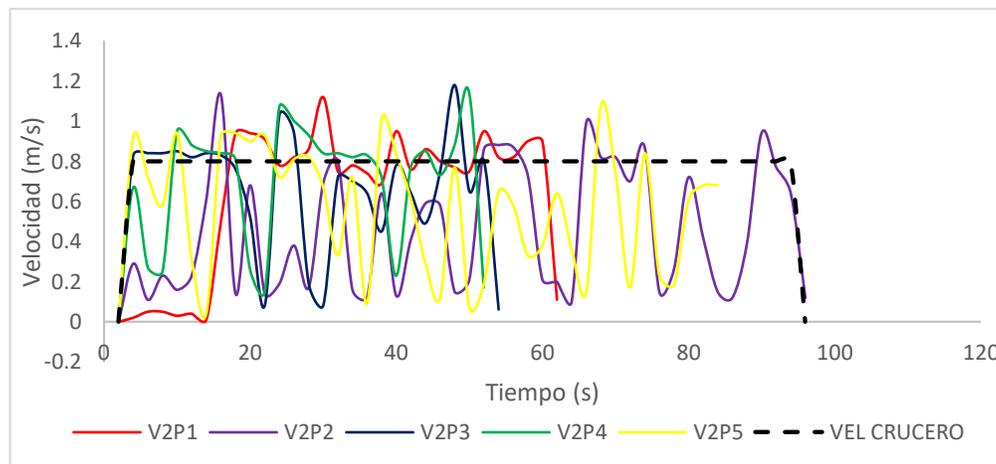


Figura 19: Variación de velocidad con objetivo de 0.8 m/s

En el Cuadro 5 se presenta un resumen estadístico del consumo de corriente de las velocidades evaluadas, los datos muestran una idea general del rendimiento energético que se puede alcanzar de acuerdo al tipo de batería con la que se cuenta. La primera velocidad registró un consumo medio de 6.42 A con una desviación estándar de 1.83 A, mientras que el consumo medio de la segunda velocidad fue de 8.25 A con una desviación estándar de 2.08 A. Se observa que el pico máximo de corriente se registró en la velocidad 1 prueba 4 (V1P5) con un valor de 40.5 A el cual es un valor inferior al soportado por la controladora de motores.

Cuadro 5: consumo de corriente para 0.6 y 0.8 m/s sin ajuste de orientación y velocidad.

	Media (A)	D. Estándar (A)	Mínimo (A)	Máximo (A)
<b>V1P1</b>	4.53	3.15	1	13.7
<b>V1P2</b>	4.33	4.83	1	23.8
<b>V1P3</b>	8.16	4.14	1.2	20
<b>V1P4</b>	7.44	4.05	1.1	19.8
<b>V1P5</b>	7.64	7.09	1.2	40.5
<b>V2P1</b>	6.73	3.92	3.1	18.6
<b>V2P2</b>	10.73	5.32	3.1	23.1
<b>V2P3</b>	6.72	2.18	1.2	9.6
<b>V2P4</b>	6.76	4.13	2.3	19.6
<b>V2P5</b>	10.31	5.51	3.3	29.9

En la Figura 20 y 21, se muestran los resultados obtenidos con la modificación de parámetros de la dirección y velocidad del robot, como se observa que se redujeron las oscilaciones sobre la ruta de referencia para las dos velocidades evaluadas (0.8 m/s y 1 m/s) en comparación con las pruebas sin ajuste de parámetros.

