

Construcción de Multiagentes Especializados Para la Búsqueda de Un Objetivo Común

Basados en Sistemas Swarm Robotics

Bryan Reyes Ortega

Universidad Internacional SEK

Nota de Autor

Bryan Reyes Ortega, Facultad Ingeniería Mecánica, Universidad Internacional SEK

Director Ing. Santiago Gómez Msc.

Cualquier correspondencia concerniente a este trabajo puede dirigirse a:

bryangmreyes@gmail.com

DECLARACIÓN JURAMENTADA

Yo, Bryan Alexander Reyes Ortega, con cedula de identidad 172237401-2, declaro bajo juramento que el trabajo aquí desarrollado es de mi autoría, que no ha sido previamente presentado para ningún grado a calificación profesional; y, que se ha consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración, cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

BRYAN REYES ORTEGA

CI: 172237401-2

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios por haberme permitido estudiar en esta prestigiosa universidad, a mis padres por ayudarme en todas las formas posibles, a mi abuelita por darme mucho ánimo durante la carrera, a mi hermana por darme consejos acertados que han sido de gran utilidad durante este proceso, a mi amiga Karen Sofía Juelas por ayudarme, brindarme su apoyo incondicional y tiempo en este trabajo y a mis maestros por su preparación y profesionalismo para dictar las diferentes cátedras de la carrera, son el pilar fundamental de mi confianza tanto académicamente como laboral; es imperante para mí el reconocer su esfuerzo y labor docente que no solo me ha motivado a conocer cada una de las materias de pregrado, sino que también me impulsan a continuar estudiando.

Debo extender un agradecimiento especial a mi maestro tutor Ing. Santiago Gómez Msc quien propuso el tema de tesis y guio cada uno de mis procesos permitiéndome la oportunidad de probar mis capacidades y aprender más, también debo agradecer de forma comedida a mis maestros lectores que además de ser excelentes docentes, se han tomado el tiempo de leer y corregir lo más minucioso posible este trabajo para que sea lo esperado.

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado principalmente a Dios, a mi familia, a mis maestros y amigos quienes han aportado de forma directa en este trabajo, me han dado ánimo, consejo y apoyo en muchos momentos importantes, no solo de este proyecto sino de mi carrera, también está dedicado como aporte académico para la sociedad, y estudiantes interesados en desarrollar y mejorar este tipo de trabajos.

Índice de Contenido

DECLARACIÓN JURAMENTADA	2
Índice de Figuras	7
Resumen	10
Abstract.....	11
Introducción.....	12
Método.....	18
Diseño de sistema de búsqueda.	18
Diseño mecánico.	19
Diseño electrónico.....	22
Movimiento del explorador.....	32
Diagrama de flujo Buscador	38
Funciones de movilidad	38
Función principal.....	40
En la figura 28 se puede observar el diagrama de flujo que se ejecuta si el explorador encuentra la zanja en medio de la interrupción que sigue al objetivo, esto mantiene al agente con la antena encendida indefinidamente por medio de un bucle infinito.	43
Ecuaciones utilizadas para cálculo de resultados del algoritmo	43
Ecuación para el tiempo de descarga de la batería.....	43

Ecuación para calcular velocidad lineal	44
Ecuación para obtener factor de tiempo de barrido por metro de distancia en desplazamiento ideal	44
Resultados.....	45
Mecánicos	45
Eléctricos	46
Algoritmos	47
Prácticos	47
Discusión de resultados.	50
Conclusiones y Recomendaciones	53
Bibliografía.....	56
Anexo A: Partes estructurales de explorador	58
Anexo B: Detalles técnicos de elementos electrónicos.	59
Anexo C: Diagrama eléctrico	60
Anexo D: Algoritmos	61

Índice de Figuras

Figura 1. Prototipo explorador	19
Figura 2. Ensamblaje de buscador	20
Figura 3 Disposición de elementos electrónicos en elemento 3.....	21
Figura 4. Vista superior de pista de pruebas.....	22
Figura 5. Vista de altura de paredes de pista.	22
Figura 6. Módulos Puente H L298N. Tomado de	23
Figura 7. HC-SR04. Tomado de.....	25
Figura 8. Diodo Receptor PD 333-3B. Tomado de http://www.everlight.com/file/ProductFile/PD333-3B-H0-L2.pdf	26
Figura 9. Diodos receptores de Infrarrojo y salida lógica al receptor Luz	26
Figura 10. Configuración eléctrica de panel objetivo.....	27
Figura 11. Batería AX18650 4800mAh, Tomado de http://www.acaciapy.com/2016/07/bateria-ax-18650.html	27
Figura 12. Modo de conexión de las baterías.	28
Figura 13. Regulador L7812CV, tomado de https://www.nextiafenix.com/producto/regulador-l7812cv/	28
Figura 14. Arduino ATmega 2560 Pinout. Tomado de https://arduino- info.wikispaces.com/MegaQuickRef	31
Figura 15. Detalle de elementos y conexión a pines arduino.	32
Figura 16. Ambiente controlado.....	33
Figura 17. Desplazamiento ideal de explorador.	34
Figura 18. Movimiento de búsqueda exhaustivo teórico propuesto.	35
Figura 19. Movimiento para ubicación inicial 1.	35

Figura 20. Movimiento para ubicación inicial 2.	36
Figura 21. Movimiento para ubicación inicial 3.	36
Figura 22. Movimiento para ubicación inicial 4.	37
Figura 23. Movimiento para ubicación inicial 5.	37
Figura 24. Función para avance de buscador.	38
Figura 25. Función de retroceso del buscador.	39
Figura 26. Función que gira a la derecha al buscador.	39
Figura 27. Función para giro izquierda de buscador.	40
Figura 28. Función que detiene la movilidad total del buscador.	40
Figura 29. Funciones para realizar barrido de búsqueda con interrupción en paralelo.	41
Figura 30. Función de interrupción	42
Figura 31. Función de activación de antena.	43
Figura 32. Diseño teórico y resultado real.	45
Figura 33. Implementación física de pista de pruebas.	45
Figura 34. Panel objetivo de diodos emisores infrarrojo.	46
Figura 35. Partida invalida para exploración.	52
Figura 36. Barrido con medición de amplitud de barrido para determinar cambio de sentido por ubicación inicial invalida	54

Índice de Tablas

Tabla 1	20
Tabla 2	24
Tabla 3	25
Tabla 4	29
Tabla 5	30
Tabla 6	47
Tabla 7	49
Tabla 8	50
Tabla 9	51

Resumen

Este proyecto de graduación tiene por objetivo el desarrollo de algoritmos de búsqueda para realizar funciones específicas por agentes que por sus características y elementos implicados están en capacidad de cumplir con procesos puntuales de exploración y ubicación de la meta general de la colmena o falla de campo.

El trabajo se basa principalmente en un sistema que emula un comportamiento de enjambre en un ambiente controlado, donde un explorador hace búsqueda exhaustiva para encontrar un objetivo común propuesto sujeto a probabilidad de fallas en el terreno que se corrigen mediante el uso de un agente especialista en construcción, el cual conoce la posición del buscador cuando este activa la antena LED emisora de luz infrarroja incorporada que señala el desperfecto; si se encuentra imposibilitado para continuar los procesos de búsqueda.

Este trabajo se centra en el diseño mecánico, electrónico y algorítmico del buscador, del ambiente controlado y objetivo.

Abstract

This graduation project aims to develop search algorithms to perform specific functions by agents whose characteristics and elements involved are able to meet specific scanning processes and location I overall objective of the hive or failure field.

The work is mainly based on a system that emulates a swarming behavior in a contused environment where an explorer does exhaustive search to find a proposed common objective subject to the probability of ground failures that are corrected through the use at a specialist agent in construction, which knows the position finder is active when LED light emitting antenna infrared incorporated that point out the flaw; if that finds it impossible to continue the search processes.

This work focuses on the mechanical design, electronic and algorithmic from search engine, the controlled environment and objective.

Introducción

La robótica de enjambre está en desarrollo estas últimas dos décadas, debido a las distintas aplicaciones y funcionalidades como la búsqueda de recursos, mapeo de entornos, corrección de desperfectos en lugares poco accesibles, esto es de mucha utilidad ya que se puede conseguir información, arreglar desperfectos y entre otras aplicaciones en lugares donde la exposición humana es peligrosa o incluso inaccesible, debido a esto la cooperación entre agentes robot es importante para su desenvolvimiento autónomo y se han redactado varias publicaciones acerca del tema tal como se indica en (Li, 2008).

Los comportamientos de enjambre son un fenómeno complejo que se observa en la naturaleza, donde los mecanismos de auto organización y la interacción entre agentes son rasgos evolutivos importantes en la adaptación que a su vez determinan ventajas por medio de división de labores. (Duarte, 2011).

Este proyecto se focaliza en el desarrollo de algoritmos de búsqueda, utilizando agentes que cumplen funciones específicas (exploración y corrección de errores) para encontrar un objetivo dentro de un área (ambiente controlado).

Durante los últimos tiempos los sistemas con robots móviles se realizan con solo un robot que cumple una función en un ambiente específico, para realizar funciones como mapeos, búsquedas, exploraciones, funciones repetitivas de manufactura, entre otros. (Solís, 2016). Pero de acuerdo a otros investigadores como Dudek, 1993 que aseveran que es más eficaz utilizar varios robots simples y pequeños, con el objetivo de minimizar costos, ahorrar energía, mejorar la ejecución de tareas, tener un sistema que admita pequeños fallos, sea modificable y fácil de mejorar.

En pocas palabras el desarrollo de algoritmos tipo enjambre permite utilizar varios agentes con un fin común, lo cual, le da importancia al ahorro de recursos para cumplir

funciones específicas tales como búsqueda, marcación de caminos, localización de fallas, seguimiento de rastros y corrección de errores; dándole a cada agente especializado una cualidad que resalta por su utilidad según el sistema lo requiera.

Como un ejemplo en este proyecto se puede agregar que el agente buscador se encarga de localizar un objetivo común y si este llegara a encontrar fallas de terreno durante la búsqueda, se genera un proceso de interrupción encendiendo una antena infrarroja para la ubicación por parte de un agente constructor especialista que siga el rastro por medio de sensores y equipado con un mecanismo de construcción que corrija la falla para continuar la búsqueda, como se expresa anteriormente esto genera ahorro de energía en la exploración ya que el buscador se mueve más rápido al no cargar con el peso del constructor y este a su vez por ser su potencia mayor permite economizar energía al seguir la antena del buscador por la ruta más corta hacia el obstaculo del terreno.

