

## DESARROLLO DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA EN ROBOT MÓVIL TIPO ORUGA PARA APOYO EN TAREAS DE SIEMBRA EN CAMPOS CAFICULTORES

### DEVELOPMENT OF AN AUTONOMOUS NAVIGATION SYSTEM FOR A COFFEE LABOR ASSISTING TRACKED MOBILE ROBOT

Ing. Luis Hermes Ortega Quiñonez\*, Ing. Nicolás Silva García\*, MSc. Oscar Eduardo Rueda Sánchez\*, Ph.D. Sebastián Roa Prada\*

\* **Universidad Autónoma de Bucaramanga**, Facultad Ingeniería, Ingeniería Mecatrónica.  
Avenida 42 No. 48 – 11, Bucaramanga, Santander, Colombia.  
PBX (57) (7) 643 6111/643 6261  
E-mail: {lortega517, nsilva72, orueda741, sroa}@unab.edu.co.

**Resumen:** Debido a las condiciones particulares del cultivo de café colombiano, sembrado en pendientes pronunciadas, donde a la maquinaria grande ya existente le sería imposible llegar y realizar sus funciones. Por lo tanto, se hace necesario la concepción de equipos que se adecúen a la topografía colombiana y las particularidades de los cultivos de café. En este artículo se explicará el diseño de un sistema de navegación autónoma para una plataforma mecatrónica ya desarrollada. Este prototipo se espera que sea la solución de algunos asuntos problemáticos en el cultivo de café como lo son la exposición de la mano de obra a aspectos climáticos y las largas horas de trabajo en operaciones de plantación, cosechas y postcosecha. Con lo anterior, se espera alcanzar mayores rendimientos dentro de estas rigurosas áreas de trabajo en los campos caficultores.

**Palabras clave:** Navegación autónoma, agricultura de precisión, rover, cultivos de café.

**Abstract:** Due to the conditions of Colombian coffee crops where plants are sowed on steep slopes, large machinery is unable to reach and perform its functions. Therefore, it is necessary to design agricultural equipment adapted to the Colombian topography and the singularities of Colombian coffee crops. This article will explain the design of an autonomous navigation system for an already built mechatronic platform. This prototype is expected to be the solution to some problematic issues in coffee crops such as the exposure of the workforce to weather changes and long hours of work in sowing, harvest, and post-harvest operations. By developing this system, it is expected to achieve higher yields within these severe work conditions in the coffee fields.

**Keywords:** Autonomous navigation, precision agriculture, rover, coffee crops.

## 1. INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión es un área que está revolucionando los cultivos del país, su objetivo es medir, controlar y ejecutar procesos con la menor intervención humana posible, con el fin de mejorar

los procesos productivos en la plantación, cosecha y post cosecha. Su función principal es evitar las largas jornadas de trabajo a los humanos y evitar que se expongan a condiciones extremas. (Barrientos & del Cerro, 2016)

Estas condiciones a las que se someten los cosechadores, han sido un problema para conseguir mano de obra para los empresarios caficultores (Reuters, 2015), por tal motivo resulta muy acertado la utilización de robots en esta área. Las condiciones locales encontradas en los campos caficultores generan problemáticas que se pueden solucionar con la utilización de la agricultura de precisión.

Por tal razón en este artículo se describe el diseño de un sistema de navegación autónomo para un robot móvil tipo oruga instrumentado, que le permitirá a esta plataforma mecatrónica reconocer su ubicación, planear trayectorias y transmitir información a interfaz de mando, para apoyar varias labores en la plantación de café.

Este sistema le brindará al robot un nivel de autonomía que a futuro y con la inclusión diferentes de herramientas ahorrará tiempos y esfuerzos en la recolección del café y otras labores en campo necesarias para los caficultores.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación, se describirá la metodología utilizada para el desarrollo del sistema de navegación autónoma.

