

RAE

1. TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecatrónico y Electrónico.

2. TÍTULO: Diseño y construcción de un módulo de autolocalización y navegación en espacios interiores.

3. AUTORES: Santiago Ariza Clavijo, Eusebio Mercado Martínez

4. LUGAR: Bogotá, D.C.

5. FECHA: Abril de 2015.

6. PALABRAS CLAVE: Autolocalización, navegación, LIDAR, orientación, caracterización, trayectoria y mapeo.

7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO: Este trabajo de investigación muestra el desarrollo de un módulo autolocalización y navegación en espacios interiores. Para llevar a cabo la construcción de este módulo se trabajó inicialmente en la obtención de la información, y procesamiento digital de la señal para filtrado de datos no válidos y ubicación cartesiana, para posteriormente, con los datos obtenidos determinar el espacio probable de navegación y el trazado de ruta.

8. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Instrumentación y Control de procesos.

9. METODOLOGÍA: Empírico Analítica.

10. CONCLUSIONES: Se demuestra durante el desarrollo del proyecto la viabilidad de utilizar un sensor Lidar junto con un magnetómetro para establecer la ubicación cartesiana dentro de un espacio de forma poligonal con ciertas restricciones y a partir de esta información realizar de forma autónoma un trazado de ruta de navegación.

Los algoritmos desarrollados para el mapeo, extracción de características, autolocalización, trazado de rutas y navegación son de bajo peso computacional y pueden ser implementados en microcontroladores.

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODULO DE AUTOLOCALIZACIÓN Y
NAVEGACIÓN EN ESPACIOS INTERIORES**

**SANTIAGO ARIZA CLAVIJO
EUSEBIO MERCADO MARTÍNEZ**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTA 2015**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODULO DE AUTOLOCALIZACIÓN Y
NAVEGACIÓN EN ESPACIOS INTERIORES**

**SANTIAGO ARIZA CLAVIJO
EUSEBIO MERCADO MARTÍNEZ**

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

**Asesor del trabajo de grado
Ing. Julián Severiano Rodríguez Acevedo M.Sc.**

**UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA, BOGOTÁ
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTA 2015**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a toda mi familia: a mi papá, a mi abuelita, a mi hermana, porque aunque ella no lo crea, es una de las inspiraciones para que todo esto sea posible, a mi mamá porque gracias a ella pude tener estos cinco años de estudio y porque cada día me hace ser una mejor persona, a mi tía Gordita, porque a pesar de la distancia cada conversación con ella es una voz de aliento para cumplir mi meta. A Martica, Maneyo y Mokita, porque son un apoyo incondicional para mí. Muchas gracias a todos los que participaron en este proyecto, a todos los que nos dieron sus comentarios sobre nuestras ideas y nos dieron las suyas para solucionar problemas que se presentaron en el camino. Finalmente un agradecimiento especial para Eusebio, porque no solamente es mi compañero de tesis sino un gran amigo que me enseñó muchísimas cosas y me hizo crecer como persona e ingeniero.

Santiago Ariza Clavijo

Quiero agradecer a mi abuelo Emilio, quien sembró en mí la semilla del amor por el conocimiento. A mis padres, por su infinito amor, su apoyo incondicional y su ejemplo de vida. En especial a mi madre, sin ella nada de esto hubiese sido posible.

A mi Esposa Norma y mis hijos Thomas y Sofía, por todo el tiempo que les he robado, gracias por su comprensión y su amor. Son mi fuente de inspiración. A mis hermanos por su amor y su confianza. A mis maestros, que pacientemente me formaron en esta carrera. A mis compañeros de estudio Steven, Mono, Luis Eduardo, Fabián, Karen con quienes compartimos conocimiento, frustraciones y noches en vela. A Santiago a quien auguro un futuro brillante, gracias por tu constancia, tu apoyo y tus aportes.

Eusebio Mercado Martínez

Nota de aceptación

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá ____ de _____ del 2015

TABLA DE CONTENIDO

LISTA DE FIGURAS	1
LISTA DE TABLAS	3
LISTA DE ANEXOS	4
Introducción	5
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	8
1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	9
1.2. FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	18
2. JUSTIFICACIÓN.....	20
3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	22
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	22
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4. MARCO REFERENCIAL	23
4.1. MARCO CONCEPTUAL.....	23
4.1.1. Sensor.....	23
4.1.2. Robot.....	23
4.1.3. SLAM	23
4.1.4. LIDAR.....	23
4.1.5. Filtro pasa bajos	24
4.1.6. Filtro pasa altos	24
4.1.7. Filtro pasa bandas.....	24
4.1.8. Filtro de Kalman	24
4.1.9. GPS.....	24
4.1.10. AGPS.....	25
4.2. MARCO TEÓRICO.....	26
4.2.1. Sensores y medidores de proximidad y distancia	26
4.2.1.1. Sensores ultrasónicos	27
4.2.1.2. Sensores infrarrojos.....	27
4.2.1.3. Sensores capacitivos.....	28

4.2.1.4.	Sensores inductivos.....	28
4.2.1.5.	LIDAR	29
4.2.2.	Sensores y medidores de orientación	31
4.2.2.1.	Efecto HALL.....	31
4.2.2.2.	Filtrado de datos	31
4.2.2.3.	YEI 3-Space Embedded	32
4.2.3.	Sensores y medidores de geolocalización	33
5.	DISEÑO INGENIERIL.....	34
5.1.	Requerimientos	34
5.2.	Selección de sensores.....	35
5.2.1.	Sensores de distancia	35
5.2.1.1.	Comparación de sensores de distancia comerciales.....	35
5.2.1.2.	Análisis de las tecnologías consideradas	36
5.2.1.3.	Comparativo entre sensores LIDAR	36
5.2.1.4.	Selección	36
5.2.2.	Sensores de orientación.....	37
5.2.2.1.	Comparación de sensores de orientación comerciales	38
5.2.2.2.	Análisis de las tecnologías consultadas	39
5.2.3.	Sensores de ubicación	39
5.2.3.1.	Comparación de módulos GPS	39
5.2.3.2.	Análisis de las tecnologías consultadas	40
5.3.	Módulo de navegación y autolocalización	40
5.3.1.	Obtención de la información.....	41
5.3.1.1.	LIDAR	42
5.3.1.2.	YEI 3-Space Sensor	44
5.3.2.	Ubicación geoespacial	47
5.3.3.	Detección de vértices y cambios representativos en la dirección.	47
5.3.4.	Extracción de características	52
5.3.5.	Selección del origen del sistema de coordenadas unificado.	52
5.3.6.	Trazado del mapa según el sistema de coordenadas unificado.....	54
5.3.7.	Trazado de rutas	55

5.4. Diseño mecánico	60
5.4.1. Análisis de tensión y deformación	62
6. RESULTADOS	66
7. CONCLUSIONES	70
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Módulo medidor de distancia Láser	10
Figura 2. Equipo de fútbol robótico.	11
Figura 3. Plataforma robótica “Carlitos”	17
Figura 4. Robot móvil para ayuda doméstica.....	18
Figura 5. Sensor ultrasónico SRF02.....	27
Figura 6. Sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A02YK0F	28
Figura 7. Sensor capacitivo	28
Figura 8. Sensor inductivo	29
Figura 9. Sick LIDAR	29
Figura 10. Funcionamiento LIDAR por medición de ángulo de incidencia.....	30
Figura 11. YEI 3-Space embedded.....	32
Figura 12. Piccolo Lidar	37
Figura 13. El mismo salón visto por el mismo robot en la misma ubicación con diferente orientación.	38
Figura 14. Skylab Skynav SKM53.....	40
Figura 15. Diagrama del espacio sensado comparado con la nube de puntos adquirida con el Lidar.....	43
Figura 16. Comparación de los datos antes y después del primer filtro.....	44
Figura 17. Comparativo de dispersión de datos con y sin filtro de Kalman.....	44
Figura 18. Curva de Caracterización de la respuesta del magnetómetro del sensor YEI3.....	45
Figura 19. Curva de Caracterización ajustada del magnetómetro del sensor YEI3.	47
Figura 20. Vértices y puntos donde hay un cambio brusco de pendiente.....	48

Figura 21. a) Acercamiento de datos del LIDAR. b) Representación gráfica de los segmentos a comparar.	50
Figura 22. Acercamiento a secuencia de puntos	50
Figura 23. Trazado de líneas	51
Figura 24. Intersección de la proyección de las rectas más pronunciadas	52
Figura 25. Trazado de líneas de intersección	53
Figura 26. Origen del sistema de coordenadas	54
Figura 27. Espacio de operación del robot dividido en cuadrados más pequeños	56
Figura 28. Espacio de operación del robot.	57
Figura 29. Dirección del vector según el ángulo.	58
Figura 30. Siguiendo nodo a navegar.	58
Figura 31. Navegación sin obstáculos.	59
Figura 32. Navegación con obstáculos.	60
Figura 33. Diseño de las piezas de la plataforma robótica (Escala diferentes)	61
Figura 34. Ensamblaje del chasis del robot	61
Figura 35. Análisis de la Tensión de Von Mises en las barras de la estructura.	63
Figura 36. Análisis de deformación en las barras de la estructura.....	64
Figura 37. Análisis de la Tensión de Von Mises en los vértices de la estructura...64	
Figura 38. Análisis de deformación en los vértices de la estructura.	65
Figura 39. Módulo de navegación y autolocalización.....	67
Figura 40. Cálculo del centro de un espacio desde ubicaciones diferentes.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de tecnologías de detección de proximidad y medición de distancia.....	35
Tabla 2. Comparativo de sensores LIDAR.....	36
Tabla 3. Comparativo de magnetómetros.....	38
Tabla 4. Comparativo de módulos GPS.....	39
Tabla 5. Datos de caracterización del magnetómetro del sensor YEI 3 calibrado.	45
Tabla 6. Valores posibles de la matriz	56

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Plano del vértice del chasis.....	74
ANEXO B. Plano de las barras del chasis	75
ANEXO C. Plano de la base del módulo de autolocalización y navegación	76
ANEXO D. Plano de las láminas laterales del módulo de autolocalización y navegación	77
ANEXO E. Plano de la lámina frontal del módulo de autolocalización y navegación	78
ANEXO F. Plano de la lámina posterior del módulo de autolocalización y navegación	79
ANEXO G. Plano de la tapa del módulo de autolocalización y navegación.....	80
ANEXO H. Datasheet Yei 3-Space Sensor.....	81
ANEXO I. Datasheet SKM53	82
ANEXO J. Datasheet SRF02	83
ANEXO K. Datasheet Oruga.....	84
ANEXO L. Diagrama de flujo del algoritmo de mapeo	85

Introducción

La robótica móvil pretende expandir los campos de aplicación de la robótica más allá de los límites de los espacios confinados de los robots manipuladores. Con ello surge una nueva problemática relacionada con la localización y la navegación autónoma. Aunque se han desarrollado soluciones de navegación para exteriores muy efectivas como los navegadores basados en tecnología GPS (Global Positioning System) o AGPS (Assisted Global Positioning System) las soluciones para posicionamiento en interiores IPS (Interior Positioning System) no gozan del mismo reconocimiento y efectividad. Incluso algunas resultan ser poco prácticas para navegación debido al amplio margen de error en la localización. En la actualidad no existe un equivalente estandarizado del navegador GPS de exteriores, que sea para uso en interiores.

Por lo tanto, este trabajo de investigación tiene la finalidad de diseñar y construir una plataforma robótica móvil capaz de resolver el problema de auto localización y navegación. Para el cumplimiento de este propósito esta investigación está dividida en tres fases, cada una de las cuales le aportará, por separado, elementos fundamentales para alcanzar la meta propuesta.

La primera fase consiste en el diseño y la construcción de un módulo de autolocalización y navegación en espacios interiores independiente de la plataforma robótica móvil; la segunda fase consiste en el diseño y la construcción de un robot modular con capacidad de navegación, y finalmente, la tercera fase consiste en la integración de las fases uno y dos junto con la implementación de una rutina de trabajo cooperativo entre varias plataformas robóticas móviles que aumente las capacidades de operación.

Para optar por el título de INGENIERO MECATRÓNICO e INGENIERO ELECTRONICO se desarrollaron las primeras dos fases teniendo en cuenta las siguientes etapas:

1. Generación de una rutina de mapeo en espacios interiores a partir de la información suministrada por los sensores de navegación.
2. Diseño de un algoritmo que extrae las características del entorno utilizando operaciones que requieren baja capacidad de procesamiento.
3. Implementación de un algoritmo de autolocalización en interiores que determina la posición del módulo de navegación.
4. Implementación de un algoritmo de trazado de rutas que permite la navegación autónoma en un espacio interior predeterminado.
5. Diseño y construcción mecánica del módulo de navegación
6. Diseño y construcción mecánica de una plataforma robótica móvil.
7. Control de orientación y posición de la plataforma robótica móvil.

Para fundamentar las etapas anteriores, en este trabajo de grado se plantearon lineamientos teóricos y conceptuales que soportaron el proyecto teniendo en cuenta el planteamiento del problema. Esta fundamentación se realizó haciendo una selección de la revisión de fuentes documentales que permitieron detectar, extraer y recopilar la información de interés para construir el marco referencial pertinente al problema de investigación planteado.

Se utilizó el enfoque metodológico empírico analítico para dar cumplimiento a los objetivos propuestos, la escogencia de este enfoque investigativo se hace para poder llegar a solucionar el problema teniendo como base la experimentación del objeto o tema de estudio mediante la utilización de métodos deductivos e inductivos; estos métodos hacen que una investigación en algunos casos sea inexacta, es por eso que para que este proyecto posea una total credibilidad se hace necesario

demostrar en el diseño ingenieril, paso a paso, el desarrollo del módulo de navegación y autolocalización, que no solo quedaron como fuentes escritas sino que son verificables con la construcción de dicho módulo.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Hace mucho tiempo que el ser humano se planteó la necesidad de realizar trabajos que sobrepasaban su propia capacidad física o intelectual. Ejemplos tenemos a millares: mover rocas enormes, elevar autos, transportar objetos de diferentes tamaños, etc. Para estos retos se inventaron las máquinas, desde la más grande como una grúa hasta la más sencilla como una pinza; todos estos inventos del hombre han tenido como fin reducir el esfuerzo humano para realizar un trabajo; de ahí que esta necesidad que poseemos de mover y trasladar objetos de diferentes magnitudes, peso y tamaño crea un imperioso afán de crear soluciones prácticas en todas las ramas de la industria, la medicina, el hogar, el comercio y a todas las actividades humanas que requieran de movimiento de objetos de un lugar a otro.

En cualquier tipo de proceso que requiera movimiento y transporte de objetos en ambientes dinámicos se busca que estos sean más eficientes, rápidos, seguros y que utilicen la menor cantidad de recursos posibles, es por esto que la robótica móvil, como producto del progreso de la tecnología, hace que las aplicaciones manuales queden en un segundo plano para que las máquinas hagan automáticamente tareas que pueden llevar largos periodos de tiempo a una persona, con una mayor precisión.

De este producto tecnológico nace la necesidad de crear máquinas completamente autónomas y que trabajen cooperativamente, en el caso de la robótica móvil, es hacer que un robot reconozca autónomamente el espacio en el cual va a operar, trazar una trayectoria y navegar por este, sin la necesidad de tener a una persona operándolo.

1.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

Los antecedentes que a continuación se describen son trabajos de investigación que preceden a este estudio investigativo que se está realizando y guardan mucha relación con los objetivos planteados en el estudio que se aborda. En este mismo orden de ideas, los trabajos de investigación consultados son artículos publicados en revistas científicas y corresponden a antecedentes de campo.

Para una mayor claridad se ha organizado la información recopilada teniendo en cuenta los siguientes aspectos; primero están en orden cronológico, segundo se identifican con nombre de los autores, el año de realización y el título de la investigación y por último se muestra la descripción del trabajo suministrada por el autor de cada investigación.

Autores: O. Toedter, A.W. Koch

Año: 2000

Título de la investigación: A simple laser-based distance measuring device [1]

Resultados obtenidos:

Toedter y Koch presentaron un sensor simple basado en láser para mediciones de distancia, velocidad y forma. La distancia entre el sensor y el objeto de medición es evaluada por un principio de triangulación. El objeto de medición se explora por medio de un rayo láser que proporciona una alta resolución espacial. La distancia se determina trigonométricamente a partir de una medición del ángulo de incidencia de la luz en dos detectores diferentes. El rango de medición abarca varios centímetros hasta 10 m, el error relativo de un solo disparo de medición es inferior a 11% y se podría reducir por múltiples mediciones a menos de 5%. La tasa de repetición de la medición es de hasta 200 kHz dependiendo de la intensidad de láser emitido y el circuito de evaluación. En la figura 1 se ilustra el sensor utilizado en este artículo.

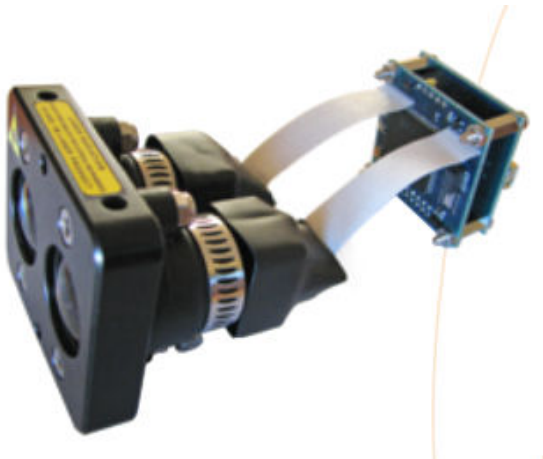


Figura 1. Módulo medidor de distancia Láser

Fuente: Lightware Optoelectronics. "SF01 – Laser Range Finder Manual Rev 2." Lightware Optoelectronics (Pty) Ltd. 2013.

Autores: Gutmann, J.-S., Weigel, T., Nebel, B

Año: 2000

Título de la investigación: A fast, accurate and robust method for self-localization in polygonal environments using laser range finders [2]

Resultados obtenidos:

Uno de los métodos para una navegación exitosa es la autolocalización; esta es importante en casi todas las tareas robóticas. Gutmann, Weigel y Nebel desarrollan la navegación de un robot para jugar un juego estético y efectivo de fútbol robótico, ellos consideraron que la autolocalización es un requisito necesario. Cuando diseñaron su equipo de fútbol robótico para participar en competencias de fútbol robótico, resultó que ninguno de los enfoques existentes satisfizo sus necesidades de ser rápido, preciso y robusto. Por esta razón, desarrollaron un nuevo método, que se presenta y se analiza en su trabajo. Este método es uno de los componentes clave y es probablemente una de las explicaciones para el éxito de su equipo en las competencias nacionales e internacionales. También presentan evidencia experimental de que su método supera a otros métodos de autolocalización en el entorno RoboCup.



Figura 2. Equipo de fútbol robótico.

Fuente: Gutmann, J.-S., Weigel, T., Nebel, B. A fast, accurate and robust method for self-localization in polygonal environments using laser range finders

Autores: Lee Y.-J.a, Yim B.-D.b, Song J.-B.a

Año: 2009

Título de la investigación: Mobile robot localization based on effective combination of vision and range sensors [3]

Resultados obtenidos:

La mayoría de los algoritmos de localización están basados en la visión o en la medición de distancias, pero el uso de un solo tipo de sensor no puede garantizar a menudo una localización exitosa. En este trabajo se propone un método de localización basado en filtro de partículas, que combina la información de distancia obtenida desde un escáner de infrarrojos de bajo costo con la información visual a base de SIFT (transformación de características invariante de la escala) obtenida de una cámara monocular para estimar robustamente la posición del robot. La estimación aproximada de la pose del robot por el sensor de alcance puede ser compensada con la información visual dada por la cámara y a su vez el lento reconocimiento de objeto visual puede ser superado por las frecuentes

actualizaciones de la medición de distancia. Aunque los anchos de banda de los dos sensores son diferentes, pueden ser sincronizados mediante el uso de la información del encoder del robot móvil. Por lo tanto, todos los datos de ambos sensores se utilizan para estimar la posición del robot sin retardo de tiempo y las muestras utilizadas para estimar la posición del robot convergen más rápidamente que los de localización basada en un solo tipo de sensor. También sugieren un método para evaluar el estado de la localización basado en la probabilidad normalizada de un modelo de sensor de visión. Diversos experimentos muestran que el algoritmo propuesto puede estimar con fiabilidad la posición del robot en diversos ambientes de interior y puede recuperar la posición del robot después de una localización incorrecta.

Autores: Hwang S.-Y., Song J.-B.

Año: 2011

Título de la investigación: Monocular vision-based SLAM in indoor environment using corner, lamp, and door features from upward-looking camera [4]

Resultados obtenidos:

En esta investigación buscan solucionar el problema de la navegación examinando la localización y mapeo simultáneos (SLAM por sus siglas en inglés) basados en visión para un robot móvil utilizando una cámara que mira hacia arriba. Aunque una cámara monocular mirando hacia el techo puede proporcionar una solución de bajo costo para SLAM en interiores, este enfoque es a menudo incapaz de lograr la navegación confiable debido a la falta de características visuales fiables en el techo. Proponen un nuevo enfoque para SLAM monocular usando la esquina, la lámpara, y las características de las puertas al mismo tiempo para lograr la navegación estable en varios ambientes. Utilizaron las características de la esquina y las partes más brillantes de forma circular de la imagen del techo para la detección de las características de la lámpara. Además, las líneas verticales y horizontales se combinan para detectar robustamente las características de puertas para reducir el

problema de identificación errónea debido a los bordes cercanos. El uso de estos tres tipos de características como puntos de referencia aumenta la capacidad para observar las características en diferentes entornos y mantiene la estabilidad del proceso de SLAM. Una serie de experimentos en los ambientes interiores mostró que el sistema propuesto se tradujo en una la navegación confiable.

Autores: M.M. Rashid, Nor SaidahbtMohdZain, Faridatunbinti Mohammad Zain.

Año: 2012

Título de la investigación: Development of Omni Directional Mobile Robot Navigation System using RFID for Multiple Object [5]

Resultados obtenidos:

Se desarrolla una técnica de navegación modular en relación con la señal de las etiquetas RFID y el lector RFID. La idea principal es poner a prueba la capacidad del robot móvil para navegar en ambientes interiores. El lector de RFID está montado en el robot móvil para comunicarse con las etiquetas RFID y poder determinar la posición del robot, mientras que las etiquetas RFID se colocan en diferentes ubicaciones. La posición del robot móvil se determina basado en la ubicación de la etiqueta de RFID. El actuador se mueve de acuerdo con el ángulo entre la posición actual del robot y la etiqueta de destino.