La principal importancia de este proyecto es la exploración dentro de un ambiente controlado, para pruebas y futuros desarrollos que funcionen en ambientes no controlados, lo que sería de gran utilidad ya que permitiría buscar objetivos concretos con la adaptación de sensores más eficientes.

Se busca llevar a cabo distintas aplicaciones como el uso elementos robot que sean capaces de llevar componentes pequeños de un lugar a otro y montar las piezas de forma precisa, con la capacidad de modificar el entorno donde se desenvuelven las operaciones, también podría desarrollarse un método algorítmico avanzado, donde la opción es hacer entregas de forma eficiente en la que los robots son capaces de sortear obstáculos y buscar direcciones por si solos basados en mecanismos de búsqueda distintos; se puede incluso utilizar en labores de rescate con lugares inaccesibles en los cuales se podría enviar robots buscadores que guarden información o encuentren personas con sensores que capten signos

vitales y actuadores que eviten obstáculos; la búsqueda se podría realizar de forma rápida y sin intervención humana, generando un apoyo invaluable en labores de búsqueda, exploración y corrección de obstáculos.

Hoy en día se han redactado artículos científicos y el desarrollo práctico de algunas empresas en videos de internet demuestran una cooperación exitosa entre varios agentes del mismo tipo. A nivel internacional se está estudiando el tema y se busca emular ciertos comportamientos que han sido exitosos en la naturaleza, debido a que los miembros naturales tienen caracterizaciones que individualmente no generan un gasto energético grande, sin embargo, cumplen una aplicación que sola no es de mucha importancia pero en conjunto ha sido una forma eficiente de adaptación.

En algunas fuentes se ha realizado simulaciones con robots prototipo que buscan un objetivo, dejan rastros y simulan comportamientos parecidos al de las abejas u hormigas, de los cuales algunos tratan la configuración de enjambres como un tipo de inteligencia artificial, es el caso de (Muñoz, 2008), en el cual se describe una serie de algoritmos que conducen una sociedad de robots a comportamientos independientes con alto grado de precisión para la solución de inconvenientes; otro trabajo es el de búsqueda con comportamiento de enjambre de Alfonso (2007) en el cual se emula el comportamiento de las abejas para detectar y localizar néctar, donde se utilizan algoritmos complejos que generan soluciones de campo y que al imitar la inteligencia colectiva de las abejas se logra un objetivo. Según (Dorzan,2009), la investigación se basa en colonias de hormigas, su comportamiento, sus habilidades y la interrelación de sus miembros para optimización de soluciones geométricas; en el tratado se hace referencia a la solución de problemas por medio de conjuntos de puntos como triangulaciones, pseudo triangulaciones y poligonizaciones que buscan medir la calidad de configuraciones como peso, perímetro,

dilatación, factor de carga entre otros; el fin es la creación de algoritmos que dan soluciones cercanas a las óptimas para un problema o formar parte de un planeamiento general. De acuerdo a (Solís, 2016), se hace referencia a un algoritmo cooperativo para la exploración con robots en el cual se da la comunicación por medio de simulación de feromonas hacia un objetivo encontrado.

El método que se van a utilizar para el desarrollo de la búsqueda es el uso de algoritmos para arduino para barrido de exploración y en caso de encontrar un obstaculo tipo zanja activar la antena que señala el desperfecto para que otro agente (constructor) la siga, llegue al lugar del problema y determine dónde colocar la plataforma, regresar a la base y que el explorador pueda continuar la búsqueda.

El buscador se mueve realizando un barrido de búsqueda exhaustiva en zigzag hasta encontrar el objetivo que es detectado a través de sensores implementados en el buscador.

La investigación se realiza en base a repositorios digitales los cuales tienen un aporte técnico fundamental para el desarrollo del proyecto, donde el objetivo principal es el reconocimiento de un ambiente controlado imitando el comportamiento de hormigas utilizando cualidades importantes de la naturaleza como ubicación y marcación para llegar a un objetivo. Los resultados esperados son el barrido del buscador, la capacidad de determinar zanjas en el terreno, la señal infrarroja desde la falla para ubicarla, y encontrar el objetivo propuesto.

La robótica móvil es un área de investigación que ha sido testigo de increíbles avances de las últimas décadas. Temas como la navegación autónoma, la percepción, la reactividad, la creación de mapas, la evasión de obstáculos y la auto-localización han sido profundamente estudiados durante los últimos años con aplicaciones en la industria, el transporte, el área militar y entornos de seguridad (Petrina, 2011).

Bajo esta visión la robótica no solo resulta una herramienta en procesos industriales y de manufactura, sino que su desarrollo permite avances en la investigación e implementación de nuevas tecnologías. (Araújo, 2014).

Una de las problemáticas que se encuentra en el área de rescate, se basa en el desarrollo de algoritmos de búsqueda con un objetivo puntual. Algunos autores como Birk, 2006 se han concentrado en el desarrollo de una única plataforma robótica móvil que contenga todos los instrumentos y actuadores para llegar al objetivo trazado. Sin embargo, en varias ocasiones se ha determinado que un sistema con control centralizado no siempre genera los resultados esperados (Calisi, 2007), ya que, es un sistema costoso y dependiente de una única plataforma.

El enfoque planteado en el proyecto de investigación es el desarrollo de nuevos algoritmos de búsqueda basados en teoría de enjambres por medio de agentes robóticos especializados y de bajo costo, lo cual, brinda flexibilidad y versatilidad en los procesos de búsqueda, ya que al desarrollar agentes especializados únicamente en exploración y búsqueda, permite abaratar costos y además con la creación de varios agentes de este tipo se puede prescindir de un agente si se da el caso de la pérdida o mal funcionamiento en el área de exploración, tal como sucede en una colonia de hormigas, donde varias de ellas permiten encontrar rápidamente los recursos necesarios para la colonia, aunque si se pierde una puede ser reemplazada por otra.

Mediante un proceso de búsqueda cooperativa entre agentes robóticos, sin necesidad de intervención humana, se realiza un barrido identificador del terreno y del objetivo propuesto. El trabajo cooperativo de los agentes robóticos permite mayor eficiencia en el proceso de búsqueda al asignar distintas tareas específicas a cada agente, para el caso de este proyecto la búsqueda de objetivo.

El propósito de este documento es desarrollar un algoritmo aplicable a una plataforma robótica con características tipo explorador, que cumple funciones de búsqueda por objetivo en un ambiente controlado, mediante el uso de instrucciones ordenadas en lenguaje C interpretable por el microcontrolador ATmega 2560 de la empresa Arduino, para realizar un reconocimiento ordenado y ubicación de obstáculos deprimidos en un entorno controlado.

Método

Diseño de sistema de búsqueda.

Los sistemas de enjambre consisten en el asentamiento en un espacio, exploración del mismo y desarrollo de funciones para supervivencia, tomando como ejemplo básico el comportamiento de especies exitosas en el medio natural, como es el caso de abejas u hormigas, se puede observar que cada uno de los individuos pertenecientes a la colmena se encuentran funcionando dentro de un área determinada y cumplen funciones específicas, una de las más importantes y que asegura la obtención de recursos valiosos para la supervivencia y desarrollo es la exploración, para la cual se requiere de miembros equipados y especializados en realizar labores de búsqueda, esto consiste en la capacidad de moverse dentro de un espacio de forma óptima, con la habilidad de detectar el elemento o recurso que se está buscando, para luego realizar procesos de obtención del objetivo propuesto o en el caso de alguna obstrucción poderla superar con otro individuo capaz realizar procesos y corrección del problema.

Este trabajo de titulación está orientado a emular el comportamiento de un agente explorador por medios electrónicos, para lo cual es importante el desarrollo de un algoritmo de búsqueda que controle los procesos del agente robótico a ser diseñado.

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento de los algoritmos de búsqueda se contempla el diseño básico de un ambiente controlado y una plataforma explorador, tomando en cuenta capacidades de movilidad, detección de obstáculos como paredes y zanja con el uso de sensores de distancia, para lograr una trayectoria valida que permita llegar al objetivo propuesto (meta) detectable por medio de sensores receptores de luz infrarroja o señalar el hundimiento en el campo por medio de activación de antena.

Por ende el planteamiento del proyecto será subdividido en tres áreas principales siendo estos el mecánico, eléctrico y algoritmos de control

Diseño mecánico.

Elementos estructurales que componen al buscador.

El agente buscador debe ser robusto, eficiente, estable y preciso por lo cual está construido de madera MDF de 3 [mm] de espesor, una característica importante es su bajo peso de 1,39 a 1,45 [kg] lo cual mejora su velocidad y autonomía.

El agente tiene forma cubica lo cual facilita su electrónica interna, su movilidad, acceso por lugares complicados y su calibración en sensores, se moviliza utilizando actuadores del tipo oruga, como se observa en la figura 1.

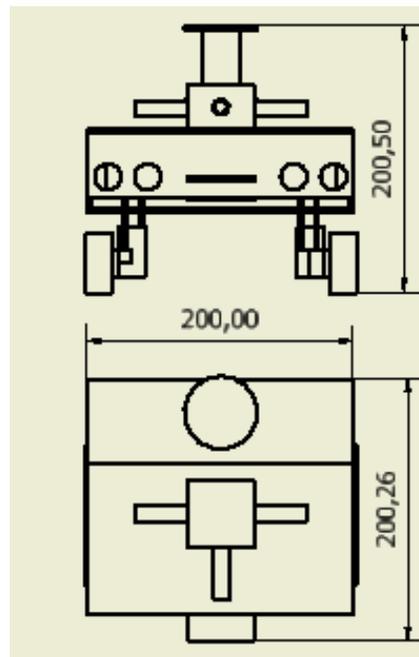


Figura 1. Prototipo explorador

Los mecanismos de oruga utilizados en este proyecto presentan las siguientes características, una velocidad nominal de 3 [rad/s] a 12 [V], facilidad de montaje, el

consumo de corriente en funcionamiento nominal es de inferior a 1 [A], generan buena estabilidad y mejoran la tracción en cualquier tipo de terreno, los elementos del buscador se pueden apreciar en la figura 2 y se detallan en la tabla 1.