### 2.1. Metodología

Para la creación del sistema de navegación autónoma se siguió el modelo de desarrollo de productos y servicios denominado Design Thinking. Esta metodología fue desarrollada en la Universidad de Standford en los Estados Unidos.

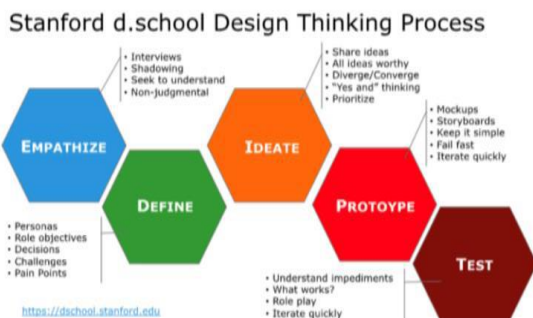


Fig. 1: Metodología de Design Thinking

Esta metodología consiste en cinco etapas bien diferenciadas a saber (Xavier, 2018):

1. **Empatizar:** realizar una inmersión en la realidad del usuario, en busca de sus

necesidades reales, a menudo no explicitadas, y de las emociones que las guían.

2. **Definir:** explicitar las necesidades, aspiraciones y deseos del usuario, a fin de concretar y acotar la esencia de los problemas a resolver.
3. **Idear:** plantear creativamente soluciones radicales a los problemas explicitados.
4. **Prototipar:** proyectar las ideas y los conceptos generados en arquitecturas y substratos físicos simples.
5. **Probar:** mostrar los resultados a potenciales usuarios, probar los conceptos, y refinarlos en base a sus nuevas percepciones.

### 2.2. Desarrollo de la metodología

#### 2.2.1 Empatizar

Para esta etapa se hicieron salidas de campo a la Hacienda El Roble ubicada en el municipio de Los Santos en el departamento de Santander. Se escogió esta Hacienda, por su cercanía, fácil acceso a sus instalaciones desde el punto de vista logístico y también por los pocos permisos necesarios para ingresar.

En la primera visita se entrevistó al ingeniero agrónomo José Camacho quien es el responsable de la plantación la cual cubre un área superior a 300 hectáreas. El ingeniero comentó la situación del cultivo y de su mano de obra. Es evidente la dificultad que han tenido para la recolección del grano, ya que cada vez es menos atractivo para los jóvenes de la zona cosechar la cereza de café. También tienen zonas de café que son cultivadas orgánicamente, donde no se pueden utilizar agroquímicos y esto aumenta la demanda de personal para desarrollar tareas de fertilización y fumigación.

En la visita se permitió la toma de datos como la distancia entre plantas, la distancia entre surcos, la altura de las plantas, se pudo evidenciar las condiciones del terreno, las condiciones climáticas y de sombra, entre otros datos necesarios para el diseño del sistema de navegación.

Conocer la problemática de manera inmersiva es fundamental para la etapa de empatizar, con eso se logra tener una visión de 360° de los problemas.



Fig. 2: Toma de mediciones en el cultivo

### 2.2.2. Definir

En definir se delimitó el problema, ya que de la visita se encontraron muchos aspectos que pueden ser resueltos con ayuda de la tecnología. También hay que tener en cuenta que el grupo de Modelado y Simulación perteneciente al Grupo de Investigación en Control y Mecatrónica (GICYM) de la Universidad Autónoma de Bucaramanga ya cuenta con una plataforma mecatrónica móvil donde se puede implementar la solución que parta de la necesidad planteada en esta etapa.



Fig. 3: Plataforma mecatrónica móvil (Ruiz Romero, 2018)

Esta plataforma mecatrónica (robot móvil tipo oruga) fue desarrollada anteriormente teniendo en cuenta las dimensiones del cultivo de café (ancho de surco y distancia entre plantas) y las condiciones del terreno para que pueda navegar sin dificultad por las irregularidades y no compacte el suelo.