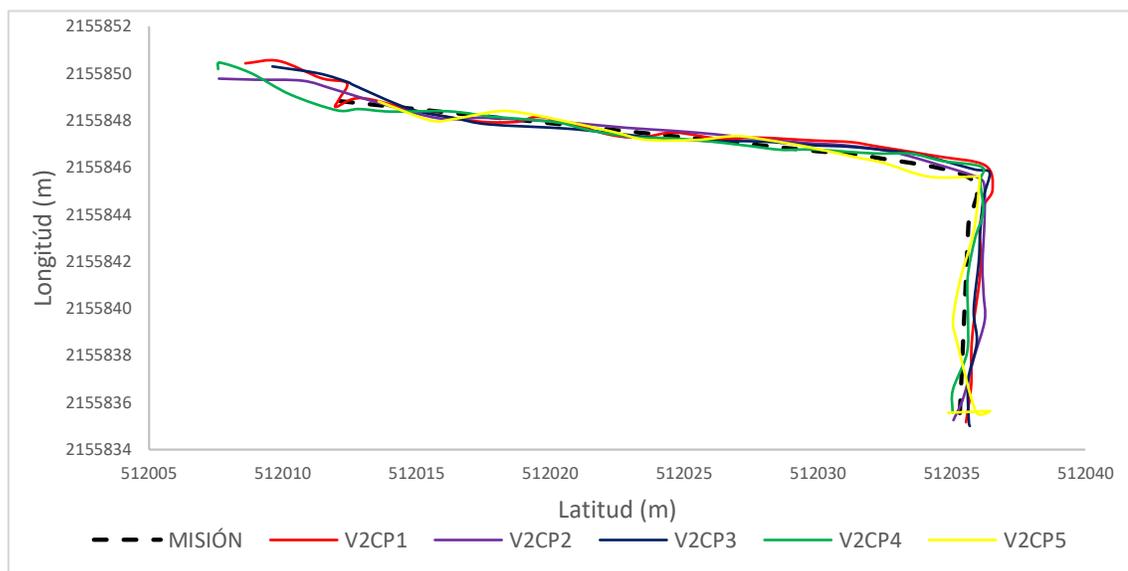


Figura 20: Navegación a una velocidad de 0.8 m/s con parámetros de dirección y velocidad ajustados

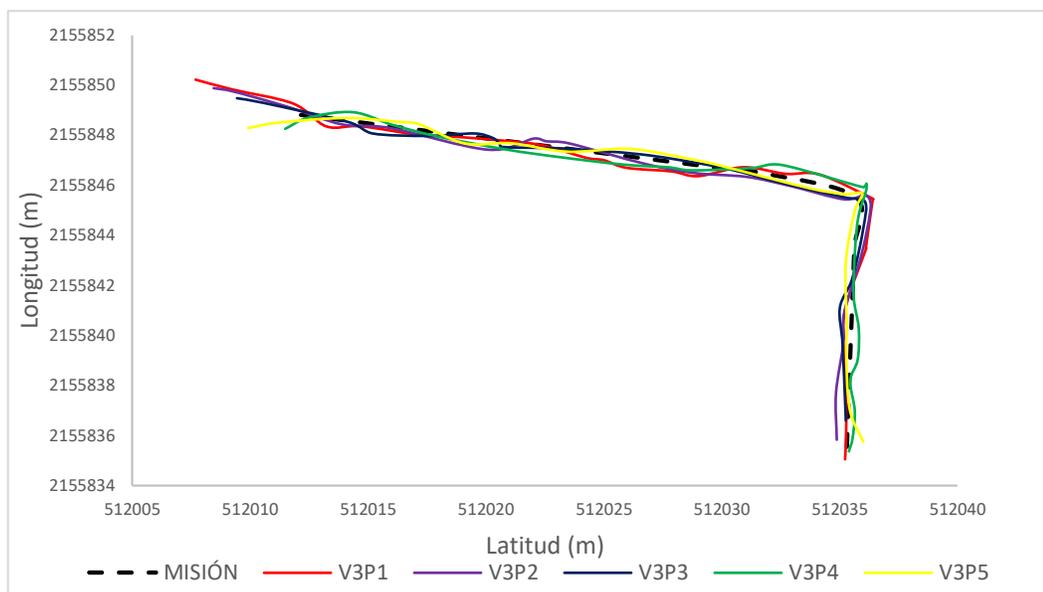


Figura 21: Navegación a una velocidad de 1 m/s con parámetros de dirección y velocidad ajustados

En el Cuadro 6 se muestran los resultados de la evaluación del desempeño del robot durante la ruta, para las velocidades 2 y 3. Se observa que la precisión mejoró con la calibración realizada. Para la velocidad 2 a lo largo de las 5 pruebas se registró una media de 76.7 cm con desviación estándar de 22.8, mientras que para la velocidad 3 una media de 76.3 cm y desviación estándar de 15 cm. Para estas velocidades la precisión se aumentó en comparación con las primeras pruebas realizadas en un 50% pasando de 147 cm a 76 cm.

