



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL
ESCUELA DE POSGRADOS “ESPOG”

MAESTRÍA EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN
Resolución: RPC-SO-09-No.265-2021

PROYECTO DE TITULACIÓN EN OPCIÓN AL GRADO DE MAGISTER

Título del proyecto:
Simulación de dos modelos matemáticos en Matlab para planificación de rutas de robots móviles con ruedas.
Línea de Investigación:
Ciencias de la ingeniería aplicadas a la producción, sociedad y desarrollo sustentable
Campo amplio de conocimiento:
Ingeniería, industria y construcción
Autor/a:
Mélany Jazmín Yarad Jácome
Tutor/a:
Ing. Junior Figueroa Mgst. – Ing. Wilmer Albarracin Mgst.

Quito – Ecuador

2023

APROBACIÓN DEL TUTOR EXTERNO

Yo, Junior Rafael Figueroa Olmedo con C.I: 0802820183 en mi calidad de Tutor práctico del proyecto de investigación titulado: **Simulación de dos modelos matemáticos en Matlab para planificación de rutas de robots móviles con ruedas.**

Elaborado por: **Mélaney Jazmín Yarad Jácome**, de C.I: 171624299-3, estudiante de la Maestría **Electrónica y Automatización de la UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito D.M., 25 de Agosto de 2023

Firmado
digitalmente por
JUNIOR RAFAEL
FIGUEROA OLMEDO
Fecha: 2023.08.25
08:21:53 -05'00'

Firma

Ing. Junior Rafael Figueroa Olmedo, Mgst

C.I: 0802820183

Senescvt: 1001-2017-1798737

APROBACIÓN DEL TUTOR INTERNO



Yo, Wilmer Fabian Albarracín Guarochico con C.I: 171334115-2 en mi calidad de Tutor metodológico del proyecto de investigación titulado: **Simulación de dos modelos matemáticos en Matlab para planificación de rutas de robots móviles con ruedas.**

Elaborado por: **Mélany Jazmín Yarad Jácome**, de C.I: 171624299-3, estudiante de la Maestría **Electrónica y Automatización** de la **UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA ISRAEL (UISRAEL)**, como parte de los requisitos sustanciales con fines de obtener el Título de Magister, me permito declarar que luego de haber orientado, analizado y revisado el trabajo de titulación, lo apruebo en todas sus partes.

Quito D.M., 29 de agosto de 2023



Firma

DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE



Yo, **Mélany Jazmín Yarad Jácome** con C.I: **171624299-3**, autor/a del proyecto de titulación denominado: **Simulación de dos modelos matemáticos en Matlab para planificación de rutas de robots móviles con ruedas**. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las instituciones de educación superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar el respectivo trabajo de titulación para que sea integrado al Sistema Nacional de Información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.

1. Manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica Israel los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador, artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor@ del trabajo de titulación, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital como parte del acervo bibliográfico de la Universidad Tecnológica Israel.
2. Autorizo a la SENESCYT a tener una copia del referido trabajo de titulación, con el propósito de generar un repositorio que democratice la información, respetando las políticas de prosperidad intelectual vigentes.

Quito D.M., 25 de Agosto de 2023



Verificar autenticidad por:
**MELANY JAZMIN YARAD
JACOME**

Ing. Mélany Yarad J. Mgst

Ci: 1716242993

Tabla de contenidos

APROBACIÓN DEL TUTOR PRÁCTICO	II
APROBACIÓN DEL TUTOR METODOLÓGICO	III
DECLARACIÓN DE AUTORIZACIÓN POR PARTE DEL ESTUDIANTE	IV
Tabla de contenidos	V
Índice de figuras	VII
Índice de tablas	VIII
Índice de ecuaciones	VIII
Índice de anexo	VIII
INFORMACIÓN GENERAL	2
Contextualización del tema	2
Problema de investigación	3
Objetivo general	4
Objetivos específicos	4
Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos	4
CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	6
1.1. Contextualización general del estado del arte	6
1.2. Proceso investigativo metodológico	9
CAPÍTULO II: PROPUESTA	11
2.1 Fundamentos teóricos aplicados	11
2.1.1 Robots móviles	11
2.1.1.1. Robots móviles terrestres	12
2.1.1.1.1. Robots móviles terrestres de patas	13
2.1.1.1.2. Robots móviles terrestres de ruedas	14
2.1.1.1.3. Robots móviles terrestres de orugas	14
2.1.1.1.4. Robots móviles terrestres híbridos	15
2.1.2 Modelo cinemático del robot móvil diferencial	16
2.1.3 Planeación de rutas para robots móviles	17
2.1.3.1 Entorno del robot	18
2.1.3.2 Espacio de configuración	18
2.1.4 Algoritmos para planeación de rutas	20
2.1.4.1 Algoritmo Dijkstra	20
2.1.4.2 Algoritmo A-star	21

2.1.5	Software de simulación	22
2.1.5.1	Diseño de algoritmos para robots móviles en Matlab	23
2.2	Descripción de la propuesta	23
2.3	Validación de la propuesta	31
2.4	Matriz de articulación de la propuesta	32
2.5	Análisis de resultados. Presentación y discusión.	34
CONCLUSIONES		36
RECOMENDACIONES		37
BIBLIOGRAFÍA		38
ANEXOS		41

Índice de figuras

Figura 1	Grafo Dijkstra	7
Figura 2	Grafo A-Star	8
Figura 3	Robots terrestres, aéreos y acuáticos	12
Figura 4	Robot hexápodo.....	13
Figura 5	Mars Curiosity.....	14
Figura 6	Robot tipo oruga	15
Figura 7	Robot armar	15
Figura 8	Modelo cinemático de un robot móvil diferencial	16
Figura 9	Localización en el plano cartesiano del robot	17
Figura 10	Entorno de un robot	18
Figura 11	Robot circular en el entorno que contiene un obstáculo	19
Figura 12	Esquema algoritmo Dijkstra (Preciado, 2018).....	20
Figura 13	Proceso para planificación de rutas	24
Figura 14	Diseño de mapeo en Excel	25
Figura 15	Configuración de nodos en Matlab	26
Figura 16	Diseño de mapeo en Matlab.....	26
Figura 17	Generación de nodos	27
Figura 18	Entornos estructurados para comparación de algoritmos	278

Índice de tablas

Tabla 1 Datos de algoritmos simulados	29
Tabla 2 Comparación de resultados	30
Tabla 3 Descripción de perfil de validadores	31
Tabla 4 Escala de evaluación. Elaborada por: MSc Manolo Paredes Calderón.	31
Tabla 5 Escala de evaluación. Elaborada por: Ing. Diego González Sacoto. MI	32
Tabla 6 Escala de evaluación. Elaborada por: Ing. Christian Ortega Mgs.	32

Índice de ecuaciones

Ecuación 1: Ecuaciones cinemáticas del punto medio del eje entre las ruedas activas	17
Ecuación 2: Espacio de trabajo libre	19
Ecuación 3: Estimación heurística del coste asociado	22
Ecuación 4: Estimación costo mínimo desde un nodo N	22
Ecuación 5: Estimación costo de desplazarse desde el nodo inicial hasta cualquier otro nodo	22
Ecuación 6: Función distancia euclidiana definida para un par de nodos	22

Índice de anexos

ANEXO 1 Parámetros de evaluación algoritmo A* ruta 1	41
ANEXO 2 Parámetros de evaluación algoritmo A* ruta 2	41
ANEXO 3 Parámetros de evaluación algoritmo A* ruta 3	42
ANEXO 4 Parámetros de evaluación algoritmo A* ruta 4	42
ANEXO 5 Parámetros de evaluación algoritmo Dijkstra ruta 1	43
ANEXO 6 Parámetros de evaluación algoritmo Dijkstra ruta 2	43
ANEXO 7 Parámetros de evaluación algoritmo Dijkstra ruta 3	44
ANEXO 8 Parámetros de evaluación algoritmo Dijkstra ruta 4	44
ANEXO 9 Aprobación del Validador MSc Manolo Paredes Calderón.	45
ANEXO 10 Aprobación del Validador Ing. Diego González Sacoto. MI	46
ANEXO 11 Aprobación del Validador Ing. Christian Ortega Mgs.	47

INFORMACIÓN GENERAL

Contextualización del tema

Hoy en día con el avance de la tecnología se ha demostrado que los robots móviles ya no se encuentran anclados a su ambiente y pueden desplazarse dentro de un espacio siendo este delimitado o no. Para determinar el movimiento del robot la configuración dinámica parte desde una posición inicial, indicando que tipos de movimientos se pueden realizar y cuáles no. Las limitaciones de los movimientos sean estos libres y/o restringidos dependen del número de ruedas empleadas y de la posición donde se coloquen (García Á. , 2019). La aplicación de los robots en el ámbito industrial se ha tornado una necesidad creciente, sobre todo si se habla de robótica móvil, ya que se ha convertido en una herramienta de apoyo a la productividad.