Para definir e idear soluciones del problema a resolver se utilizó la metodología APTE (De La Bretesche, 2000), un método francés para el desarrollo de productos. Este método permite por medio de gráficos analizar la necesidad, convertirlas en funciones y luego hallar soluciones técnicas que cumplan con las funciones y a su vez dé una respuesta satisfactoria a la necesidad inicial.

Dados los problemas vistos en la visita y la experiencia dentro del grupo de investigación se decide atacar el problema del acopio del grano de café desde la planta de café hasta la vía donde el camión recoge lo recolectado. Esta operación actualmente se realiza de manera manual, los trabajadores pierden tiempo y esfuerzo llevando los sacos con cerezas de café, que pesan 20 kilos, al punto de recolección. Esta tarea los agota y pierden minutos preciados de recolección que es como les miden a ellos la producción y se les define la paga.

En este método el primer paso es el análisis de la necesidad, para esto se recurre al diagrama de análisis de la necesidad, también conocido como Bête à Cornes (Bestia con cuernos), en el se especifican los cuatro aspectos básicos de una necesidad: el producto, el usuario, sobre lo que actúa el producto y la necesidad que resuelve el producto.

Para lograr lo anterior se debe dotar al robot móvil de un sistema de navegación autónoma que le permita ir del punto A (Planta de café) al punto B (vía de recolección).



Fig. 4: Diagrama de análisis de la necesidad

Luego de definir la necesidad se procede a encontrar las funciones que el sistema debe realizar para suplir la necesidad planteada. Con el diagrama de análisis funcional de la necesidad se encuentran las funciones principales y funciones restrictivas.

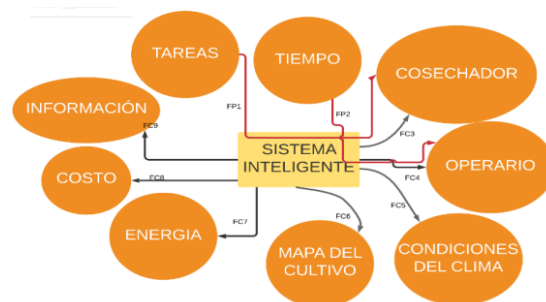


Fig. 5: Diagrama de análisis funcional de la necesidad

Del diagrama se extraen las siguientes funciones:

Funciones principales:

FP1: Ayudar en las tareas de acopio de la cereza de café.

FP2: Ahorrar tiempo en el proceso de acopio

Funciones restrictivas:

FC3: Requerir del cosechador para cargar lo recogido al robot.

FC4: Poder guiar al robot por medio de un operario.

FC5: Considerar las condiciones de clima para evitar daños al robot

FC6: Conocer el terreno donde se va a desplazar el dispositivo.

FC7: Implementar al sistema una fuente de energía permanente.

FC8: Determinar los costos del sistema

FC9: Procesar la información de sensores para la toma de decisiones.

### 2.2.3. Idear

De las funciones halladas en la etapa anterior y utilizando el diagrama FAST (Function Analysis System Technique) (Mukhopadhyaya, 2013) se encuentra que el sistema inteligente de navegación debe contar con cuatro subsistemas necesarios para cumplir con la tarea de llevar los recolectado de un punto A a un punto B.

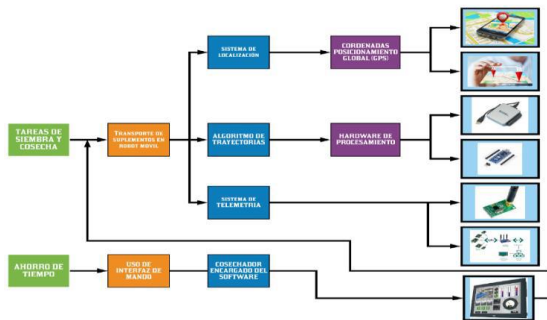


Fig. 6: Diagrama de análisis técnico de la necesidad

Esos subsistemas son:

- Subsistema de transmisión de datos
- Subsistema de generación de trayectorias
- Subsistema de geolocalización
- Subsistema de Interacción Humano Máquina

Debido al alcance del proyecto la detección de obstáculos se desarrollará a futuro, es decir, este proyecto se limita a la navegación autónoma del robot móvil.