Cuadro 6: Precisión a 0.8 y 1.0 m/s con ajuste de velocidad y orientación.

	<b>MEDIA (cm)</b>	<b>D. ESTANDAR (cm)</b>	<b>MINIMO (cm)</b>	<b>MAXIMO (cm)</b>
<b>V2P1</b>	81.07	41.68	0.00	175.00
<b>V2P2</b>	45.10	49.23	0.00	170.00
<b>V2P3</b>	62.79	60.48	0.00	180.00
<b>V2P4</b>	95.00	42.29	0.00	170.00
<b>V2P5</b>	99.76	46.69	0.00	155.00
<b>V3P1</b>	66.79	43.08	0.00	170.00
<b>V3P2</b>	80.73	63.23	0.00	180.00
<b>V3P3</b>	63.25	64.07	0.00	180.00
<b>V3P4</b>	100.50	53.72	0.00	180.00
<b>V3P5</b>	70.24	42.03	0.00	120.00

Los resultados de la velocidad después de la calibración se muestran en las Figuras 22 y 23, resulta evidente que el control de velocidad que se tuvo durante el recorrido fue mejor, también se observa que, en cada una de las 5 pruebas para ambas velocidades, hubo una caída de velocidad por debajo de los 0.4 m/s lo cual ocurrió cuando el vehículo hizo el giro de 85° a la derecha.