Comparando el concepto del modelo matemático para los robots móviles como lo menciona Martín Larco en su investigación, se entiende que el modelo matemático base manejado por los robots móviles es un modelo no lineal, característica particular que conlleva a un tratamiento de las variables en base a la función de estados, permitiendo llevar al sistema de una posición X, Y, θ a una posición deseada en un tiempo dado. (Larco M. , 2019)

Existen empresas que ofrecen robots móviles en tareas como la limpieza de hogares, monitoreo y vigilancia de instalaciones, exploración de ambientes naturales, remoción de bombas y explosivos, agricultura, entre otros. (Chávarro & Zambrano, 2016) Como es notorio todas estas aplicaciones realizan una planeación de rutas, estas rutas permiten planificar trayectorias transitables entre la posición de origen y la del objetivo. Con el transcurso de los años y la continua progresión de la inteligencia artificial, se han creado variados algoritmos que simplifican la tarea de diseñar trayectos; para sintetizar esta actividad se utilizará la herramienta Matlab, ya que maneja un entorno de programación, cálculos numéricos con vectores y matrices y efectuará la simulación del robot móvil, el análisis matemático y la comparación de los algoritmos planteados, siendo estos Dijkstra y A-Star (A*).

El algoritmo de Dijkstra se basa en la búsqueda de caminos mínimos, es decir permite encontrar el camino más corto entre dos vértices de una estructura de datos usada para la representación de conexiones entre elementos. “Consiste en generar un árbol de estados donde el inicio es la raíz de árbol, punto a partir del cual se exploran todos los estados sucesores (todos los estados conectados a la raíz), cada vez que es explorado un estado se almacena el costo de moverse del estado actual a cada uno de sus sucesores, este proceso se repite para todos los estados” (Dijkstra, 1959). Su principal aplicación se encuentra en los módulos GPS, encargados de hallar la ruta más próxima entre la posición presente del usuario y el punto de llegada deseado.

Algoritmo A* es una mejora desarrollada a los postulados del algoritmo Dijkstra, su principio es encontrar rutas más cortas dentro de la estructura de datos (grafo) entre un punto de partida y un punto de llegada determinados. El algoritmo A* considera las distancias de seguridad que han sido definidas en el ámbito de la robótica. Este algoritmo es eficiente y flexible, aparte de que si existe una solución siempre dará con ella. Esto es importante puesto que nos da fiabilidad y estabilidad a la hora de calcular una trayectoria (Fernández & Valmaseda, 2010)

Problema de investigación

La inserción de la automatización en el campo industrial ha crecido significativamente con la digitalización, la robótica y la inteligencia artificial (IA), las cuales han transformado la tecnología de manera exponencial, generando nuevas ocupaciones y cambiando las tareas que los seres humanos realizaban dentro de una industria, esto significa que en un futuro no muy lejano un tercio de las máquinas no reemplazarán a los trabajadores, sino que complementarán su trabajo, liberando tiempo para que los empleados desarrollen actividades más creativas e innovadoras (Coba, 2021)

Los robots móviles son máquinas utilizadas en la automatización industrial, pueden ser adaptados de acuerdo con las necesidades que garanticen mejor producción y optimización en los tiempos de trabajo con rutas de operación. Es de esta manera que se pretende encontrar la mejor ruta de planificación para

la ejecución de estas actividades teniendo en cuenta que el principal problema para un robot móvil es la planeación de dicha trayectoria, dado que se desea encontrar un recorrido libre de colisiones para el robot en un espacio de trabajo que presente una configuración inicial y final.

Con el análisis de los algoritmos Dijkstra y A-Star para planeación de rutas de robots móviles con ruedas se pretende comparar, y seleccionar el algoritmo más eficaz en la generación de rutas en ambientes que están en constante cambio; dado que, en el mundo real los sistemas robóticos móviles están diseñados para adaptarse a situaciones imprevistas en la ejecución de tareas con el fin de llegar al cumplimiento de metas y objetivos.

Objetivo general

Desarrollar la simulación de dos modelos matemáticos en Matlab para planificación de rutas de robots móviles con ruedas.

Objetivos específicos

- Definir los requerimientos necesarios para desarrollar la programación de los algoritmos Dijkstra y A-Star en Matlab.
- Diseñar la estructura de programación para la simulación de los modelos matemáticos propuestos en Matlab.
- Simular la planificación de la trayectoria del robot móvil evitando obstáculos y calculando la ruta óptima con el uso de los algoritmos Dijkstra y A-Star.
- Validar el algoritmo más eficiente para la planeación de rutas de robots móviles con ruedas.

Vinculación con la sociedad y beneficiarios directos

Disponer de una simulación para la planeación de rutas en robots móviles con ruedas, representa un aporte tecnológico para las industrias; cuya aplicación principal es realizar tareas de movilidad o transporte de artículos dentro de un espacio confinado con obstáculos, ya que el uso de esta tecnología

facilita el seguimiento de la trayectoria del robot, haciendo que este no presente dificultad en el trascurso del recorrido desde el punto de partida hasta el punto de llegada.

También se puede usar esta aplicación como una herramienta de entrenamiento para los robots móviles con ruedas, dado que el uso de la inteligencia artificial confiere autonomía al robot para decidir el camino con menor costo a tomar.

Así también, se estará colaborando con el medio ambiente en la reducción de plataformas móviles a base de combustibles, mismos que ejercen en la actualidad el transporte de elementos dentro de una industria.

CAPÍTULO I: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

1.1. Contextualización general del estado del arte

La investigación realizada por Martín Larco, hace referencia a los sistemas de control para robots móviles, donde menciona que la principal configuración se basa en el concepto de realimentación entre las variables que se necesitan medir y las que se usan para obtener el control del comportamiento del robot. (Larco M. , 2019)

Se debe entender que un robot móvil es un dispositivo capaz de tomar sus propias decisiones, esto haciendo referencia en su movilidad; por tanto, es un dispositivo autónomo el cual está monitoreado por software de robótica e inteligencia artificial, en conjunto con sensores y componentes de almacenamiento que le permiten desarrollar su gestión. Sebastián Ojeda en su proyecto con robots, menciona que los robots móviles “se articulan con programas informáticos de control y de gestión de almacenes que planifican las rutas que debe cubrir el dispositivo internamente y con herramientas informáticas de planificación de rutas y monitoreo en tiempo real para los recorridos de última milla.” (Ojeda, 2021)

El principal desafío en la elaboración de rutas y la navegación autónoma de robots surge al moverse en espacios limitados, donde existen obstáculos interponiéndose en el camino predeterminado. Esta problemática engendra dificultades como la complejidad de los datos, la carga computacional y la eventual existencia de barreras en movimiento. (Pandey & Parhi, 2017). Adicionalmente, es frecuente que las plataformas robóticas perciban su entorno a través de sistemas sensoriales, lo que implica analizar una amplia variedad de situaciones con el fin de lograr una navegación efectiva.. (Chenatti, 2018)

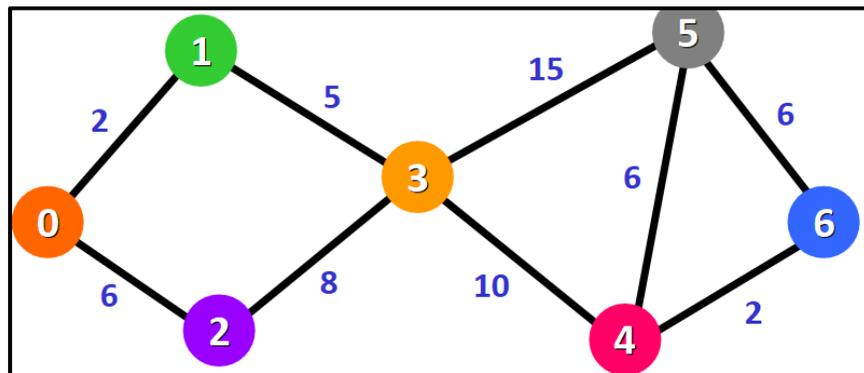
Iván Acosta en su desarrollo de proyecto de titulación relacionado con la planeación de rutas, indica “...la planificación de trayectorias es algo muy importante para los robots móviles autónomos, permite a los robots encontrar la trayectoria más corta u óptima entre dos puntos...” (Acosta, 2017)

Para el desarrollo del proyecto comparación de algoritmos para planeación de rutas en robots móviles con ruedas se emplean algoritmos relacionados al proceso, entendiendo que un algoritmo es una secuencia lógica y finita de pasos que permite solucionar un problema o cumplir con un objetivo (Merchán & Palencia, 2021). Los algoritmos relacionados a la planeación de trayectorias en esta simulación son el Dijkstra y el A-Star, cuyos principios se basan en la determinación del camino más corto desde el lugar de inicio hasta el punto de destino.

El algoritmo Dijkstra, también conocido como el algoritmo de los caminos mínimos, basa su principio en las iteraciones para calcular la ruta más breve desde un punto de partida, que actúa como origen, hasta el punto final, siguiendo las posibles sendas en la trayectoria, tal como se ilustra en la figura 1.