Autores: Huang, G., Truax, R., Kaess, M., Leonard, J.J.

Año: 2013

Título de la investigación: Unscented iSAM: A consistent incremental solution to cooperative localization and target tracking [6]

Resultados obtenidos:

En esta investigación se abordó el problema de la navegación junto con una temática cooperativa; los autores estudian el problema de la localización de cooperación y seguimiento del blanco (CLATT), es decir, un equipo de robots móviles utilizan las mediciones de sus sensores a bordo para seguir

cooperativamente múltiples objetivos en movimiento, y proponer un novedoso método de mapeo incremental (enfoque U- ISAM). El método propuesto alcanza una reducción de errores de linealización mediante el uso de la transformación “unscented” y las propiedades de observabilidad correctas mediante la imposición de restricciones de observabilidad en la transformación “unscented” al calcular los jacobianos de medición. El algoritmo propuesto se valida a través de extensas simulaciones de Monte - Carlo.

Autores: Luo R.C., Lai C.C.

Año: 2014

Título de la investigación: Multisensor fusion-based concurrent environment mapping and moving object detection for intelligent service robotics [7]

Resultados obtenidos:

El desarrollo de robots de servicio inteligente es un tema importante y crítico para las aplicaciones de la comunidad humana. Con las necesidades de servicios diversos y complejos, la percepción y la navegación son temas esenciales. La investigación de Luo y Lai se centra en la fusión sinérgica de múltiples sensores para un robot de servicio inteligente que no sólo realiza la auto localización y cartografía, sino que también detecta objetos o personas en el edificio en donde se desenvuelve. En primer lugar, un nuevo enfoque ampliado de la estimación óptima basada en grafos fue derivado de la concurrencia de las posturas del robot y la estimación de trayectoria del objeto en movimiento. Por otra parte, todos los problemas de detección de objetos en movimiento de la navegación interior de un robot se dividen y conquistan a través de metodologías de fusión de varios sensores. Los métodos de estimación se utilizan tácticamente para obtener un resultado más preciso que el de sólo el láser de distancia o la visión estereoscópica. Además, para resolver el problema de asociación consistente de objetos en movimiento, se aplica una asignación de creencia de intersección área de covarianza para la evaluación de estado de movimiento y las evidencias

complementarias tales como la cinemática y la visión son unidas para mejorar la eficiencia de asociación con el método de fusión de evidencia. El concepto se ha demostrado exitosamente y analizado con éxito.

Autores: M. Suruz Miah, Wail Gueaieb

Año: 2014

Título de la investigación: Mobile robot trajectory tracking using noisy RSS measurements: An RFID approach [8]

Resultados obtenidos:

Otro método para la navegación es el uso de la Radio Frecuencia; la mayoría de las técnicas de navegación de robots móviles basados en señuelos de RF dependen de la aproximación de distancias de línea de vista entre los señuelos y el robot. Esto se lleva a cabo en su mayoría midiendo la intensidad de la señal recibida por el robot (RSS) proveniente de los señuelos. Sin embargo, la cartografía precisa entre las mediciones de RSS y la distancia en línea de vista es casi imposible de lograr en entornos reverberantes. El artículo de Suruz Miah y Wail Gueaieb presenta un controlador de retroalimentación observada parcialmente por un robot móvil con ruedas, donde la señal de realimentación es en forma de mediciones RSS ruidosas emitidos por las etiquetas de identificación por radiofrecuencia (RFID). El controlador propuesto no requiere ni una correspondencia exacta entre la distancia LOS y las mediciones de RSS, ni la linealización del modelo de robot. El rendimiento del controlador se demuestra a través de simulaciones numéricas y experimentos en tiempo real.

Investigaciones realizadas en Colombia y España

Autores: Giovanni R. Bermúdez Bohórquez, Miguel R. Pérez Pereira, Edwin A. Beltrán González, Leidy Y. López Osorio, Jonathan E. Cruz Ortiz

Año: 2012

Título de la investigación: Modelo cinemático de un robot móvil implementado con LEGO NXT para un sistema de localización indoor diseñado en Labview

Resultados obtenidos

“El estudio de la cinemática de una plataforma móvil establece el desarrollo de modelos matemáticos que permite conocer el comportamiento de las velocidades relacionadas con las características de los motores usados en el móvil. Por lo general, en la gran cantidad de artículos consultados, el proceso de validación de los modelos no son especificados ni detallados pero la importancia de su implementación permitiría conocer su comportamiento real y los errores sistemáticos que están presentes. Este trabajo presenta el proceso de validación del modelo cinemático y odométrico para una plataforma diferencial construida con LEGO NXT que permita la implementación de algoritmos de planificación de rutas y sistemas de navegación en zonas desconocidas dentro de un entorno cerrado, que son necesarios para el desarrollo de un sistema de localización para un sistema multirobot.”[9]

Autor: Orlando Zapata Cortes, Ing. Universidad Nacional de Colombia - Seccional Medellín

Año: 2013

Título: Diseño de un esquema de coordinación de comportamientos para la navegación de una plataforma robótica móvil. [10]

Resultados obtenidos

El trabajo desarrollado por Zapata presenta un esquema de coordinación de comportamientos para una plataforma robótica móvil pequeña, basado en el seguimiento de paredes derecha, izquierda y la evasión de obstáculos.

El autor del proyecto utiliza lógica difusa para incluir conocimiento cualitativo y cuantitativo basado en la experiencia en el comportamiento del robot.



Figura 3. Plataforma robótica “Carlitos”

Fuente: Zapata O. Diseño de un esquema de coordinación de comportamientos para la navegación de una plataforma robótica móvil

Autor: Joaquín Ferruz Melero - Universidad de Sevilla y Universidad Politécnica de Cartagena

Año: 2013

Título: Robot móvil inteligente de bajo coste que ayuda en las tareas domésticas

Resultados Obtenidos:

“El robot portátil de asistencia personal se desplaza por superficies horizontales, mediante un sistema de tracción de bajo coste. El prototipo desarrollado es capaz de evitar los obstáculos que puede encontrarse en la vivienda, como sillas o mesas. También puede generar mapas del inmueble y recordar lugares importantes, puertas y accesos a las habitaciones. Además tiene capacidad para comunicarse con las personas mediante lenguaje natural, es decir, es capaz de hablar. Esta capacidad facilita la comunicación con sus usuarios. El prototipo desarrollado resultará de gran ayuda en las tareas domésticas como la vigilancia de personas con problemas de pérdida de memoria, como entretenimiento o compañía de mayores o para desplazar objetos de un lugar a otro de la vivienda, por ejemplo un vaso de agua.

El robot dispone de dos cámaras de bajo coste, lo que le permite adquirir información visual, procesarla y actuar adecuadamente. Este sistema inteligente de visión artificial facilitará las labores de vigilancia y la realización de tareas de forma autónoma. El principal objetivo del prototipo, que se encuentra en fase de desarrollo, es aumentar la calidad de vida de los usuarios.” [11]

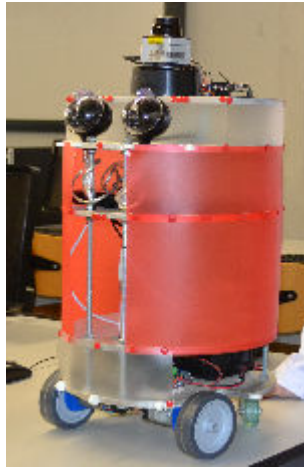


Figura 4. Robot móvil para ayuda doméstica

Fuente: Universidad Politécnica de Cartagena, página web:
<http://www.upct.es/saladeprensa/notas.php?id=871>

1.2. FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN

Partiendo de las necesidades planteadas se formula el siguiente problema a investigar:

¿Cómo diseñar y construir una plataforma robótica móvil cooperativa y modular capaz de transportar una carga, navegando de forma autónoma dentro de un espacio predeterminado?

Para resolver este problema se plantean diferentes etapas o fases que le aportarán a la investigación soluciones particulares; para ello se formulan preguntas

pertinentes a resolver desde cada una de las fases y que en conjunto darán solución al problema investigativo.

FASE 1

¿Cómo diseñar y construir un módulo de autolocalización y navegación en espacios interiores que sea independiente del sistema de locomoción?

FASE 2

¿Cómo diseñar y construir una plataforma robótica móvil con capacidad de navegación en interiores?

FASE 3

¿Cómo acoplar las fases uno y dos implementando una rutina de trabajo cooperativo entre varias plataformas robóticas móviles que aumente las capacidades de operación?

Para obtener el grado de Ingeniería Mecatrónica y Electrónica; se desarrollaron las Fases uno y dos.

2. JUSTIFICACIÓN

En el campo de la robótica en los últimos años, la comunidad científica se ha esmerado por construir prototipos robóticos cada vez más versátiles con características que mejoran el desempeño en las tareas asignadas para el autómata. Estos esfuerzos han llevado la robótica móvil a incurrir en diferentes campos como la domótica, la Industria, exploración de terrenos, la robótica militar, etc. El éxito de la robótica móvil en las diferentes áreas ha venido siendo cada vez más notable y reconocido por la comunidad mundial, dando esto como resultados exigencias de sistemas robóticos cada vez más autónomos. Uno de los problemas en la robótica actual, es definir cuál es el tipo de navegación y la forma en la que el robot va a llevarla a cabo de una manera autónoma teniendo en cuenta su entorno para poder reconocer los obstáculos que se le presentan.

Tales exigencias, crearon la necesidad de diseñar y construir un módulo de autolocalización y navegación que extraiga, en espacios interiores, las características del entorno para resolver problemas de autolocalización de forma autónoma.

La importancia de este proyecto radica en el aporte tecnológico de una solución de navegación independiente de la plataforma robótica móvil, en la que se hizo una sinergia entre diferentes tipos de sensores disponibles en el mercado que junto con el diseño de un algoritmo puede llegar a solucionar problemas actuales de una manera eficiente; acercándose así a uno de los fines que tienen los avances tecnológicos que es lograr procesos exitosos con menores recursos y mayor velocidad.

En la búsqueda realizada en los antecedentes se evidencia que los sistemas de navegación para robótica móvil parten de una sensórica integrada al cuerpo del robot, mientras que en este trabajo de investigación demostramos que se puede independizar el módulo de navegación del sistema de locomoción; de igual forma que un navegador GPS (*Global Positioning System*) portable es independiente del vehículo en que se opera.

De este modo se propone una solución general para un problema común en la industria diseñando y construyendo un módulo de autolocalización y navegación en espacios interiores independiente de la plataforma robótica móvil; para lograrlo la solución planteada debe ser capaz de mapear espacios interiores a partir de la información suministrada por los sensores de navegación, extraer las características del entorno utilizando operaciones que requieran baja capacidad de procesamiento, determinar la posición del módulo de navegación y trazar rutas de forma autónoma que permitan la navegación en un espacio interior predeterminado. De esta manera, la solución planteada puede ser utilizada en futuras aplicaciones industriales y comerciales como son: el transporte de partes dentro de una planta de distribución, el despacho automatizado de mercancía en grandes superficies, el despacho de correspondencia en una oficina, entre otros.

3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

3.1.OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un módulo de autolocalización y navegación en espacios interiores que sea independiente del sistema de locomoción, junto con una plataforma robótica móvil.

3.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar una rutina de mapeo en espacios interiores a partir de la información suministrada por los sensores de navegación.
- Diseñar un algoritmo que extraiga las características del entorno utilizando operaciones que requieran baja capacidad de procesamiento.
- Implementar un algoritmo de autolocalización en interiores que determine la posición del módulo de navegación.
- Implementar un algoritmo de trazado de rutas autónomo que permita la navegación en un espacio interior predeterminado.
- Realizar un análisis estructural para determinar la resistencia mecánica de las piezas que conforman la plataforma robótica móvil.

4. MARCO REFERENCIAL

En este marco se recopilan brevemente y de una manera concisa los conceptos y teorías que se relacionan directamente con el desarrollo del tema y del problema de investigación de las fases uno y dos de este proyecto.

4.1. MARCO CONCEPTUAL

4.1.1. Sensor

Es un dispositivo que captura una magnitud, como por ejemplo campo eléctrico, temperatura, presión, etc. y da una señal de salida en función de una variable medida. [12]

4.1.2. Robot

Máquina automática programable capaz de realizar determinadas operaciones de manera autónoma y sustituir a los seres humanos en algunas tareas, en especial las pesadas, repetitivas o peligrosas; puede estar dotada de sensores, que le permiten adaptarse a nuevas situaciones. (Oxford dictionaries, página web)

4.1.3. SLAM

Tiene su nombre de las siglas de “Simultaneous localization and mapping” y se refiere al proceso de construir un mapa de un lugar mientras que busca una posición estimada del robot dentro de este espacio. Este método le permite obtener una localización autónoma y provee datos para la generación de un mapa y generar una trayectoria para el movimiento. [13]

4.1.4. LIDAR

Viene de las siglas de “Light Detection and Ranging” El término acuñado originalmente como LIDAR hacer referencia a radar LASER (Light Radar), hoy se conoce el término en un rango más amplio como Light Detection And

Ranging. El sensor Lidar funciona de modo similar a un radar, solo que en lugar de utilizar una señal de radio se emplea un haz de luz láser para medición de la distancia al punto de rebote en una superficie. [14]

4.1.5. Filtro pasa bajos

Este tipo de filtros admite las señales de menor frecuencia respecto a una frecuencia de referencia. [12]

4.1.6. Filtro pasa altos

Permite admitir las señales que superen un umbral de frecuencias dadas según la aplicación en la que se utilice. [12]

4.1.7. Filtro pasa bandas

Este tipo de filtros es una mezcla entre el filtro pasa bajos y pasa altos, puesto que permite admitir un rango de frecuencias determinado. [12]

4.1.8. Filtro de Kalman

El filtro de Kalman es un algoritmo desarrollado por Rupert Kalman en 1960 que permite, por medio de ecuaciones matemáticas, implementar un estimador de tipo predictivo e incluso correctivo para minimizar el error entre datos o mediciones con un alto grado de dispersión. [15]

4.1.9. GPS

La tecnología GPS ha sido desarrollada por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con el fin de permitir determinar la ubicación de objetos sobre la tierra o cerca de ella para aplicaciones civiles o militares. Para este propósito se dispuso de una red de satélites en una órbita controlada a 20000 kilómetros de distancia. Cada satélite cuenta con un reloj atómico de alta precisión, adicionalmente los relojes de los satélites se encuentran sintonizados.

Un dispositivo de localización GPS en tierra escucha la señal con la estampa de tiempo transmitida por los satélites y toma en cuenta el retardo desde la emisión hasta la recepción de la señal para determinar la distancia al satélite, cuya posición es computada con un simple algoritmo. Este mismo proceso se efectúa con otros satélites y se calcula el punto de intersección de los radios de las distancias calculadas a cada uno para determinar la ubicación del receptor. Se necesita un mínimo de cuatro satélites para poder calcular la posición.

En la actualidad se cuenta con diversas constelaciones de satélites dispuestos en órbita que se utilizan para geolocalización, como son GNSS, GLONASS, GALILEO, BEIDU. Aquellos receptores que tienen la posibilidad de escuchar las señales de diferentes redes cuentan con un mayor número de satélites disponibles con lo que pueden obtener una fijación más rápida y una mayor precisión en la localización.

La precisión en la geolocalización se encuentra en el rango de los 6m, esta precisión disminuye dependiendo de las condiciones climáticas. En la actualidad la industria está trabajando en tecnologías que permitan una precisión en la geolocalización en el rango inferior a centímetro, pero estas requieren por el momento del uso de dos receptores sincronizados para tal fin.

4.1.10. AGPS

El GPS Asistido busca mejorar el tiempo en el arranque del funcionamiento de un GPS, en muchos casos y cuando el receptor se encuentra en lugares cubiertos y sitios donde la señal es susceptible a rebotes, como ciudades con edificaciones muy altas, sótanos o incluso debajo de árboles, la señal proveniente de los satélites tarda en encontrar el receptor y genera largos tiempos de espera para lograr obtener la ubicación.

Esta tecnología complementa el GPS convencional con señales de antenas repetidoras de celulares para que logre una ubicación inicial más rápida y permite que los satélites encuentren a los receptores de manera eficiente. Esta tecnología se implementó con el fin de ubicar el origen de las llamadas a los números de emergencia en Estados Unidos y así lograr un mejor servicio y una respuesta veloz en caso de cualquier eventualidad.

El funcionamiento general para la ubicación es exactamente el mismo que el GPS, solo que está complementado para que, con la ayuda de las torres cercanas, obtenga una ubicación aproximada inicial y la señal proveniente del satélite encuentre rápidamente el receptor. El problema al utilizar esta tecnología es que esta requiere una conexión a un servidor que le permita acceder a las torres, ya sea por datos móviles o WI-FI.

4.2. MARCO TEÓRICO

La navegación de un robot móvil parte de una correcta localización, lo cual pareciera ser un problema trivial. Se han explorado varias técnicas para resolverlo como son: triangulación por radiofrecuencia, triangulación por WIFI, triangulación por RFID (Radio Frequency Identification), ubicación por medición de distancia con láser, infrarrojo, reconocimiento visual del entorno, entre otros. En esta sección se explicaran algunos de los métodos utilizados y algunos principios de funcionamiento de los sensores que permiten el funcionamiento de estos métodos.

4.2.1. Sensores y medidores de proximidad y distancia

Existen varios métodos para la medición de proximidad y distancia, cada uno utiliza una tecnología diferente y está adaptado para condiciones de operación diferentes:

4.2.1.1. Sensores ultrasónicos

Estos, como su nombre lo dice, emiten una frecuencia por encima del rango audible y miden el tiempo de rebote, a partir de este se calcula la distancia a la que se encuentra el objeto más próximo. Son direccionales, pero susceptibles a interferencias por reflejo de la señal. La figura 5 muestra el sensor ultrasónico SRF02. [12]



Figura 5. Sensor ultrasónico SRF02

Fuente: <http://cosasdeingenieria.com/mystore/item/173/b/sensor-ultrasonico-xl-maxsonar-ez4>

4.2.1.2. Sensores infrarrojos

Estos sensores emiten un haz de luz infrarrojo modulado y calculan la distancia basados en la intensidad de la señal reflejada por el objeto en su campo de visión. Tienen un alcance inferior a 1,50m y la medición es susceptible a errores ocasionados por las condiciones de iluminación del entorno. [12]



Figura 6. Sensor infrarrojo Sharp GP2Y0A02YK0F

Fuente: <http://5hertz.com/images/08703.jpg>

4.2.1.3. Sensores capacitivos

El funcionamiento de estos sensores se basa en el aumento de la capacitancia al acercarse un material a su campo eléctrico. [12]



Figura 7. Sensor capacitivo

Fuente: <http://181.143.31.26/pub/internet/nuevo/graficas/pequesc18mm.jpg>

4.2.1.4. Sensores inductivos

Detectan el paso o la presencia de materiales ferrosos o metales. Permiten detectar el tipo de material si se hace una caracterización previa del mismo. Son de corto alcance. [12]



Figura 8. Sensor inductivo

Fuente: <http://sensoresdeproximidad.galeon.com/inductivo.jpg>

4.2.1.5. LIDAR

Sensores que trabajan por medio de la emisión y recepción de un haz de luz láser, los hay de dos tipos, los que funcionan por triangulación óptica y los que funcionan por medición del cambio de fase del haz de luz reflejado. Su precisión no depende de las condiciones lumínicas sino de la distancia de medición; Los objetos de color negro son invisibles para estos sensores.



Figura 9. Sick LIDAR

Fuente: <http://www.autonomoustuff.com/uploads/9/6/0/5/9605198/7818537.jpg>

Los sensores LIDAR disponibles en el mercado se pueden dividir en tres grupos de acuerdo a la estrategia que utilizan para obtener dicha medición, como son: LIDAR por medición de tiempo de vuelo, LIDAR por interferometría y LIDAR por medición

de ángulo de incidencia. La diferencia en el tipo de estrategia utilizada tiene un alto impacto en la precisión y el costo del sensor. Siendo los más precisos y costosos los dos primeros, su utilización se da primordialmente en ambientes aeronáuticos e industriales, mientras que los últimos son comúnmente utilizados en productos orientados al consumidor final. [14]

4.2.1.5.1. LIDAR por medición de ángulo de incidencia.

Este tipo de radar cuenta con un emisor (E) y un receptor (R) ubicados a una distancia conocida (a). Se emite un haz de luz láser modulado el cual rebota en el obstáculo ubicado directamente enfrente, el haz de luz reflejado incide en el receptor con un ángulo (θ), el cual es determinado por la posición del centroide de luz en el mapa del sensor ubicado en el receptor. Entonces conociendo la distancia del cateto adyacente (a) y el ángulo de incidencia (θ), se puede determinar trigonométricamente la dimensión del cateto opuesto (b) que corresponde a la distancia del emisor al punto de rebote.

La precisión del sensor LIDAR por medición de ángulo de incidencia es directamente dependiente de la resolución del sensor del receptor.

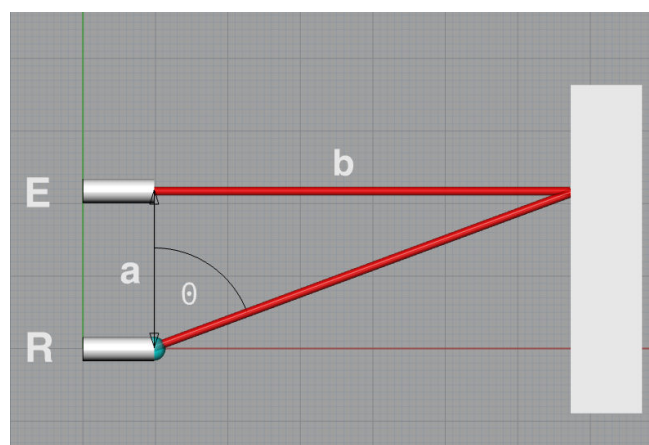


Figura 10. Funcionamiento LIDAR por medición de ángulo de incidencia.

4.2.2. Sensores y medidores de orientación

Los sensores de orientación utilizan el campo magnético de la tierra para poder encontrar de manera acertada diferentes magnitudes como lo son la aceleración, orientación, altitud, entre otros.

Es posible determinar la rotación del mapa de un robot con respecto al mapa de otro tal como lo hacen los robots futbolistas [2], o el análisis de vértices apoyado en extracción de características, pero ambos métodos son computacionalmente costosos para un microcontrolador. El problema puede ser solucionado de forma más sencilla midiendo la orientación relativa al norte magnético con un sensor de efecto HALL, aunque esto represente limitaciones de uso en espacios con campos magnéticos intensos.