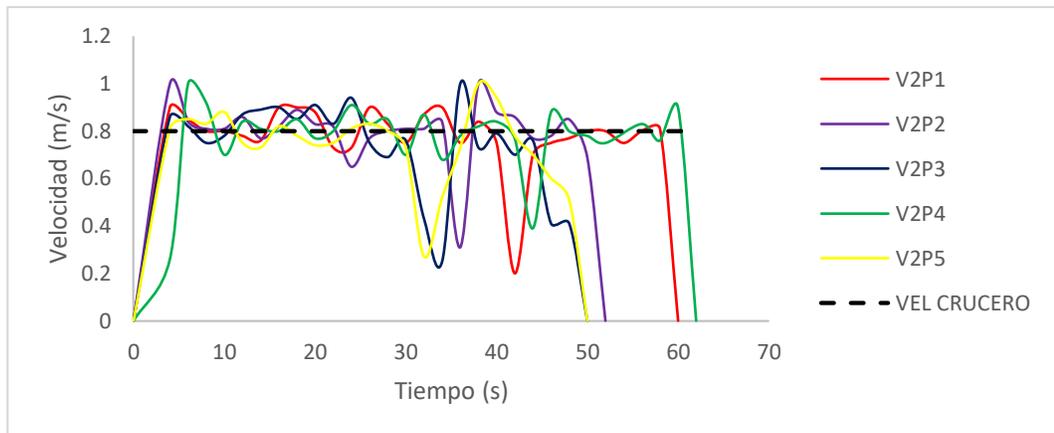


Figura 22: variación de velocidad con objetivo de 0.8 m/s

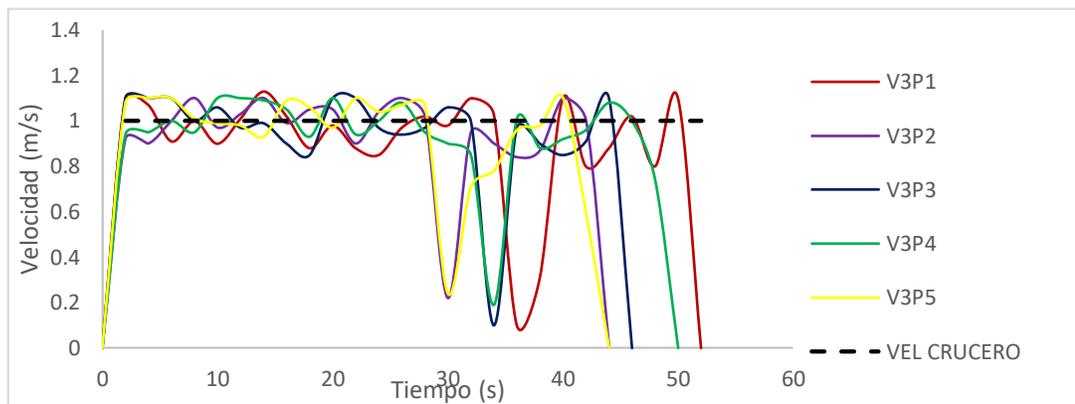


Figura 23: Variación de velocidad con objetivo de 1 m/s

A continuación, se muestra un resumen de los datos de la corriente consumida durante las 5 pruebas de las dos velocidades, para la primera velocidad se registró una media de 4.58 A y desviación estándar de 0.81 A, para la velocidad 3 la media fue de 5.73 A con desviación estándar de 1.23 A, el pico máximo de corriente se registró en la prueba 1 de la velocidad 3 (V3P1), el cual se encuentra dentro del límite permitido por la controladora.

: Cuadro 7: Consumo de corriente a 0.8 y 1.0 m/s con ajuste de velocidad y orientación.

	Media (A)	D. estándar (A)	Mínimo (A)	Máximo (A)
<b>V2P1</b>	5.67	4.71	0.20	27.30
<b>V2P2</b>	3.93	4.29	0.40	24.60
<b>V2P3</b>	4.16	3.45	0.10	21.40
<b>V2P4</b>	3.94	4.53	0.10	25.70
<b>V2P5</b>	5.23	4.34	0.30	20.00
<b>V3P1</b>	7.38	6.20	0.10	30.40
<b>V3P2</b>	4.16	4.63	0.40	25.70
<b>V3P3</b>	5.39	3.85	0.20	25.70
<b>V3P4</b>	6.45	3.46	0.20	14.70
<b>V3P5</b>	5.28	3.89	0.10	25.70

En la Figura 24 se muestra el resultado a una velocidad de 0.6 m/s y una carga de 8kg, los parámetros de velocidad y orientación fueron los preestablecidos.

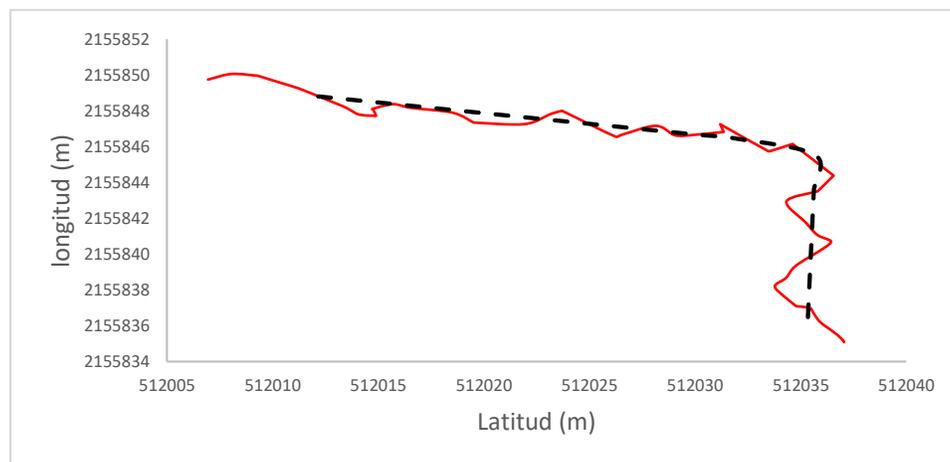


Figura 24: Navegación a 0.6 m/s con una carga distribuida de 8 kg.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las pruebas hechas con los parámetros preestablecidos, se recalibró cada uno de los parámetros con el objetivo de reducir las oscilaciones durante el recorrido.

En la Figura 25 se muestran los recorridos realizados de las cinco pruebas hechas, cuando se calibraron los resultados de velocidad y orientación. Como resultado se redujeron las

oscilaciones durante el recorrido.