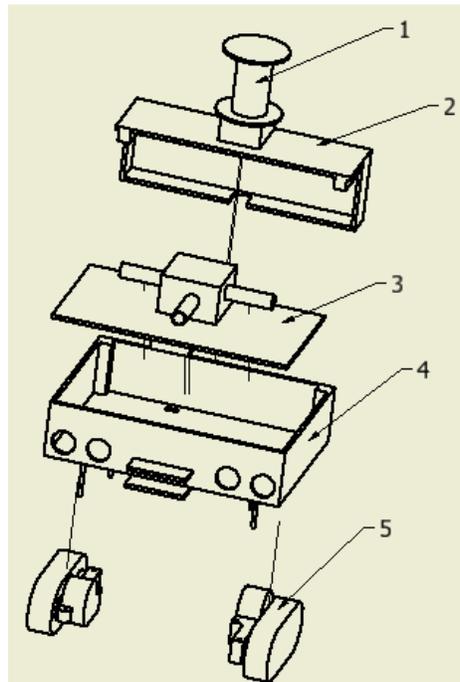


Figura 2. Ensamblaje de buscador

Tabla 1
Descripción elementos estructurales buscador

Elemento	Descripción
1	Antena emisora Infrarrojo
2	Tapa trasera
3	Tapa superior con sensores receptores de infrarrojo
4	Caja base en la que se coloca electrónica interna y baterías.
5	Mecanismos de orugas

Nota: Se describen los elementos de la figura 1 que componen el ensamblado del agente buscador

Como se puede ver en la figura 2 y tabla 1 se aprecia la ubicación de los sensores y actuadores utilizados, el elemento 1 es la antena que se activa solo si se encuentra la depresión en el terreno que impide el paso del explorador al objetivo, el elemento 2 es la

base para la antena, el elemento 3 posee tres cilindros que contienen un sensor receptor de luz infrarroja en cada uno para la detección de objetivo, en el elemento 3 se colocan las baterías, controlador, modulo driver para control de los motores, los sensores de distancia ultrasónicos para evitar colisión con paredes y detección de hundimiento en pista como se observa en la figura 3 y por último el elemento 4 son los actuadores tipo oruga para movimiento del explorador, tienen un radio de 2,4 [cm].

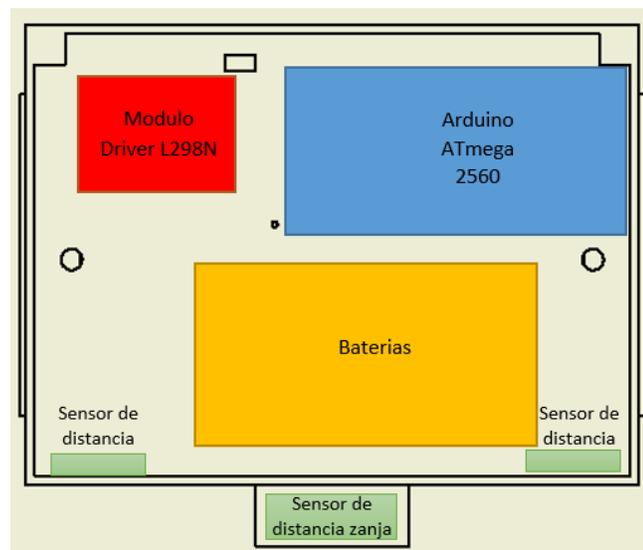


Figura 3 Disposición de elementos electrónicos en elemento 3.

Para detalle de piezas de explorador dirigirse a anexo A.

Ambiente controlado.

Para realizar las pruebas pertinentes, se considera la construcción de una pista idónea para la movilidad del buscador, en la cual se puede realizar un barrido organizado y la ubicación de falla, por este motivo se escogió que la geometría para un ambiente básico de simulación sea un rectángulo de 2x3 [m], con piso de poliestireno expandido para mejorar tracción, facilidad de transporte y armado, las dimensiones se observan en las figuras 4 y 5.

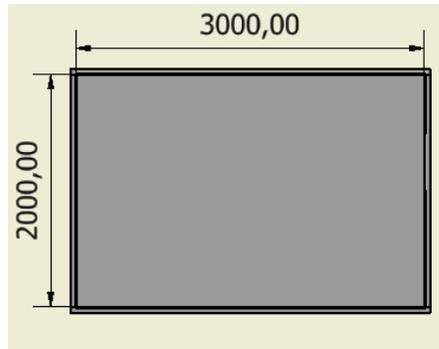


Figura 4. Vista superior de pista de pruebas.



Figura 5. Vista de altura de paredes de pista.

Diseño electrónico.

Selección de elementos electrónicos.

Para la construcción de un agente se considera los sensores y actuadores basados en varios aspectos como: tamaño, forma, utilidad, peso, precisión y costo, que son parte de las decisiones del diseño caracterizados a continuación:

Módulos Puente H L298N.

Es un módulo driver permite controlar dos motores a la vez con dirección en ambos sentidos, posee 4 pines de control digital para activar los motores, sentidos de giro y control de velocidad, el modulo permite usar dos motores de hasta 2 [A] y es necesario para el control de las orugas por medio de activación de los puertos PWM digitales en la placa arduino ATmega, la figura 6 detalla el pinout del módulo L298N.

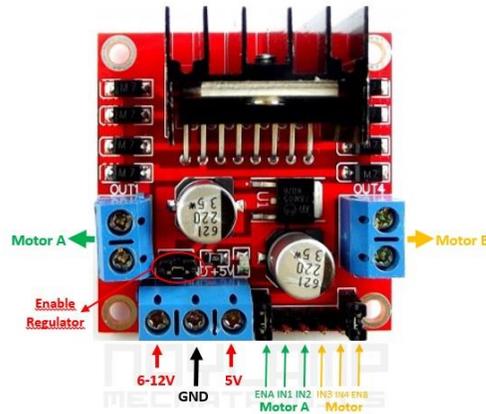


Figura 6. Módulos Puente H L298N. Tomado de http://www.naylampmechatronics.com/blog/11_Tutorial-de-Usodel-M%C3%B3dulo-L298N.html

Selección de sensor de distancia.

Existen dos tipos de sensores de distancia muy comercializados y con buenas características de medición, es por esto que para determinar el mejor sensor de distancia de acuerdo a los requerimientos del proyecto, se realizó la comparación entre ambos.

Comparación de sensores de distancia ultrasónicos vs Sharp infrarrojo.

A pesar de ser ambos sensores de distancia, el ultrasónico relaciona el tiempo de rebote con la distancia realizando una conversión a nivel de algoritmos, es decir cuenta el tiempo que se demora desde que se lanza la onda ultrasónica hasta su retorno. Al recibir la onda de regreso se obtiene un 1 lógico, que por medio de código y factores de conversión se calcula la distancia a la superficie rebotante, siendo el costo local entre 4 y 7 dólares.

Por otro lado el sensor de Infrarrojo es bastante utilizado en la robótica, este sensor tiene un LED emisor y otro receptor, envía pulsos luminosos que se reciben de acuerdo al ángulo de recepción y cambia la salida analógica del sensor, se calcula la distancia por medio de la conversión de los datos analógicos en la programación, y su costo es entre 15 y 18 dólares.

Se seleccionó el sensor ultrasónico por su alta precisión, desde 2 [cm] a 4 [m] con un error de 3 [mm] y en comparación con los infrarrojos es más seguro sobre superficies que no reflejan luz, lanza valores que se pueden calibrar por programación, además localmente resultan más económicos en comparación con los infrarrojos, la tabla 2 muestra la comparación del 1 al 5 con respecto a la conformidad que ofrecen los dos sensores.

Tabla 2
Comparación entre sensor ultrasónico y Sharp infrarrojo

Aspectos tomados en cuenta	Ultrasónico	Sharp infrarrojo
Confiability	4	3
Precisión	3	4
Tamaño	5	5
Modo de programación	4	5
Precio local	5	2

Nota: Calificación comparativa de las características de los sensores de distancia.

Sensores de distancia Ultrasonido HC-Sr 04.

Son sensores que emiten ultrasonido y lo reciben nuevamente luego que rebota con un sólido, en este proyecto son utilizados para localizar las paredes del ambiente controlado, sentir giros del barrido, evitar colisiones y detectar la zanja-obstáculo mientras sigue la ruta al objetivo, estos sensores presentan las características técnicas descritas en la tabla 3 y físicas en la figura 7.

Tabla 3
Sensor de distancia HC-SR04

Voltaje de Trabajo	5V
Corriente	15mA
Frecuencia de Trabajo	40 [Hz]
Rango Maximo	4 [m]
Rango Minimo	2 [cm]
Angulo de medicion	15 grados

Nota: Características de funcionamiento HC-SR04, Tomado de <http://www.electroschematics.com/wp-content/uploads/2013/07/HCSR04-datasheet-version-1.pdf>



Figura 7. HC-SR04. Tomado de <http://www.electroschematics.com/wp-content/uploads/2013/07/HCSR04-datasheet-version-1.pdf>

Transistores receptores de infrarrojo PD 333-3B para reconocimiento de objetivo.

Son diodos que cuando reciben luz infrarroja permiten el paso de corriente, se utilizan para los receptores sensitivos del buscador, permitiendo el encontrar la meta que está construida por diodos emisores de luz infrarroja, se muestra el diodo receptor en la figura 8, y su modo de conexión para salida lógica en la figura 9.

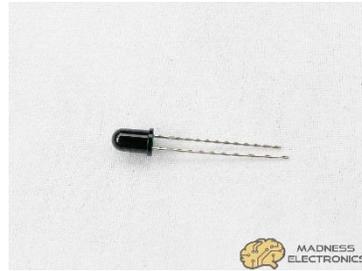


Figura 8. Diodo Receptor PD 333-3B. Tomado de <http://www.everlight.com/file/ProductFile/PD333-3B-H0-L2.pdf>

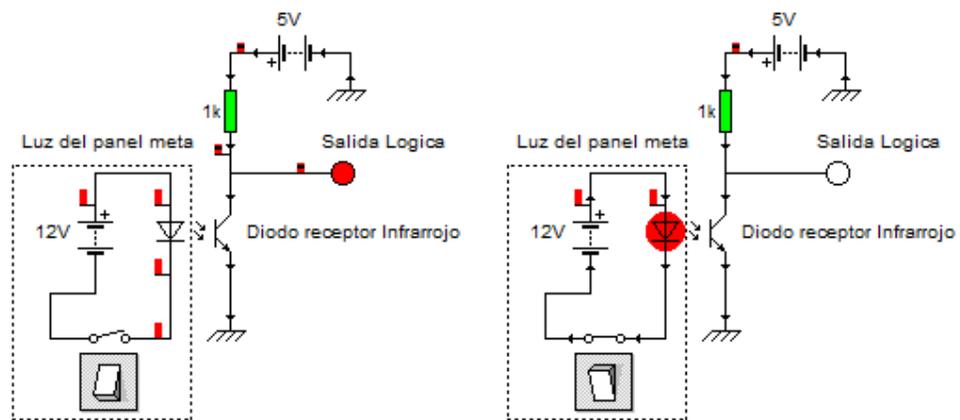


Figura 9. Diodos receptores de Infrarrojo y salida lógica al receptor Luz

Panel de diodos emisores de infrarrojo IR 333.