A partir de la definición de los subsistemas se procede a idear cuales son las soluciones técnicas que mejor pueden cumplir con la tarea de cada uno de ellos así:

a) Subsistema de transmisión de datos

En este subsistema se exploraron dos opciones:

- SIGFOX
- LoRa

b) Subsistema de planeamiento de trayectorias

Se analizaron los siguientes algoritmos: (Prieto Rodríguez, 2017)

- Algoritmo A\*
- Descomposición de celdas
- Algoritmo RTT y RTT\*
- Algoritmo Vornoi

c) Subsistema de geolocalización

Se contemplaron las siguientes tecnologías:

- Sensor GPS
- Red local
- Tele operación

d) Subsistema de Interacción Humano Máquina

Para conectar al operario con la máquina se determinó que se podía realizar por:

- Hardware de control de mando.
- Dispositivos paralelos de uso.

Todas las anteriores opciones fueron alimentadas a matrices QFD (Akao, 2004) orientadas a la toma de decisiones para determinar cuales serían las mejores soluciones. El resultado de dichas matrices es el siguiente:

Tabla 1: Resultado Matrices QFD

RESULTADOS MATRIZ DE DECISIÓN	
Subsistema	Solución técnica elegida
Transmisión de datos	de LoRA
Generación de trayectorias	de RTT y RTT*
Geolocalización	GPS
Interacción Humano Máquina	Dispositivo paralelo de uso

### 2.2.4. Prototipar

Teniendo en cuenta el robot tipo oruga que va a funcionar en el cafetal, se construyó un robot más pequeño, pero con diseño y configuraciones muy similares. Por medio de la impresión 3D se pudo construir el chasis y oruga del robot. Se decidió hacer este modelo a escala para validar con mayor facilidad cada uno de los subsistemas, ya que el desplazamiento de la plataforma mecatrónica móvil era complicado por su tamaño y peso.

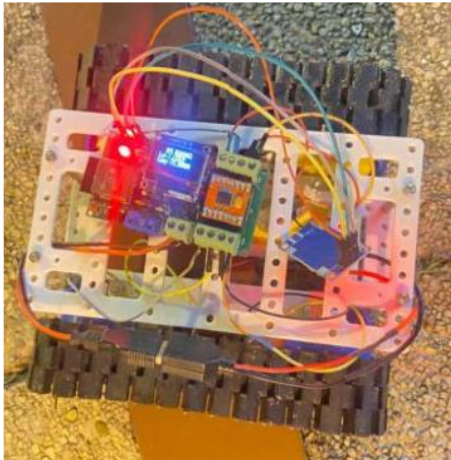


Fig. 7: Robot a escala

La figura 7 muestra la vista superior del robot empleado para realizar las simulaciones y pruebas que permitan cumplir con todos los parámetros establecidos para el sistema en escala real.

Para la unidad electrónica se utilizó la plataforma KiCAD la cual facilitó la construcción del circuito electrónico que controla el robot y a la cual se conectaron diferentes sensores y dispositivos que permiten su funcionamiento.

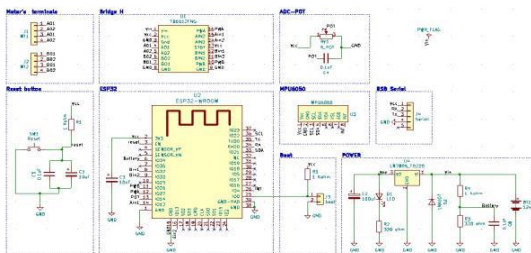


Fig. 8: Circuito electrónico del robot a escala.