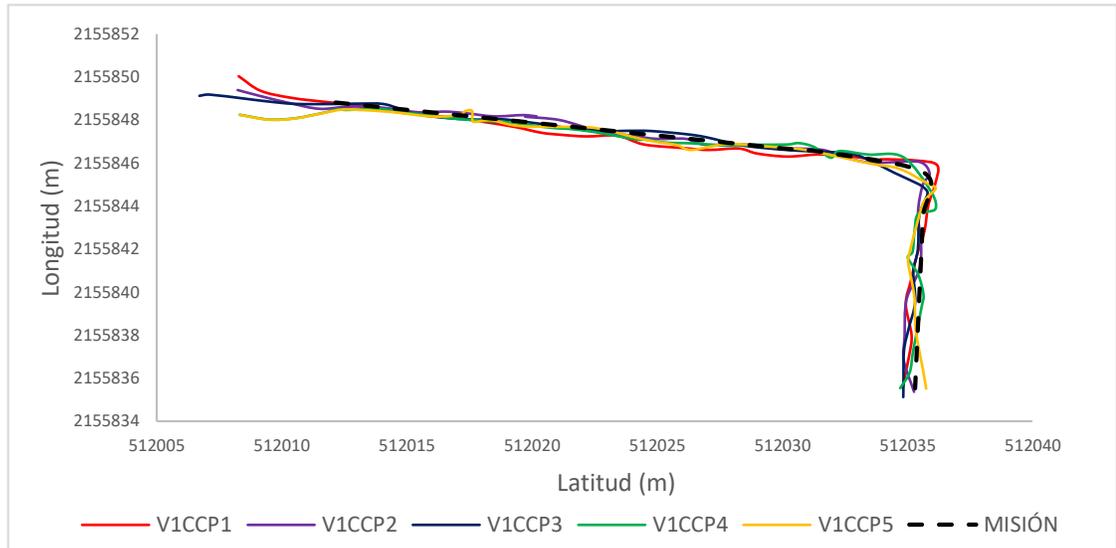


Figura 25: Navegación a 0.6 m/s con carga de 8 kg y parámetros de velocidad y orientación ajustados.

En el Cuadro 8 se muestran los datos recolectados de la precisión que se obtuvo durante la navegación de la ruta en las cuales se obtuvo un promedio durante las cinco pruebas de 67.8 cm con desviación de 27.3 cm, se observa que los resultados son similares a los de prueba en vacío y que además se encuentra dentro del rango de precisión del GPS como cada una de las evaluaciones anteriores.

Cuadro 8: Precisión durante navegación con carga de 8 kg.

	<b>MEDIA (cm)</b>	<b>D. ESTANDAR (cm)</b>	<b>MINIMO (cm)</b>	<b>MAXIMO (cm)</b>
<b>V1CCP1</b>	89.37	63.10	0.00	165.00
<b>V1CCP2</b>	65.15	50.68	0.00	170.00
<b>V1CCP3</b>	51.37	41.37	0.00	160.00
<b>V1CCP4</b>	91.88	50.26	0.00	170.00
<b>V1CCP5</b>	61.23	33.85	0.00	140.00

El comportamiento de la velocidad también fue similar al obtenido en las pruebas sin carga (Figura 26), donde hubo una disminución de velocidad al momento de giro

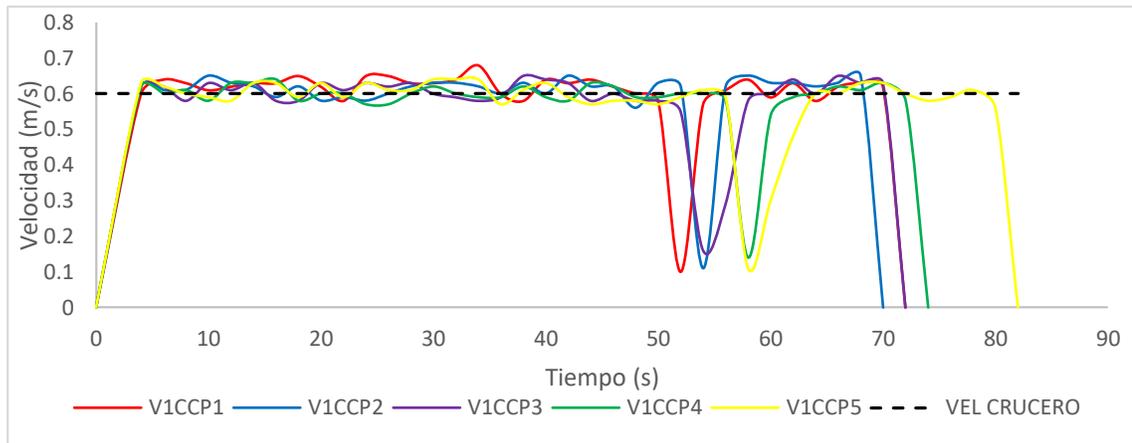


Figura 26: Variación de velocidad con objetivo de 0.6 m/s y una carga de 8kg.