4.2.2.1. Efecto HALL

El efecto Hall es aquel que hace que en todos los metales por los que circule una corriente, situado en un campo magnético perpendicular al vector de la corriente, se genera un voltaje y un campo eléctrico transversal.

La forma para determinar la orientación y encontrar el norte es por medio del campo magnético terrestre, los sensores de efecto Hall detectan este campo y pueden determinar la dirección hacia la cual están apuntando.

4.2.2.2. Filtrado de datos

Algunos sensores pueden tener errores en la medición debido a algunos datos que no obtuvo completamente o a la acumulación de pequeños errores que al pasar el tiempo van haciendo que la medición se desvíe del valor real en la orientación.

Existen una gran cantidad de filtros digitales, los más adecuados para obtener la orientación son los filtros pasa bajos, pasa altos, pasa bandas y filtro de Kalman. Los sensores de orientación que mejores respuestas generan son aquellos que cuentan con uno de estos filtros, ese es el caso del YEI 3-Space Embedded

4.2.2.3. YEI 3-Space Embedded

El YEI 3-Space Embedded es un sensor que incluye un giroscopio de tres ejes, acelerómetro y brújula digital, también tiene filtros basados en cuaterniones y filtro de Kalman. Permite obtener datos en tiempo real en tres formatos diferentes:

- Datos crudos: Son los datos leídos directamente desde cada uno de los componentes del sensor antes de que cualquier tipo de procesamiento sea realizado.
- Datos corregidos: Son los datos mostrados luego de tomar los crudos y escalarlos para representar unidades del mundo real.
- Datos normalizados: Este tipo de datos se genera luego de tomar los corregidos y normalizarlos geoméricamente.

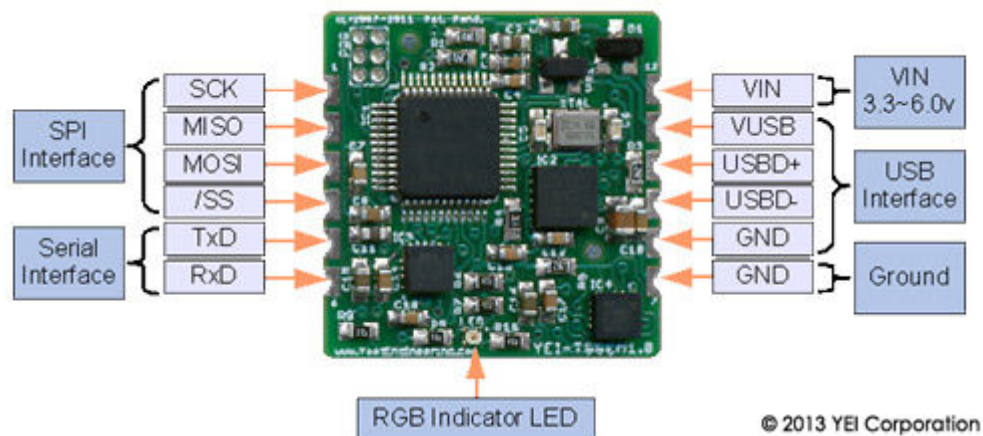


Figura 11. YEI 3-Space embedded

Fuente: <http://www.yeitechnology.com/productdisplay/3-space-embedded-0>

4.2.3. Sensores y medidores de geolocalización

Para lograr una ubicación completa y acertada no es suficiente con una localización específica dentro de una habitación, existe la posibilidad de encontrar espacios iguales o muy coincidentes pero que estén localizados en lugares completamente diferentes, es por esta razón que surge la necesidad de lograr una localización global precisa que pueda ubicar al robot en un espacio terrestre determinado para que sea posible tener, en futuras aplicaciones, una memoria y evitar tener que realizar el trazado de un mapa general cada vez que entre en una habitación, así haya estado ahí anteriormente.

Actualmente el estándar para la geolocalización es el GPS aunque también es utilizado, más que todo en los teléfonos móviles, el GPS Asistido (AGPS).

5. DISEÑO INGENIERIL

Este capítulo describe cada uno de los pasos seguidos para el diseño y la construcción del módulo de navegación y autolocalización junto con la plataforma robótica móvil.

5.1. Requerimientos

El módulo de navegación para el robot móvil presentado en este proyecto debe ser capaz de obtener su ubicación y orientación en el espacio de forma autónoma, es decir, sin requerir de elementos adicionales externos de hardware y solo puede contar con las señales disponibles en el entorno. Adicionalmente debe detectar los obstáculos que interfieran con el movimiento y la distancia a los mismos; estos obstáculos pueden ser de naturaleza permanente o también variante en el tiempo.

Teniendo en cuenta los requerimientos anteriormente expresados, son necesarios sensores de ubicación, de distancia, de orientación y de movimiento.

Los medidores de distancia necesarios deben garantizar la detección de los obstáculos en un rango no menor a cinco metros para los fines de este proyecto, deben ser multidireccionales, detectar la mayor cantidad de materiales, colores y texturas y adicionalmente deben tener un tiempo de respuesta corto para poder prevenir colisiones.

Los sensores encargados de obtener la orientación deben determinar la orientación del robot con respecto a una referencia unificada de igual modo que una brújula señala siempre la dirección del norte. Por lo tanto se delimita el tipo de sensor a utilizar a uno de efecto HALL; sin embargo es preciso contar con un filtro capaz de corregir las pequeñas desviaciones en la medición, de igual manera se requiere

limitar la exposición a ambientes con campos magnéticos intensos que pueden afectar drásticamente la medición de la orientación.

Por último, para tener una idea general de la ubicación del robot existen dos métodos estandarizados: GPS y GPS asistido, estos pueden retornar la ubicación en coordenadas de latitud y longitud con una incertidumbre inferior a seis metros debido a que así se podrá determinar el área dentro de una edificación en la que se encuentra el robot, permitiendo de esta manera el acceso a información pertinente del lugar de ubicación.

5.2. Selección de sensores

5.2.1. Sensores de distancia

Se efectuó una búsqueda de sensores de distancia disponibles en el mercado, se tomaron en cuenta las características más importantes y con base en esta información se selecciona el más adecuado para este proyecto. Los resultados más relevantes se presentan en la tabla 1.

5.2.1.1. Comparación de sensores de distancia comerciales

Sensor	Distancia medición nominal	Tiempo de respuesta	Tipo de medición	Materiales
Ultrasonico	60mm a 10m	35 a 500 ms	Monodireccional	Deflectores de sonido
Inductivos	1 mm a 300 mm	5 a 10 ms	Monodireccional	Ferrosos
Capacitivos	0 a 40 mm	10 a 20 ms	Monodireccional	Alta constante dieléctrica
Infrarojo	5 cm a 80cm	20 a 50 ms	Monodireccional	Alta radiación de luz
LIDAR	15 cm a 6m	Según velocidad rotación	Monodireccional	Reflectores de luz

Tabla 1. Comparación de tecnologías de detección de proximidad y medición de distancia.

Fuente: Autores

5.2.1.2. Análisis de las tecnologías consideradas

Como se puede observar en la tabla 1, los sensores Ultrasónicos y los LIDAR son los únicos que permiten medir distancias superiores en el rango de los 5m, adicionalmente a esto el LIDAR es el único que puede medir en diferentes direcciones sin la necesidad de un mecanismo adicional o del uso de sensores adicionales. Por este motivo se enfocó la búsqueda en medidores de distancia LASER y LIDAR.

5.2.1.3. Comparativo entre sensores LIDAR

Se efectuó una búsqueda de módulos de medición por Laser y LIDAR disponibles en el mercado, se filtraron aquellos con costos superiores a mil quinientos dólares. Los resultados más relevantes se presentan en la tabla 2. Para la referencia de precios incluimos en ella el modelo más sencillo a nivel industrial el cual está en el orden de los miles de dólares.

Dispositivo	Método de funcionamiento	Rango	Precisión	Tipo de medición	Precio (USD)
Parallax	Triangulación	15 a 122 cm	3%	Unidireccional	\$89.10
Piccolo Lidar	Triangulación	15 a 600 cm	3%	360 grados	\$75
Light Ware SF02	Tiempo de vuelo	10 m	0.10%	Unidireccional	\$349
Hokuyo URG-04LX-UG01	Interferometría	2 a 400 cm	3%	240 grados	>\$1000

Tabla 2. Comparativo de sensores LIDAR

Fuente: Autores

5.2.1.4. Selección

Los sensores LIDAR industriales de alta precisión se encuentran por encima del presupuesto asignado para este trabajo, por este motivo no se tuvieron en cuenta.

Para escoger el sensor se tuvo en cuenta que el rango de medición estuviera en el orden de los 5m, debido a que este es el tamaño promedio de una habitación en el ambiente de pruebas, el tipo de medición multidireccional y el error en la medición inferior a 15cm para contar con una tolerancia suficiente al momento de atravesar una puerta de ancho promedio. Se encontró que el Piccolo Lidar cuenta con las características requeridas de rango, precisión y tipo de medición a un costo razonable, por lo que se escogió para el desarrollo de este proyecto. La figura 12 muestra una imagen del sensor seleccionado.

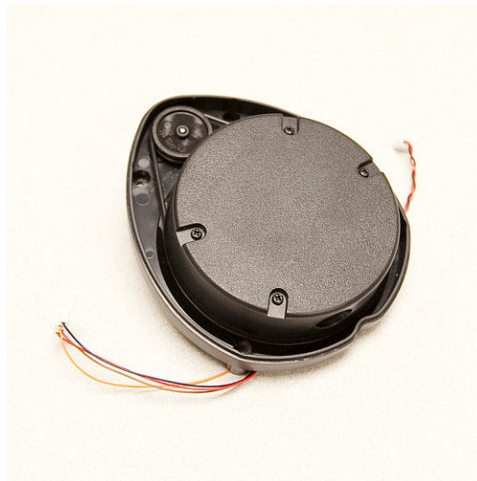


Figura 12. Piccolo Lidar

Fuente: <http://www.sparkfun.com/images/newsimages/XV11Teardown/TheGoodStuffMasked.jpg>

5.2.2. Sensores de orientación

Si bien es útil contar con un mapa del entorno que provee el sensor LIDAR, esta información no es suficiente para determinar la orientación real del robot. Aunque se puede inferir la misma con respecto al mapa obtenido, esta es relativa a la orientación inicial del LIDAR; el mismo robot vería el mapa rotado si iniciase con un ángulo de rotación diferente como se aprecia en la figura 13.

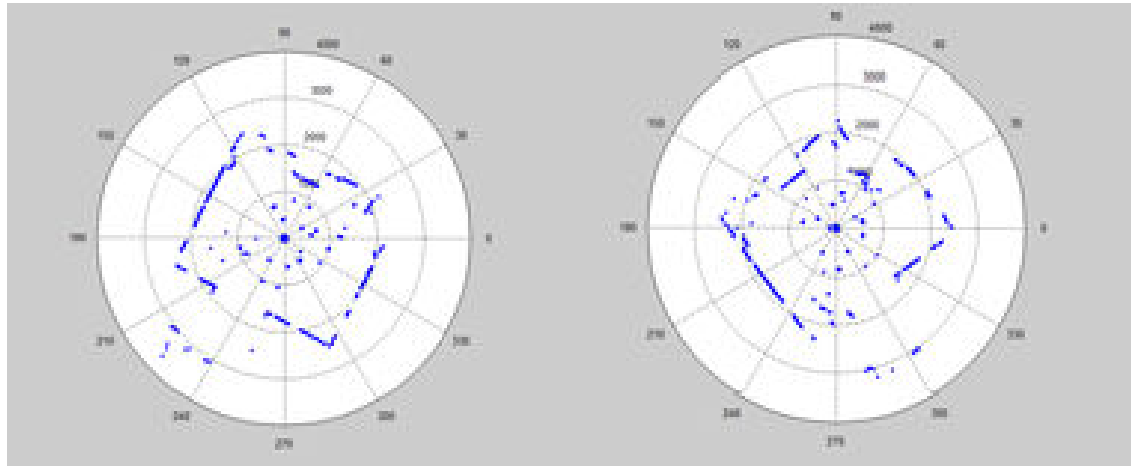


Figura 13. El mismo salón visto por el mismo robot en la misma ubicación con diferente orientación. (Unidades angulares en grados y unidades cartesianas en milímetros)

Fuente: Autores

De igual manera un robot ubicado en un espacio interior pero en diferente posición dentro de la misma área vería el mismo mapa con distinta orientación, lo que nos lleva a concluir que es necesario contar con un marco de referencia local unificado; para esto se necesita escoger correctamente un sensor de orientación. En la tabla 3 se muestran algunos sensores utilizados para obtener la dirección, comparando los aspectos más importantes de cada uno.

5.2.2.1. Comparación de sensores de orientación comerciales

Sensor	Filtro	Tiempo de respuesta
GY-85 - IMU 9DoF	Sin filtro	160 hz
LSM303DLHC	Filtro pasa altos	400 hz
YEI 3-Space Sensor	Filtro de Kalman	250 hz

Tabla 3. Comparativo de magnetómetros.

Fuente: Autores

5.2.2.2. Análisis de las tecnologías consultadas

Con los datos obtenidos en la tabla comparativa se considera al YEI 3-Space Sensor el adecuado para esta aplicación, esto debido principalmente a la inclusión del filtro de Kalman [15], este puede permitir tener una medición con el menor error posible, lo cual es vital en este proyecto ya que, incluso un error de dos grados en la medición del norte, puede desviar totalmente la trayectoria del robot.

5.2.3. Sensores de ubicación

Se efectuó una búsqueda de sensores de ubicación disponibles en el mercado, los módulos GPS son los más utilizados comercialmente y por lo tanto se enfocó la búsqueda en esta tecnología. Se tomaron en cuenta las características más importantes y con base en esta información se selecciona el más adecuado para este proyecto. Los resultados más relevantes se presentan en la tabla 4.

5.2.3.1. Comparación de módulos GPS

Sensor	Satélites	Tiempo de respuesta	Error	Precio (USD)
LS20031	66	5 a 10 Hz	3m	\$70
GPS Venus conector SMA	51	10 Hz	2.5m	\$53.50
Skylab Skynav SKM53	22 a 66	10 Hz	3m	\$23.90
TK-1315	20	1 Hz	3m	\$52

Tabla 4. Comparativo de módulos GPS.

Fuente: Autores.

5.2.3.2. Análisis de las tecnologías consultadas

Como se puede observar en la tabla anterior, la diferencia entre los módulos GPS radica principalmente en su precio, puesto que las características de los demás elementos son muy similares; por lo tanto se escogió el módulo “Skylab Skynav SKM53” por ser el más económico respecto a los demás. En la figura 14 se muestra el sensor seleccionado.



Figura 14. Skylab Skynav SKM53

Fuente: <http://competefornothing.com/wp-content/uploads/2012/06/SKM53.jpg>

5.3. Módulo de navegación y autolocalización

El fin de esta etapa del proyecto es lograr una autolocalización sin la necesidad de utilizar marcas o alguna señal distintiva del lugar en el que se encuentre para poder trazar el mapa, ubicarse y finalmente trazar trayectorias para moverse evadiendo los obstáculos presentes.

Para poder obtener dicho mapa y la ubicación del módulo es necesario el uso conjunto de los sensores explicados anteriormente para que, a partir de la información que estos proporcionan, lograr una navegación correcta y eficiente.

Para poder cumplir con el objetivo de este proyecto se realizó un proceso compuesto por varios pasos:

1. Obtención de la información y filtrado de datos no válidos.
2. Ubicación geoespacial.
3. Detección de vértices y cambios representativos en la dirección de los vectores.
4. Filtro de espacios desconocidos.
5. Trazado de líneas.
6. Extracción de características.
7. Selección del origen del sistema de coordenadas unificado.
8. Trazado del mapa según el sistema de coordenadas unificado.

5.3.1. Obtención de la información.

El primer paso es obtener la información sobre los elementos que se encuentran en el campo de visión del módulo de navegación, para esto se utiliza la información proveniente del sensor de proximidad. Obtener esta información requiere de un proceso de interpretación de los datos, esto debido a que el sensor LIDAR utilizado en este proyecto hace parte de una aspiradora automática y no se dispone de una hoja de datos que explique su funcionamiento ni su caracterización.

Posteriormente se obtienen los datos de longitud y latitud para calcular una posición global y así saber en qué lugar se encuentra ubicado el robot. Finalmente se obtienen los datos de la orientación del robot, más específicamente la desviación que tiene el robot con referencia al norte magnético de la tierra.

5.3.1.1. LIDAR

El Piccolo LIDAR envía datos por medio de un puerto serial (UART), esto ocurre únicamente cuando el motor que hace girar el emisor y receptor está en movimiento a razón de 300 rpm, este envía 360 lecturas por revolución, es decir, una por grado; enviando 90 paquetes de datos por vuelta que contienen 4 lecturas consecutivas cada uno. Cada paquete tiene una longitud de 22 bytes y se encuentran ordenados de la siguiente forma:

1. Inicio: Siempre es un 0xFA, esto permite identificar en la cadena de datos cuando está iniciando un paquete nuevo.
2. Índex: Este byte indica cual es el número del paquete y la lectura que está mostrando, va desde 0xA0, para indicar el paquete de datos cero y las cuatro primeras lecturas, hasta 0xF9, indicando el paquete 89 con las últimas cuatro lecturas.
3. Velocidad: Este dato ocupa dos bytes e indica, como su nombre lo dice, la velocidad en RPM (Revoluciones por minuto) a la cual está girando el motor del sensor.
4. Datos: Después de la velocidad se obtienen las cuatro lecturas de los datos, cada una tiene una longitud de cuatro bytes y tiene una organización específica así:
 - a. Byte 0: Distancia hasta el obstáculo en milímetros.
 - b. Byte 1: Bandera de datos inválidos o aviso de señal muy débil.
 - c. Byte 2: 8 primeros bits de la intensidad de la señal
 - d. Byte 3: Bits finales de la intensidad de la señal.
5. Suma de verificación: Muestra una suma de los 20 primeros bytes para saber si el paquete está completo y correcto. [16]

Luego de esta interpretación se obtiene un dato de la distancia de los obstáculos según el ángulo en el que lo encontró y el número del paquete al que corresponde, de esta forma se obtiene una lectura inicial como la que se muestra en la figura 15.

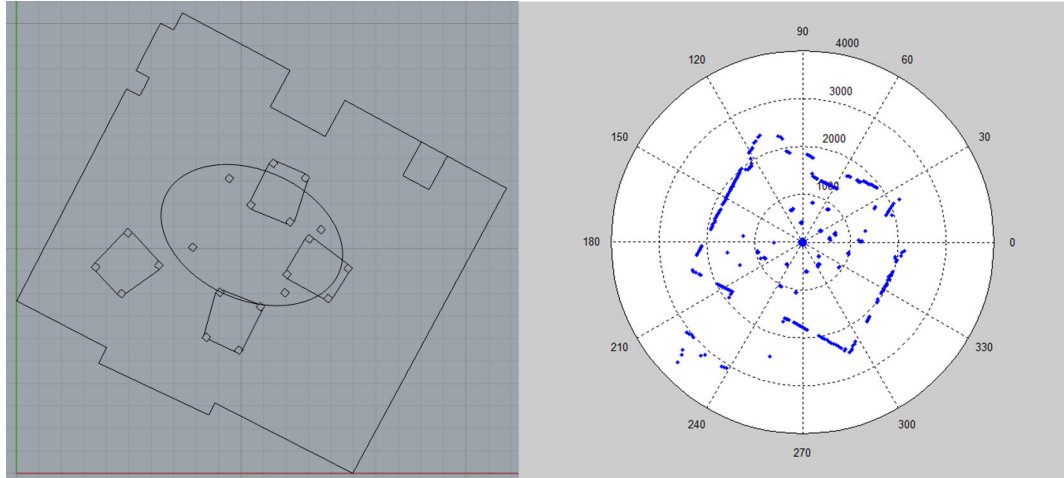


Figura 15. Diagrama del espacio sentido comparado con la nube de puntos adquirida con el Lidar.
(Unidades angulares en grados y unidades cartesianas en milímetros)

Fuente: Autores

5.3.1.1.1. Filtrado de datos inválidos

Como se puede observar en la figura 15, hay una concentración de mediciones en el origen; esto debido a que hay puntos en los que no obtiene una medición clara o que esta contiene errores.

Para solucionar este problema se programó un filtro en el que todas las mediciones menores a 10cm son desechadas ya que el rango del sensor es de 10cm a 6m y todos los datos que estén fuera de este rango serán considerados como erróneas. En la figura 16 se muestra el resultado de este filtro en los datos obtenidos.

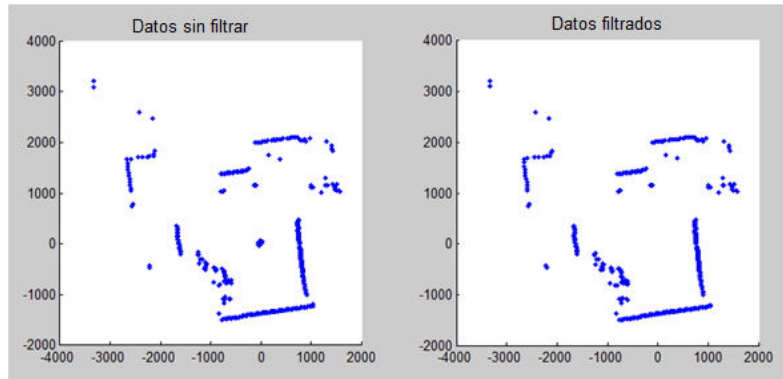


Figura 16. Comparación de los datos antes y después del primer filtro (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores.

5.3.1.2. YEI 3-Space Sensor

Según el tipo de dato requerido, este sensor puede enviar las mediciones en diferentes escalas y con uso de los filtros con los que viene integrado. Sin el uso de alguno de estos filtros, la medición no va a ser correcta y se tendrá una dispersión de datos mucho mayor a la deseada, en la siguiente gráfica se puede observar el comportamiento del mismo grupo de mediciones con y sin el uso de un filtro de Kalman:

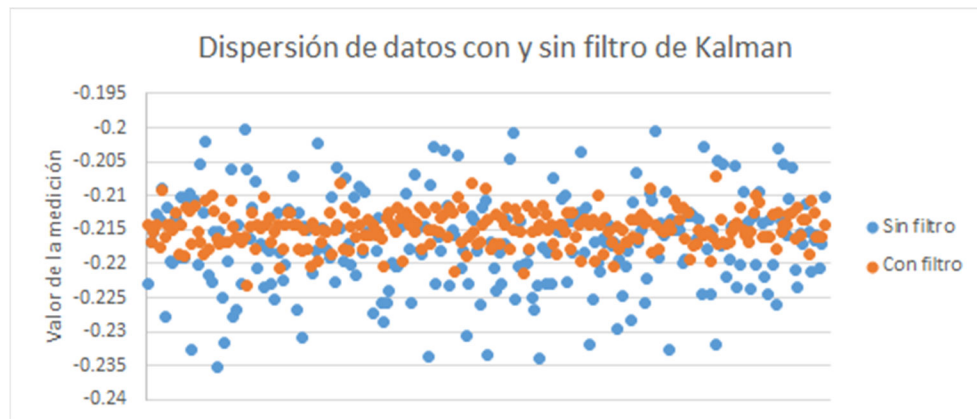


Figura 17. Comparativo de dispersión de datos con y sin filtro de Kalman.