Por medio del micro SP32 se estableció la base del circuito y se construyó la tarjeta que permite manipular el robot. Se debe tener en cuenta que la única diferencia entre el robot a escala y el robot real, es el cambio del puente H, porque utilizan

motores diferentes, los demás dispositivos electrónicos serán utilizados en robot móvil en tamaño real.

El modelo cinemático (Gracia Caladín, 2008) implementado e instalado para el movimiento de las oruga se basa en el modelo de movimiento de los vehículos con transmisión diferencial mostrado a continuación.

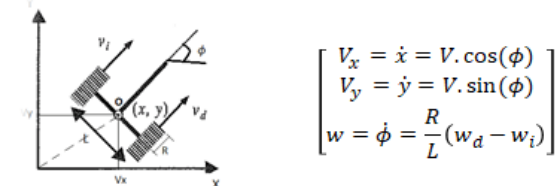


Fig. 9: Modelo diferencial aplicado al robot

Por medio del programa Matlab se realizó la simulación que permite analizar los resultados cuando se ejerce movimiento lineal en el robot.

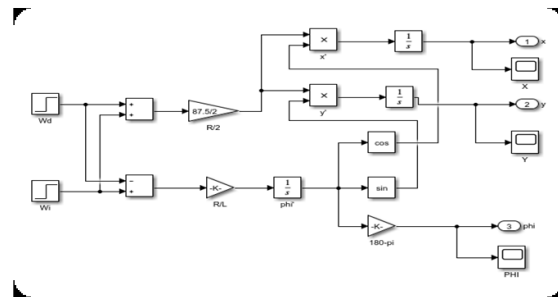


Fig. 10: Simulación del modelo matemático.

Como se puede observar en la Figura 10 se construyó en la herramienta Simulink la ecuación matricial que permite entender los movimientos que sufrirá el robot ante dos entradas. Se debe recordar que se deben tener los valores de las variables R (Radio de piñón guía) y L (distancia entre ejes) los cuales son; 87,5 mm y 250 mm respectivamente.

Para sistema de geolocalización, el robot a escala visualiza en todo momento las variables de latitud y longitud por medio de la interfaz gráfica en LCD suministrados por el sensor GPS incorporado al microcontrolador SP32. Se decidió trabajar la lógica de referencia por marcas naturales, las cuales permiten diseñar el mapa a transitar por ubicación de puntos en específico.

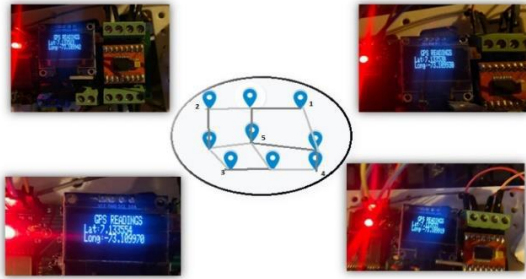


Fig. 11: Emulación de geolocalización a escala.

La emulación permitió crear un mapa en un área común a la vivienda de residencia actual. Este paso es fundamental para indicar al robot los límites del mapa, los posibles caminos y los prohibidos; esto permite caracterizar el proceso de selección.

En la robótica tradicional es normal que el usuario indique la trayectoria que desea ser transitada por el mecanismo móvil, pero en este caso, se requiere que por sí “solo” tenga la capacidad de entender su entorno y diseñar la trayectoria teniendo en cuenta solo el punto actual de su ubicación y el punto final a donde se quiere llegar.