Figura 1

Grafo Dijkstra



Nota: La ilustración muestra un gráfico que representa la ruta que será creada por el algoritmo, trazando el camino más breve desde el punto de partida hacia los distintos puntos de destino. (Cassingena, 2022)

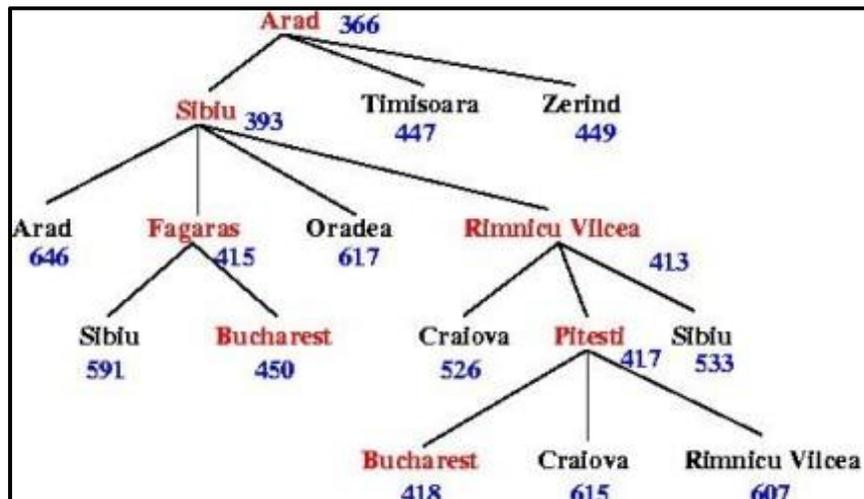
Una vez que el algoritmo ha identificado la ruta más corta entre el nodo inicial y otro nodo, dicho nodo se etiqueta como "visitado" y se incorpora al recorrido. Este proceso se repite hasta que todos los nodos en el gráfico hayan sido incluidos en el trayecto. De esta manera, se obtiene una senda que conecta el nodo de partida con todos los demás nodos, siguiendo el camino más corto para llegar a cada uno de ellos. (Cassingena, 2022)

Cuando se trabaja con el algoritmo Dijkstra este termina su trabajo al completar todos los nodos que se han agregado al camino hasta llegar al final, conectando cada uno de estos a través del camino más corto.

Como segundo paso a realizar se contempla el algoritmo A-Star (A*), este modelo matemático es una variación optimizada del algoritmo Dijkstra, dado que contine características propias y especiales para poder interpretar las trayectorias de los caminos a seguir; en esta modificación mejorada, se pretende encontrar rutas más cortas dentro de una trayectoria. (Grapheverywhere, 2020) En la figura 2 se tiene como punto central la observación dentro de la trayectoria, misma que permite obtener decisiones óptimas obre los caminos que debe seguirse para completar de una manera eficiente la ruta.

Figura 2

Grafo A-Star



Nota: El esquema indica la mejor forma de buscar un camino más corto dentro de una trayectoria, a lo que se le denomina una estrella en donde es necesario comprender como se procede a dividir dicha trayectoria. (Aymar & Barahona, 2019)

En la investigación realizada en la Universidad Mayor de San Simón, se menciona que El algoritmo A* es una de las estrategias más conocidas, en la planeación de trayectorias, este algoritmo se clasifica

dentro de los algoritmos de búsqueda con información y es mayormente utilizado para búsquedas sobre grafos. (Malagón, 2018)

Una vez que se entiende los algoritmos que se compararán mediante modelos matemáticos y simulaciones, se toma como referencias investigaciones realizadas en donde se utilizan estas técnicas para la planeación de trayectorias, mismas que servirán como ayuda o complemento en la ejecución de este proyecto; tomando como referencia los resultados obtenidos se determina que el uso de esta metodología en robots móviles con ruedas dentro de los espacios confinados en las industrias representa una gran ventaja, obteniendo reducción en el tiempo de movilización y producción.

En la Universidad Tecnológica Israel, no se ha desarrollado un proyecto de planeación de rutas para robots móviles, mas si se tiene información relevante en el control necesario para este tipo de robots.

1.2. Proceso investigativo metodológico

La Academia Enago en el estudio realizado “Cómo elegir la mejor metodología de investigación para su estudio” (Enago Academy, 2018) indica que para que una investigación sea exitosa se debe partir de una pregunta inicial que deba responderse o de un problema que se quiere solucionar, esto se lo consigue en base a los datos y resultados que se encuentren en la ejecución del proyecto, por tal razón, la metodología del proceso investigativo no es solo importante sino crucial.

En su proyecto de titulación, Carlos Ruiz expone que una investigación puede definirse como un plan amplio que guía las acciones necesarias para abordar la pregunta de investigación planteada. La esencia del diseño metodológico radica en descubrir la solución óptima adaptada a cada circunstancia particular. (Ruiz, 2022). De esta manera, concluyendo con las potenciales configuraciones del diseño que estarán condicionadas por el tipo de preguntas planteadas en la investigación, el diseño metodológico conferirá una identidad distintiva, exclusiva y altamente específica.

En este proceso investigativo se establece de manera precisa y detallada las técnicas y procesos que se deben considerar para la comparación de los algoritmos de planificación de trayectorias para

vehículos autónomos equipados con ruedas, realizando la simulación de los modelos matemáticos planteados.

Se parte de una investigación de carácter bibliográfico para comprender la base de cada uno de los algoritmos que realizan el control de planeación, en donde se indique información relevante y puntual que faciliten el levantamiento y funcionamiento de la simulación de trayectorias cortas; para alcanzar el objetivo de la investigación se desarrollarán una serie de actividades obligatorias que servirán para cumplir con la meta planteada.

De manera paralela se aplicará el método experimental para la calibración de variables en los puntos de recorrido en las trayectorias, obtenidas durante la simulación del robot móvil con ruedas y que configuran el desempeño del algoritmo de control, es imprescindible comprender que las variables del controlador son parte de un modelo no lineal, razón por la cual no se puede encontrar un valor numérico exacto y se requiera de varias pruebas de experimentación hasta encontrar las magnitudes adecuadas del controlador. (Larco M. , 2019) (Grapheverywhere, 2020)

Se precisa de una investigación documental de trabajos realizados a nivel nacional e internacional referente a los temas tratados en este proyecto y que tengan relación con la planeación de rutas para robots móviles con ruedas, con el fin de poder definir un marco teórico válido y principalmente verificar cuales son los avances que se han generado en los últimos años; considerando el crecimiento tecnológico a nivel industrial y las aplicaciones de la automatización e inteligencia artificial.

CAPÍTULO II: PROPUESTA

2.1 Fundamentos teóricos aplicados

2.1.1 Robots móviles

Los avances tecnológicos en robótica han llevado a la creación de robots móviles que son capaces de moverse y navegar en sus entornos, lo que los hace muy versátiles y útiles en diversos campos. Estos robots están diseñados para realizar diversas tareas en diferentes campos que van desde la fabricación hasta la atención médica, la seguridad y la exploración; son capaces de moverse y navegar en sus entornos. La tecnología de los robots móviles ha revolucionado la forma de vida y trabajo, facilitando la realización de tareas que antes eran imposibles.

Los robots móviles se pueden controlar de forma remota o autónoma mediante sensores permitiéndoles percibir su entorno y algoritmos que tiene como objetivo principal tomar decisiones basadas en los datos recopilados de los sensores; estos robots son muy inteligentes y pueden realizar una amplia gama de tareas.

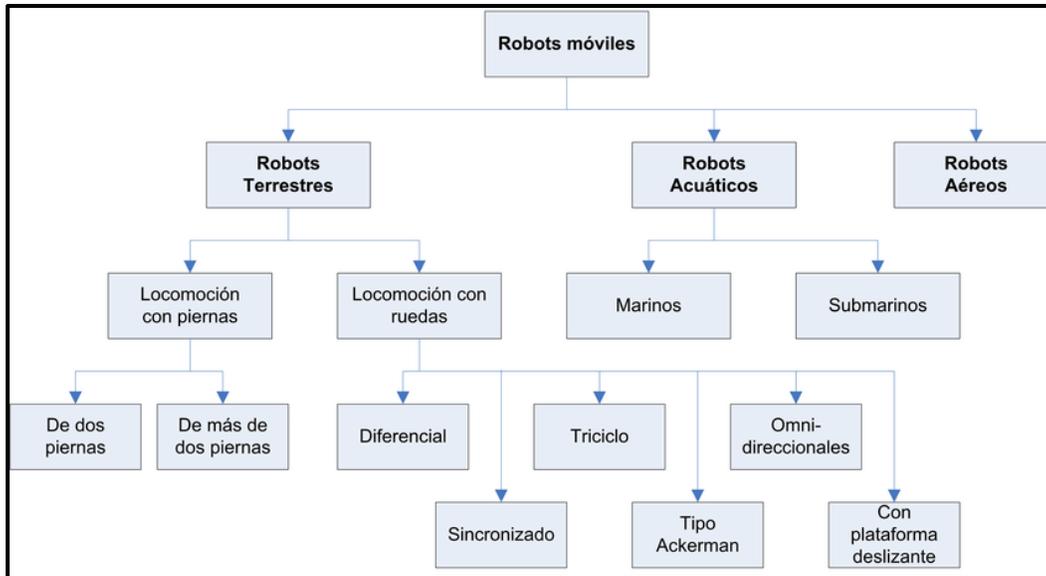
Los robots móviles tienen una amplia gama de aplicaciones en diferentes campos tal cual se indica en la figura 3, se evidencia las aplicaciones como son la fabricación, manipulación, montaje e inspección de materiales; estos robots son muy eficientes y pueden trabajar durante muchas horas, lo que los hace ideales para la producción en masa. En seguridad, los robots móviles se utilizan para patrullar áreas y monitorear la actividad, se pueden equipar con cámaras y otros sensores para detectar cualquier actividad sospechosa, lo que los hace efectivos en la gestión de riesgos.

Mientras que, en la exploración, los robots móviles se utilizan en entornos que son demasiado peligrosos o inaccesibles para los humanos, se pueden usar para explorar el espacio, las profundidades del mar y otras áreas de difícil acceso.