Fuente: Autores.

Con los datos filtrados el siguiente paso es hacer una caracterización de los mismos, con el fin de conocer como es el funcionamiento del sensor y la forma en la que muestra las mediciones según el ángulo en el que se encuentra, con esa identificación es posible escalar o transformar esos datos a valores que puedan ser operados fácilmente. A continuación se muestran los datos recogidos variando la posición del sensor en intervalos de 10 grados:

Angulo	Medicion	Angulo	Medicion	Angulo	Medicion	Angulo	Medicion
0	0.2498	90	-0.1402	180	-0.2097	270	0.184
10	0.2187	100	-0.1756	190	-0.1795	280	0.2231
20	0.1809	110	-0.208	200	-0.1426	290	0.2579
30	0.1381	120	-0.2311	210	-0.1006	300	0.2882
40	0.0924	130	-0.2465	220	-0.0548	310	0.3058
50	0.0429	140	-0.2567	230	-0.0076	320	0.3181
60	-0.009	150	-0.2558	240	0.0383	330	0.3219
70	-0.0526	160	-0.2482	250	0.0912	340	0.3155
80	-0.0979	170	-0.2326	260	0.1388	350	0.289

Tabla 5. Datos de caracterización del magnetómetro del sensor YEI 3 calibrado.

Fuente: Autores.

A partir de los datos obtenidos se realizó la siguiente gráfica, en la que se muestra el comportamiento de los datos generados por el sensor:

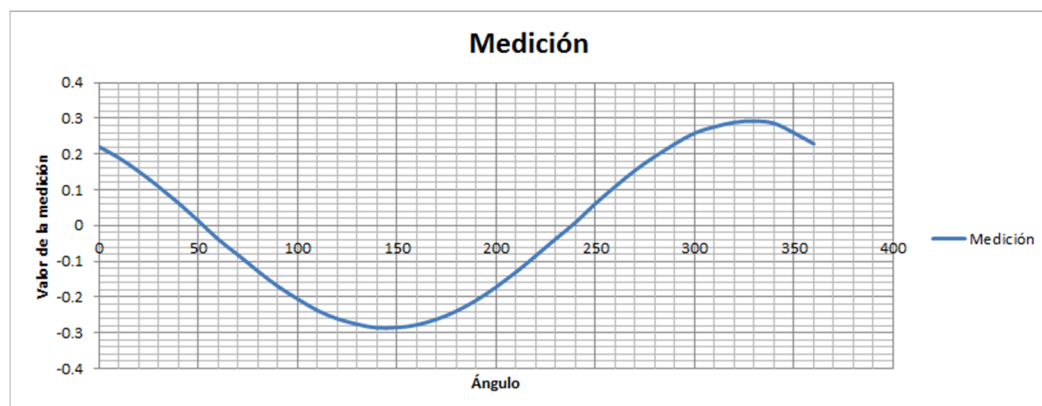


Figura 18. Curva de Caracterización de la respuesta del magnetómetro del sensor YEI3.

Fuente: Autores

Como se puede observar, la respuesta del sensor es de forma senoidal con magnitudes máximas y mínimas aproximadas de 0.3 y -0.3 respectivamente. Observando en detalle la gráfica, el valor máximo no coincide con el valor mínimo, puesto que estos deben ser iguales pero con signo contrario, para coincidir con la forma senoidal perfecta, por lo tanto es necesario determinar un offset y escalar la señal para que coincida con un seno.

Primero se calcula el offset necesario, para ello se toma el valor máximo y el valor mínimo y se encuentra el promedio:

$$\frac{-0.2632 + 0.3219}{2} = 0.02935$$

El valor obtenido se resta en cada una de las mediciones (Se resta ya que el valor absoluto del máximo es mayor al del mínimo) y con esto se garantiza que el valor máximo sea igual que el mínimo pero opuesto.

$$\begin{aligned} -0.2632 - 0.02936 &= -0.29255 \\ 0.3219 - 0.02936 &= 0.29255 \end{aligned}$$

Finalmente se toma uno de los puntos máximos, y se encuentra la escala para que este sea 1, así:

$$\frac{1}{0.29255} = 3.418219$$

Luego de restarle el offset y escalar los valores, la gráfica con estos valores se muestra en la figura 19.

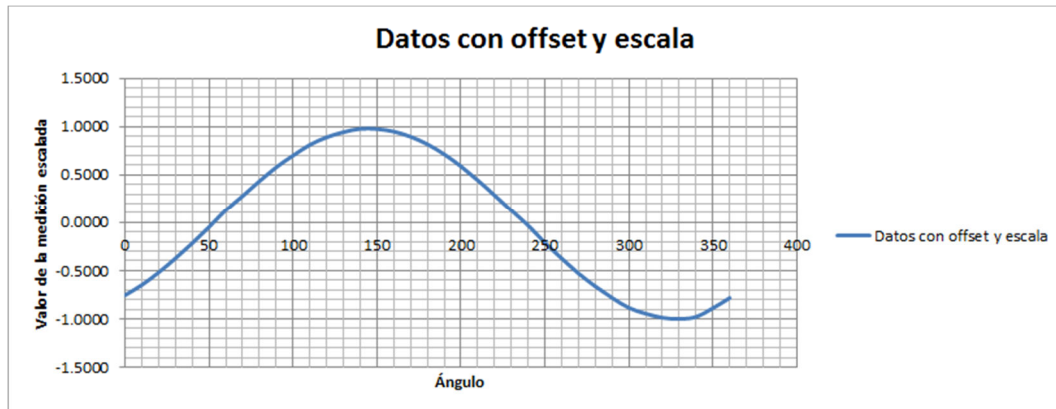


Figura 19. Curva de Caracterización ajustada del magnetómetro del sensor YEI3.

Fuente: Autores

5.3.2. Ubicación geoespacial

El GPS utilizado en este proyecto obtiene la Longitud, Latitud y Altitud con un error máximo de tres metros, la altitud puede ser despreciada debido a que con los otros dos datos es posible obtener la ubicación y con menos datos se logra una mayor velocidad de procesamiento. En un principio se consideró que este proceso se llevaría a cabo para que en la misma habitación solo sea necesario realizar todo el proceso de filtrado de muros una vez y la próxima vez que entre allí pueda tener un mapa precargado con los muros obtenidos para que solo se tenga que buscar nuevos obstáculos y no exista la necesidad de procesar nuevamente el algoritmo completo, ahorrando así recursos y tiempo de ejecución; pero en la práctica se observó que los módulos GPS no obtienen una medición precisa debido a que el rebote de la señal en interiores genera errores que aumentan el grado de incertidumbre.

5.3.3. Detección de vértices y cambios representativos en la dirección.

A simple vista los datos son lo suficientemente claros para poder ubicarse dentro de un espacio cerrado, pero para el microcontrolador son solo una serie de puntos

ubicados en diferentes coordenadas que no pueden conformar un mapa, por lo tanto es necesario pasar estos datos por algoritmos que obtengan las características del espacio que se está muestreando.

El primer paso para obtener estas características es definir cuáles son las esquinas y los puntos en los que pueda iniciar o terminar un obstáculo, para esto el algoritmo busca los vértices y los puntos en los que los datos tengan un cambio brusco de pendiente o de dirección, esta extracción de características se puede observar en la figura 20, en donde las cruces de color rojo indican los puntos en los que el cambio de pendiente es muy pronunciado.

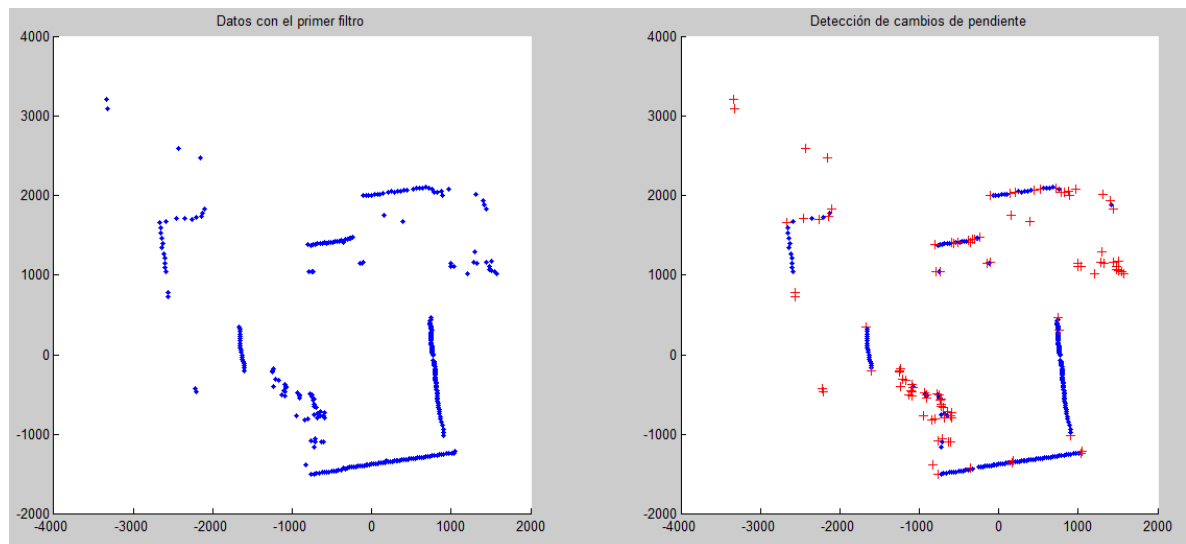


Figura 20. Vértices y puntos donde hay un cambio brusco de pendiente (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores

Actualmente los métodos más utilizados para este fin son: RANSAC [17], K-Means [18] y SPIKES [14] pero como puede observarse en sus respectivas publicaciones, son algoritmos recursivos que requieren de un uso intensivo de pila y memoria, al igual que tiempo de ejecución debido a la gran cantidad de recursiones que se realizan, lo que conlleva a que la ejecución en un microcontrolador no es la mejor. Por esta razón en este proyecto se expone un algoritmo alternativo para ser implementada en microcontroladores, dado que no es recursivo sino iterativo y las

operaciones de punto flotante son finitas, independientemente de la complejidad del entorno mapeado por el LIDAR.

Teniendo en cuenta que la incertidumbre en la medición obtenida del sensor es del orden de tres centímetros y que el módulo se pretende utilizar en plataformas robóticas móviles, no es estrictamente necesaria una precisión milimétrica, por lo tanto, este algoritmo favorece más la velocidad y el uso limitado de memoria que la precisión obtenida en el análisis por ajuste por mínimos cuadrados, haciendo que el método desarrollado en este proyecto pueda obtener un vértice o pendiente pronunciada aproximada de forma más ágil y navegar a una distancia prudente de un obstáculo.

La detección de vértices implementada hace el análisis de los puntos obtenidos por el LIDAR tomando grupos de tres puntos consecutivos en el orden del barrido angular, se presume que el punto central hace parte de la misma recta en la que se encuentran el punto anterior y el punto siguiente si su distancia a dicha recta es inferior a cierto umbral. Una forma computacionalmente eficiente de establecer lo anterior es calcular la diferencia de la longitud del segmento ac y compararla con la suma de los segmentos ab y bc , mientras más distante se encuentre el punto b mayor será la diferencia, de esta forma se discriminan los puntos que hacen parte de una línea recta y los puntos con cambios muy pronunciados de dirección que indican el inicio y fin de las líneas rectas. En la figura 21 se observa un acercamiento de las mediciones del sensor LIDAR a una superficie irregular, desde la cual se puede mostrar gráficamente algunos de los segmentos que son comparados en este algoritmo.

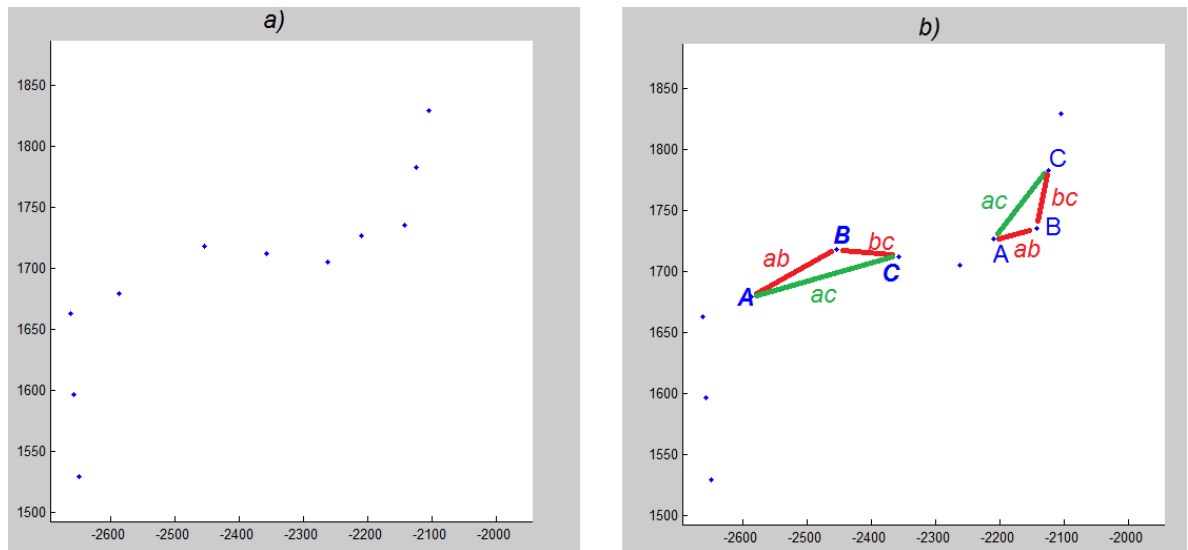


Figura 21. a) Acercamiento de datos del LIDAR. b) Representación gráfica de los segmentos a comparar. (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores.

Este algoritmo realiza este análisis 360 veces en el peor de los casos, teniendo en cuenta que el LIDAR arroja idealmente 360 mediciones correctas en un barrido. En la figura 22 se observa el acercamiento a una de las secuencias de puntos obtenidas del LIDAR, en esta imagen es posible apreciar que el algoritmo descartó todos los puntos intermedios, aunque no estuvieran perfectamente alineados, para marcar únicamente los puntos en los que el cambio en la dirección es visiblemente significativo.

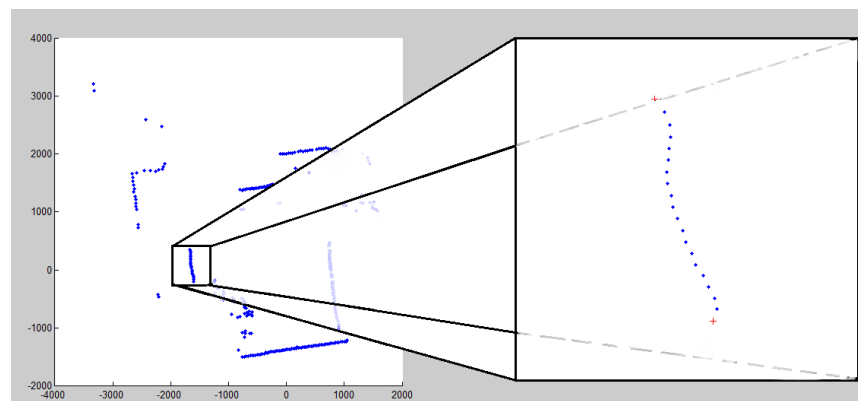


Figura 22. Acercamiento a secuencia de puntos (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores

Una vez discriminados los vértices de los puntos intermedios se procede a hacer la segmentación, este proceso busca simplificar la información reemplazando conjuntos de puntos por ecuaciones de rectas que los representen. Para esto se hace un análisis en mismo orden de barrido angular conectando los puntos terminales detectados en el paso anterior, en esta etapa se aplica un filtro adicional que únicamente conecta los puntos cuya variación de distancia, comparada con la variación angular (Llamémoslo pendiente polar) se encuentre por debajo de un umbral predeterminado, con esto se busca excluir los segmentos de recta que se encuentran en una orientación similar a la del ángulo de medición, pues presentan una mayor probabilidad de contener información errónea y evitan trazar líneas entre puntos entre los cuales el sensor no tiene datos suficientes para determinar si existe una pared u obstáculo. Este trazado de líneas se observa en la figura 23.

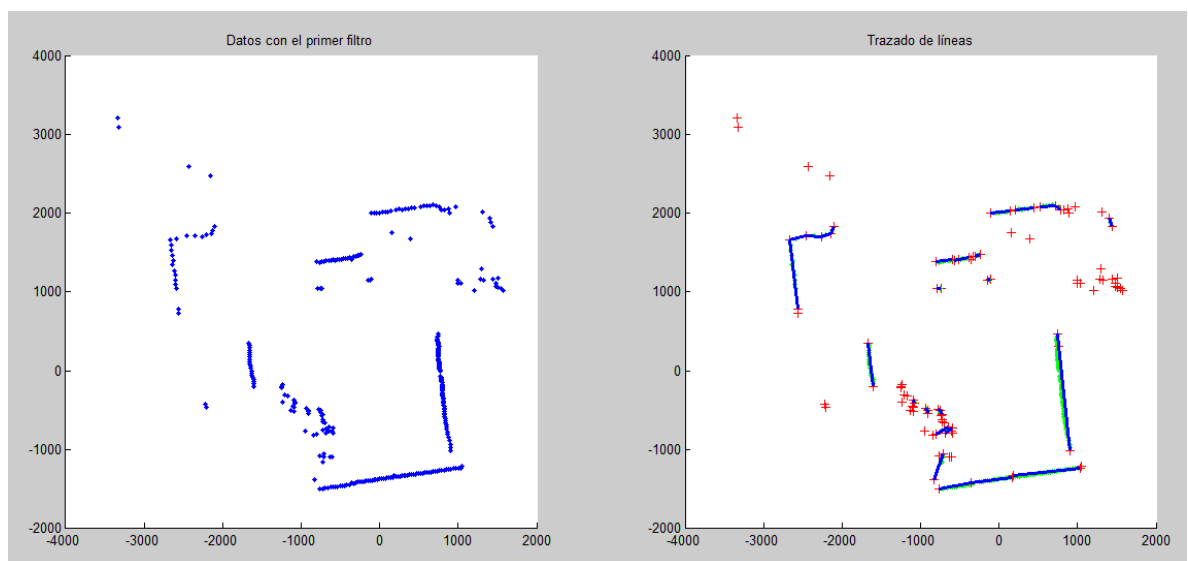


Figura 23. Trazado de líneas (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores

La información resultante de este proceso es un mapa simplificado en donde se han reemplazado puntos por rectas las cuales describen de una mejor manera la presencia de obstáculos detectados en la dirección de la medición y reducen

notablemente la cantidad de datos, pues se pasó de tener 360 mediciones a menos de 50 líneas; esta cantidad puede reducirse aún más aumentando el umbral de la comparación de la variación de mediciones con ángulos.

5.3.4. Extracción de características

Se definieron como características notables los segmentos de recta de mayor longitud, puesto que se considera que estos serán visibles total o parcialmente con mayor probabilidad desde cualquier ubicación en el mismo espacio, coincidiendo estos normalmente con los muros o los obstáculos grandes del entorno.

5.3.5. Selección del origen del sistema de coordenadas unificado.

Para escoger el sistema de coordenadas unificado se analizó la intersección de la proyección de las rectas de las características obtenidas en el paso anterior, que corresponden a esquinas del espacio analizado. En la figura 24 se representan con círculos negros las intersecciones de las proyecciones de las rectas más pronunciadas. Se dio mayor importancia a esta información puesto que se puede inferir matemáticamente siempre que haya visibilidad parcial de los muros que la constituyen.

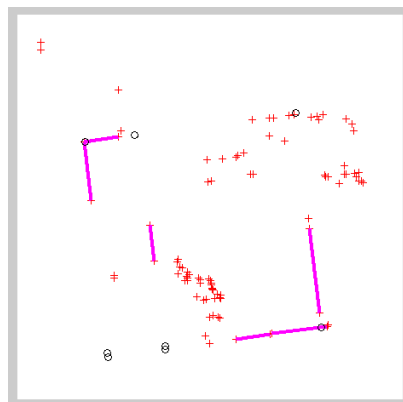


Figura 24. Intersección de la proyección de las rectas más pronunciadas (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores

El algoritmo calcula la intersección de todas las rectas encontradas y filtra todas las que formen un ángulo inferior a 70 grados, este ángulo puede cambiarse, pero para favorecer las intersecciones de muros ortogonales y desechar las intersecciones de rectas con ángulos obtusos, se consideró pertinente el valor presentado anteriormente, además se escogen las intersecciones entre los puntos más lejanos. En la figura 25 se muestran las rectas que el algoritmo obtiene luego de realizar este filtro.

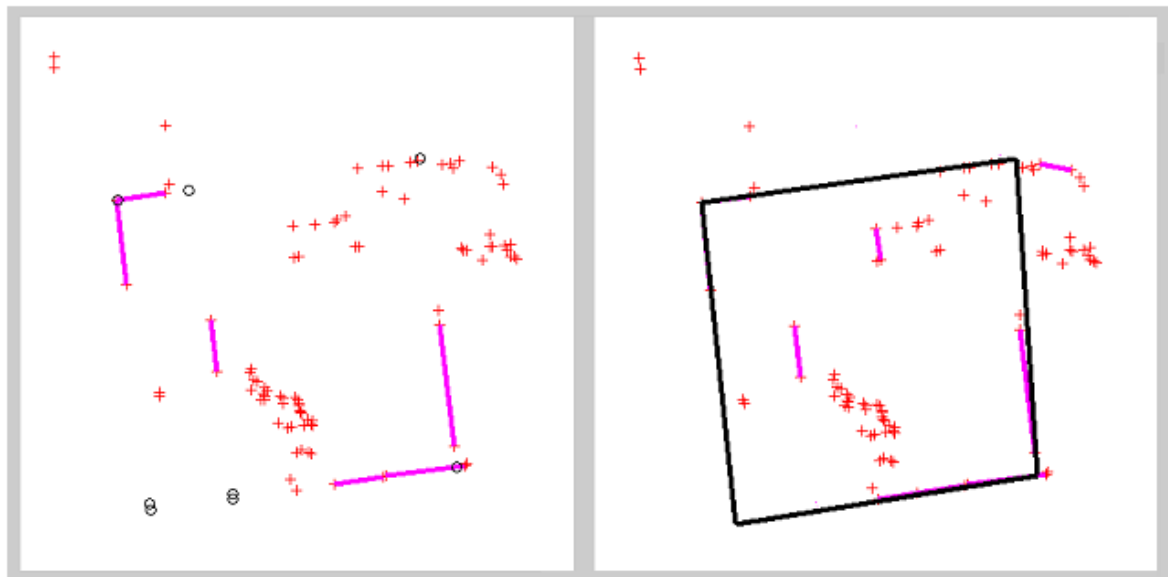


Figura 25. Trazado de líneas de intersección (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores.