Este panel contiene diodos emisores de luz infrarroja IR333, simula el objetivo del buscador detectable con los sensores receptores de infrarrojo, el modo de conexión de los diodos se puede apreciar en la figura 10.

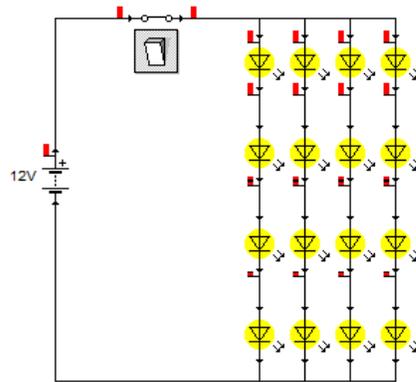


Figura 10. Configuración eléctrica de panel objetivo

Baterías Recargables li-ion

Las baterías utilizadas son AX18650 4800mAh, son baterías de bajo costo y fácil acceso en el mercado, sus beneficios son, recargar fácilmente con una fuente de voltaje o cargador, cada batería utilizada aporta 3,7 [V], se implementaron 8 baterías en dos grupos de 4 baterías en serie para obtener 14,8 [V] y conectadas en paralelo para conseguir un aumento de la capacidad de carga de hasta 9,6 [Ah], cada batería debido a su característica dada en miliamperios por hora [mAh], tienen una capacidad de carga útil para el funcionamiento del agente explorador, se puede observar la batería en la figura 11 y su modo de conexión para alimentación en la figura 12.



Figura 11. Batería AX18650 4800mAh, Tomado de <http://www.acaciapy.com/2016/07/bateria-ax-18650.html>

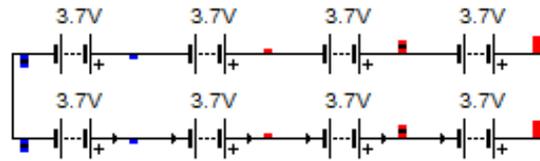


Figura 12. Modo de conexión de las baterías.

Regulador L7812CV

El regulador L7812CV mantiene estable el voltaje a 12 [V], debido a que las baterías disminuyen su carga mientras el explorador se encuentra en funcionamiento, lo que provoca fallas de calibración. Este elemento mantiene la tensión de alimentación estable aunque las baterías varíen su voltaje, se colocaron tres reguladores en paralelo para evitar daño por sobre carga ya que el explorador en funcionamiento utiliza 1 [A] por lo que la potencia aproximada en funcionamiento es de 12 [W], el regulador se puede observar en la figura 13.

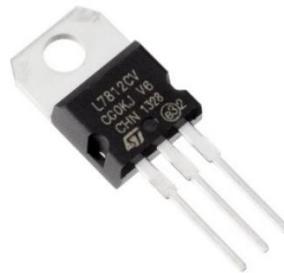


Figura 13. Regulador L7812CV, tomado de <https://www.nextiafenix.com/producto/regulador-l7812cv/>

Disposición de elementos electrónicos y conexiones para selección de arduino.

Para realizar la selección del tipo de controlador en el agente explorador, se toma en cuenta los puertos requeridos para el funcionamiento de sensores y actuadores necesarios en los procesos de búsqueda, la disposición de pines discretos a utilizar se encuentran detallados en la tabla 4.

Tabla 4
Pines utilizados para control con arduino

Elemento	Cantidad de puertos utilizados	Función	Pines
Sensor distancia derecho	2	Echo sensor derecho	8
		Trigger sensor derecho	9
Sensor distancia izquierdo	2	Echo sensor izquierdo	10
		Trigger sensor izquierdo	11
Sensor distancia orificio	2	Echo sensor de orificio	50
		Trigger sensor de orificio	51
		Control In1 de Modulo L298N	3
		Control In2 de Modulo L298N	4
		Control In3 de Modulo L298N	5
Módulo L298N	4	Control In4 de Modulo L298N	6
		Sensor central	46
Sensores infrarrojo	3	Sensor izquierdo	48
		Sensor derecho	47
Antena emisora	1	Antena emisora infrarroja	7
Entrada lógica de NAND HD 74LS10P	1	Entrada de compuerta NAND, para activación de interrupción	2
Total de puertos a ser utilizados	15		

Nota: Detalle de cantidad de puertos discretos necesarios y disposición para conexión en arduino.

De acuerdo a la tabla 4, el total de puertos discretos de control que se utiliza son 15, por lo que la selección del controlador a implementar es el arduino ATmega 2560, debido a que presenta la cantidad de puertos requeridos, el cual se describe a continuación.

Arduino ATMEGA 2560

Es el microcontrolador que se utilizara para el control de todos los procesos del agente explorador, el cual se programa por medio del software actualizado Arduino 1.8.5, mediante programación en lenguaje C++ y librerías de arduino, se utiliza esta tarjeta debido a la cantidad de puertos necesarios mencionados en la tabla 3, las características disponibles que se describen en la tabla 5 y el pinout apreciable en la figura 14.

Tabla 5
Arduino ATmega 2560

Placa	Procesador	Voltaje de operación	Voltaje de alimentación	Pines análogos	Pines Digitales	Pines PWM
Arduino	ATmega2560	5V	7-12V	16	54	15

Nota: Características, entradas análogas y digitales de Arduino ATmega, Tomado de <https://arduino-info.wikispaces.com/MegaQuickRef>

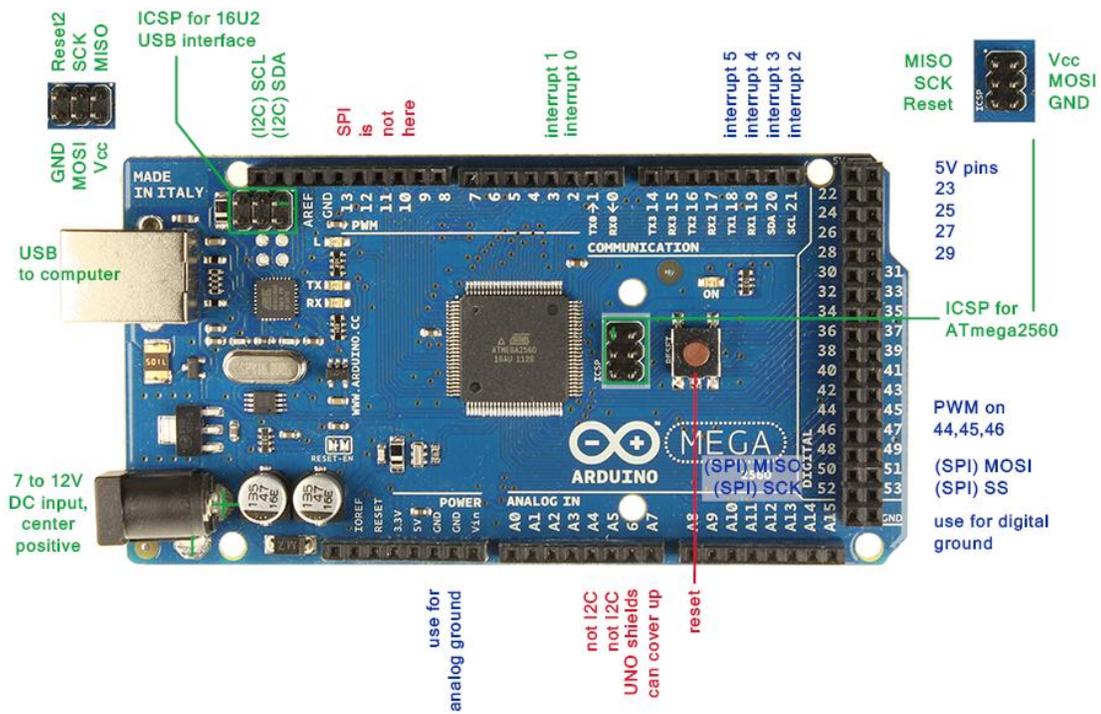


Figura 14. Arduino ATmega 2560 Pinout. Tomado de <https://arduino-info.wikispaces.com/MegaQuickRef>.

Para mayor información técnica de elementos electrónicos dirigirse a anexo B.

Modo de conexión elementos en arduino

En la figura 15 se puede apreciar el diagrama de conectividad y elementos descritos anteriormente.