Los robots terrestres, aéreos y marinos son tecnologías robóticas que son empleados en diversas aplicaciones de gran alcance. Los robots terrestres se utilizan para tareas como la exploración de minas, la limpieza de áreas peligrosas y la agricultura de precisión (Enciso, 2018)

Figura 3

Robots terrestres, aéreos y acuáticos



Nota: El interés especial que se ha tenido hacia los robots ha generado una diversidad en el desarrollo de los mismos, distinguiéndose estos por el medio por el cual se desplazan (Salas, 2015)

2.1.1.1. Robots móviles terrestres

La robótica terrestre se refiere a la creación y uso de robots que se mueven sobre superficies terrestres, ya sea en interiores o exteriores (Barrenechea, 2020) Al desarrollar robots con patas, es importante tener en cuenta su posición y velocidad, así como garantizar su estabilidad y seguridad. Además, existen robots móviles que combinan sistemas de locomoción terrestre y aérea, los cuales pueden ser útiles en una amplia variedad de aplicaciones, desde la exploración espacial hasta la vigilancia y la seguridad en entornos urbanos y rurales. La robótica terrestre es un campo en constante evolución y desarrollo, y se espera que en el futuro se sigan encontrando nuevas aplicaciones y mejoras

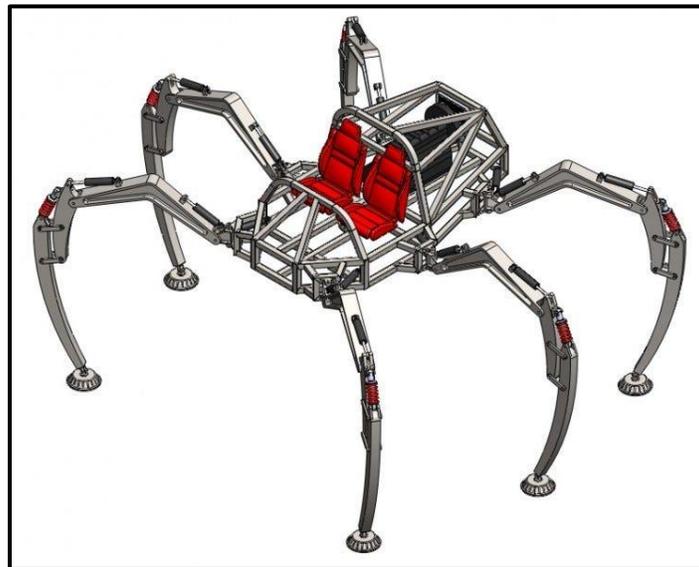
en la tecnología para mejorar la eficiencia y la precisión de estos robots. (García R. , Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para aplicaciones de búsqueda y rescate, 2016)

2.1.1.1.1. Robots móviles terrestres de patas

Los sistemas que se valen de patas son notablemente intrincados, aunque existen diversas variantes. Un sistema de patas similar al de los insectos puede ser construido empleando solamente conjuntos de servomotores. Para llevar a cabo un paso, un servo abre la pata desplazándola lejos del cuerpo para superar cualquier obstáculo, y luego el otro servo de la pareja gira para que la pata se mueva hacia adelante. Un ejemplo de este mecanismo se ilustra en la figura 4. El primer servo baja la pata hasta que ésta toque el suelo, finalmente el segundo servo gira hacia atrás empujando el cuerpo del robot adelante. El movimiento coordinado de seis patas permite al robot moverse adelante, atrás y girar.

Figura 4

Robot hexápodo



Nota: “Un hexápodo es un robot móvil con 6 patas y dependiendo de la configuración que este tenga dependerá la forma en que el robot se moverá. Por ejemplo, los robots hexápodos pueden tener 12 motores dos para cada una de las patas, con lo que el algoritmo para desplazarse dependerá de esta

configuración, en la siguiente imagen se muestra un robot hexápodo con 12 grados de libertad”. (Sirpa, 2017)

2.1.1.1.2. Robots móviles terrestres de ruedas

Los robots móviles terrestres de ruedas son robots diseñados para moverse y operar en superficies terrestres utilizando ruedas como medio de locomoción. Estos robots pueden variar en tamaño, forma y funcionalidad, y se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, desde la exploración espacial hasta la inspección industrial como se puede apreciar en la figura 5 y la robótica educativa. Su principal ventaja es conseguir velocidades altas, además este tipo de robot puede presentar desventajas en terrenos irregulares ya que puede patinar. (Toapanta, 2019)

Figura 5

Mars Curiosity



Nota: “Este laboratorio rodante cuenta para facilitar su desplazamiento por tierras marcianas con seis ruedas, cada una de ellas equipada con su propio motor. Además, cuatro de ellas (las dos delanteras y traseras) disponen de motores individuales de dirección, con lo que es posible que el “rover” pueda girar 360 grados sobre sí mismo.” (Yllera, 2011)

2.1.1.1.3. Robots móviles terrestres de orugas

Son una forma de robots con ruedas que giran sincrónicamente como se visualiza en la figura 6. Su forma permite la movilidad en escenarios irregulares, no son una forma tan común de robots, ya que no tienen tanta eficiencia (Quicaliquin, 2019)

Figura 6

Robot tipo oruga



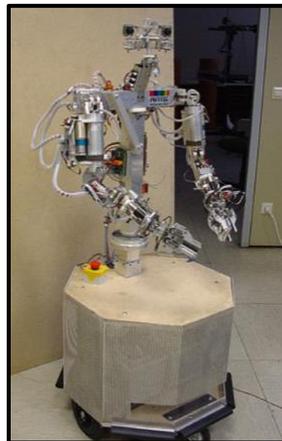
Nota: Una opción intrigante para terrenos poco compactos en lugar de ruedas o patas son las orugas. Este método de desplazamiento emplea superficies deslizantes, lo que conlleva un área de contacto más extensa con el terreno. Esto resulta en una mayor capacidad de maniobra y tracción en comparación con las ruedas, además de una movilidad superior a la proporcionada por las patas. (González y otros, 2015)

2.1.1.1.4. Robots móviles terrestres híbridos

Los robots móviles terrestres híbridos son robots que combinan diferentes sistemas de locomoción para moverse en terrenos variados.

Figura 7

Robot armar



Nota: De manera similar, algunos robots pueden ser clasificados como híbridos al combinar un cuerpo que se asemeja a un vehículo móvil con un brazo similar al de los robots industriales, colocados uno al lado del otro. (Virtual, 2023)

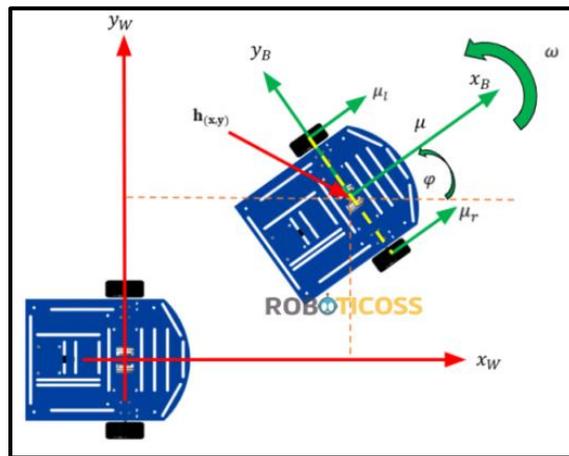
Algunos ejemplos de sistemas de locomoción híbridos incluyen extremidades con ruedas y extremidades con orugas; estos robots utilizan una combinación de tecnologías como se visualiza en la figura 7, esto les ayuda para adaptarse a diferentes tipos de terreno y superar obstáculos; pudiendo combinar ruedas y orugas para lograr una mayor versatilidad y eficiencia en su desplazamiento. (Milenio - Diario, S.A, 2022)

2.1.2 Modelo cinemático del robot móvil diferencial

Este modelo permite determinar la localización del móvil dentro del plano cartesiano, tal cual se visualiza en la figura 8 en donde se relaciona las velocidades del punto de interés o control $h(x,y)$ con las velocidades de los actuadores considerando al robot como una masa puntual, es decir, sin analizar las fuerzas que ejercen sobre el mismo (momentos de inercia y rozamientos). (Sasig, 2021)

Figura 8

Modelo cinemático de un robot móvil diferencial



Nota: Se muestra la geometría de un vehículo tipo diferencial, cuya posición la define el punto $h(x,y)$ y la orientación el ángulo (π). (Sasig, 2021)

Este diseño resulta útil para calcular la posición y la orientación de la parte final del robot en relación con un sistema de coordenadas de referencia. Esto se logra al conocer los valores de las articulaciones y los parámetros geométricos de los componentes del robot.

Jhonny Valencia, Alejandro Montoya y Luis Ríos en su publicación “Cinematic model of mobile robot differential type and Navigation from the odometric estimation” indican que “Típicamente una plataforma móvil de tracción diferencial cuenta con dos pares de ruedas: dos ruedas de tracción que tienen acoplados dos motores DC, dos ruedas de estabilización que mantienen el balance del vehículo.” (Valencia y otros, 2009) La figura 9 muestra la localización en el plano cartesiano del robot tipo diferencial.