Referente al consumo de corriente si hubo un incremento de las mismas (Cuadro 9) donde el promedio del consumo fue de 8.28 A con desviación estándar de 2.06 A para las 5 velocidades, sin embargo, en los giros hubo picos máximos hasta de 40.2 A un valor por debajo del límite permitido por la controladora de motores.

Cuadro 9: Consumo de corriente durante navegación con carga.

	<b>MEDIA</b>	<b>D. ESTANDAR</b>	<b>MINIMO</b>	<b>MAXIMO</b>
	<b>(A)</b>	<b>(A)</b>	<b>(A)</b>	<b>(A)</b>
<b>V1CCP1</b>	6.91	4.78	0.40	33.30
<b>V1CCP2</b>	7.91	7.11	0.40	37.10
<b>V1CCP3</b>	7.37	5.25	0.60	33.70
<b>V1CCP4</b>	10.88	9.83	0.90	40.20
<b>V1CCP5</b>	8.30	8.03	0.70	33.90

Finalmente, en el Cuadro 10 se muestran los resultados de la posición final del robot hacia el punto establecido como objetivo. En él se muestran las distancias medias de las dos pruebas sin carga con parámetros de orientación y velocidad ajustados, así como de la prueba con carga con sus respectivos parámetros de calibración. Se observa que el robot se aproxima a distancias cercanas a los 100 cm, cuyo valor está dentro del rango de precisión del GPS.

Cuadro 10: Precisión registrada a punto objetivo.

	<b>DISTANCIA</b>			
	<b>MEDIA</b> <b>(cm)</b>	<b>D. ESTANDAR</b> <b>(cm)</b>	<b>MINIMO</b> <b>(cm)</b>	<b>MAXIMO</b> <b>(cm)</b>
<b>V1CC</b>	77.00	12.04	60.00	90.00
<b>V2</b>	90.00	7.91	80.00	100.00
<b>V3</b>	92.00	11.51	80.00	105.00

El consumo de corriente incrementó en función de la velocidad cuando se utilizaron los parámetros preestablecidos., pero con el ajuste de parámetros tanto de velocidad como de dirección se redujo este consumo ya que se logra suavizar las oscilaciones o efecto trenza del vehículo sobre la misión mitigando los repetitivos cambios de dirección en los cuales hay mayor consumo de energía. Los cambios de velocidad estarán en función de los cambios de dirección y oscilaciones que se presenten durante el recorrido los cuales se reducen con la calibración.

Auerhammer y Schueller (1999) mencionan una serie de actividades que se pueden realizar de acuerdo a la precisión y dan a conocer que para actividades de simple navegación es necesaria una precisión menor a los 10 m. Sin embargo, para los propósitos de este trabajo la precisión obtenida es suficiente para acercar el vehículo a la estación de recarga que al combinarlo con sensores a bordo de detección de objetos y distancias se puedan complementar para lograr una recarga o cambio de batería de manera autónoma.

### **3.6 Conclusiones**

Con la culminación del sistema de navegación satelital en el robot agrícola se logra acercar al éste hacia una estación base a una distancia por debajo de los 100 cm. En cuanto al comportamiento del vehículo sobre la ruta éste se desvía en promedio 70 cm, un resultado adecuado debido a la precisión del GPS. La precisión de la navegación no se ve afectada por la velocidad a la que se realizan las misiones autónomas ni cuando se agrega peso al robot, sin embargo, es necesario modificar los parámetros de operación de éste.

El consumo de corriente se redujo cuando se modificaron los parámetros de la velocidad

y dirección. Sin embargo, hubo un incremento del consumo de corriente cuando se agregó peso al robot, lo que se traduciría en un menor tiempo de trabajo. El controlador de los motores se adecuó al sistema implementado, los picos máximos de las pruebas fueron inferiores al 50% de la capacidad máxima.