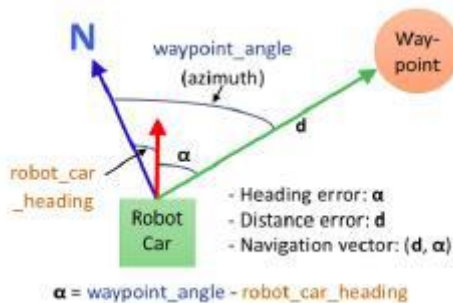


Fig. 12: Formula para el ángulo azimuth

En la figura 12 se ilustra la manera para hallar el ángulo entre el robot y el punto a donde se quiere llegar, en matemáticas este ángulo es llamado azimuth y representa el arco medido sobre el horizonte celeste que forman el punto cardinal Norte y la proyección vertical del astro sobre el horizonte del observador situado en alguna latitud. Por proyección vertical, entendemos el corte con el horizonte que tiene el círculo máximo que pasa por el cenit y el astro.

La altura y el azimuth son coordenadas que dependen de la posición del observador. Es decir que, en un mismo momento, un astro es visto bajo diferentes coordenadas horizontales por diferentes observadores situados en puntos diferentes de la Tierra. Esto significa que dichas coordenadas son locales, con esta coordenada y teniendo cuenta el

principio de Haversine o fórmula del semiver seno. (Armingol Moreno, 1997)

Dicha fórmula permite la navegación astronómica, en cuanto al cálculo de la distancia de círculo máximo entre dos puntos de un globo sabiendo su longitud y su latitud.

Las fórmulas son introducidas en Matlab con sus respectivos valores en variables y esto le permitirá al sistema, evaluar y conocer el ángulo que el robot debe mantener y la distancia aproximada a su destino final.

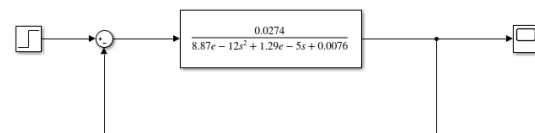


Fig. 13: Función de transferencia del sensor IMU

Como se referenció anteriormente es fundamental que el robot entienda su entorno, por tal razón se implementó el sensor tipo IMU el cual tiene incorporado un giroscopio, acelerómetro y magnetómetro. Para configurar dicho dispositivo se debe encontrar la función de transferencia que lo rige, la Figura 13 muestra la resultante obtenida después de estabilizar el sensor y agitarlo bruscamente. Se analizó la gráfica obtenida, introduciendo los datos hallados en Simulink para su posterior utilización en la navegación propia del robot.

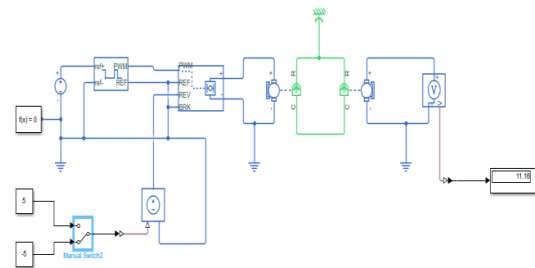


Fig. 14: Simulación PWM en los motores.

El siguiente paso requiere el trabajo de los motores, poder enviar la información a realizar del software al hardware; en la figura 14 se ilustra la simulación enviando la información por medio del PWM (modulación por ancho de pulsos) dirigida a los motores, con el fin de poder realizar el movimiento o giro que el robot requiere para llegar al punto deseado.

Se debe tener en cuenta que, en el entorno de Simulink, su librería no permite manejar “puente

h” para dos motores, por eso la simulación solo ilustra el movimiento aplicado a un solo motor, pero el principio del otro es exactamente el mismo.

Para finalizar, se diseñó un código que permite recrear mapas aleatorios para hacer la prueba de todo el algoritmo de trayectorias, teniendo en cuenta el pseudocódigo RRT\* analizado con anterioridad en este documento.

Cada punto de latitud y longitud fue caracterizado como un punto en coordenadas polares “X” “Y”. Al principio de la simulación se deben introducir la ubicación actual del robot y el punto final a donde quiere que se desplace, por medio de las ecuaciones ya programadas, el sistema mide la distancia que hay entre el punto más cercano de sus cuatro lados y el punto a donde se quiere llegar, va seleccionando el más cercano. De esta manera el robot recrea el camino más cercano o posible para enviar estos resultados a los motores.