Con las intersecciones obtenidas se toma la media de las distancias máximas tanto verticales como horizontales de las características del plano orientado hacia el norte como el origen del sistema de coordenadas, de modo que cualquier robot ubicado en el mismo espacio sin importar la posición pueda inferir el origen haciendo el mismo análisis. Esta posición se representa en la figura 26 con el rombo de color cian.

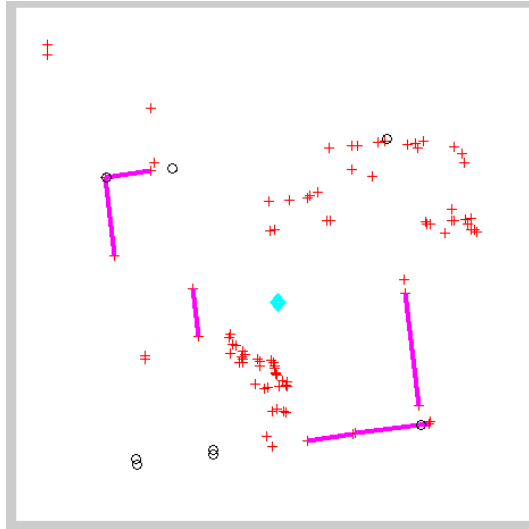


Figura 26. Origen del sistema de coordenadas (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores

En un sistema cooperativo los robots pueden trabajar de manera conjunta para obtener un mapa del entorno ya que cada robot puede aportar al mapa elementos visibles desde su perspectiva. El marco de coordenadas unificado es válido para cualquier robot en el mismo salón. Cada salón tendrá entonces su propio marco de coordenadas unificado. Se puede discriminar el salón actual utilizando un análisis de correlación cruzada. El algoritmo generado para obtener el mapa se muestra en forma de diagramas de flujo en el anexo L.

5.3.6. Trazado del mapa según el sistema de coordenadas unificado

Cuando se obtienen mediciones del mismo espacio pero desde diferentes orientaciones y posiciones es necesario que las coordenadas del mapa obtenido por el robot sean coincidentes, de este modo cualquier robot sin importar la posición y orientación podrá hacer uso de la información del mapa pues esta será válida dentro del mismo espacio. Para unificar el sistema de coordenadas se hizo una traslación de coordenadas para que el centroide del área, hallado en el paso

anterior, corresponda al origen del sistema. Esto se realizó por medio de una simple resta que cambia la posición de todos los puntos obtenidos por la correspondiente con la referencia encontrada:

$$Pos_{finalX} = Pos_{inicialX} - X_{0calculado} \quad (5.1)$$

$$Pos_{finalY} = Pos_{inicialY} - Y_{0calculado} \quad (5.2)$$

5.3.7. Trazado de rutas

Para obtener la ruta entre el punto inicial y final de la trayectoria el primer paso fue generar un espacio de operación, teniendo en cuenta que el rango del radar es de 12 metros en ambas direcciones, se consideró un espacio de 14 metros para fines de visualización y que, sin importar el tamaño del lugar donde se encuentre, siempre sea posible observar el mapa completo.

El espacio generado se dividió en una retícula de 35 centímetros de modo que el robot fuese capaz de pasar sin correr el riesgo de chocar con algún obstáculo; el tamaño de la retícula se determinó teniendo en cuenta que el robot tiene un radio aproximado de 30 centímetros, lo que le permite tener 5 centímetros de holgura a cada lado; la cuadrícula final tiene 40 filas y 40 columnas, esta división se observa en la figura 27. Se almacenó la retícula en forma de una matriz de 1600 bytes, en la que cada posición tiene un valor significativo que representa su estado, este valor se muestra en la tabla 6.

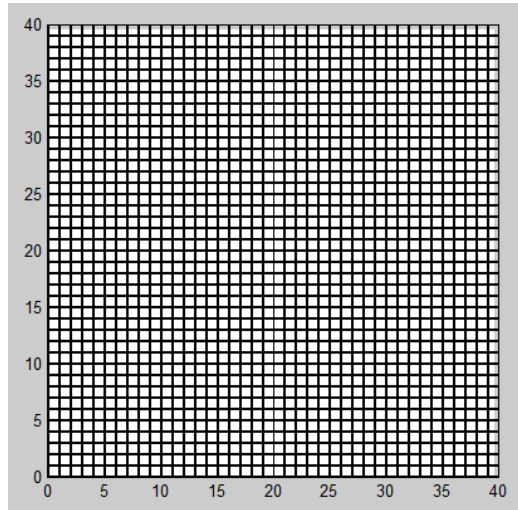


Figura 27. Espacio de operación del robot dividido en cuadrados más pequeños

Fuente: Autores

Valor	Estado
0	Espacio ocupado
1	Espacio disponible
2	Espacio por donde pasa la ruta
3	Espacio posible para la ruta

Tabla 6. Valores posibles de la matriz

Fuente: Autores

Con el espacio de operación definido, el siguiente paso consistió en marcar en la cuadrícula el lugar en donde están los obstáculos y paredes que se obtuvieron en el mapa anteriormente; para poder hacer esto se escribió un algoritmo que, a partir de las coordenadas de los puntos generados por el LIDAR, obtiene la fila y columna en la que se encuentra el punto dentro de la matriz generada, si se encuentra un

punto, el algoritmo marca como ocupado esa posición en la matriz, de esta forma no se corre el riesgo de que el robot trate de ocupar esa posición. En la figura 28 se observa como esta función marca un los puntos dentro de la retícula.

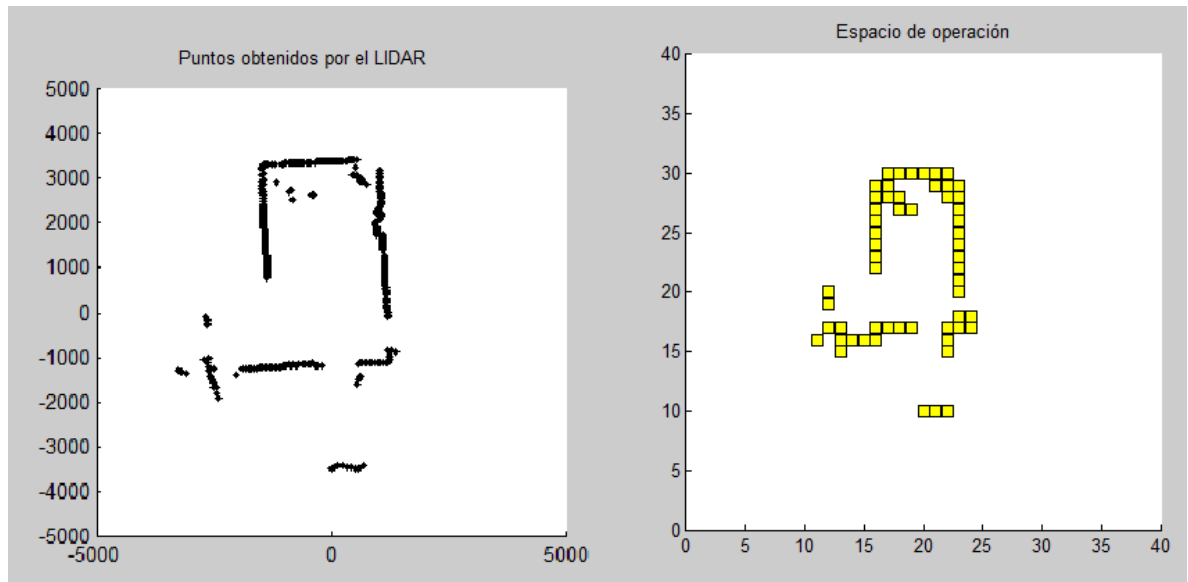


Figura 28. Espacio de operación del robot. (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores

En el último paso se implementó un algoritmo de navegación no recursivo para la evasión de obstáculos por la derecha, el cual de forma iterativa aproxima el vector de navegación desde el punto de partida hasta el punto de destino. El algoritmo evalúa el ángulo del vector calculado, como se muestra en la figura 29, en donde el robot se encuentra en el centro del cuadro azul y el punto final es el cuadro rojo, el cual puede estar en cualquier lugar del espacio navegable. En la imagen se aprecian ocho conos de dirección numerados, en uno de los cuales se encuentra el vector calculado, representado por una flecha azul.

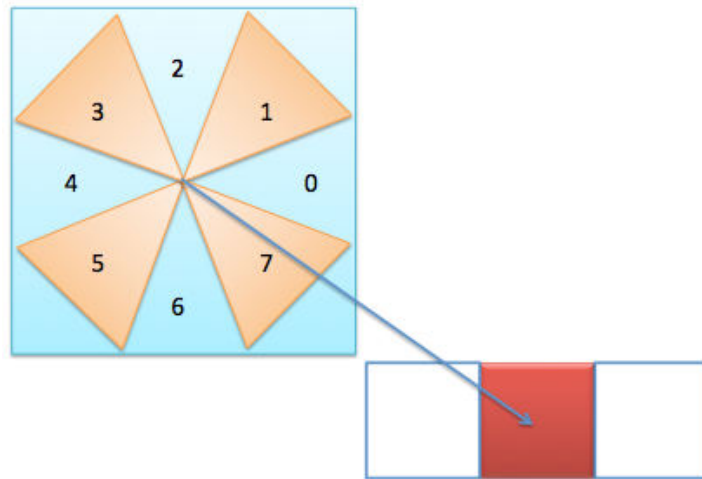


Figura 29. Dirección del vector según el ángulo.

Fuente: Autores

El número del cono por el cual pasa el vector de dirección determina cual es el siguiente cuadrado circundante a la posición actual por donde debe continuar la trayectoria para llegar al destino como se ilustra en la figura 30.

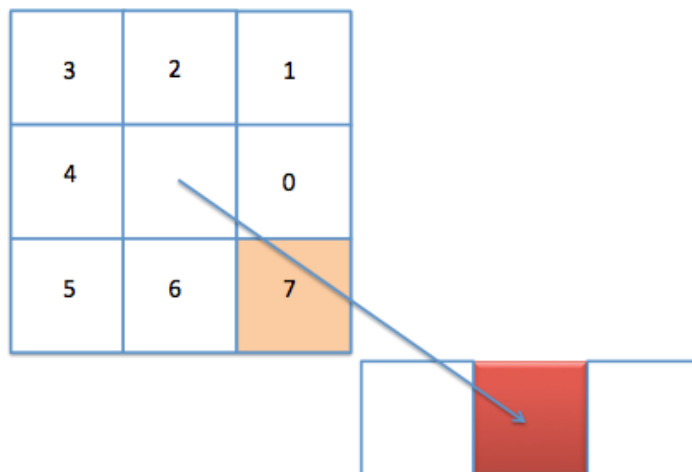


Figura 30. Siguiendo nodo a navegar.

Fuente: Autores

En el ejemplo anterior, idealmente el recuadro siete se encuentra desocupado, en este caso se marca y se convierte en el nuevo punto de partida para calcular un nuevo vector. Si por el contrario, este nodo se encontrara marcado como ocupado entonces se evalúa si el siguiente espacio en el sentido horario está disponible y en caso tal se marca y se selecciona como el nuevo punto de partida. Se puede iterar este proceso hasta hallar un nodo desocupado o agotar los recuadros circundantes. Cuando se han agotado los espacios circundantes sin encontrar salida, el algoritmo se detiene pues no hay camino hasta el destino por la ruta evaluada.

En la figura 31 se ilustra la navegación sin obstáculos hasta un destino, en donde se parte de la esquina superior derecha con dirección al recuadro rojo, en cada paso se itera el proceso y se calcula un nuevo vector hasta el destino, representado por una flecha azul; la flecha naranja representa el vector de movimiento escogido por el algoritmo.

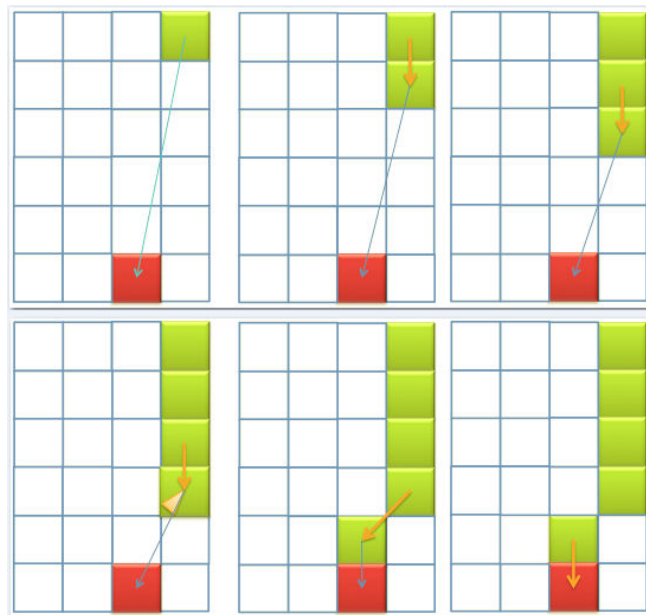


Figura 31. Navegación sin obstáculos.

Fuente: Autores

En el siguiente ejemplo se ha introducido un obstáculo en el espacio de navegación, el algoritmo lo evadirá buscando salida en el sentido horario desde la posición del robot, en la figura 32 se ilustra el obstáculo en color morado.

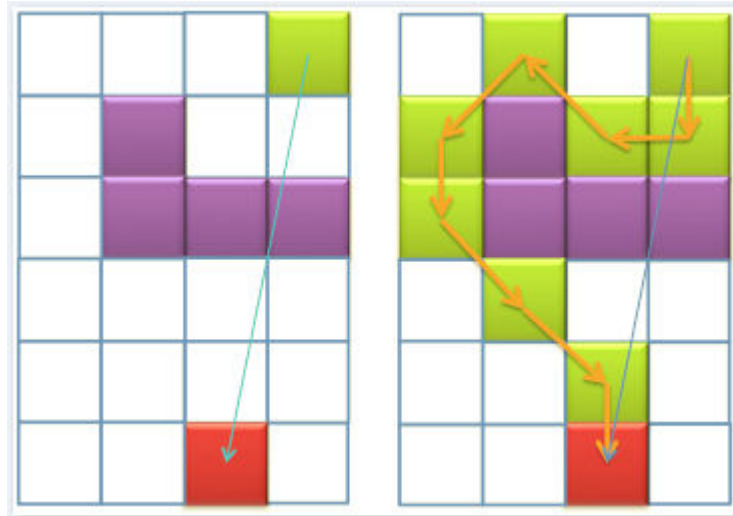


Figura 32. Navegación con obstáculos.

Fuente: Autores

5.4. Diseño mecánico

Para el diseño de la plataforma robótica móvil hay que tener en cuenta que uno de los objetivos a largo plazo del proyecto es la modularidad del robot, por lo tanto esta fue la prioridad en el concepto del diseño, también se buscó la mayor simplicidad posible, así como la menor cantidad de piezas diferentes. A partir de estos requerimientos se propone una solución basada en el diseño de dos piezas diferentes para que, con la combinación adecuada de varias de estas, pueda formarse el chasis del robot. En la figura 33 se muestran los diseños realizados para la construcción del robot.

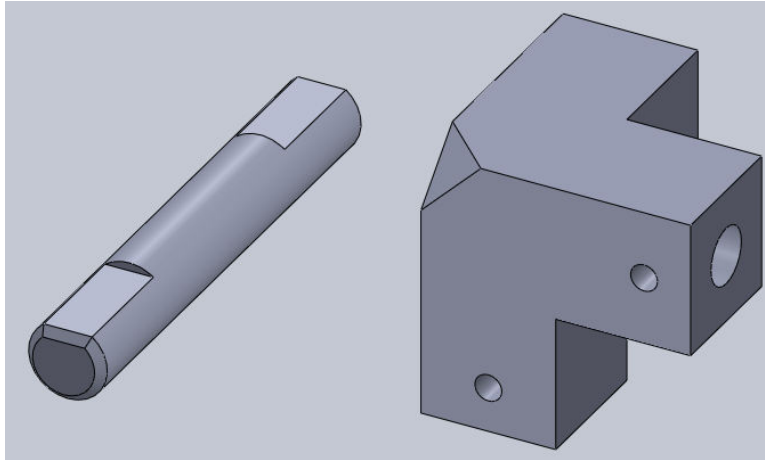


Figura 33. Diseño de las piezas de la plataforma robótica (Escala diferentes)

Fuente: Autores

Con estos diseños realizados se generó un ensamble para tener una clara idea de la forma final del chasis del robot antes del mecanizado de las piezas y la construcción final de la plataforma. En la figura 34 se puede observar el ensamble realizado.

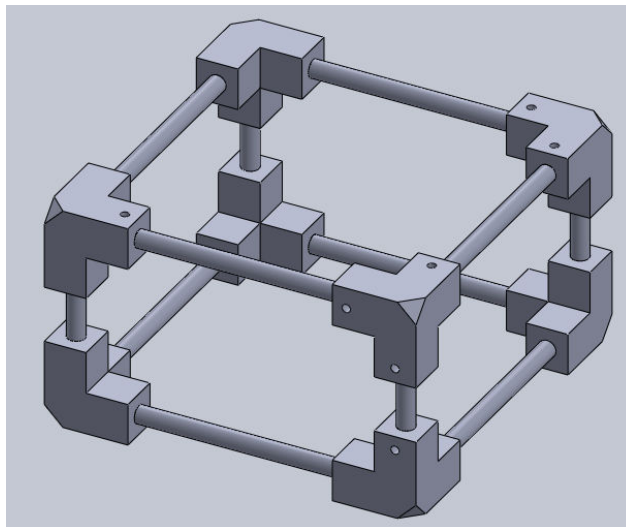


Figura 34. Ensamblaje del chasis del robot

Fuente: Autores.

Para cumplir con el fin de la modularidad se realizan barras de diferentes longitudes así solo será necesario cambiar las barras y la plataforma tendrá tamaño y capacidad volumétrica diferentes, permitiendo así la adaptación a necesidades distintas según el propósito del robot.

5.4.1. Análisis de tensión y deformación

Para la construcción se considera que el material apropiado es el aluminio, debido a las propiedades mecánicas que posee, tales como su resistencia a la corrosión y la baja densidad comparada con otros metales como el acero, lo que hace que la estructura final sea liviana. Partiendo de esta consideración se efectuaron análisis de esfuerzos y deformaciones para determinar la idoneidad del material.

Para verificar que la pieza es capaz de soportar la fuerza o presión en un punto específico, sin comprometer su integridad estructural se llevó a cabo un análisis de tensión de Von Mises, el cual permite conocer si el material supera su límite elástico bajo la presión aplicada. Utilizando el asistente SimulationXpress de Solidworks se realizó dicho análisis.

Teniendo en cuenta que el peso del robot va a ser la única carga sobre la estructura, las barras verticales estarán soportando esta fuerza en su parte superior, se realizó la simulación con la barra anclada desde la base y con la fuerza actuando hacia abajo con una magnitud de 50N, magnitud mayor a la real puesto que el robot pesa aproximadamente tres kilogramos; el resultado de este análisis se muestra en la figura 35, donde se puede observar que el valor máximo al que estará sometida la pieza es el 6.96% del límite elástico del material, por lo tanto el diseño es correcto, tanto en la forma como en el material seleccionado.

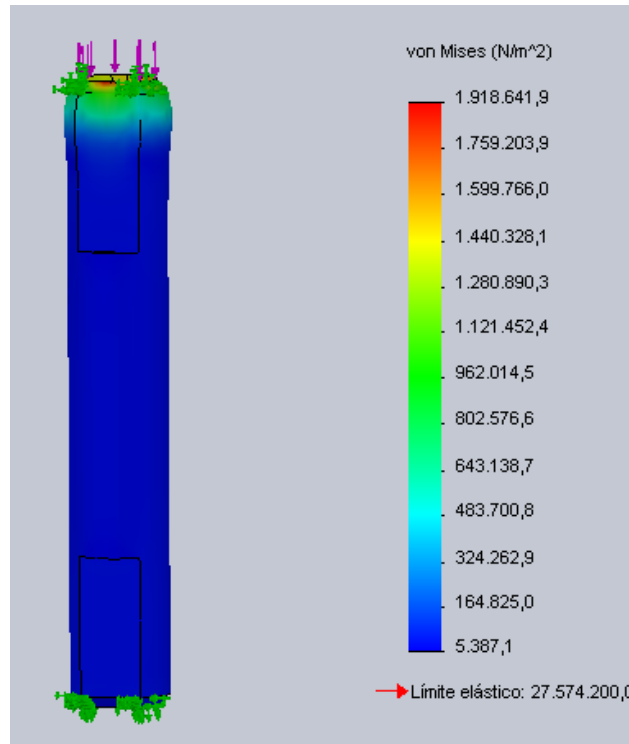


Figura 35. Análisis de la Tensión de Von Mises en las barras de la estructura.

Fuente: Autores.

Adicional a la tensión de Von Mises, se realizó una prueba de desplazamiento, para conocer cuánto será la máxima deformación que sufrirá la pieza, los resultados de este análisis se observan en la figura 36, donde se puede apreciar que la deformación máxima está en el orden de nanómetros, lo cual da mayor solidez en la decisión tomada en el diseño.

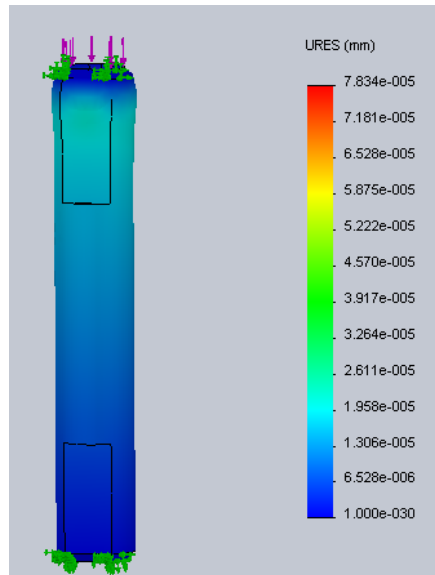


Figura 36. Análisis de deformación en las barras de la estructura.