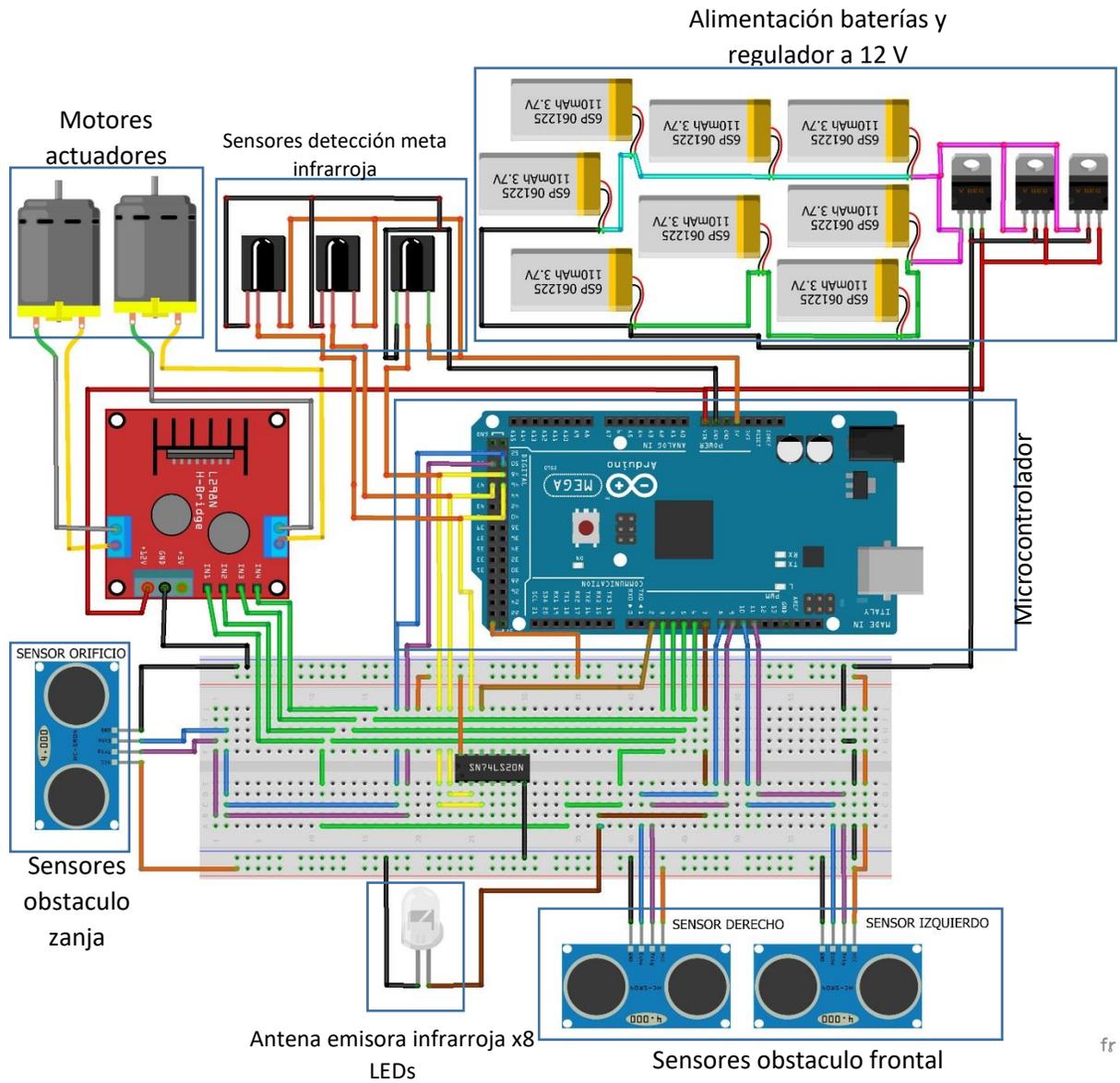


Figura 15. Detalle de elementos y conexión a pines arduino.

Para mayor detalle de diagrama eléctrico dirigirse a anexo C.

Movimiento del explorador.

El explorador se mueve dentro de un ambiente controlado el cual se puede apreciar en la figura 16, la disposición de los elementos en la pista se deben a que el objetivo es encontrado por el explorador luego de realizar un barrido de búsqueda, desde la partida que

presenta la posibilidad de ser ubicada en cualquier punto de la pista, hasta el objetivo que se coloca luego de la hendidura, es decir el punto inicio de búsqueda no es fijo y la meta sí.

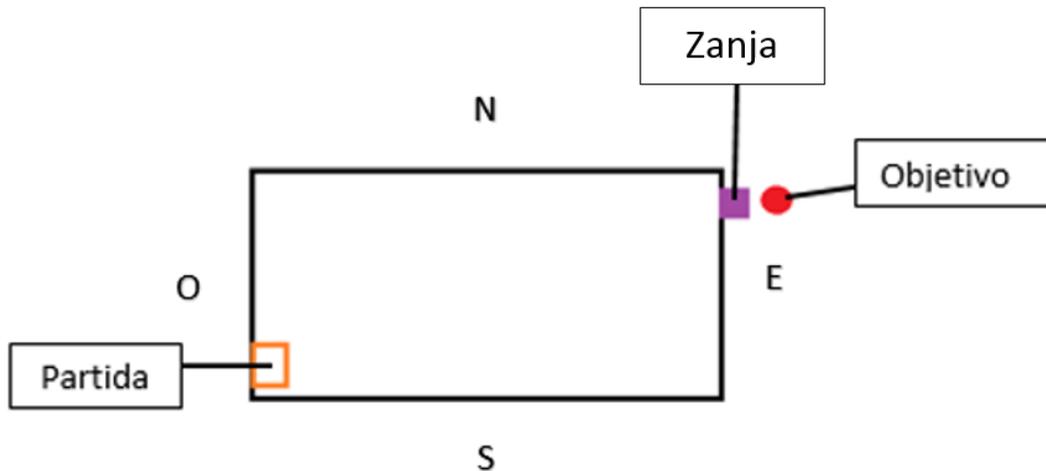


Figura 16. Ambiente controlado.

El propósito de este proyecto se divide en varias fases o procesos que realiza el explorador para llegar al objetivo, que son:

- 1.- Partida: Salida del punto designado de partida.
- 2.- Movimiento de barrido zigzag: procedimiento donde la plataforma se mueve en barrido denominado en este proyecto como búsqueda exhaustiva.
- 3.- Monitoreo de sensores receptores infrarrojos: recepción de señal infrarroja indicando la posición del objetivo.
- 4.- Detección y direccionamiento frontal del explorador hacia la meta.
- 5.- Avance hacia objetivo con detección de posible zanja: posterior al direccionamiento, el buscador avanza hacia la meta monitoreando el suelo debido a la posible hendidura.

6.- Activación de antena emisora infrarrojo para señalar existencia de zanja: al determinarse la existencia de obstaculo deprimido antes del objetivo, el explorador realiza funciones para posicionarse y activar la antena.

Por lo expuesto en la teoría de enjambres en la introducción, es necesario realizar procesos de exploración debido a que el agente desconoce la ubicación del objetivo, simulación del procedimiento lo más parecido a la realidad, donde los individuos que componen la colmena deben realizar búsqueda en el entorno para encontrar el recurso requerido por el enjambre, ya que es imposible que los agentes buscadores conozcan desde un inicio la ubicación del objetivo.

Si los agentes de una colmena conociesen la ubicación del objetivo desde el inicio, no se requiere realizar procesos de búsqueda, por lo que el desplazamiento hacia la meta sería ideal, trazando una ruta directa partida-objetivo como se muestra en la figura 17.

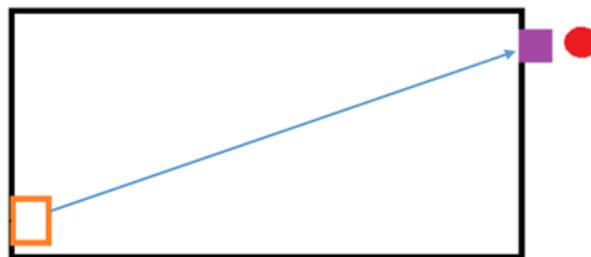


Figura 17. Desplazamiento ideal de explorador.

El desplazamiento de exploración exhaustivo propuesto en este proyecto es el que se observa en la figura 18, el cual consta de un avance en zigzag limitado por paredes perceptibles por medio de sensores frontales, este método de búsqueda se escogió ya que además de ser imposible un desplazamiento ideal, se debe explorar la mayor cantidad de área dentro del entorno en forma ordenada, hasta que la meta sea ubicada por medio de sensores de infrarrojo.

Ubicación inicial 2.

Barrido teórico con el buscador en la esquina nor-oeste y con el frente hacia el este de la pista, se aprecia en la figura 20.

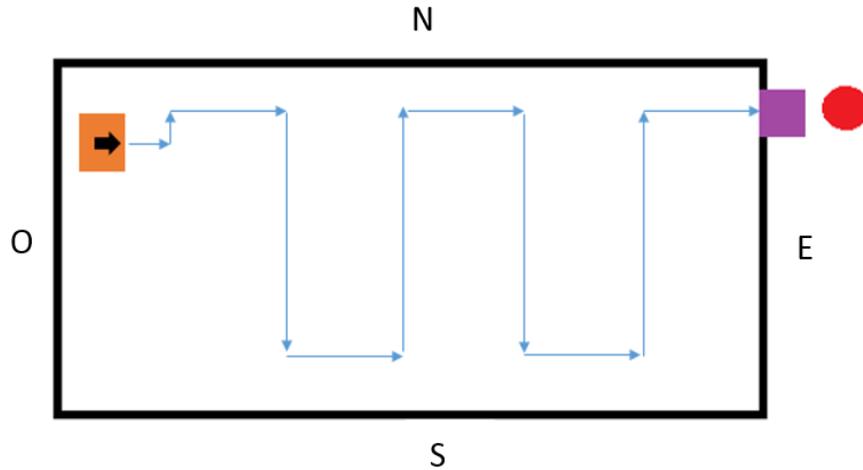


Figura 20. Movimiento para ubicación inicial 2.

Ubicación inicial 3.

Barrido teórico con el buscador en la parte oeste de la pista y con el frente hacia el este, se puede apreciar en la figura 21.

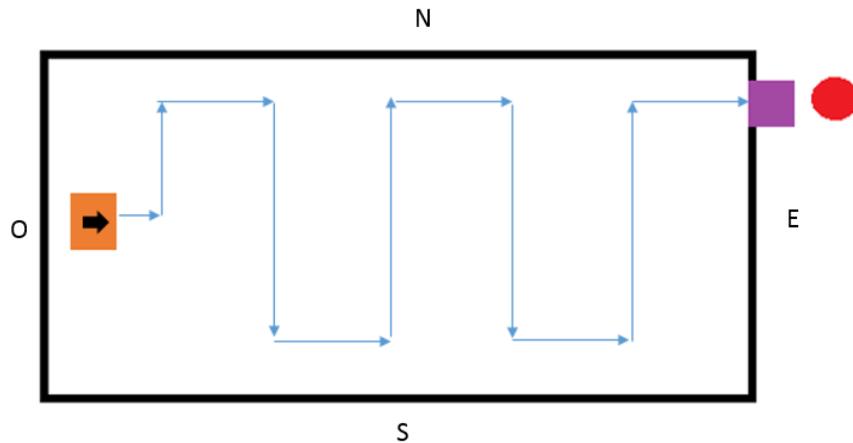


Figura 21. Movimiento para ubicación inicial 3.

y le permiten realizar los procesos para encontrar el objetivo en las distintas pruebas descritas anteriormente.