Las ecuaciones cinemáticas del punto medio del eje entre las ruedas activas, referidas a un sistema de referencia global son: (Adams, 1999)

$$\dot{x} = v(t) \cos(\theta(t))$$

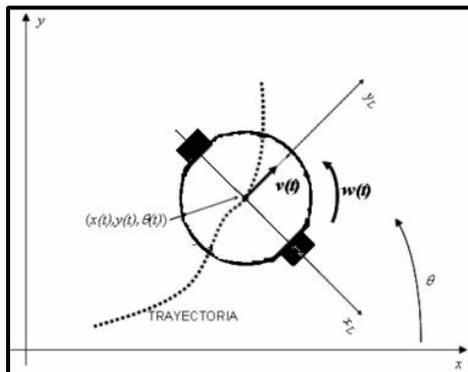
$$\dot{y} = v(t) \sin(\theta(t))$$

$$\dot{\theta} = w(t)$$

Ecuación 1: ecuaciones cinemáticas del punto medio del eje entre las ruedas activas

Figura 9

Localización en el plano cartesiano del robot



Nota: El desplazamiento y giro de estas plataformas diferenciales son establecidos por la acción individual de cada una de las ruedas de propulsión. (Valencia y otros, 2009)

2.1.3 Planeación de rutas para robots móviles

En un entorno desconocido el robot no sabe qué esperar, por lo que debe ser capaz de adaptarse a cambios inesperados, esto se logra mediante el uso de sensores, que permiten al robot "ver" su entorno

y tomar decisiones sobre cómo actuar; mientras que en un entorno conocido se sabe qué esperar, por lo que puede planificar una trayectoria óptima libre de obstáculos.

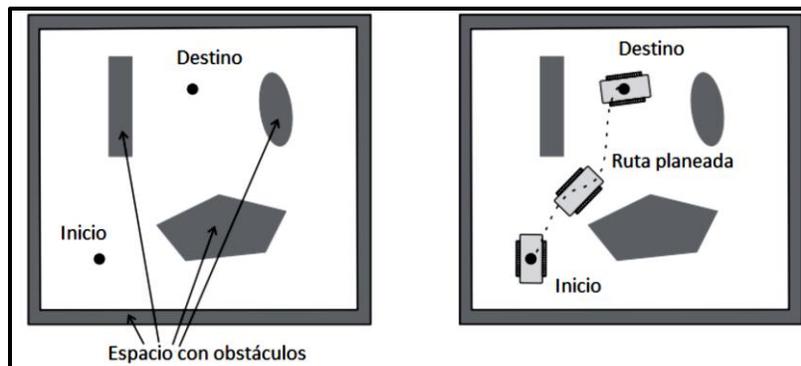
Esto se logra mediante el uso de algoritmos de planificación de trayectorias, que calculan la mejor ruta para el robot de un punto de partida a un punto de llegada. El robot puede luego seguir esta trayectoria utilizando su sistema de navegación.

2.1.3.1 Entorno del robot

La navegación es la técnica de conducir un robot móvil mientras atraviesa un entorno para alcanzar un destino o meta sin chocar con ningún obstáculo (Fernández y otros, 2009). El robot puede moverse en un entorno que puede ser tanto un espacio despejado como un espacio con obstáculos, en donde la posición inicial y final del robot se encuentran en la parte libre de dicho entorno por la que se desplazará, como se indica en la figura 10.

Figura 10

Entorno de un robot



Nota: Izquierda: entorno con obstáculos y configuraciones de inicio y meta. Derecha: uno de los muchos caminos posibles desde el principio hasta la configuración del objetivo. (Klancar y otros, 2017)

2.1.3.2 Espacio de configuración

El espacio de trabajo (W) de un robot se caracteriza como el ámbito geométrico en el cual el robot puede llevar a cabo sus operaciones, en donde se engloba tanto obstáculos que pueden limitar sus

movimientos como áreas libres que el robot puede ocupar. (Klancar y otros, 2017) La elección del espacio de trabajo varía según el tipo de aplicación que se quiera llevar a cabo; por esta razón, es fundamental seleccionar un espacio más o menos complejo de acuerdo a los requerimientos específicos de cada situación. El espacio de trabajo corresponde a una de las siguientes opciones:

Espacio bidimensional, $W = \mathbb{R}^2$

Espacio tridimensional, $W = \mathbb{R}^3$

El vector de estado se describe mediante $q = [q_1, \dots, q_n]^T$, en donde el estado q es un punto en el espacio n-dimensional llamado espacio de trabajo W , que presenta todas las configuraciones posibles del sistema móvil según su modelo cinemático. Parte del espacio de configuración que ocupan los obstáculos O_i es denotado por $Q_{obst} = U_i O_i$, entonces la parte libre del entorno sin obstáculos se define como:

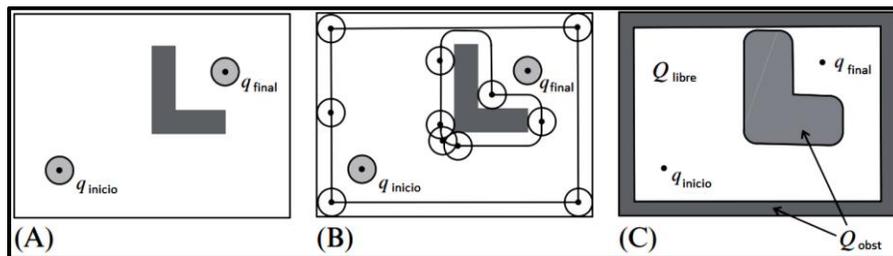
$$Q_{libre} = Q - Q_{obst}$$

Ecuación 2: espacio de trabajo libre

Q_{libre} por lo tanto, contiene el espacio donde el sistema móvil puede planificar su movimiento, el espacio de configuración Q se determina moviendo el robot alrededor de los obstáculos manteniéndolo en contacto con el mismo, como se muestra en la figura 11

Figura 11

Robot circular en el entorno que contiene un obstáculo



Nota: Configuraciones de inicio y meta marcadas, (B) definición del espacio de configuración, (C) entorno transformado de (A) a un espacio de configuración (Klancar y otros, 2017)

2.1.4 Algoritmos para planeación de rutas

Los algoritmos de planificación de rutas se utilizan para encontrar una ruta entre dos puntos, incluso cuando se tiene poca o ninguna información sobre el espacio, explorando el espacio y probando diferentes rutas hasta encontrar una que cumpla con los criterios especificados. Con el paso del tiempo, la IA y los algoritmos de búsqueda han evolucionado constantemente, pues esto ha llevado al desarrollo de diferentes algoritmos para la planificación de rutas pues en un gráfico, se busca una ruta desde un vértice específico explorando los nodos cercanos hasta llegar al nodo de destino. El objetivo principal suele ser encontrar la ruta más corta y económica.

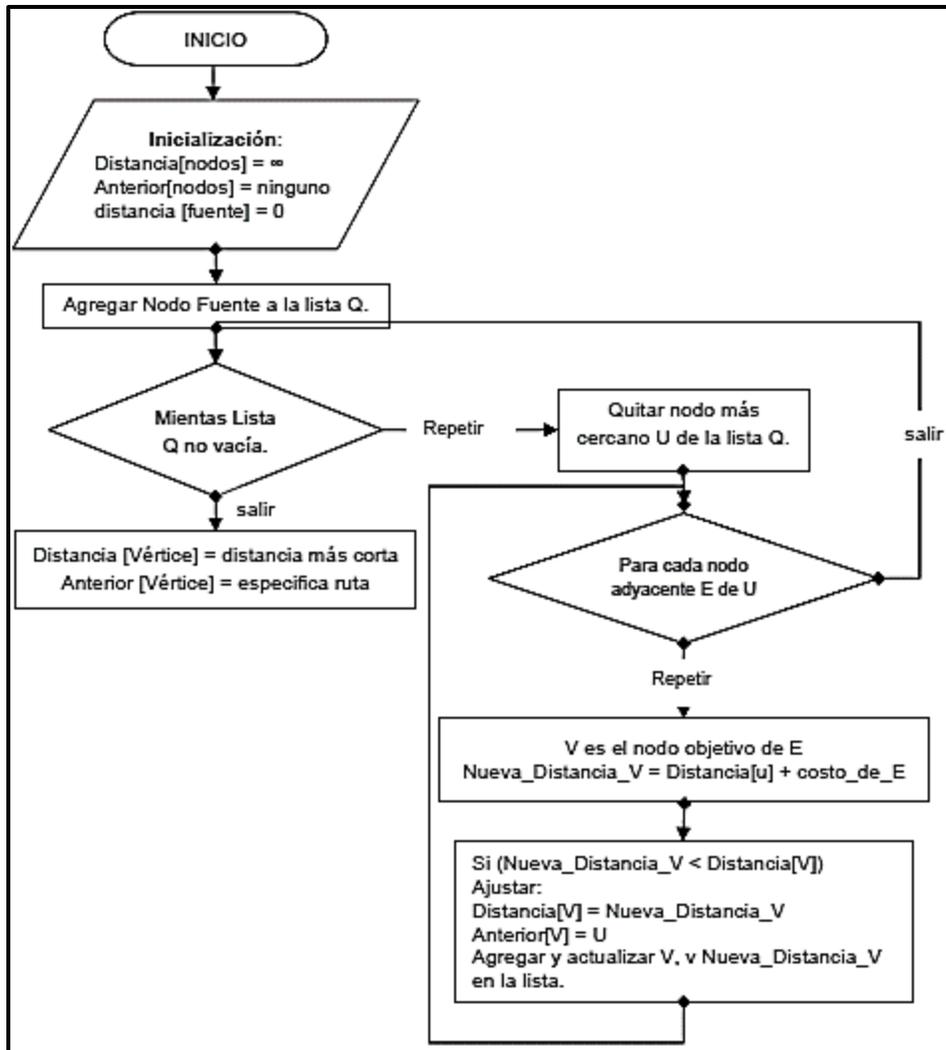
2.1.4.1 Algoritmo Dijkstra

El algoritmo de Dijkstra se emplea para encontrar la ruta más corta desde un nodo origen hasta todos los demás nodos de una matriz o grafo, en la que las aristas o nodos adyacentes tienen pesos o costos asociados.