Fuente: Autores.

El análisis realizado a las barras es el mismo que se utilizó para los vértices del chasis, en las figuras 37 y 38 se muestran los resultados obtenidos de estos análisis, en los que, al igual que las barras, se comprueba que la decisión en cuanto al diseño y el material es acertada ya que no soportará más del 0.4% del límite elástico del aluminio y la deformación está en el orden de nanómetros.

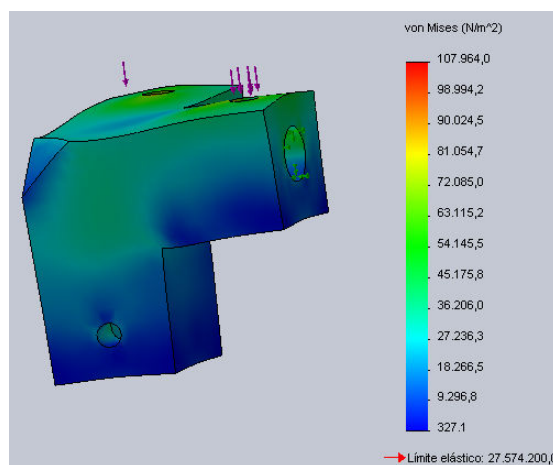


Figura 37. Análisis de la Tensión de Von Mises en los vértices de la estructura.

Fuente: Autores

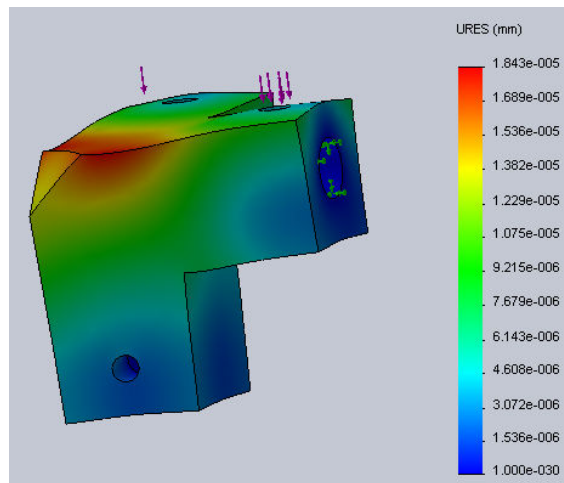


Figura 38. Análisis de deformación en los vértices de la estructura.

Fuente: Autores.

6. RESULTADOS

Con el desarrollo de las primeras dos fases de este proyecto se obtuvieron los siguientes resultados:

Se construyó un módulo de autolocalización y navegación para espacios interiores, el cual, es independiente del sistema de locomoción puesto que puede ser utilizado, incluso, sin ninguna plataforma móvil, este módulo es capaz de obtener un mapa del lugar en el que se encuentra, siempre que este no sobrepase sus límites, que son de seis metros en cada dirección, así como la altura a la que se encuentre ya que solo observará los obstáculos posicionados a una altura igual a la que estén el receptor y el emisor del sensor laser. Se efectuaron pruebas en múltiples entornos obteniendo resultados consistentes en cada una de ellas. El margen de error es de $\pm 2\%$ a la distancia de medición. Se encontró una limitación cuando el objeto que está sensando es de color negro, ya que los objetos de este color no reflejan lo suficiente la luz generada por el láser y por lo tanto el receptor no puede calcular el tiempo de vuelo del haz de luz; para superar esta limitación se empleó un sensor ultrasónico en la dirección de avance, de esta forma el navegador dará la orden de detención al encontrar un obstáculo en el rango de 30 centímetros que no haya sido observado por el radar laser. En la figura 42 se puede observar el módulo de navegación y autolocalización.



Figura 39. Módulo de navegación y autolocalización.

Fuente: Autores.

La rutina de mapeo desarrollada, logró generar representaciones detalladas del espacio consistentes con el área observada, conservando un margen de error de $\pm 2\%$ a la distancia de medición, independientemente de las condiciones de iluminación del entorno.

El algoritmo de extracción de características es capaz de hacer el análisis del mapa en un tiempo promedio de 1.5 milisegundos para traducir la nube de 360 puntos en su equivalente en segmentos de línea utilizando un microcontrolador PIC32MX695F512H a una velocidad de 84 MHz. Cada línea representa una reducción de la cantidad de información a analizar y además aporta información adicional requerida para poder determinar el área del entorno. El umbral para el filtro de detección de muros se basó en la longitud del segmento, las pruebas realizadas indicaron que el umbral con el resultado más consistente es de 50 centímetros, simplificando la información del área a menos de 10 segmentos de línea.

Se logró implementar la detección de líneas utilizando un algoritmo propio con resultados efectivos para datos obtenidos por un radar laser, la naturaleza no recursiva de este algoritmo permite reducir el uso de la pila de memoria, predecir el número de iteraciones a realizar y por consiguiente el tiempo de ejecución, lo cual lo hace idóneo para la implementación en microcontroladores.

Los vértices obtenidos a partir del cómputo de los segmentos característicos logran reflejar de modo acertado la ubicación de las esquinas del espacio analizado. La ventaja significativa de este método es que permite concluir la existencia de las esquinas sin que estas sean visibles desde la posición del LIDAR. El análisis de la información proporcionada por los vértices permitió determinar el centro probable del área de forma consistente sin importar la ubicación desde donde se toma la medición. Al comparar el centro calculado a partir de diferentes mediciones se obtuvo un margen de error inferior a 10cm. Este algoritmo funciona correctamente desde que se puedan determinar mínimo cuatro esquinas a partir del cómputo de segmentos. En la figura 43 se muestra como este algoritmo encuentra un centro en cuatro mediciones diferentes dentro de un mismo espacio pero con el módulo ubicado en lugares diferentes, en la imagen el rombo cian indica el centro calculado y el punto negro la ubicación del módulo para esa medición.

El algoritmo de trazado de ruta se evaluó con ambientes generados de modo aleatorio en Matlab y también en ambientes reales con mediciones obtenidas por el LIDAR. El algoritmo es capaz de resolver la ruta de navegación siempre que no existan rutas ciegas, es decir, que todos los espacios alrededor del punto de partida estén marcados como ocupados.

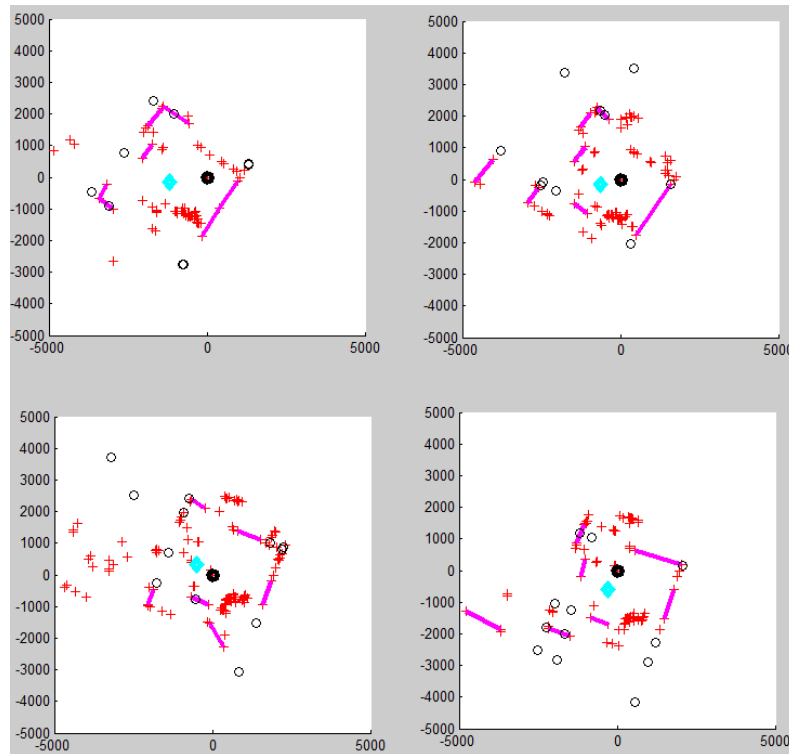


Figura 40. Cálculo del centro de un espacio desde ubicaciones diferentes. (Unidades en milímetros)

Fuente: Autores.

La plataforma robótica móvil tiene la capacidad de funcionar de manera inalámbrica gracias a las baterías LiPo utilizadas, además cuenta con un sistema de locomoción conformado por tracción de tipo oruga en el que los motores tienen encoders magnéticos, con el cual es posible controlar la velocidad y la distancia que avanzan o retroceden. La plataforma tiene un chasis conformado por barras y vértices de aluminio, los cuales pueden contener en su interior los elementos electrónicos necesarios para su funcionamiento como lo son el puente H o el microcontrolador encargado del movimiento.

7. CONCLUSIONES

A continuación se describen las conclusiones obtenidas después del desarrollo de las fases número uno y dos del proyecto.

Se demuestra durante el desarrollo del proyecto que la rutina de mapeo puede ser realizada, con un margen de error de $\pm 2\%$, con un radar laser (LIDAR), de esta forma se pueden reemplazar sensores para la medición de distancia unidireccionales como el ultrasónico y el infrarrojo obteniendo resultados muy precisos y simplificando procesos adicionales que son necesarios para la obtención de un mapa.

La interpretación de un mapa de puntos puede ser realizado por operaciones sencillas computacionalmente, tales como la suma, resta y la raíz cuadrada, un espacio promedio se puede reducir a menos de 20 segmentos de línea, lo cual provee un grado de abstracción de la información que permite reducir el número de cálculos realizados.

Las restricciones en el campo de visibilidad del sensor que impiden la obtención de características notables del entorno, como son los vértices del recinto, pueden ser superadas matemáticamente a partir del cómputo de la intersección de los segmentos de línea que representan las paredes o límites. Esta información resulta particularmente útil para determinar el centroide del espacio de operación, el cual es consistente desde diferentes lugares o puntos de observación dentro de la misma área, lo que permite unificar el marco de referencia para las mediciones.

El módulo de navegación es capaz de resolver de forma autónoma la ruta desde un origen hasta un destino en el espacio. El algoritmo de evasión implementado y evaluado es capaz de sortear satisfactoriamente los obstáculos sin perder la noción

del destino final. Esta función no está diseñada para resolver un laberinto, puesto que no evalúa todas las rutas posibles, sin embargo las pruebas efectuadas demuestran que en un recinto promedio cerrado con obstáculos en su interior es capaz de encontrar el camino acertadamente, aunque este no necesariamente es el más corto. Se sugiere para un trabajo posterior, la implementación de un algoritmo para optimizar el trazado de la ruta evaluando múltiples alternativas.

Los algoritmos utilizados para el mapeo, extracción de características, autolocalización, trazado de rutas y navegación, al ser algoritmos no recursivos, son ideales para ser utilizados en microcontroladores, esto permite disminuir el tamaño de la pila de programa y su implementación en sistemas embebidos, de modo que estos puedan realizar estas tareas de forma autónoma.

El análisis estructural y el diseño del chasis del robot demuestran que puede contener de forma segura una carga en su interior, no obstante para la implementación en ambientes no controlados se debe contar con un diseño orientado a la interacción con humanos.

El módulo de autolocalización y navegación en espacios interiores funciona sin necesidad de estar conectado con alguna plataforma robótica móvil específica, lo que lo hace idóneo para su utilización en futuros trabajos de investigación que incorporen un componente de navegación.

Finalmente, cabe destacar que el algoritmo diseñado e implementado para la extracción de características, es un algoritmo realizado por los autores, el cual utiliza operaciones de bajos recursos computacionales con resultados concisos y apropiados para esta aplicación.

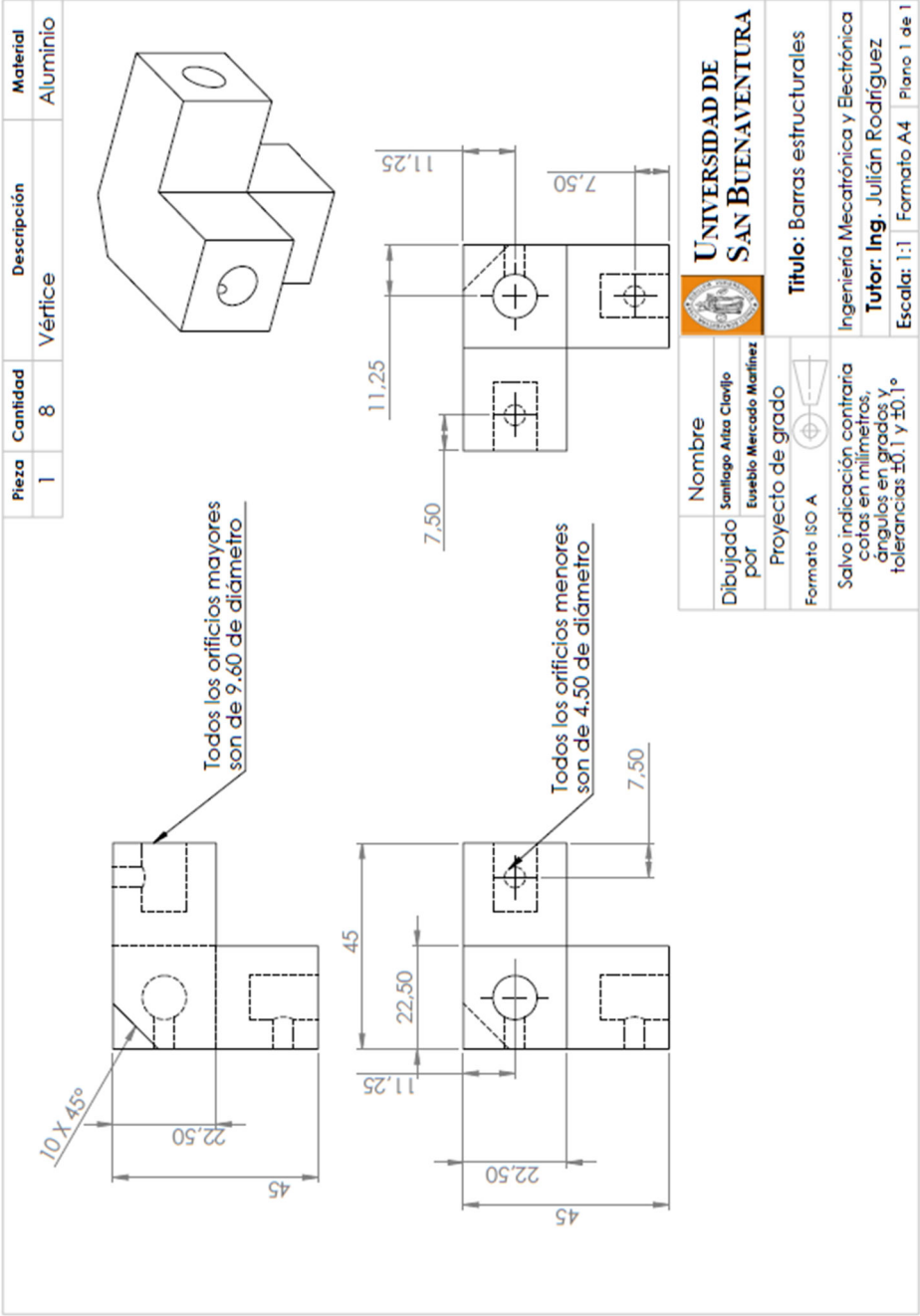
BIBLIOGRAFÍA

- [1] O. Toedter, A.W. Koch "A simple laser-based distance measuring device" *Measurement*, Volume 20, Issue 2, Pages 121–128. 2000
- [2] Gutmann, J.-S., Weigel, T., Nebel, B. "A fast, accurate and robust method for self-localization in polygonal environments using laser range finders" *Advanced Robotics*, 14 (8), pp. 651-667. 2000
- [3] Yong-Ju Lee, Byung-Doo Yim, Jae-Bok Song "Mobile robot localization based on effective combination of vision and range sensors" *International Journal of Control, Automation and Systems*. Volume 7, Issue 1, pp 97-104. 2009
- [4] Seo-Yeon Hwang, Jae-Bok Song "Monocular Vision-Based SLAM in Indoor Environment Using Corner, Lamp, and Door Features From Upward-Looking Camera" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Volume: 5 Issue: 10. 2011
- [5] M.M. Rashid , Nor SaidahbtMohdZain, Faridatunbinti Mohammad Zain "Development of Omni Directional Mobile Robot Navigation System using RFID for Multiple Object" *Conference on Modelling, Identification and Control*. Volume 3, 2012, Pages 474–480. 2012
- [6] Guoquan, H. Truax, R. Kaess, M. Leonard, J.J. "Unscented iSAM: A consistent incremental solution to cooperative localization and target tracking" *2013 European Conference on Mobile Robots (ECMR)*. 2013
- [7] Luo, R.C. Chun Chi Lai. "Multisensor Fusion-Based Concurrent Environment Mapping and Moving Object Detection for Intelligent Service Robotics" *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2014
- [8] M. Suruz Miah, Wail Gueaieba, "Mobile robot trajectory tracking using noisy RSS measurements: An RFID approach" *ISA Transactions* Volume 53, Issue 2. 2014
- [9] Bermúdez, G. Pérez M. Beltrán E. López L. Cruz J. "Modelo Cinemático de un robot móvil implementado con LEGO NXT para un sistema de localización indoor diseñado en Labview" 2012

- [10] Zapata, O. "Diseño de un esquema de coordinación de comportamientos para la navegación de una plataforma robótica móvil" 2013
- [11] Página web de la Universidad Politécnica de Cartagena, consultada en: <http://www.upct.es/saladeprensa/notas.php?id=871>
- [12] Pallás R. Sensores y acondicionadores de señal. Editorial Marcombo, 2004
- [13] Wang Z. Simultaneous Localization and Mapping: Exactly Sparse Information Filters. World Scientific, 2011
- [14] Riisgaard, S., and Blas, M. R. A tutorial approach to simultaneous localization and mapping, 2004
- [15] Welch G., Bishop G. An Introduction to the Kalman Filter. 2001
- [16] Hacking the Neato XV-11. Consultado en octubre del 2014. Disponible en: <http://xv11hacking.wikispaces.com/home>
- [17] M. A. Fischler, R. C. Bolles. Random Sample Consensus: A Paradigm for Model Fitting with Applications to Image Analysis and Automated Cartography. Comm. of the ACM, Vol 24, pp 381-395, 1981.
- [18] Wagstaff K., Cardie C., Rogers S., Schroedl S. "Constrained K-means Clustering with Background Knowledge" Proceedings of the Eighteenth International Conference on Machine Learning, 2001.

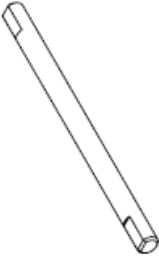
ANEXOS

ANEXO A. Plano del vértice del chasis.