Por lo cual se desarrolla diagramas de flujo que describen la sucesión de funciones utilizadas para realizar la exploración propuesta.

Diagrama de flujo Buscador

Funciones de movilidad

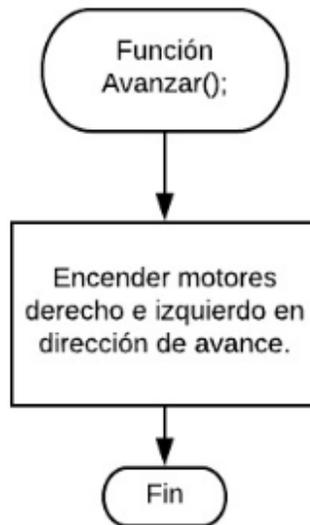


Figura 24. Función para avance de buscador.

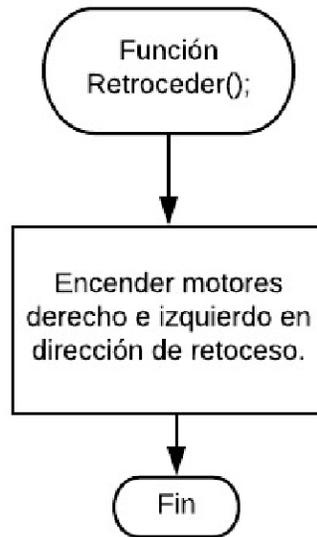


Figura 25. Función de retroceso del buscador.

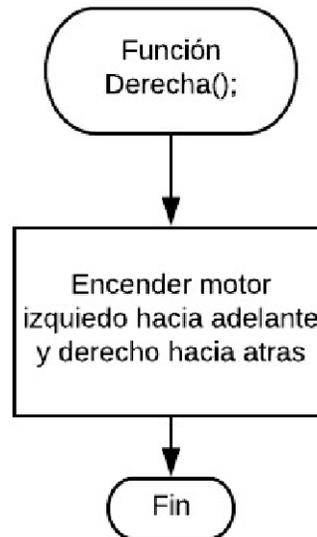


Figura 26. Función que gira a la derecha al buscador.

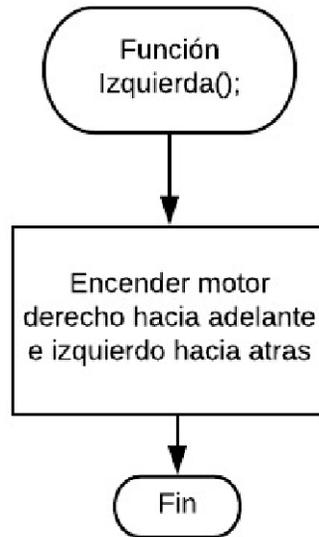


Figura 27. Función para giro izquierda de buscador.

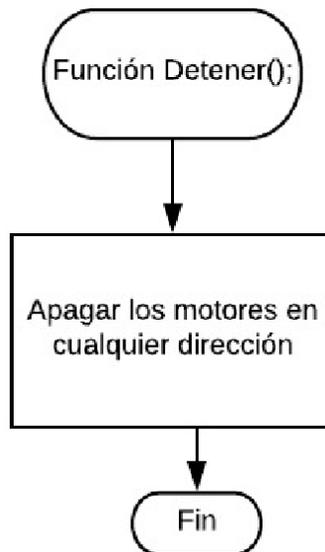


Figura 28. Función que detiene la movilidad total del buscador.

Función principal.

El explorador realiza funciones de barrido con la opción de activar la interrupción si detecta el panel de diodos en cualquier instante, los sensores receptores presentan output inverso, esto es 0 si detecta y 1 en estado normal, por este motivo las salidas de los tres

sensores se conectan a una compuerta lógica NAND, y cuando uno se activa, la compuerta activa la interrupción indicando que se encontró la meta, en la figura 29 se puede apreciar el diagrama de flujo que muestra las funciones ordenadas para realizar el barrido de búsqueda, con la capacidad de activar la interrupción al encontrar el objetivo.

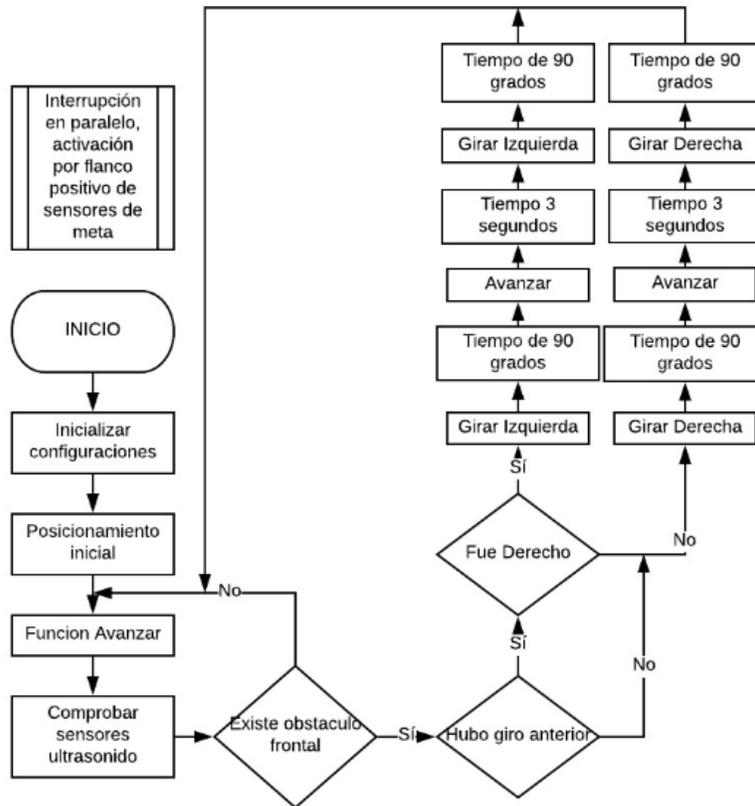


Figura 29. Funciones para realizar barrido de búsqueda con interrupción en paralelo.

Las funciones que se observan en la figura 29, permiten realizar el desplazamiento en zigzag de búsqueda y evasión de paredes.

Cuando se encuentra la meta se activa la función de interrupción expuesta en la figura 30 y realiza los siguientes procedimientos:

- 1.- Posicionamiento frontal de explorador en dirección a la meta: el explorador se coloca frontalmente hacia el panel de diodos emisores.

2.- Avance y monitoreo de hendidura: el agente explorador avanza hacia el objetivo comprobando la existencia de zanja.

3.- Activación de antena infrarroja: la antena se activa si la hendidura existe, realizando un proceso para detener al explorador en una ubicación visible para otro agente especializado.

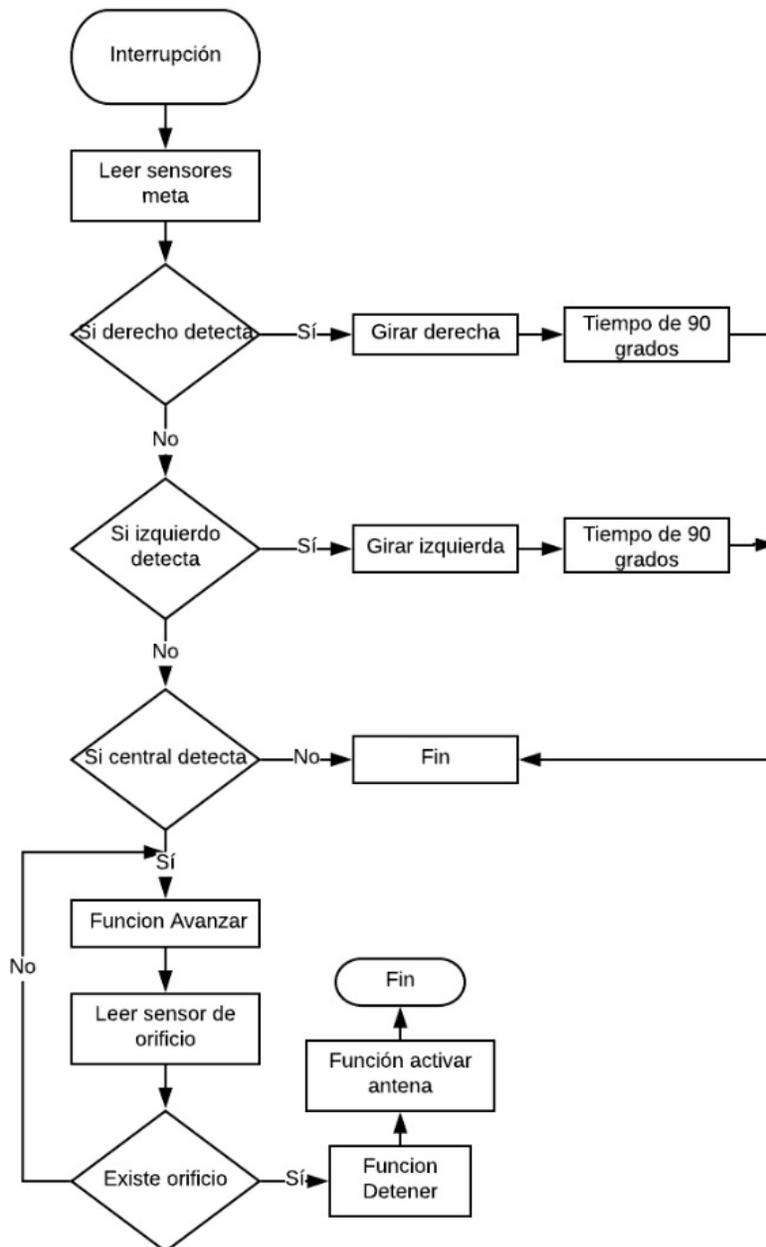


Figura 30. Función de interrupción

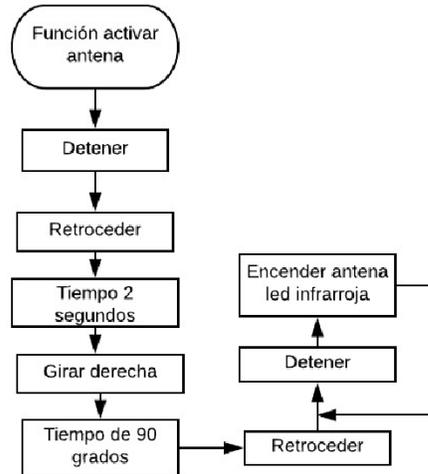


Figura 31. Función de activación de antena.