La táctica de este algoritmo implica realizar iteraciones desde el nodo de origen hacia todos sus nodos vecinos, marcando continuamente el nodo con el costo más bajo. Luego se progresa hacia el siguiente nodo, repitiendo este proceso hasta alcanzar el nodo de destino. En la figura 12 se representa de manera gráfica el esquema del algoritmo de Dijkstra.

Figura 12

Esquema algoritmo Dijkstra (Preciado, 2018)



Nota: Es fundamental considerar que en caso de que el punto de partida o el destino cambien en el árbol de estados, será necesario repetir el proceso de exploración y planificación de la ruta óptima.

2.1.4.2 Algoritmo A-star

“El algoritmo A* (pronunciado como A-start o A-asterisco), es un algoritmo de búsqueda heurística el cual trata de hallar el camino más corto entre dos puntos.” (Hart & Nilsson, 1968) El algoritmo A* utiliza una función de costo para cada nodo explorado, estos nodos explorados se organizan en una lista llamada "Abiertos," que se ordena de menor a mayor costo; en donde cada iteración se examina el nodo de menor costo de la lista "Abiertos." A través del operador de expansión, se exploran las celdas vecinas del nodo seleccionado.

Para cada celda abierta, se verifica si está libre de colisiones y si es accesible en el tiempo actual. Además, se calcula el costo asociado a esa celda, si la celda está libre de colisiones, se marcará como vacía en la malla y se estima el costo asociado mediante una función de costo. Básicamente, se trata de una estimación heurística del coste asociado. La función consta de dos términos:

$$f(N) = g(N) + h(N)$$

Ecuación 3: estimación heurística del coste asociado

- $g(n)$ estima el costo de moverse desde el nodo de inicio hasta cualquier otro nodo, con el objetivo de lograr que la ruta encontrada tenga el costo de desplazamiento más bajo posible.
- $h(n)$ calcula la mínima estimación de costo desde un nodo n hasta el nodo de destino.

$$h(N) = d_E(N', N_g) = \sqrt{(N_{gx} - N'_x)^2 + (N_{gy} - N'_y)^2}$$

Ecuación 4: estimación costo mínimo desde un nodo N

$$g(N) = \begin{cases} C(N_i, N') & \text{Para } i = 1 \\ g(N) + C(N_i, N') & \forall i > 1 \end{cases}$$

Ecuación 5: estimación costo de desplazarse desde el nodo inicial hasta cualquier otro nodo

La función $C(N_i, N')$ se puede asignar como un valor constante o como el resultado de una función matemática.

$$C(N_i, N') = d_E(N_i, N') = \sqrt{(N'_x - N_x)^2 + (N'_y - N_y)^2}$$

Ecuación 6: función distancia euclidiana definida para un par de nodos

2.1.5 Software de simulación

Se ha optado por emplear Matlab como lenguaje de programación para este proyecto debido a sus ampliamente reconocidas características. Matlab es un lenguaje de alto nivel centrado en entornos de cálculo técnico de alto rendimiento para tareas que involucran cálculos numéricos y visualización. Además, es capaz de combinar análisis numérico, operaciones matriciales, procesamiento de señales y

gráficos, todo dentro de una interfaz de usuario de fácil uso. Esto permite expresar problemas y soluciones de manera matemática, eliminando la necesidad de una programación tradicional más complicada

La modelización y la simulación pueden mejorar la calidad del diseño del sistema desde un comienzo y ayudan a reducir el número de errores más adelante en el proceso de diseño. Esto se traduce en una reducción significativa del plazo y el coste de desarrollo. (MathWorks, 1994-2023)

2.1.5.1 Diseño de algoritmos para robots móviles en Matlab

Mediante el uso de MATLAB y Simulink en el ámbito de la robótica, es viable desarrollar una simulación escalable de robots que facilita la creación de prototipos, evaluación de modelos conceptuales y depuración, de una manera rentable. Este enfoque permite emplear modelos de alta fidelidad para validar el desempeño, al tiempo que integra el resto de los algoritmos dentro del mismo entorno de simulación. Una vez que se logra el resultado deseado en la simulación del robot, es posible generar un código ejecutable autónomo para el sistema embebido. Esta conversión se efectúa a partir del modelo en Simulink, que puede ser traducido a lenguajes de programación ampliamente reconocidos. (MathWorks, 1994-2023)

“Los algoritmos de Robotics System Toolbox™ se centran en aplicaciones robóticas móviles o en aplicaciones de vehículos terrestres. Este tipo de algoritmos proporcionan asistencia a lo largo de todo el flujo de trabajo de robótica móvil, desde la aplicación a la planificación y el control, dado que se puede crear mapas de entornos con cuadrículas de ocupación, desarrollar algoritmos de planificación de rutas para robots en un determinado entorno, y ajustar controladores para seguir un conjunto de waypoints” (MathWorks, 1994-2023)

2.2 Descripción de la propuesta

La búsqueda de una trayectoria más corta entre dos vértices conectados en un grafo es un problema relevante en diversos campos, entendiendo que al referirse como "más corta" se entiende al costo

mínimo acumulado de los bordes, que puede representar la distancia física en una aplicación robótica o cualquier otra métrica relevante para una aplicación específica.

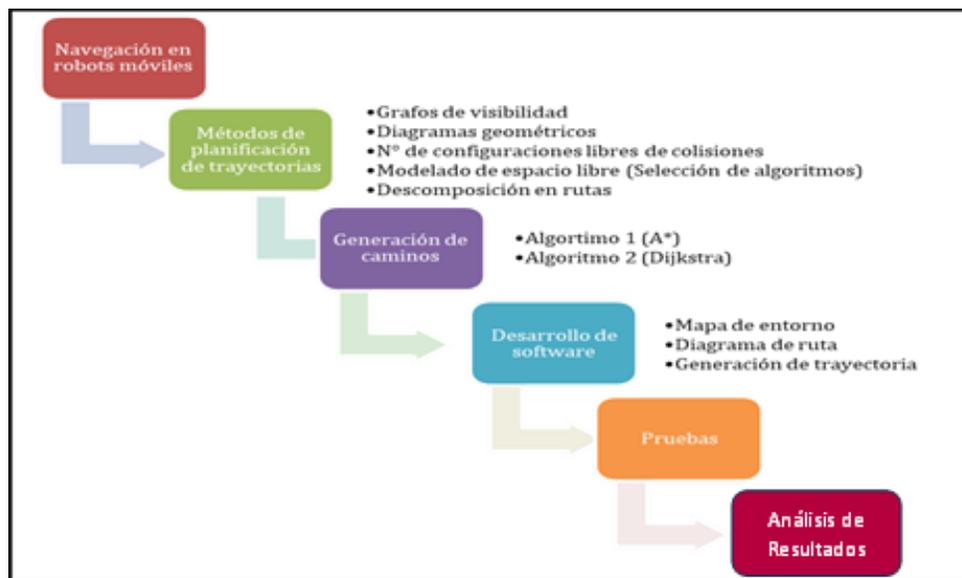
En el campo de la robótica, el enfoque se dirige hacia el diseño de algoritmos que generen movimientos útiles mediante el procesamiento de modelos geométricos complejos. En el ámbito de la inteligencia artificial, el enfoque se centra en la creación de sistemas que empleen modelos de teoría de decisión para calcular las acciones adecuadas. Por otro lado, en la teoría del control, el enfoque se concentra en algoritmos que calculan trayectorias factibles para sistemas, con una consideración especial en la regeneración y optimización.

a. Estructura general

En la figura 13 se muestra el proceso a seguir para el desarrollo de la planificación de rutas para robots con ruedas en entornos estructurados.

Figura 13

Proceso para planificación de rutas



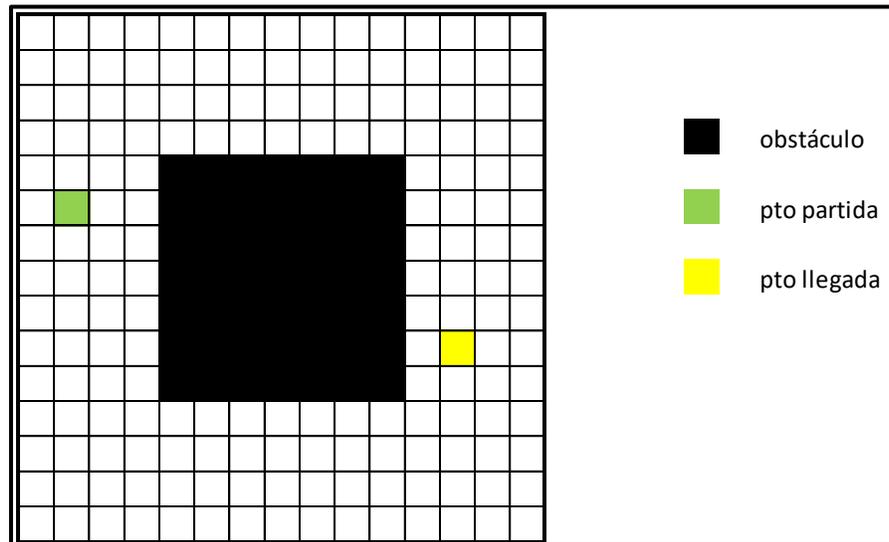
Nota: La eficiente y segura planificación de rutas es fundamental para mejorar el rendimiento, la seguridad y la longevidad de los robots móviles con ruedas en diversas aplicaciones industriales, logísticas y de servicios.

b. Explicación del aporte

Se desarrolla como primer paso los algoritmos planteados, siendo esto el A* (algoritmo 1) y el Dijkstra (algoritmo 2); para esto se toma como base principal una estructura de cuadrícula en la que se presenta punto de partida, punto de llegada y los posibles obstáculos que se encuentren en el ambiente de entorno estructurado. Como inicio se considera un mapeo realizado en Excel como se indica en la figura 14, con esta premisa se realiza el código correspondiente tanto para el algoritmo 1 como el algoritmo 2

Figura 14

Diseño de mapeo en Excel



Nota: La figura presenta un diseño básico de un posible escenario considerando un entorno estructurado con obstáculos (cuadro de color negro), en donde se pretende que se localice la ruta óptima con el menor coste desde el punto de partida (cuadro amarillo) hasta el punto de llegada (cuadro verde).