A continuación, se visualiza los resultados obtenidos en dos entornos diferentes:

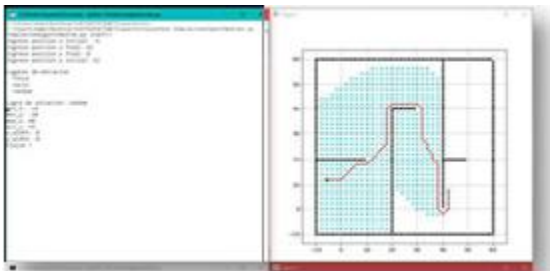


Fig. 15: Simulación final del algoritmo de trayectorias

Para la intercomunicación con el operario se utiliza una interfaz gráfica en donde el usuario inicia el funcionamiento e indica lo que se quiere realizar.

Para este caso, se realizó por medio del programa APPinventor, la programación y el diseño de la interfaz que permite manejar de forma manual y autónoma el robot.

#### 2.2.5. Probar

Se realizaron pruebas con el robot a escala con el fin de probar cada uno de los subsistemas: geolocalización del robot, transmisión de variables de latitud y longitud en tiempo real, el seguimiento del robot al algoritmo de trayectorias realizado y la comunicación con la interfase de usuario. Para estas pruebas se cambió el microcontrolador por un Arduino DUE con el fin de aplicar el control al seguimiento de la trayectoria.

Las pruebas se realizaron en el parque Cristo Rey, en cual se pudo comprobar el envío de datos en tiempo real de las variables de longitud y latitud, además se pudo verificar el control aplicado al seguimiento de la trayectoria por medio de puntos demarcados con anterioridad.

### 3. RESULTADOS

Los resultados de estas pruebas fueron satisfactorios porque se pudo verificar que el robot es capaz de girar sobre su propio eje hasta encontrar el ángulo que lo ubique al frente del objetivo. También se pudo concluir que el GPS empleado demarca un margen de error de 1.5 a 2.6 metros de distancia, algo que nos permite corregir en el robot grande por medio de la fusión de otro GPS que permite disminuir el margen de error.

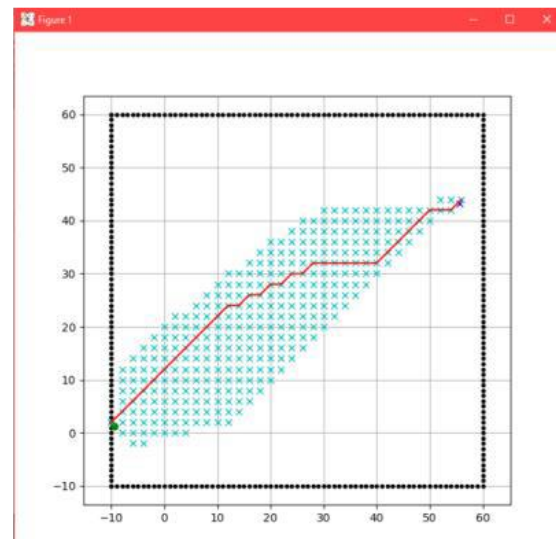


Fig. 16: Prueba final robot a escala.

El comportamiento del robot en la prueba demostró la capacidad de seguir una trayectoria y frenar en el punto señalado con anterioridad.

La figura 17 ilustra el resultado obtenido en la vida real, mostrando el camino generado por el robot y el seguimiento aplicado a una de las pruebas, en total se realizaron 20 pruebas y el error se puede evidenciar en la siguiente tabla:



Fig. 17: Error registrado en robot a escala

#### 4. CONCLUSIONES

Al hacer la visita al campo caficultor permitió entender las necesidades reales de la industria, familiarizarnos con el proceso para conocer las condiciones climáticas, de vías y envío de información dentro del campo. Obteniendo una visión más aterrizada del proyecto.