En la figura 28 se puede observar el diagrama de flujo que se ejecuta si el explorador encuentra la zanja en medio de la interrupción que sigue al objetivo, esto mantiene al agente con la antena encendida indefinidamente por medio de un bucle infinito.

Para que el agente constructor pueda distinguir entre la señal de falla del agente y el objetivo, el encendido de antena se puede realizar en una frecuencia que el constructor este programado para seguir, diferenciando la señal infrarroja del explorador con la señal de la meta.

Ecuaciones utilizadas para cálculo de resultados del algoritmo

Ecuación para el tiempo de descarga de la batería

Se utiliza para realizar el cálculo aproximado del tiempo de descarga de la batería con relación a la capacidad de carga y el amperaje utilizado por el agente.

$$\textit{Autonomia de buscador} = \frac{\textit{Caga de bateria mAh}}{\textit{Amperaje necesario}}; \quad (1)$$

Ecuación para calcular velocidad lineal

Se utiliza para calcular la velocidad lineal del agente, mediante la proporción que existe entre velocidad angular y radio de giro de los actuadores tipo oruga.

$$\vec{V} = \vec{w} \cdot r; \quad (2)$$

Donde \vec{V} es la velocidad lineal del explorador, \vec{w} la velocidad angular nominal a 12 [V] y r es el radio de las orugas.

Ecuación para obtener factor de tiempo de barrido por metro de distancia en desplazamiento ideal.

Se utilizó para calcular el factor de tiempo de barrido aproximado necesario con respecto a la distancia de desplazamiento directo o ideal.

$$\text{Factor para tiempo de barrido} = \frac{\text{Tiempo promedio de barrido por ubicación inicial [s]}}{\text{Distancia línea recta desde partida a objetivo [m]}} ; \quad (3)$$

Resultados

Mecánicos

El ensamblaje del buscador para el desarrollo de pruebas se realiza con éxito según el diseño detallados en figura 1 y tabla1, los componentes electrónicos se acomodan sin ningún problema, se puede ver el diseño 3D comparado con el modelo real en la figura 29.

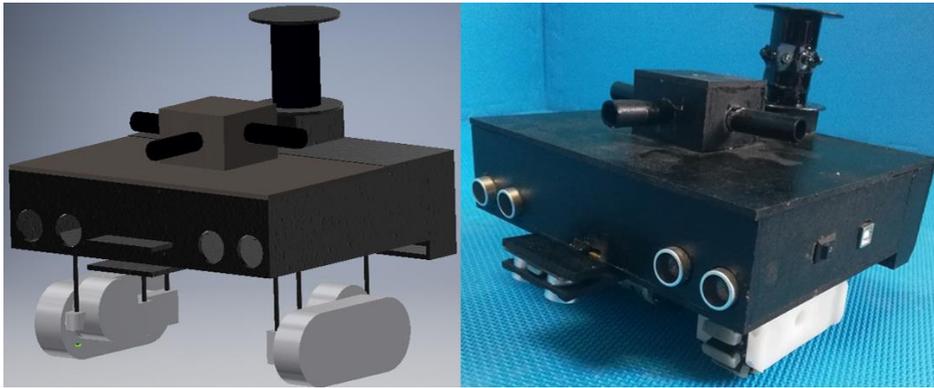


Figura 32. Diseño teórico y resultado real.

Para mayor detalle de piezas y dimensiones dirigirse a anexo A.

En la figura 30, se puede ver el resultado de construcción de pista de pruebas desarmable de poliestireno expandido con paredes MDF, y un área de 6 [m²] para realizar las pruebas.



Figura 33. Implementación física de pista de pruebas.

Eléctricos

De acuerdo a pruebas realizadas en campo se determina que el amperaje del buscador en funcionamiento es de 0,97 a 0,99 [A].

Debido a los valores reales resultantes, se estima una autonomía calculada por medio de la ecuación 1.

$$\text{Autonomia de buscador} = \frac{4,8 \text{ [mAh]}}{0,98 \text{ [A]}} = 4,9 \text{ [h]}$$

La capacidad de funcionamiento sin problema del buscador es de 4,54 [h] pero el valor puede variar según sea el requerimiento y carga de la batería.

Para ver diagrama eléctrico detallado dirigirse a anexo D.

Como resultado además se tiene la construcción e implementación del panel objetivo emisor de luz infrarroja conectado como se detalla en la figura 8, cada diodo tiene una potencia de 0,078 [W], el panel es detectable en rangos de 2 a 50 [cm] de distancia por el buscador, y se puede apreciar en la figura 30.

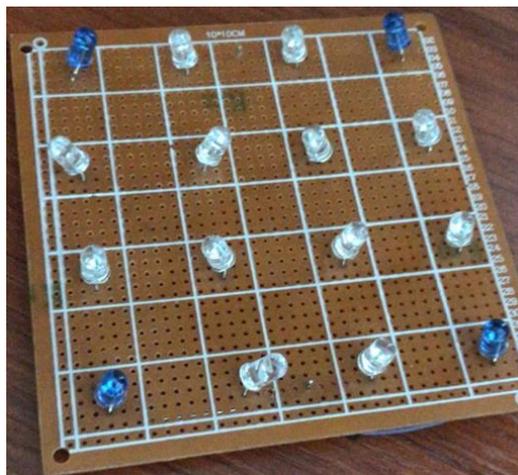


Figura 34. Panel objetivo de diodos emisores infrarrojo

Algoritmos

El código de los algoritmos de control válidos para búsqueda con agente explorador se encuentran adjuntos en el anexo D.

Prácticos

Se realizaron pruebas en distintas ubicaciones iniciales de la pista como se muestra en las figuras 19, 20, 21, 22 y 23, anteriormente explicadas con el fin de obtener probabilidades de éxito con respecto a la forma de partida del explorador, las mediciones se pueden ver en la tabla 6.

Tabla 6
Datos experimentales obtenidos en pista de pruebas.

	Prueba	Tiempo de búsqueda en segundos	Éxito/Fallida	Observación
Ubicación inicial 1. Distancia aproximada de barrido: 9,44 [m].	1	106	Éxito	*Éxito con error en el barrido
	2	90	Fallida	
	3	135	Fallida	
	4	108	Éxito	
	5	108	Éxito	
Ubicación inicial 2. Distancia aproximada de barrido: 7,74 [m].	1	168	Fallida	
	2	99	Fallida	
	3	91	Éxito	*Éxito con error en el barrido
	4	95	Éxito	
	5	85	Éxito	

Ubicación inicial 3. Distancia aproximada de barrido 8,59: [m]	1	102	Fallida	
	2	94	Fallida	
	3	99	Éxito	*Éxito con error en el barrido
	4	98	Éxito	
	5	96	Éxito	
Ubicación inicial 4. Distancia aproximada de prueba: 5,3 [m]	1	69	Éxito	
	2	72	Éxito	
	3	75	Fallida	
	4	78	Éxito	
	5	74	Éxito	
Ubicación inicial 5. Distancia aproximada de barrido: 2,1 [m]	1	26	Éxito	
	2	32	Éxito	
	3	26	Éxito	
	4	28	Éxito	
	5	31	Éxito	

Nota: Tiempos de búsqueda según la partida de prueba.

* Éxito con error en barrido. Consigue llegar a la meta sin embargo el barrido no cumple con lo esperado.

El tiempo promedio, distancia recorrida por barrido y módulo de posición relativa partida-objetivo, se describen en la tabla 7.

Tabla 7
Tiempos promedio de exploración por prueba y distancia directa objetivo-meta

Ubicación inicial	Promedio tiempo experimental en [s]	Distancia aproximada del recorrido por barrido en [m].	Distancia línea recta partida-objetivo en [m]
1	107,33	9,44	3,2
2	90,33	7,74	3,09
3	97,66	8,59	3,01
4	73,25	5,3	1,95
5	28,6	2,1	1,68

Nota: tiempos promedio obtenidos de pruebas en tabla 5.

La tabla 7 indica la distancia que el explorador debe recorrer con el barrido, en relación a la distancia directa si explorador realiza un desplazamiento ideal como se indica en la figura 17.

Discusión de resultados.

La construcción del explorador permite la aplicación de los algoritmos con resultados favorables en la búsqueda, de acuerdo a las especificaciones de las orugas, el diseño de la plataforma y objetivo

El robot se desplaza a una velocidad de 3 rad/s o 28,65 RPM debido a la reducción incorporada, proyectando así, una velocidad lineal obtenida de la ecuación 2.

$$\vec{V} = 3 \left[\frac{rad}{s} \right] \cdot 0,024 [m] = 0,072 \left[\frac{m}{s} \right]$$

La velocidad nominal permitió el desenvolvimiento de las pruebas realizadas.

De acuerdo a las pruebas realizadas que se muestran en la tabla 6, se obtiene los valores porcentuales de éxito que se aprecian en la tabla 8.

Tabla 8
Probabilidad de éxito con respecto a ubicación inicial

Ubicación inicial	Probabilidad de éxito
1	60%
2	60%
3	60%
4	80%
5	100%

Nota: Porcentaje de éxito para completar barrido de búsqueda en pista.

El porcentaje de éxito de acuerdo a la ubicación de partida tiene que ver con la distancia recorrida por el explorador, esto se puede comparar en la tabla 7.

Con los promedios de tiempo en la tabla 7, se determina que el agente se demora más en las primeras tres ubicaciones iniciales, debido a que la cantidad de barridos o distancia

recorrida es mayor y debido a que se presentan más giros de 90 grados lo que aumenta la probabilidad de falla, con respecto a las dos ubicaciones siguientes.

Con los valores expresados en la tabla 7, se puede considerar un factor de tiempo aproximado de búsqueda del algoritmo que depende de la distancia lineal partida-objetivo, utilizando los valores de tiempo promedio por ubicación inicial, con respecto a la distancia de desplazamiento ideal, los valores obtenidos aplicando la ecuación 3, se pueden ver en la tabla 9.

Tabla 9
Factor de tiempo de barrido.