Una vez que se ha determinado el escenario se procede a plasmar esta idea en el simulador, para este proyecto se utiliza el software Matlab, para dar inicio con esto se debe configurar en primera instancia el plano de trabajo, como se puede evidenciar en la figura 15, considerando las coordenadas tanto de los obstáculos como de los puntos de inicio y fin.

Figura 15

Configuración de nodos en Matlab

```
#!/ Algoritmo A star
%% CREACIÓN PLANO
input_map = false(12);           % porte de mapa
input_map (4:10, 4:9) = 1;       % coord. obstáculo
start_coords = [3,2];           % punto de inicio
dest_coords = [7,11];           % punto de llegada
cmap = [1 1 1;                  % colores del mapa
        0 0 0;
        1 0 0;
        0 0 1;
        0 1 0;
        1 1 0;
        1 1 1];                 %color de ruta
colormap(cmap);                  % imprime colores de ruta
[nrows, ncols] = size(input_map); % guarda el tamaño del mapa

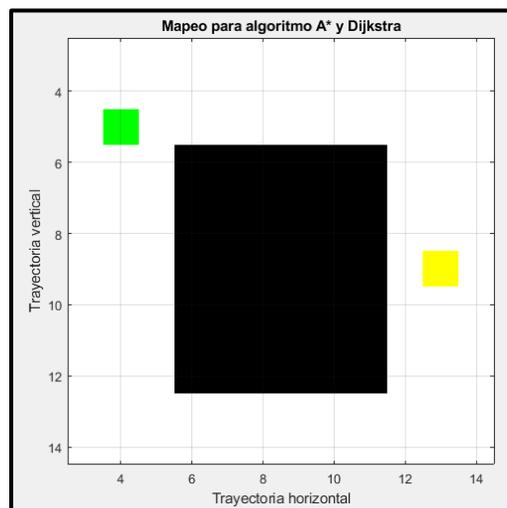
image(3, 3, cmap);
title('Mapeo para algoritmo A* y Dijkstra')
xlabel('Trayectoria horizontal')
ylabel('Trayectoria vertical')
grid on;                         % Indica la imagen en la ruta
axis image;                       % Setea los ejes limite
drawnow;                           % dibuja el algoritmo (ruta)
```

Nota: Se observa que se determina la dimensión del plano y plasma tanto coordenadas para los puntos de inicio y fin como así también los vértices del cuerpo en 2D que representa un obstáculo.

En la figura 16 se aprecia el resultado de la posición del punto de inicio, punto de fin y el obstáculo que se presenta para poder ejecutar la trayectoria con menor coste. Se entiende que esta misma configuración se aplica tanto para el algoritmo 1 como para el algoritmo 2, ya que parte desde una misma premisa, la cual se desea comparar.

Figura 16

Diseño de mapeo en Matlab



Nota: La posición de cada una de las configuraciones se puede variar, esto netamente depende del entorno estructurado que se va a analizar.

Una vez creada la estructura sobre la cual se aplicarán los algoritmos, se procede a programar cada uno de ellos, basándose en los modelos matemáticos correspondientes; de esta manera, se podrá comparar cuál de ellos genera el menor coste.

En el desarrollo de los algoritmos, es fundamental tener en cuenta que el diseño del entorno se puede representar como una cuadrícula bidimensional entendiendo que el robot se desplazará siguiendo coordenadas enteras de la forma (i, j) , lo que implica que sus movimientos serán discretos en las cuatro direcciones posibles (derecha, izquierda, abajo, arriba). Cada movimiento realizado incrementará o decrementará una de las coordenadas esto se evidencia en la figura 17 con el código de programación para encontrar el siguiente nodo

Figura 17

Generación de nodos

```
%Actualizar el valor de distancia del elemento a la derecha del elemento actual
if (i+1 <= nrows && distanceFromStart(i+1, j) > distanceFromStart(i,j) + 1)
    if (parent(i+1, j) == 0 && input_map(i+1,j)~=1 && parent(current)~= sub2ind(size(map), i+1, j))
        distanceFromStart(i+1, j) = distanceFromStart(i,j) + 1;
        map(sub2ind(size(map), i+1, j)) = 4;    % Marca el cuadro vecino como procesado
        parent(i+1, j)= current;
    end
end
```

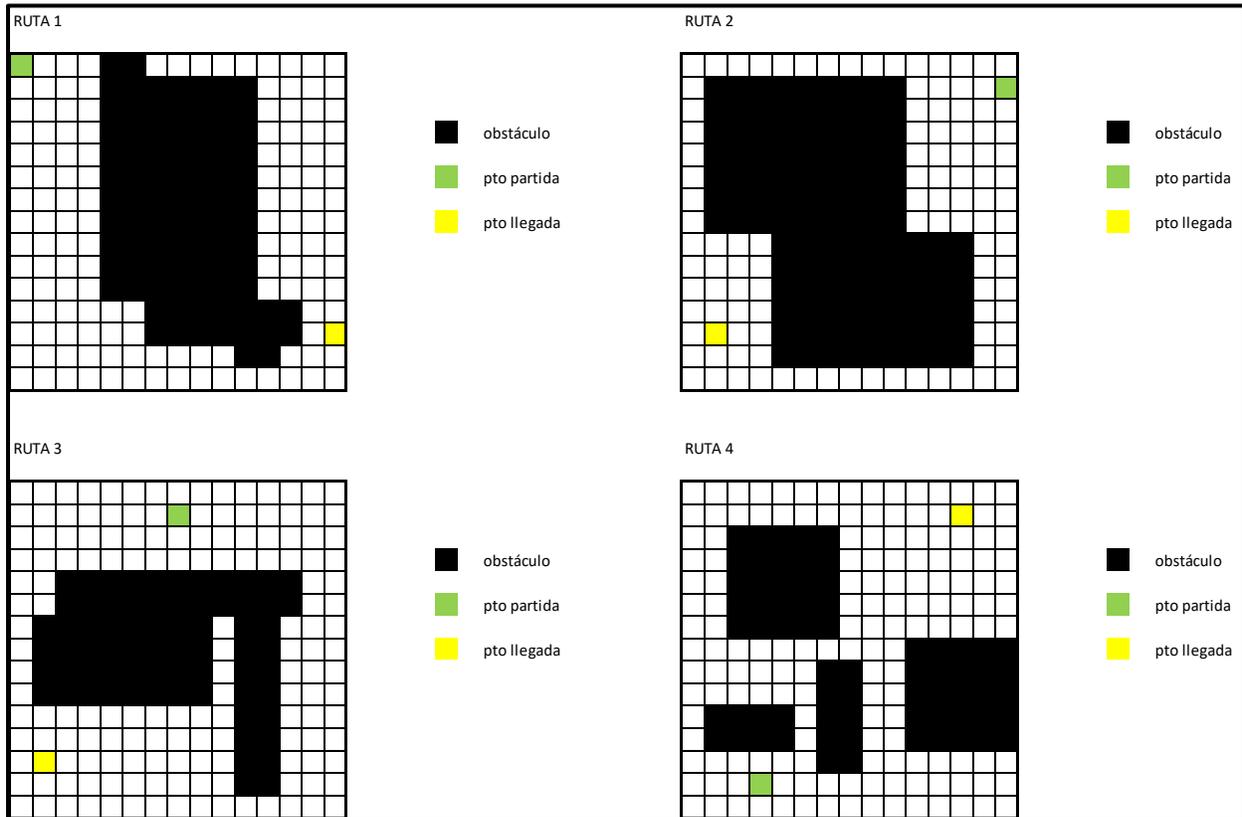
Nota: La imagen presenta un extracto para la posición del siguiente nodo, pues al analizar la lógica y de acuerdo con el algoritmo utilizado se conocerá la siguiente posición entendiendo que puede variar a la derecha, izquierda, arriba o abajo según sea el caso analizado.

El objetivo de este proyecto es determinar cuál de los dos algoritmos estudiados y propuestos es más eficiente. En este contexto, la eficiencia se define como el algoritmo que logra el menor costo (trayectoria corta en el menor tiempo). Para demostrar esto, se han diseñado y propuesto cuatro entornos estructurados distintos con el fin de validar la efectividad de la planificación de rutas y medir los recursos

temporales empleados. Se considera también la cantidad de iteraciones necesarias como un factor crucial. La figura 18 ilustra los escenarios en los que se lleva a cabo la evaluación de cada algoritmo.

Figura 18

Entornos estructurados para comparación de algoritmos



Nota: Se indica como ejemplo posibles entornos fijos que requieren de planeación de rutas, indicando cual es su punto de partida y de llegada. Esta imagen es un bosquejo que servirá para la programación de entornos en software utilizado.