Fuente: Autores

ANEXO B. Plano de las barras del chasis



Pieza	Cantidad	Descripción	Material
1	30	Barras estructurales	Aluminio



Nombre

Dibujado por

Proyecto de grado

Sanilago Altza Clarillo

Eusebio Mercado Martinez

Formato ISO A

UNIVERSIDAD DE

SAN BUENAVENTURA

Título: Barras estructurales

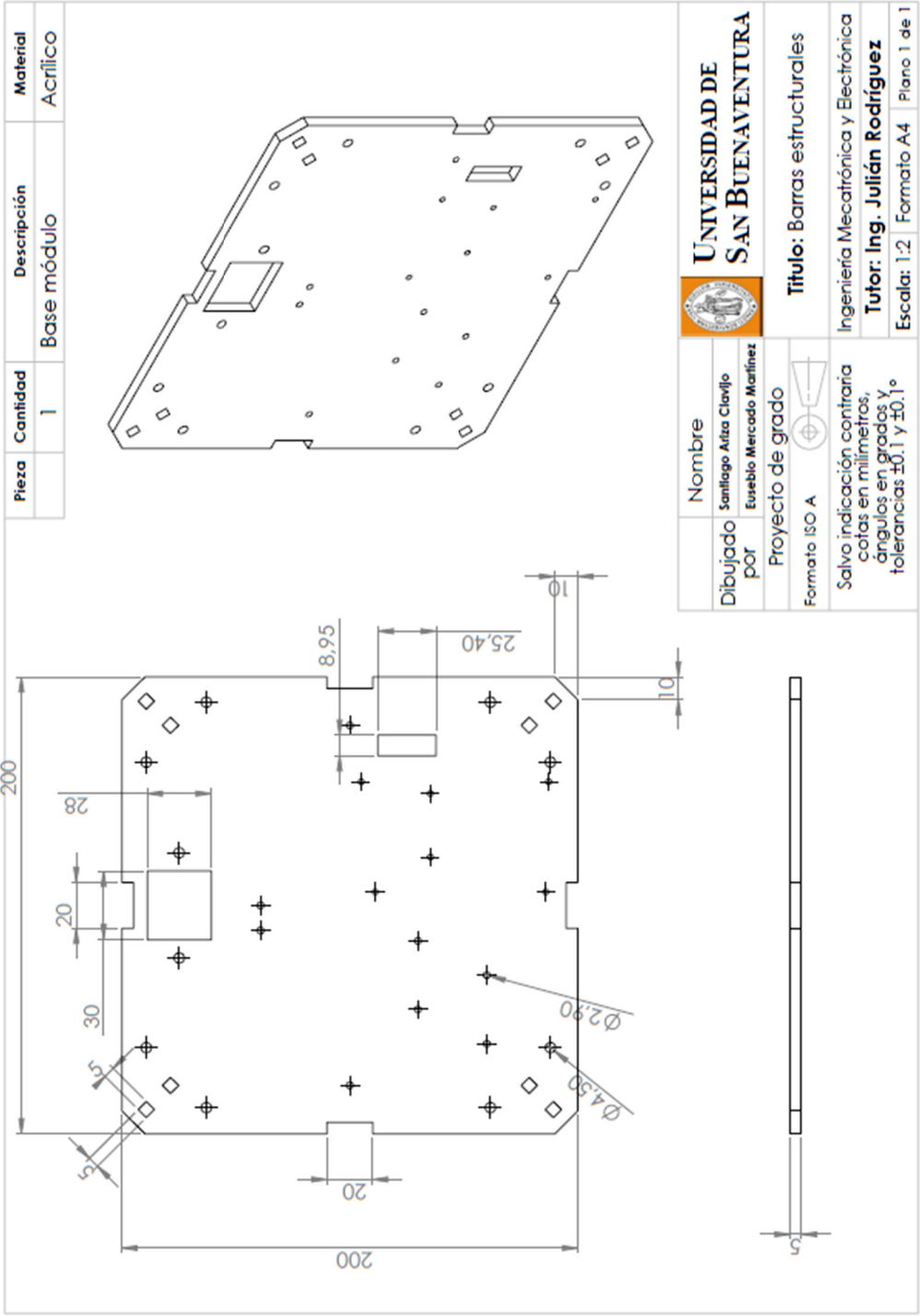
Ingeniería Mecatrónica y Electrónica

Tutor: Ing. Julián Rodríguez

Escala: 1:2 | Formato A4 | Plano 1 de 1

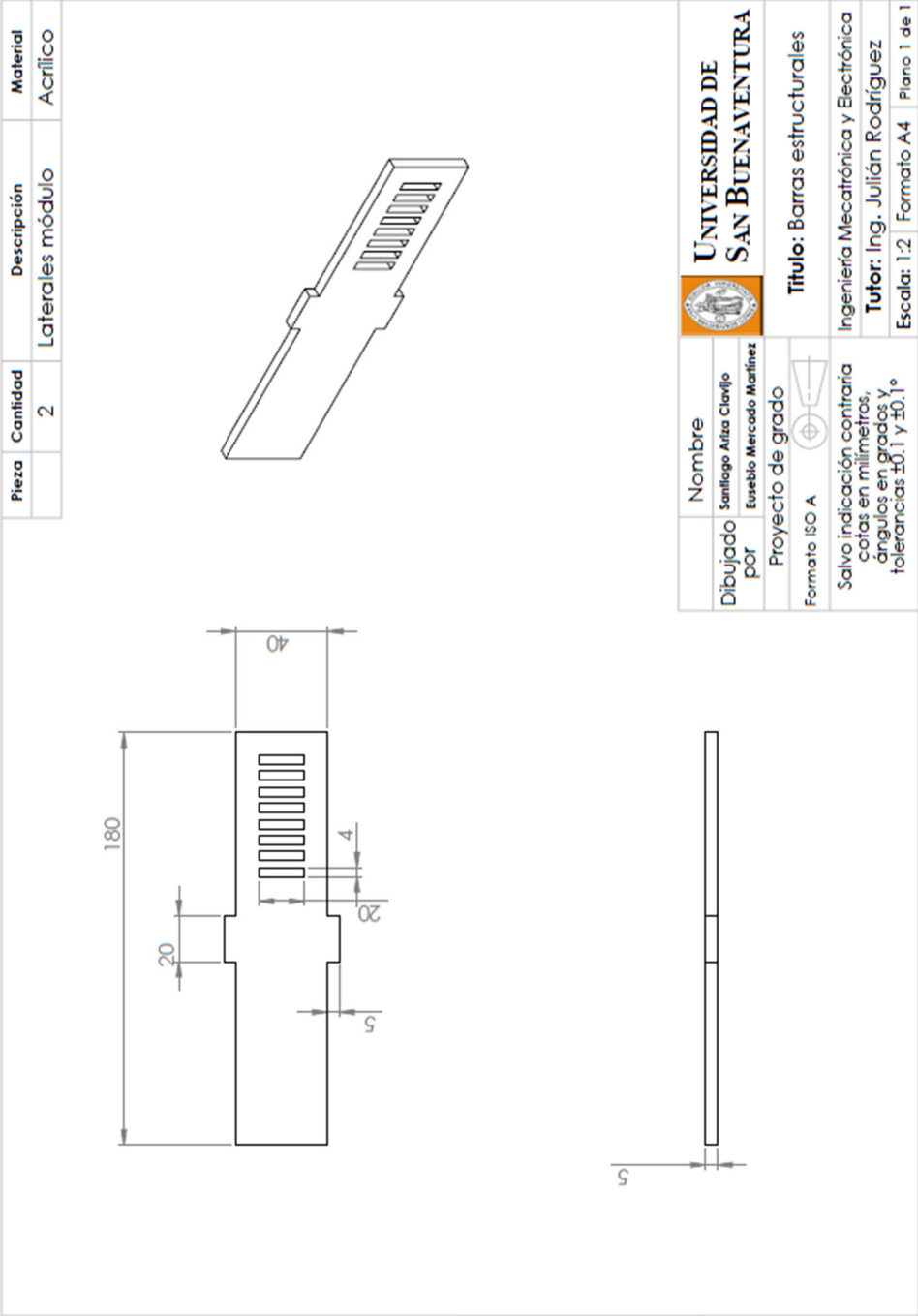
Fuente: Autores

ANEXO C. Plano de la base del módulo de autolocalización y navegación



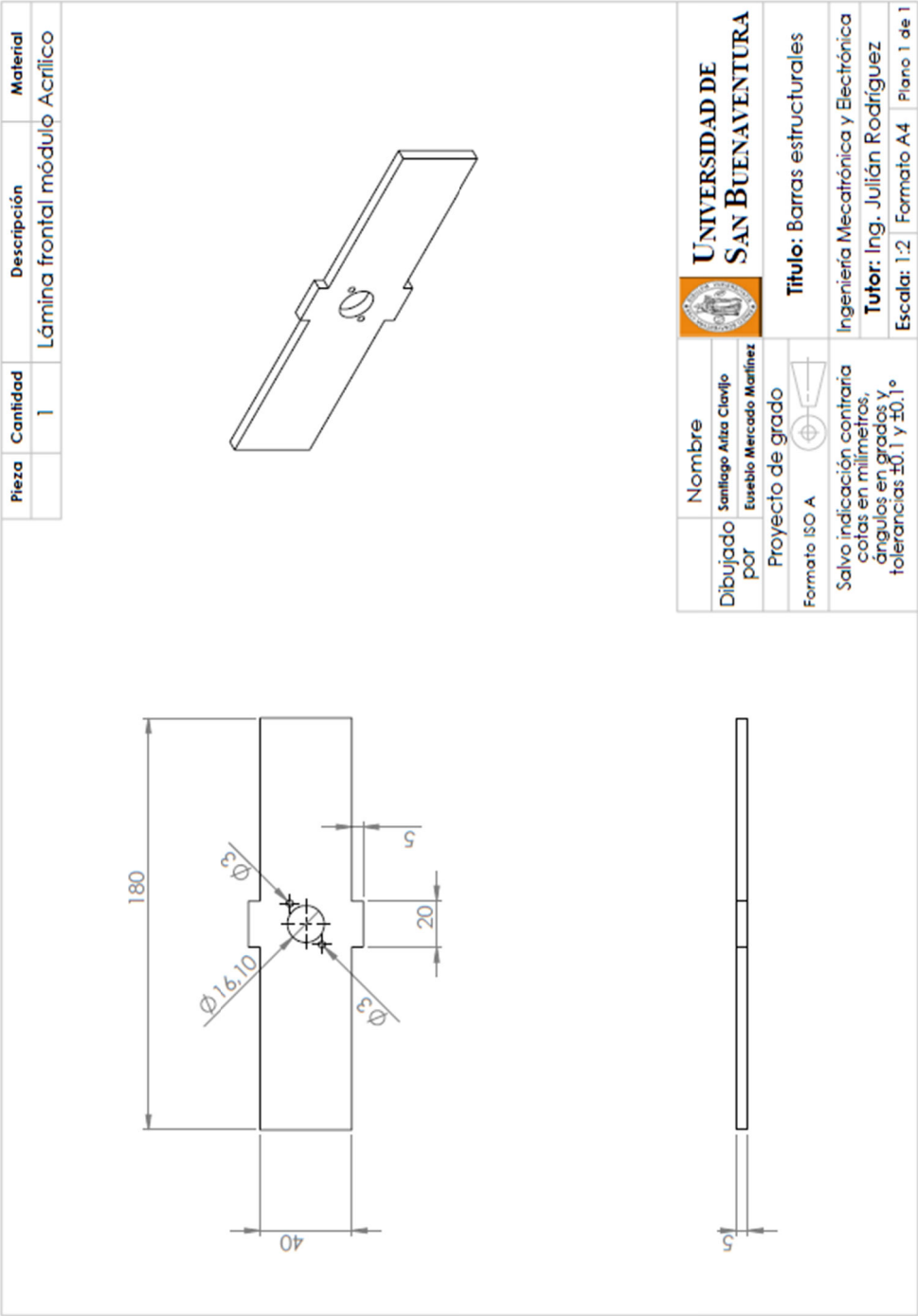
Fuente: Autores

ANEXO D. Plano de las láminas laterales del módulo de autolocalización y navegación



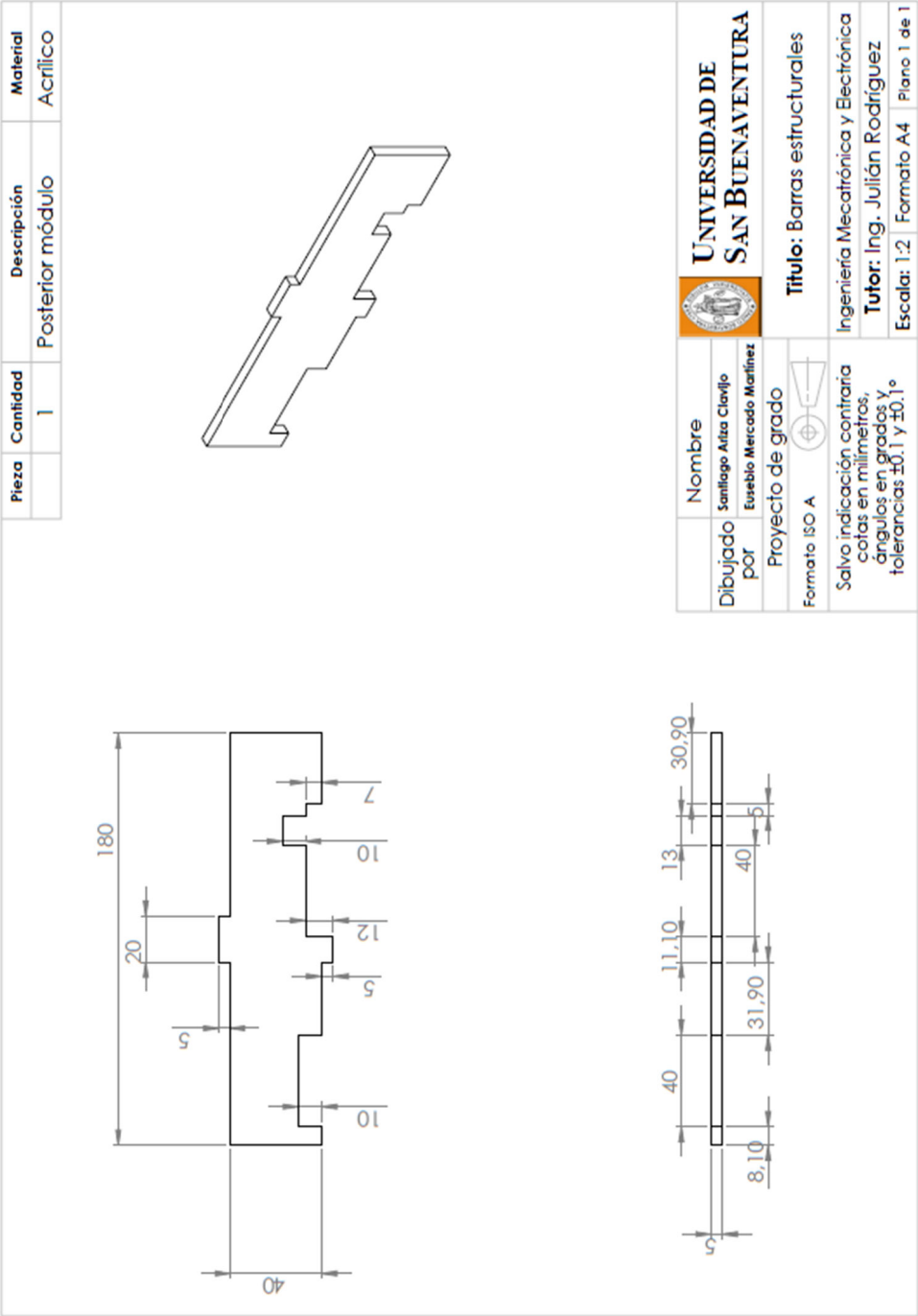
Fuente: Autores

ANEXO E. Plano de la lámina frontal del módulo de autolocalización y navegación



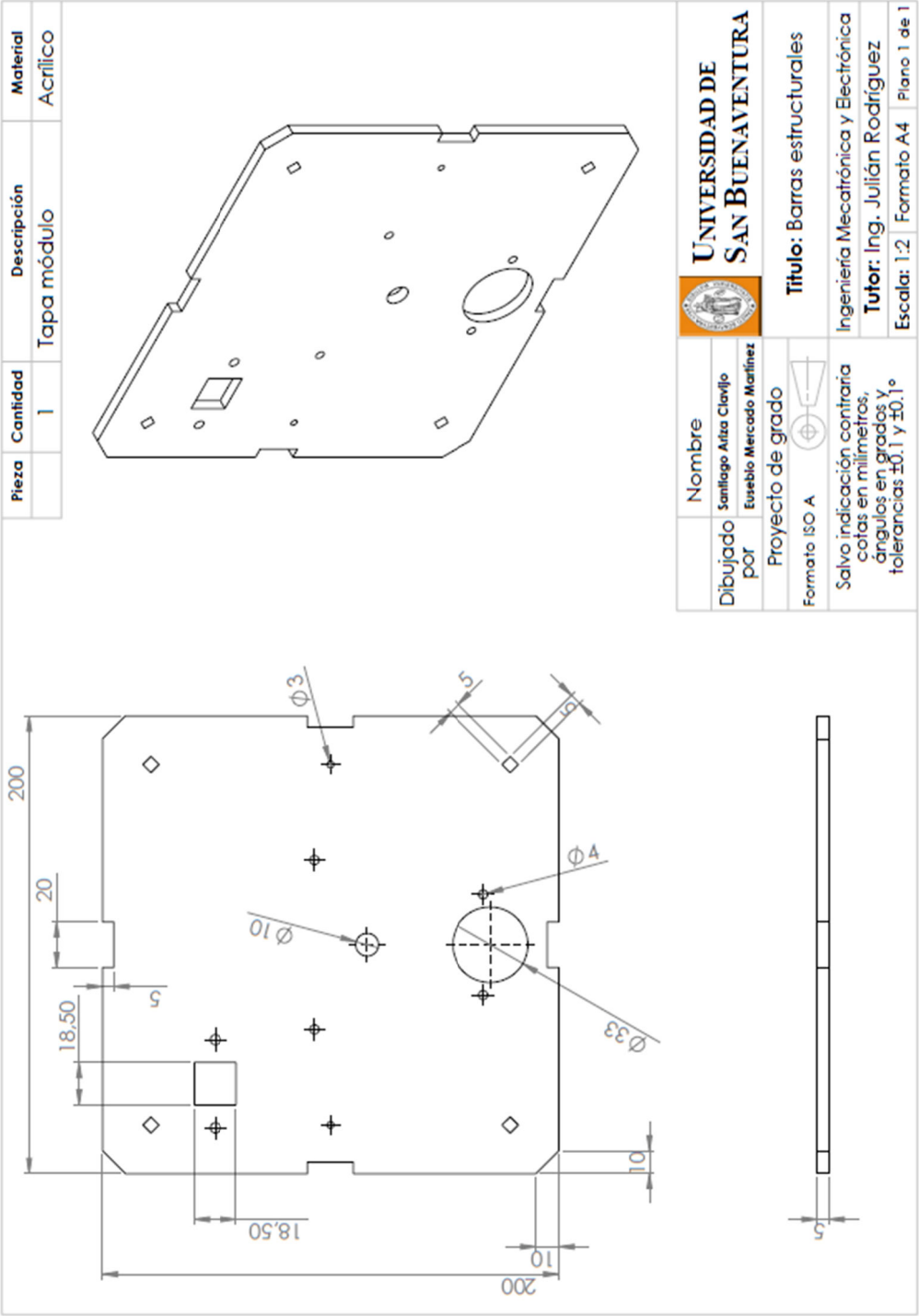
Fuente: Autores

ANEXO F. Plano de la lámina posterior del módulo de autolocalización y navegación



Fuente: Autores

ANEXO G. Plano de la tapa del módulo de autolocalización y navegación



Fuente: Autores

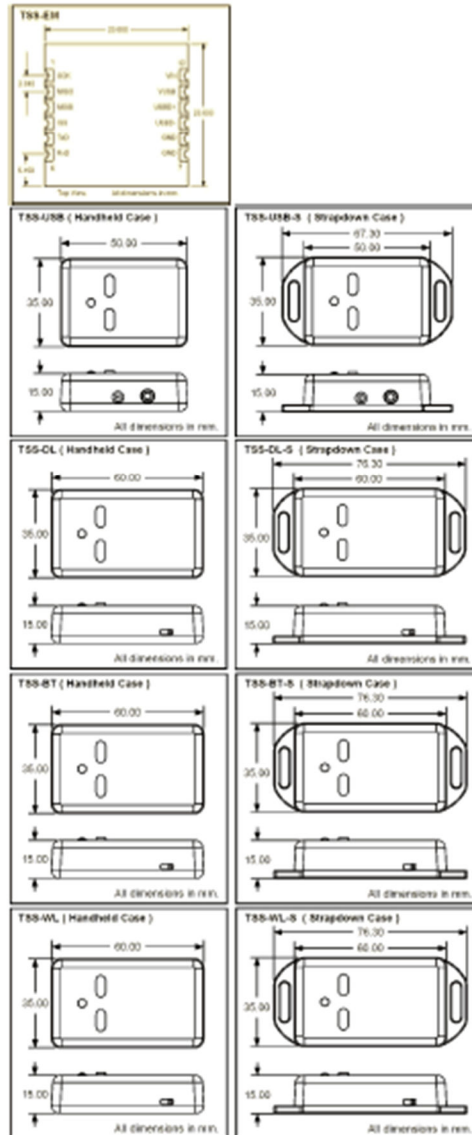
ANEXO H. Datasheet Yei 3-Space Sensor

YEI 3-Space Sensor™ Family

Miniature High-Performance AHRS / IMU Systems

High-reliability MEMS technology combined with advanced processing and quaternion-based Kalman filtering algorithms maintain accurate orientation outputs across a wide range of performance conditions.

Dimensions



Specifications

General	
Part numbers	TSS-EM (3-Space Embedded) TSS-USB-S (3-Space USB/RS232) TSS-USB-S (3-Space USB/RS232 Strap-down) TSS-DL (3-Space Data-logging) TSS-DL-S (3-Space Data-logging Strap-down) TSS-BT (3-Space Bluetooth) TSS-BT-S (3-Space Bluetooth Strap-down) TSS-WL (3-Space Wireless) TSS-WL-S (3-Space Wireless Strap-down) TSS-DNG (Communication Dongle)
Filter update rate ¹	up to 280Hz with Kalman Filter AHRS functionality up to 621Hz with Complementary Filter AHRS up to 1000Hz in IMU mode
Orientation output	absolute & relative quaternion, Euler angles, axis angle, rotation matrix, two vector
Other output	raw sensor data, normalized sensor data, calibrated sensor data, temperature
Shock survivability	5000g
Temperature range	-40C ~ 85C (-40F ~ 185F)
Sensor	
Orientation range	360° about all axes
Orientation accuracy ²	±1° for dynamic conditions & all orientations
Orientation resolution	<0.05°
Orientation repeatability	0.065° for all orientations
Accelerometer scale	±2g / ±4g / ±8g selectable for standard models ±6g / ±12g / ±24g selectable for HH models
Accelerometer resolution ³	14 bit
Accelerometer noise density ³	99µg/√Hz
Accelerometer sensitivity ³	0.00024g/digit for ±2g range 0.00048g/digit for ±4g range 0.00096g/digit for ±8g range
Accelerometer temperature sensitivity ³	±0.006%/°C
Gyro scale	±250°/sec/±500°/sec/±2000°/sec selectable
Gyro resolution	16 bit
Gyro noise density	0.03°/sec/√Hz
Gyro bias stability @ 25°C	11°/hr average for all axes
Gyro sensitivity	0.00875°/sec/digit for ±250°/sec 0.01750°/sec/digit for ±500°/sec 0.03500°/sec/digit for ±1000°/sec
Gyro non-linearity	0.2% full-scale
Gyro temperature sensitivity	±0.016%/°C
Compass scale	±1.3 Ga default. Up to ±8.1 Ga available
Compass resolution	12 bit
Compass sensitivity	5 mGa/digit
Compass non-linearity	0.1% full-scale

1. Depends upon model, communication mode, and filter mode.
2. Average value when calibrated.
3. Refer to Users Manual for IMU model specification and details.

Specifications are subject to change.
Version: 1.04

Fuente:

http://www.yeitechnology.com/sites/default/files/TSS_Family_Tech_Brief_v1.0.4b.pdf

ANEXO I. Datasheet SKM53

SkyNav SKM53 series

Datasheets

Performance Specification

Parameter	Specification	
GPS receiver		
Receiver Type	L1 frequency band, C/A code, 22 Tracking / 66 Acquisition-Channel	
Sensitivity	Tracking Acquisition	-165dBm -148dBm
Accuracy	Position Velocity Timing (PPS)	3.0m CEP without SA 0.1m/s without SA 60ms RMS
Acquisition Time	Cold Start Warm Start Hot Start Re-Acquisition	36s 33s 1s <1s
Power Consumption	Tracking Acquisition Sleep/Standby	<35mA @3.3V 45mA @3.3V TBD
Navigation Data Update Rate	1Hz	
Operational Limits	Altitude Velocity Acceleration	Max 18,000m Max 515m/s Less than 4g
Antenna Specifications		
Outline Dimension	18.2 x 18.2 x 4.0 mm	
Center Frequency	1575 ± 3 MHz	
Bandwidth	10 MHz min	
Impedance	50 Ω	
Axial Ratio	3 dB max	
Polarization	RHCP	
Mechanical requirements		
Dimension	30mm x20mm x 8.5mm	
Weight	15g	
Power consumption		
VCC	5V ±5%	
Current	50mA(typical)	
Environment		
Operating temperature	40~+85℃(w/o backup battery)	
Storage temperature	40 ~ +125 ℃	
Humidity	≦95%	

Fuente:

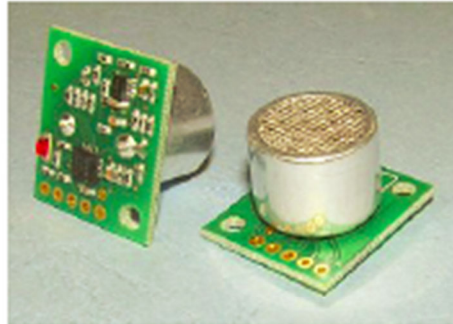
http://www.webtronico.com/documentos/SKM53_DS_030609.pdf

ANEXO J. Datasheet SRF02

1.- INTRODUCCION

El SRF02 es un medidor ultrasónico de distancias (sonar) que emplea un único transductor y se presenta en una placa impresa de muy reducidas dimensiones. Acepta comunicaciones I2C y serie. El interface serie tiene un formato estándar a 9600 baudios, 1 bits de inicio, 2 de stop y sin paridad. Los niveles de tensión son TTL por lo que se puede conectar directamente con la UART de cualquier tipo de microcontrolador.