La incorporación del radiocontrol como un modo de manejo del robot, hace más flexible y práctico su operación ya que se pueden monitorear el nivel de carga de la batería tanto del robot como del radiocontrol además de que se pueden monitorear parámetros desde la estación base o bien la configuración de parámetros.

### **3.7 Agradecimientos**

El autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por el apoyo económico brindado para que fuera posible la realización de este estudio.

### **3.8 Literatura citada**

- Aldecoa Quintana, J. M. I. (2014). Niveles de madurez tecnológica: Technology readiness levels: TRLS: una introducción. *Economía industrial*, (393), 165-171.
- Auerhammer H; Schueller J K (1999) Precision Farming. *CIGR Handbook of Agricultural Engineering*. Vol. III. Plant Production Engineering Pp. 598-616. CIGR-ASAE.
- Bakker, T., Van Asselt, K., Bontsema, J., Müller, J., & van Straten, G. (2010). A path following algorithm for mobile robots. *Autonomous Robots*, 29(1), 85-97.
- Ball David, Patrick Ross, Andrew English, Tim Patten. (2013). *Robotics for Sustainable Broad-Acre Agriculture*. Queensland University of Technology.
- Banta A. (2000). Model Creation for a Mobile Robot Using 2 Data and Features. 6th IFAC Symposium on Robot Control Vol.2..Vienna Austria
- Bechar, A., & Vigneault, C. (2016). Agricultural robots for field operations: Concepts and

Bergerman, M., Singh, S., & Hamner, B. (2012). Results with autonomous vehicles operating in specialty crops. Proceedings – IEEE International Conference on Robotics and Automation, (June), 1829–1835.

components. Biosystems Engineering, 149, 94– 1.

Cuesta, F., Gómez-Bravo, F., & Ollero, A. (2004). Parking maneuvers of industrial-like electrical vehicles with and without trailer. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 51(2), 257-269.

Gil, E. (2010). Situación actual y posibilidades de la Agricultura de Precisión.

Jilek, T. (2015). Autonomous field measurement in outdoor areas using a mobile robot with RTK GNSS. IFAC-PapersOnLine, 28(4), 480–485.

Mane, S. B., & Vhanale, S. (2016). Real time obstacle detection for mobile robot navigation using stereo vision. 2016 International Conference on Computing, Analytics and Security Trends (CAST), 637–642.

Park, S., Deyst, J., & How, J. (2004, August). A new nonlinear guidance logic for trajectory tracking. In AIAA guidance, navigation, and control conference and exhibit (p. 4900).

Rodríguez-Crespo, Marco Antonio, Trejo-Macotela, Francisco, Espinoza-Quesada Eduardo, Frey Andreas. (2017). Instrumentación y desarrollo de una plataforma de vehículo terrestre para la obtención de posicionamiento rtk. Revista del diseño innovativo. 1-1:37-43

Silva, M., Garrote, L., Moita, F., Martins, M., & Nunes, U. (2012, March). Autonomous electric vehicle: Steering and path-following control systems. In 2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (pp. 442-445). IEEE.

## 4. Anexos

### 4.1 Manual para puesta en marcha del robot en cada uno de sus modos de operación

1. Conectar los cables de alimentación a las terminales de las baterías.
2. Esperar a que el sistema se estabilice, esto sucede cuando el led RGB emite parpadeos en color verde.
3. Desde la estación base entrar a setup>optional hardware>sik radio y seleccionar load settings y esperar a que los módulos de telemetría se sincronicen y finalmente dar en connect.



Figura 1: Establecimiento de conexión entre estación base y vehículo

4. Presionar el switch durante 5 segundos y el buzzer deberá emitir un sonido seguido, los parpadeos en color verde deberán permanecer, si los parpadeos son en color azul, el GPS no está recibiendo buena señal.
5. Si el paso anterior no se completa, en la pantalla menú data de la estación base se mostrarán en color rojo los argumentos por lo cual el sistema no es estable.
6. Superado el paso 4, se procederá a armar el vehículo, es decir ponerlo a punto para su manejo, para esto, se puede armar de dos maneras diferentes: con el radiocontrol se debe mantener la palanca derecha en límite inferior y completamente a la derecha por 5 segundos, la segunda opción es armarlo desde la estación base en el menú acciones. Cuando el vehículo este armado el led RGB deberá dejar de parpadear y se debe mantener el color verde.