Por medio de la investigación a fondo realizada se lograron utilizar varios criterios de selección para los diferentes subsistemas del proyecto y de esta manera comprar, implementar y desarrollar minimizando al máximo los errores y evitando la errónea metodología de la prueba y error.

Se puede concluir que el sistema de comunicación LoRa es más efectivo que el bluetooth, wifi o de radio comunicación básicos, ya que puede enviar datos a largas distancias, sin la necesidad de tener línea de vista.

El sistema inteligente requiere de un tiempo de inicio para poder calibrar sus sensores. Aproximadamente entre 90 y 120 segundos.

El experimento obtenido del sensor GPS al cambiar las antenas fue un éxito ya que se logró un margen de error de aproximadamente de 40cm con respecto con el punto final indicado.

#### 5. MEJORAS FUTURAS

Instalar todo lo desarrollado en el presente proyecto en el robot móvil a escala real y realizar pruebas sobre el campo caficultor.

Implementar estrategias de reconocimiento y evasión de obstáculos por medio de visión artificial o sistemas de navegación tipo LIDAR.

También se puede ir añadiendo más proyectos de investigación, los cuales permiten optimizar las funciones actuales del robot. Tales como añadir un brazo robótico con la capacidad de recolectar el

café de manera autónoma, implementar inteligencia artificial al robot, para mejorar su procesamiento, ampliar sus capacidades y disminuir sus errores, dotar al robot móvil de herramientas para realizar tareas de fertilización, eliminación de malezas, detección de plagas o estimado de cosecha.

#### RECONOCIMIENTO

Agradecemos a la Hacienda El Roble por haber permitido nuestra visita y al ingeniero José Camacho por estar siempre dispuesto a solucionar las dudas sobre el importante mundo de cultivo y procesado del café.

#### REFERENCIAS

- Akao, Y. (2004). *QFD: Quality Function Deployment - Integrating Customer Requirements into Product Design*. New York, EE.UU.: Productivity Press.
- Armíngol Moreno, J. M. (1997). *LOCALIZACIÓN GEOMÉTRICA DE ROBOTS MÓVILES AUTÓNOMOS. TESIS DOCTORAL*. Leganés, España: Universidad Carlos III de Madrid.
- Barrientos, A., & del Cerro, J. (24 de Febrero de 2016). *El uso de robots en tareas agrícolas*. (Interempresas) Recuperado el 5 de Abril de 2020, de Interempresas: <https://www.interempresas.net/Horticola/Articulos/151745-El-uso-de-robots-en-tareas-agricolas.html>
- De La Bretesche, B. (2000). *La méthode APTE: Analyse de la valeur, analyse fonctionnelle*. Paris, France: Pétrelle.
- Gracia Caladín, L. I. (2008). *MODELADO CINEMÁTICO Y CONTROL DE ROBOTS MÓVILES CON RUEDAS*. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
- Mukhopadhyaya, A. K. (2013). *Function Analysis System Technique - A Stimulating Tool*. Delhi, India: I K International Publishing House Pvt. Ltd.
- Prieto Rodríguez, F. (2017). *Métodos de Generación de Trayectorias*. Sevilla, España: Universidad de Sevilla.
- Reuters. (4 de Junio de 2015). *Portafolio*. (Editorial EL Tiempo) Recuperado el 2020 de Febrero de 3, de <https://www.portafolio.co/economia/finanzas/sector-cafetero-enfrenta-grave-problema-40414>
- Ruiz Romero, B. N. (2018). *DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT MÓVIL COMO PLATAFORMA PARA EL APOYO A LAS LABORES EN LOS CULTIVOS DE CAFÉ*. Bucaramanga, Colombia: Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Xavier, F. (27 de Octubre de 2018). *Inverse design thinking*. (Xaver Ferrás) Recuperado el 23 de Agosto de 2019, de <https://xavierferras.com/2018/10/inverse-design-thinking-2/>