Ubicación inicial	Tiempo promedio de barrido en [s]	Tiempo máximo de barrido en [s]	Tiempo mínimo de barrido en [s]	Distancia recorrida línea recta en [m]	Factor de tiempo de barrido en [s/m]	Error máximo	Error mínimo
1	107,33	108	106	3,2	33,54	0,21	-0,42
2	90,33	95	85	3,09	29,23	1,51	-1,72
3	97,66	99	96	3,01	32,45	0,45	-0,55
4	73,25	78	69	1,95	37,56	2,44	-2,18
5	28,6	32	26	1,68	17,02	2,02	-1,55
Promedio					33	1	-1

Nota: El factor tiempo de barrido es la relación de tiempo de barrido para llegar a un objetivo, que en línea recta tomaría menor tiempo.

De acuerdo a la tabla 9, el factor de tiempo que se demora el explorador es en promedio de 33 [s] por metro de distancia lineal desde la partida al objetivo, con error promedio de máximo 1 [s/m] y mínimo de 1 [s/m], que puede ser resumido para efectos técnicos como 33 ± 1 [s/m].

Dados los datos de búsqueda se considera que el algoritmo es funcional parcialmente ya que existen factores detectados que aumentan la probabilidad de falla tales como:

1.- Potencia diferente entre motores: a pesar que los motores son similares físicamente presentan diferencia de velocidades, debido a que ningún elemento es completamente igual a otro, presentan pequeñas variaciones que provocan desviaciones de un 10% aproximadamente con respecto a un trazo completamente recto en el recorrido de barrido, que se deben controlar por métodos de calibración o mecanismos de control más avanzados.

2.- Arranque brusco: cuando el explorador inicia su movimiento en cualquier dirección, debe romper la inercia inicial, o pasar de estado estático a móvil, en ese momento el agente experimenta una aceleración repentina distinta en cada motor que origina una desviación pequeña al comenzar el desplazamiento, lo que afecta en la precisión de giro.

3.- Vibración durante las pruebas: Debido al movimiento de los mecanismos de oruga, el robot presenta pequeños saltos que afectan en los desplazamientos de trayectoria recta.

El algoritmo de búsqueda no es válido si el explorador se encuentra en sentido contrario a la meta como se muestra en la figura 32.

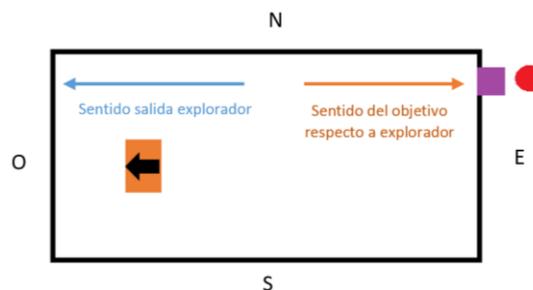


Figura 35. Partida invalida para exploración.

Conclusiones y Recomendaciones

El proyecto desarrollado es un avance en exploración utilizando sistemas de enjambre, este trabajo es un primer acercamiento a este tipo de proyectos y presenta un modelo básico de un explorador que puede desenvolverse en un ambiente controlado, realiza un barrido ordenado sujeto a fallas como las presentadas anteriormente, que para futuros trabajos pueden ser corregidas y controladas.

El sistema propuesto realiza un reconocimiento en un ambiente controlado mediante la programación por algoritmos, logrando resultados que con las pruebas realizadas, porcentaje de éxito y los tiempos de barrido obtenidos cumplen con el objetivo propuesto.

El consumo energético del buscador es de 0,99 [A] a 12 [V], por lo que considerando el tiempo de descarga de las batería calculado de 4,9 [h] x2, el explorador tiene una autonomía capaz de realizar el barrido de búsqueda 329 veces en un área de $6[m^2]$.

Se cumple el objetivo propuesto de un explorador capaz de realizar el reconocimiento por medio de barrido exhaustivo, con un tiempo de barrido proporcional al factor de tiempo de 33 [s/m] y la distancia entre el explorador y la meta en línea recta.

Para mejorar la precisión del barrido y que no afecte de manera significativa la ubicación, se sugiere acortar la amplitud de avances para realizar una exploración más completa, sin embargo, es necesario el control de velocidad u orientación precisa del explorador, ya que, al aumentar el número de giros en el barrido aumenta su porcentaje de falla.

Se recomienda utilizar materiales livianos para la construcción del buscador tales como: madera MDF, acrílico, ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), Nailon (poliamida), o

cualquier otro material ligero y maquinable para diseño de plataforma de masa no mayor a 2 [kg], para evitar sobrecargar los motores y disminuir consumo de batería.

El mantener una velocidad igual entre ambos motores es un factor importante para lograr desplazamientos rectos y giros perpendiculares precisos en 90 grados, es por esto que se requiere implementar un control de velocidad con sensores (encoder), giroscopio, brújula, acelerómetro o sistemas de ubicación como GPS local.

Para disminuir las fallas en el barrido de búsqueda se puede realizar el control al comenzar el movimiento desde el estado de reposo de forma progresiva para evitar las salidas con saltos y que se disminuya la desviación de inicio en los arranques bruscos.

Una falla a considerar en el algoritmo es cuando el explorador hace su salida en sentido opuesto a la meta, en este caso el explorador no encuentra la meta, para lo cual una solución propuesta para futuros trabajos es la implementación de un algoritmo que mida el avance luego de los giros de izquierda o derecha como se muestra en la figura 36.

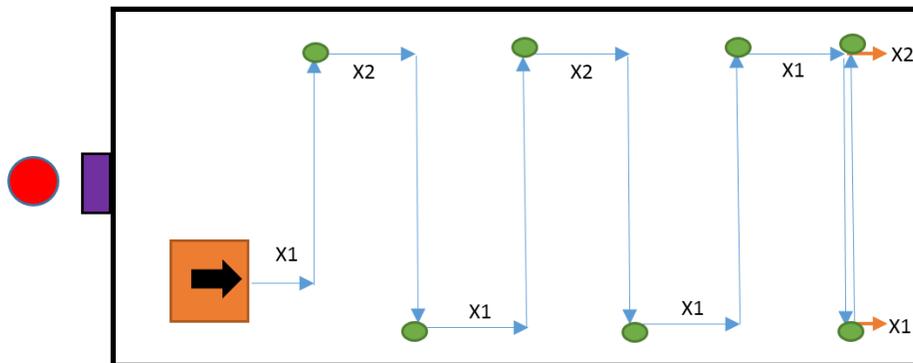


Figura 36. Barrido con medición de amplitud de barrido para determinar cambio de sentido por ubicación inicial en sentido contrario a objetivo.

El algoritmo debe comparar las distancias después del giro que se muestra de color verde en la figura 36, y guardarlo en una variable $x1$ si es salida de inicio o avance luego de

giro a izquierda, y en x_2 si el giro fue de derecha, el agente debe comparar si la distancia x_1 y distancia x_2 son iguales a 0, esto indicaría que el robot no tiene avance por lo que la meta estaría del otro lado, finalmente se posiciona el explorador al otro lado y comenzaría nuevamente el barrido en sentido contrario hasta el objetivo.

Se propone en proyectos posteriores la implementación de más buscadores que interactúen entre sí al mismo tiempo en distintos ambientes y otros agentes especializados en distintas áreas de exploración, corrección de fallas, transporte de recursos, entre otros.

Bibliografía

Li, M., Lu, K., Zhu, H., Chen, M., Mao, S., & Prabhakaran, B. (2008, August). Robot swarm communication networks: architectures, protocols, and applications. In *Communications and Networking in China, 2008. ChinaCom 2008. Third International Conference on* (pp. 162-166). IEEE.

Solís-Ortega, R. (2016). Algoritmo cooperativo con enjambres de robots para la exploración de una zona y comunicación de una ruta hacia un objetivo.

Dudek, G., Jenkin, M., Milios, E., & Wilkes, D. (1993, July). A taxonomy for swarm robots. In *Intelligent Robots and Systems' 93, IROS'93. Proceedings of the 1993 IEEE/RSJ International Conference on* (Vol. 1, pp. 441-447). IEEE.

Sharkey, A. J., & Sharkey, N. (2006). The application of swarm intelligence to collective robots. In *Advances in applied artificial intelligence* (pp. 157-185). IGI Global.

Tan, Y., & Zheng, Z. Y. (2013). Research advance in swarm robotics. *Defence Technology*, 9(1), 18-39.

Muñoz, M. A., López, J. A., & Caicedo, E. F. (2008). Inteligencia de enjambres: sociedades para la solución de problemas (una revisión). *Ingeniería e Investigación*, 28(2).

Alfonso, W., Muñoz, M., López, J., & Caicedo, E. (2007, September). Optimización de funciones inspirada en el comportamiento de búsqueda de néctar en abejas. In *Memorias del Congreso Internacional de Inteligencia Computacional (CIIC2007). Bogotá-Colombia* (pp. 1-9).

Dorzán, M., Gagliardi, E., Leguizamón, M., Taranilla, M., & Penalver, G. H. (2009). Algoritmos aco aplicados a problemas geométricos de optimización. *XIII Encuentros de Geometría Computacional*.

Duarte, A., Weissing, F. J., Pen, I., & Keller, L. (2011). An evolutionary perspective on self-organized division of labor in social insects. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42, 91-110.

Fujisawa, R., Nagaya, N., Okazaki, S., Sato, R., Ikemoto, Y., & Dobata, S. (2015). Active modification of the environment by a robot with construction abilities. *ROBOMECH Journal*, 2(1), 9.

Araújo, A., Portugal, D., Couceiro, M. S., Sales, J., & Rocha, R. P. (2014). Desarrollo de un robot móvil compacto integrado en el middleware ROS. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI*, 11(3), 315-326.

Birk, A., & Carpin, S. (2006). Rescue robotics—a crucial milestone on the road to autonomous systems. *Advanced Robotics*, 20(5), 595-605.

Calisi, D., Farinelli, A., Iocchi, L., & Nardi, D. (2007). Multi-objective exploration and search for autonomous rescue robots. *Journal of Field Robotics*, 24(8-9), 763-777.

Bravo Ramírez, H. E., Urrea, B., & Gonzalo, R. (2016). *Diseño e implementación de un robot móvil tipo oruga para exploración en terrenos irregulares* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).

Arduino. (20 de 11 de 2017). *Arduino*. Obtenido de <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>

Anexo A: Partes estructurales de explorador

Anexo B: Detalles técnicos de elementos electrónicos.

Anexo C: Diagrama eléctrico

Anexo D: Algoritmos