Sobre un mismo bus (serie o I2C) se pueden conectar hasta 16 dispositivos SRF02. Se incluyen nuevas comandos o funciones que permiten transmitir ráfagas ultrasónicas sin medir el eco recibido o, a la inversa, medir un eco sin haber enviado una ráfaga. Esto permite sincronizar y capturar medidas procedentes de otros sensores SRF02.



Ya que en el SRF02 se emplea un único transductor tanto para la transmisión de la ráfaga ultrasónica como para la recepción del correspondiente eco, la distancia mínima que se puede medir es mayor que en los sensores que emplean dos transductores. Esta distancia mínima es en torno a los 15cm (6").

2.- CARACTERISTICAS

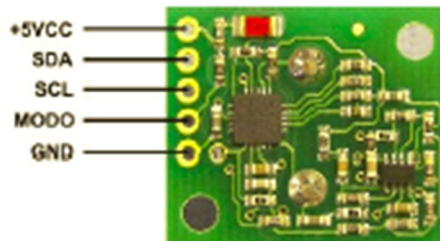
Se resumen a continuación las características mas notables del medidor ultrasónico SRF02:

- Tensión de alimentación +5Vcc
- Consumo típico 4mA.
- Frecuencia ultrasónica de 40KHz
- Rango de medidas de 15 cm hasta 6 m
- Control de automático de ganancia
- Interface serie estándar o protocolo bus I2C
- Sintonia automática
- Medida expresada en μ S, cm o pulgadas
- Reducido tamaño de 24 x 20 x 17 mm

3. MODOS DE INTERFACE

Una de las características mas relevantes del sonar SRF02 es la posibilidad de controlarlo desde un microcontrolador Master, bien mediante el interface I2C o bien mediante un Interface serie estándar.

3.1 Modo I2C



Este modo se selecciona dejando sin conectar, a nivel "1", la patilla "MODO" del SRF02. Tal y como se muestra en la figura se dispone así de las clásicas señales propias del bus I2C. SCL es la señal de reloj y SDA la de datos. Ambas señales se deben poner a +5Vcc a través de sendas resistencias Pull-Up. Estas normalmente se deben de encontrar en el Master que controla al resto de dispositivos I2C esclavos. Es decir, no es necesario poner un par de resistencias por cada esclavo disponible, sino un único par en el Master que controla el bus.

La dirección I2C del medidor SRF02 se puede elegir de entre 16 posibles: 0xE0, 0xE2, 0xE4, 0xE6, 0xE8, 0xEA, 0xEC, 0xEE, 0xF0, 0xF2, 0xF4, 0xF6, 0xF8, 0xFA, 0xFC o 0xFE. Por ello es posible tener hasta 16 sensores SRF02 conectados en el mismo bus. La dirección por defecto es 0xE0.

Fuente: <http://www.pishrobot.com/files/products/datasheets/srf02.pdf>

ANEXO K. Datasheet Oruga

产品特性 Features



簡介

Devastator Tank Mobile Platform 覆霸机器人是DFRobot 研制的机器人实验平台,该平台不但可以使用当前流行的Arduino控制板,也可以使用Raspberry pi 树莓派控制板控制。

問題的發生，往往和個人習慣、性格和環境有關，非關才德或才力不足所致。對於個人習慣和環境，其改變在藝術和科學中。

[illegible]

售價: 780元

Weight: 43mm

最大開張距離: 36cm/片

电机参数:

- 电压输入: 3-8V DC
- 减速比: 1:120
- 无负载转速(6V): 180RPM
- 无负载运行电流(6V): 160mA
- 堵转电流(6V): 2.8A

产品特性 Features



Intro:

Devastator Tank Mobile Platform is our newest robot track platform, it is fully compatible with most popular controllers in the market such as Arduino, Raspberry Pi and so on.

The Devastator uses high strength aluminum alloy which makes it extremely solid and durable. The high speed motors and premium tracks also allows it to move swiftly everywhere. What's more, it benefits from a high performance suspension and enjoys an outstanding mobility across even the toughest terrain.

Users are able to add various sensors, servos, limitables and controllers (e.g. Romeo AI-In-one, Raspberry Pi Model B+) with multiple mounting holes on the Dev-stator platform. It is perfect for hobbyists, educational, competitions and research projects.

Total Weight: 780g

Driving Wheels Diameter: 43mm

Max. Speed: 36 cm/s

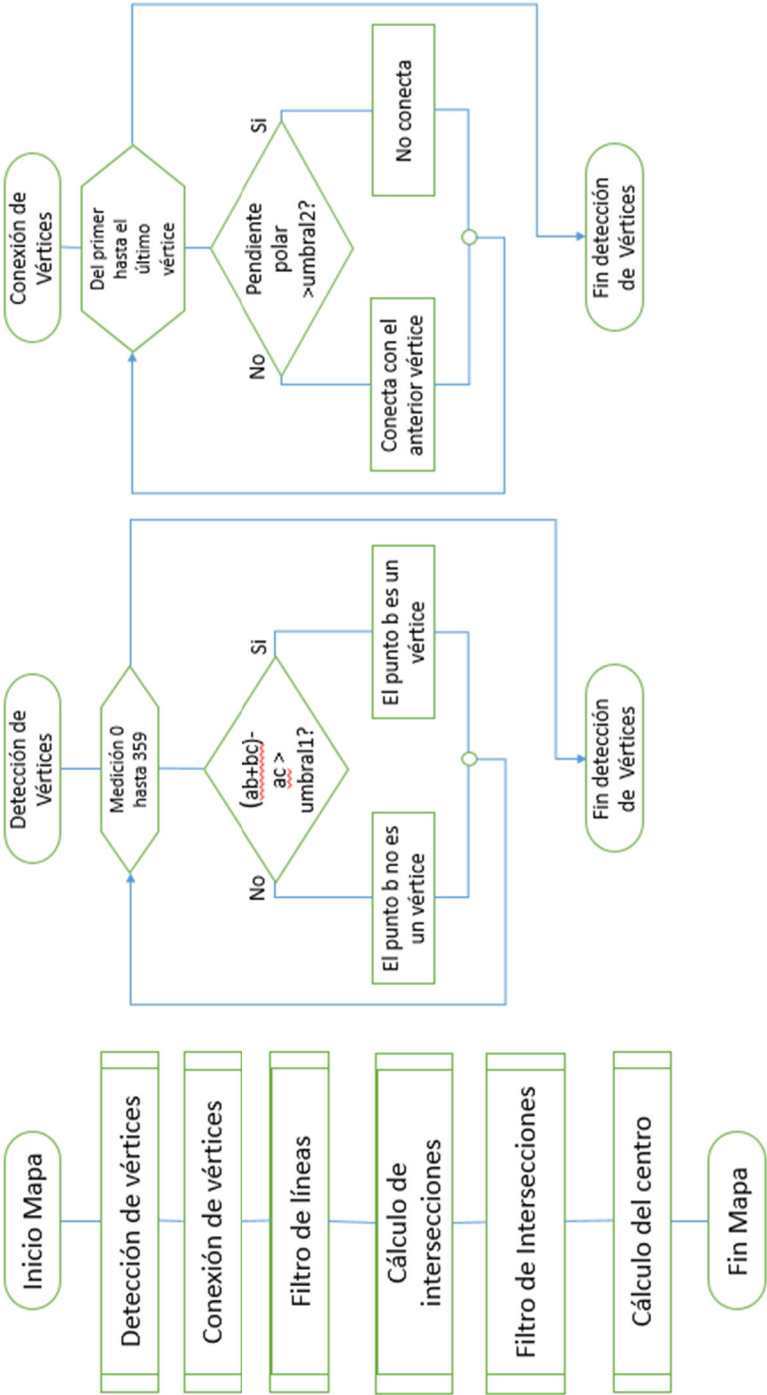
Motor Characters :

- Input Voltage: 3-6V DC
- Gear Ratio: 1:120
- No-load Rev (6V): 180RPM
- No-load Current (6V): 160mA
- Stall Current (6V): 2.8A

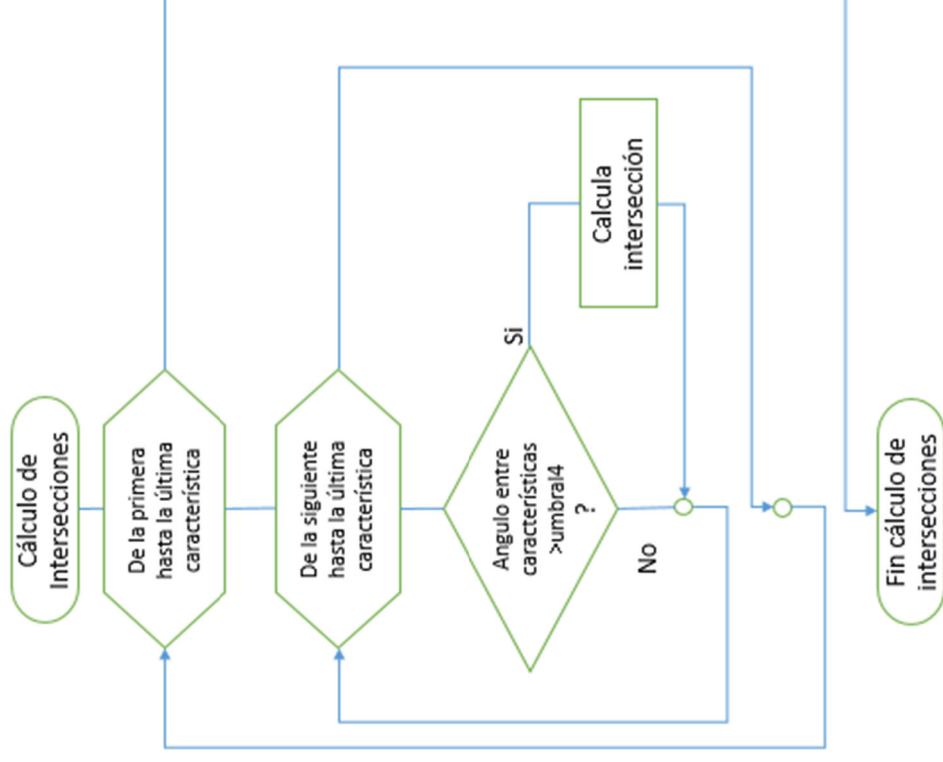
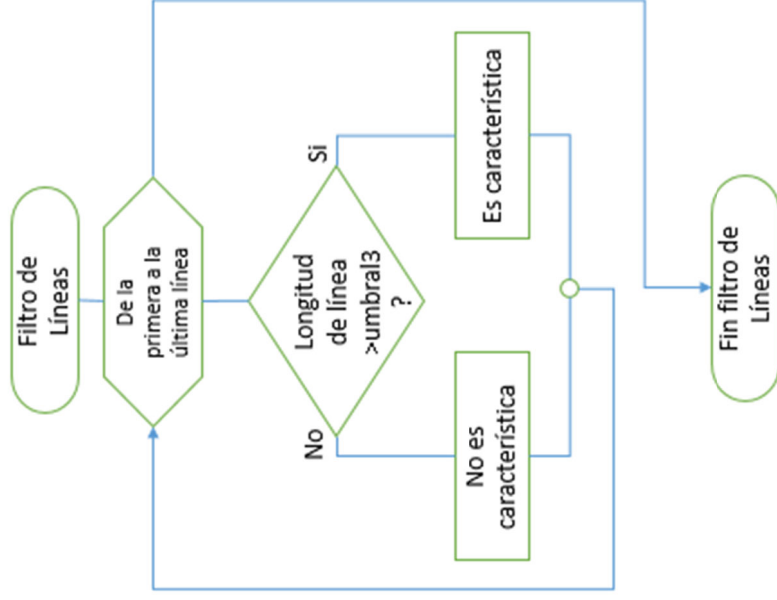
Fuente:

http://www.dfrobot.com/index.php?route=product/product&product_id=1219&search=tank+tracks&description=track+system+for+robot+chassis+2+3+4+5+6+7+8+9+10+11+12+13+14+15+16+17+18+19+20+21+22+23+24+25+26+27+28+29+30+31+32+33+34+35+36+37+38+39+40+41+42+43+44+45+46+47+48+49+50+51+52+53+54+55+56+57+58+59+60+61+62+63+64+65+66+67+68+69+70+71+72+73+74+75+76+77+78+79+80+81+82+83+84+85+86+87+88+89+90+91+92+93+94+95+96+97+98+99+100+101+102+103+104+105+106+107+108+109+110+111+112+113+114+115+116+117+118+119+120+121+122+123+124+125+126+127+128+129+130+131+132+133+134+135+136+137+138+139+140+141+142+143+144+145+146+147+148+149+150+151+152+153+154+155+156+157+158+159+160+161+162+163+164+165+166+167+168+169+170+171+172+173+174+175+176+177+178+179+180+181+182+183+184+185+186+187+188+189+190+191+192+193+194+195+196+197+198+199+200+201+202+203+204+205+206+207+208+209+210+211+212+213+214+215+216+217+218+219+220+221+222+223+224+225+226+227+228+229+230+231+232+233+234+235+236+237+238+239+240+241+242+243+244+245+246+247+248+249+250+251+252+253+254+255+256+257+258+259+260+261+262+263+264+265+266+267+268+269+270+271+272+273+274+275+276+277+278+279+280+281+282+283+284+285+286+287+288+289+290+291+292+293+294+295+296+297+298+299+300+301+302+303+304+305+306+307+308+309+310+311+312+313+314+315+316+317+318+319+320+321+322+323+324+325+326+327+328+329+330+331+332+333+334+335+336+337+338+339+340+341+342+343+344+345+346+347+348+349+350+351+352+353+354+355+356+357+358+359+360+361+362+363+364+365+366+367+368+369+370+371+372+373+374+375+376+377+378+379+380+381+382+383+384+385+386+387+388+389+390+391+392+393+394+395+396+397+398+399+400+401+402+403+404+405+406+407+408+409+410+411+412+413+414+415+416+417+418+419+420+421+422+423+424+425+426+427+428+429+430+431+432+433+434+435+436+437+438+439+440+441+442+443+444+445+446+447+448+449+450+451+452+453+454+455+456+457+458+459+460+461+462+463+464+465+466+467+468+469+470+471+472+473+474+475+476+477+478+479+480+481+482+483+484+485+486+487+488+489+490+491+492+493+494+495+496+497+498+499+500+501+502+503+504+505+506+507+508+509+510+511+512+513+514+515+516+517+518+519+520+521+522+523+524+525+526+527+528+529+530+531+532+533+534+535+536+537+538+539+540+541+542+543+544+545+546+547+548+549+550+551+552+553+554+555+556+557+558+559+560+561+562+563+564+565+566+567+568+569+570+571+572+573+574+575+576+577+578+579+580+581+582+583+584+585+586+587+588+589+590+591+592+593+594+595+596+597+598+599+600+601+602+603+604+605+606+607+608+609+610+611+612+613+614+615+616+617+618+619+620+621+622+623+624+625+626+627+628+629+630+631+632+633+634+635+636+637+638+639+640+641+642+643+644+645+646+647+648+649+650+651+652+653+654+655+656+657+658+659+660+661+662+663+664+665+666+667+668+669+670+671+672+673+674+675+676+677+678+679+680+681+682+683+684+685+686+687+688+689+690+691+692+693+694+695+696+697+698+699+700+701+702+703+704+705+706+707+708+709+710+711+712+713+714+715+716+717+718+719+720+721+722+723+724+725+726+727+728+729+730+731+732+733+734+735+736+737+738+739+740+741+742+743+744+745+746+747+748+749+750+751+752+753+754+755+756+757+758+759+760+761+762+763+764+765+766+767+768+769+770+771+772+773+774+775+776+777+778+779+780+781+782+783+784+785+786+787+788+789+790+791+792+793+794+795+796+797+798+799+800+801+802+803+804+805+806+807+808+809+810+811+812+813+814+815+816+817+818+819+820+821+822+823+824+825+826+827+828+829+830+831+832+833+834+835+836+837+838+839+840+841+842+843+844+845+846+847+848+849+850+851+852+853+854+855+856+857+858+859+860+861+862+863+864+865+866+867+868+869+870+871+872+873+874+875+876+877+878+879+880+881+882+883+884+885+886+887+888+889+890+891+892+893+894+895+896+897+898+899+900+901+902+903+904+905+906+907+908+909+910+911+912+913+914+915+916+917+918+919+920+921+922+923+924+925+926+927+928+929+930+931+932+933+934+935+936+937+938+939+940+941+942+943+944+945+946+947+948+949+950+951+952+953+954+955+956+957+958+959+960+961+962+963+964+965+966+967+968+969+970+971+972+973+974+975+976+977+978+979+980+981+982+983+984+985+986+987+988+989+990+991+992+993+994+995+996+997+998+999+1000+1001+1002+1003+1004+1005+1006+1007+1008+1009+1010+1011+1012+1013+1014+1015+1016+1017+1018+1019+1020+1021+1022+1023+1024+1025+1026+1027+1028+1029+1030+1031+1032

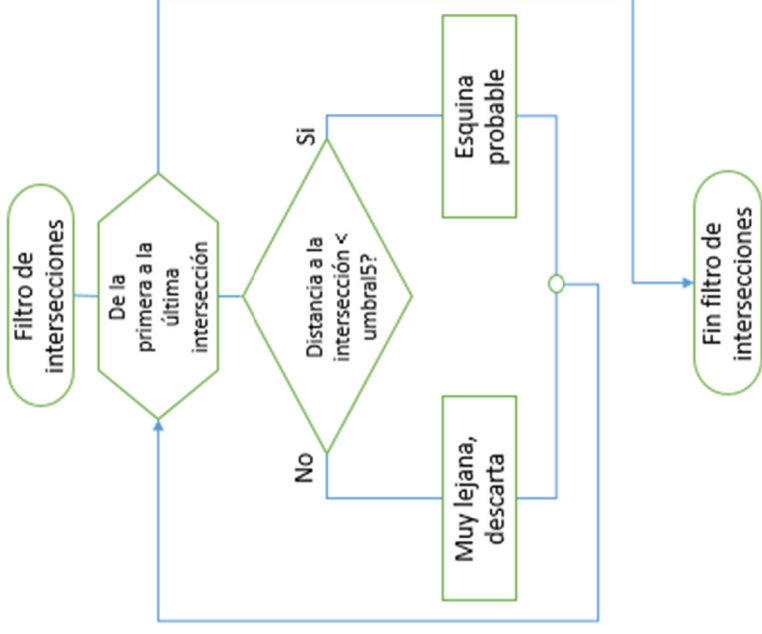
ANEXO L. Diagrama de flujo del algoritmo de mapeo



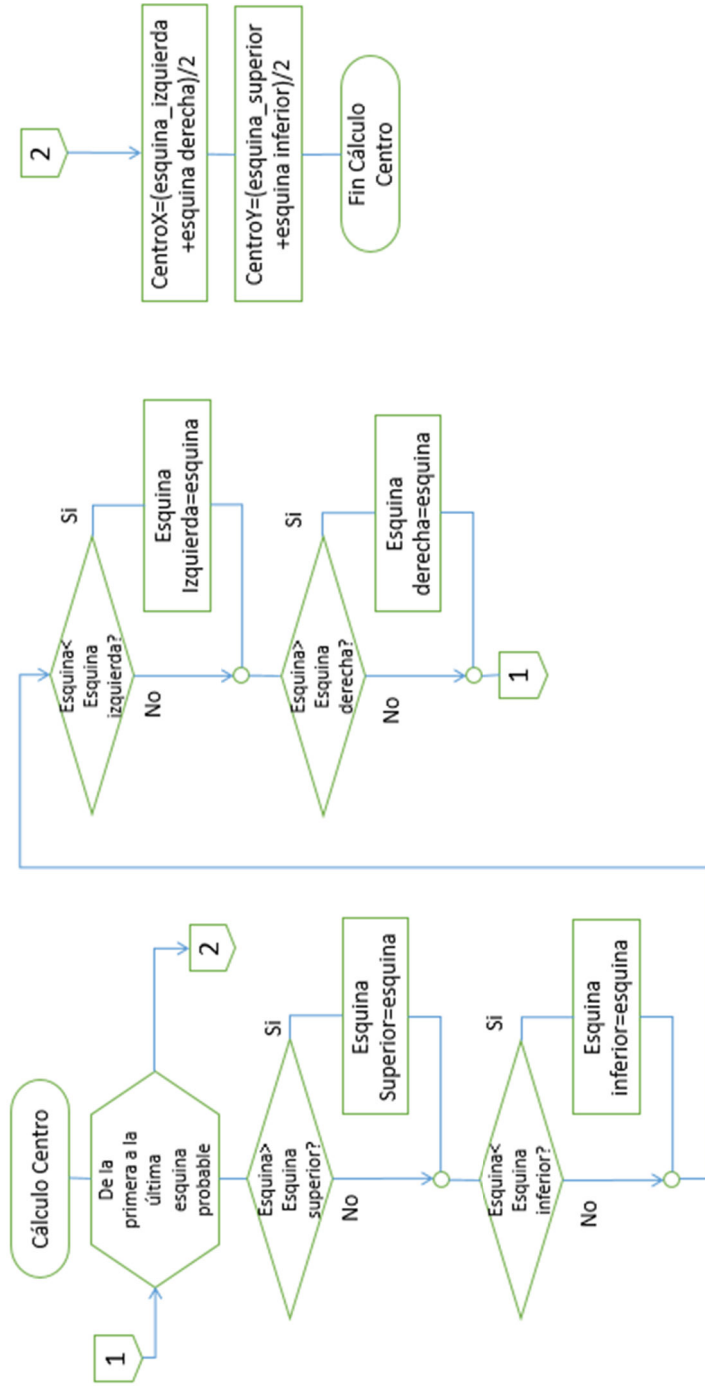
Fuente: Autores



Fuente: Autores



Fuente: Autores



Fuente: Autores