7. Culminados estos pasos el robot estará listo para manejarse en modo manual, para el autónomo se deberá cargar la misión.
8. Para cuando se finalicen las tareas con el robot, se deberá presionar el switch por 5 segundos o bien desarmar desde el menú acciones de la estación base.

## 4.2 Ficha técnica de controlador de motores Sabertooth 2x60



# Sabertooth 2x60 Quick Start Guide

October 2011

**Dimension Engineering**

Congratulations on your purchase of a Sabertooth 2x60 regenerative motor driver. Sabertooth 2x60 is one of the most flexible and configurable motor drivers on the market. As a result, it must be set to the correct operating mode before use. Below is a generalized hookup diagram of a Sabertooth 2x60. On the reverse side is a chart of some of the most commonly used operating modes.

### Sabertooth 2x60 motor driver pinout guide

**0V** provides a circuit ground for your control circuitry

**5V** is a switch-mode 1A regulated output provided by the driver

**S1** is the primary signal input. It must always be connected to a signal source e.g. a R/C receiver or analog voltage

**S2** is the secondary signal input. It is used to control the second motor, or for serial network functionality

These DIP switches are used to set the operating mode of the driver

**M1A** and **M1B** connect to the two wires of your first DC brushed motor

**M2A** and **M2B** connect to the two wires of your second DC brushed motor

**B+** connects to the positive battery terminal. Absolute maximum voltage is 33.8V

**B-** connects to the negative battery terminal. Can be used as signal ground

Do not connect B+ and B- backwards! Make sure you configure the DIP switches properly before connecting power!

Specs:
Input voltage: 6V-33.6V
Output current: 60A per channel
Peak Output current: 120A per channel
Operating modes: Analog, R/C, Serial

Figura 2: Características técnicas Sabertooth 2x60

Cuadro de referencia del modo de funcionamiento. Todas las opciones se establecen mediante los interruptores

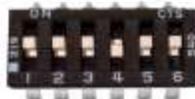
	<p><b>Analog control, linear, independent:</b> a 0V to 5V analog input is connected to terminal S1. 0V is full reverse, 5V is full forward, 2.5V is stop.</p>
	<p><b>Microcontroller pulses, independent linear control:</b> An R/C servo signal is connected to terminals S1 and S2. A 1000us – 2000us pulse controls speed and direction. 1500us is stop.</p>
	<p><b>Radio control, differential drive, exponential:</b> An R/C servo signal is connected to terminals S1 and S2. The Sabertooth will autocalibrate the center and endpoints of the signal.</p>
	<p><b>Simplified Serial, 38400 Baud:</b> A TTL level 8N1 serial data stream is connected to terminal S1. Control is by single byte commands. Motor 1: 1 is full reverse, 64 is stop and 127 is full forward. Motor 2: 128 is full reverse, 192 is stop and 255 is full forward.</p>
	<p><b>Packetized Serial, address 128:</b> A TTL level 8N1 serial data stream is connected to terminal S1. Control is via a multi-byte packet.</p>
	<p><b>Lithium cutoff option:</b> When switch 3 is in the down position (in any operating mode) the Sabertooth will shut down at 3.0V per cell. This protects lithium batteries from damage.</p>

Figura 3: Modos de operación del controlador de motores.

### 4.3 Puntos de control de ruta para navegación autónoma

Cuadro 1: Puntos de control usados en la evaluación

<b>No. PUNTO</b>	<b>LATITUD (m)</b>	<b>LONGITUD (m)</b>
139	512012.154	2155848.813
138	512014.14	2155848.576
137	512016.126	2155848.339
136	512018.111	2155848.101
135	512020.097	2155847.864
134	512022.083	2155847.628
133	512024.069	2155847.391
132	512026.055	2155847.153
131	512028.041	2155846.916
130	512030.027	2155846.676
30	512032.013	2155846.44
31	512035.698	2155845.519
141	512035.619	2155843.52
142	512035.539	2155841.521
143	512035.46	2155839.523
144	512035.38	2155837.525
145	512035.301	2155835.527