Para determinar el rendimiento de los algoritmos implementados, es necesario recolectar datos tal cual indica la tabla 1, como si encuentra la meta y tiempo de recorrido, estos parámetros se obtienen de la simulación realizada en el software Matlab, para cada uno de los entornos estructurados creados.

Tabla 1

Datos de algoritmos simulados

Algoritmo	Ruta	Posición		Tiempo de recorrido (seg)	Encuentra la ruta	N° de pasos entre inicio y fin (nodos)
		Nodo inicial	Nodo final			
A *	Ruta 1	1,1	18,20	0,416	Si	39
	Ruta 2	2,20	17,2	0,414	Si	36
	Ruta 3	2,12	17,2	0,351	Si	26
	Ruta 4	18,4	2,17	0,372	Si	28
DIJKSTRA	Ruta 1	1,1	18,20	1,255	Si	39
	Ruta 2	2,20	17,2	1,899	Si	36
	Ruta 3	2,12	17,2	1,461	Si	26
	Ruta 4	18,4	2,17	1,949	Si	28

Nota: Los datos que se presentan en la tabla son tomados de la simulación realizada para cada tipo de ruta de acuerdo al algoritmo correspondiente, esto se evidencia en cada uno de los anexos que se presentan al final del contenido.

Para Validar el algoritmo más eficiente para el diseño de trayectorias en robots de movimiento con ruedas, se utiliza el método estadístico de comparación Wilcoxon, el cual comprueba si los datos medidos en dos características diferentes pero dependientes difieren significativamente entre sí, este método se considera una prueba no paramétrica, por lo que se entiende está sujeta a hipótesis de homologaciones, siendo estas las siguientes:

- Ho: A* tienen menor coste (más eficiencia en tiempo) vs. Dijkstra
- Ha: A* es igual a Dijkstra en eficiencia relacionada al tiempo

Tabla 2

Comparación de resultados

Método Wilcoxon de comparación				
Tiempo A*	Tiempo Dijkstra	Diferencia 1	Diferencia 2 (abs)	Ranking
0,416	1,255	-0,839	0,839	1
0,414	1,899	-1,485	1,485	4
0,351	1,461	-1,11	1,11	2
0,372	1,949	-1,577	1,577	3

Nota: Con los parámetros que se obtienen se puede determinar la interpretación que brinda el método estadístico utilizado.

Suma ranking (+): 0

Suma ranking (-): 10

Población N(n): 4

Za nivel de confianza al 95%: 1,96

$$T = \min(\text{Suma ranking (+)}, \text{Suma ranking (-)}) = 10$$

$$\text{num} = T - \frac{n(n+1)}{4} = 5 \quad \text{den} = \sqrt{\frac{n(n+1)(2n+1)}{24}} = 2,73 \quad Z = \frac{\text{num}}{\text{den}} = \frac{5}{2,73} = 1,82$$

Decisión: $Z < Z_{\alpha}$, por tanto; se rechaza H_a y se acepta H_o

Interpretación: Como el coste del algoritmo A* es menor al coste del algoritmo Dijkstra se concluye que el algoritmo A*, logra disminuir tiempo en completar trayectorias

c. Estrategias y/o técnicas

Durante la ejecución de este proyecto, se empleó el software MATLAB para simular la planificación de rutas de robots mediante algoritmos, esta elección se fundamenta en las destacadas capacidades de MATLAB como entorno de programación y simulación, adicional que ofrece herramientas para la optimización numérica, lo que es útil para encontrar las mejores rutas para los robots teniendo en cuenta diferentes restricciones y objetivos.

Es importante indicar que se optó también esta aplicación para poder ejecutar un guide, el cual permite seleccionar el tipo de algoritmo que se quiere analizar y así visualizar con sus diferentes rutas en entornos estructurados la mejor opción en costos. Para realizar la comparación entre estas

herramientas generadoras de rutas se maneja un concepto estadístico conocido como el método de comparación de Wilcoxon, el cual se basa en una prueba que se basa en datos cuando no cumplen con los supuestos de normalidad o cuando la escala de medición es ordinal.

2.3 Validación de la propuesta

Tabla 3

Descripción de perfil de validadores

Nombres y Apellidos	Años de experiencia	Titulación académica	Cargo
Manolo Paredes Calderón	20	MSC en Ingeniería Electrónica (IME Brasil)	Director del Centro de Investigación de Aplicaciones Militares CICTE
Diego Patricio González Sacoto	12	Ingeniero en Electrónica, Automatización y Control Máster en Sistemas Automáticos y Electrónica Industrial especialización de Tecnologías de la producción y automatización avanzadas	Supervisor de operaciones Docente
Christian Andrés Ortega Hidalgo	4	Ingeniero en Electrónica, Automatización y Control Máster Universitario en Automática y Robótica PHd. Automática y Robótica (En proceso)	Coordinador de la carrera de Electrónica del Instituto Superior Universitario Sucre

Tabla 4

Escala de evaluación. Elaborada por: MSc Manolo Paredes Calderón.

CRITERIOS	EVALUACION SEGUN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En total desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización				X	
Actualidad				X	
Calidad Técnica				X	
Factibilidad					X
Pertinencia					X

Tabla 5

Escala de evaluación. Elaborada por: Ing. Diego González Sacoto. MI

CRITERIOS	EVALUACION SEGUN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En total desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto				X	
Aplicabilidad				X	
Conceptualización				X	
Actualidad				X	
Calidad Técnica				X	
Factibilidad				X	
Pertinencia				X	

Tabla 6

Escala de evaluación. Elaborada por: Ing. Christian Ortega Mgs.

CRITERIOS	EVALUACION SEGUN IMPORTANCIA Y REPRESENTATIVIDAD				
	En total desacuerdo	En Desacuerdo	Ni de Acuerdo Ni en Desacuerdo	De Acuerdo	Totalmente Acuerdo
Impacto					X
Aplicabilidad					X
Conceptualización					X
Actualidad					X
Calidad Técnica				X	
Factibilidad					X
Pertinencia					X

2.4 Matriz de articulación de la propuesta

Ejes o partes principales del proyecto	Breve descripción de los resultados de cada parte	Sustento teórico que se aplicó en la construcción del proyecto	Metodologías, herramientas técnicas y tecnológicas que se emplearon
<p>1</p> <p>Definición: de robot móviles terrestres, modelo cinemático para un robot diferencial, planeación de rutas para robots móviles, algoritmos de planeación de rutas</p>	<p>1.1. Robots móviles terrestres con patas 1.2. Robots móviles terrestres con ruedas 1.3. Robots móviles terrestres con orugas 1.4. Robots móviles terrestres híbridos 1.5. Entornos del robot 1.6. Espacios de configuración 1.7. Algoritmos A start 1.8. Algoritmo Dijkstra</p>	<p>Inteligencia Artificial Matemáticas Aplicadas Comunicaciones Inalámbricas (aplicación futura) Visión por Computador Machine Learning (aplicación futura en entornos dinámicos)</p>	<p>En la investigación bibliográfica determinar la diferencia de conceptos en las aplicaciones de robots móviles terrestres.</p>
<p>2</p> <p>Diseño: de entornos estructurados, código de programación en Matlab para algoritmos, código de programación para guide.</p>	<p>2.1. Código de programación algoritmo A start. 2.2. Código de programación algoritmo Dijkstra 2.3. Código de programación aplicación de algoritmos. 2. 4. Código de programación guide</p>	<p>Software Matlab</p>	<p>En este apartado se la metodología de diseño brinda un enfoque creativo y sistemático para abordar problemas y crear soluciones efectivas con la comparación de los algoritmos utilizados.</p>
<p>3</p> <p>Simulación: validación de algoritmos planteados, algoritmos con diferentes entornos estructurados</p>	<p>3.1. Algoritmo A start 3.2. Algoritmo Dijkstra 3.3 Aplicaciones de algoritmos 3.4. Guide</p>	<p>Aplicación de algoritmos para entornos estructurados.</p>	<p>Basada en la metodología experimental para la obtención de la aplicación sistemática en el conjunto de procedimientos y técnicas diseñadas para obtener la planeación de rutas confiable y objetiva</p>

2.5 Análisis de resultados. Presentación y discusión.

Con el fin de examinar cómo los algoritmos funcionan en diversas condiciones, se optó por generar una secuencia de posiciones de inicio y fin de trayectoria de manera aleatoria, esta elección se tomó para cuantificar el lapso requerido y poder descubrir la ruta de menor costo entre dichas posiciones, así también como para determinar su extensión y complejidad, esta última expresada como "tortuosidad". Entendiendo que el resultado final es poder determinar el tiempo de ejecución de los algoritmos de planificación al derivar una ruta, en conjunto con las dimensiones y el número de nodos presentes en esa trayectoria

Una vez estudiada la comparación del rendimiento aplicado de los métodos planteados, mediante los resultados adquiridos en los entornos estructurados diseñados para los 4 escenarios de prueba, se evidencia que el algoritmo A* presenta un rendimiento más rápido al dirigirse hacia el objetivo de manera guiada esto se evidencia claramente en los datos que se presentaron en la sección 2.2 apartado b, tabla 2. Además, se incluye una comparativa detallada en los anexos, esta comparación incluso disminuye la necesidad de realizar cambios de dirección, lo que en la práctica se traduce en un ahorro significativo de tiempo al recorrer la ruta que ha sido planificada.

Es evidente que el tiempo de ejecución de la simulación para cada ruta varía de acuerdo a la cantidad de obstáculos que presenta el entorno estructurado, por lo que se debe considerar que estos datos se pueden modificar dependiendo la velocidad de ejecución del software Matlab y de la computadora en uso.

Finalmente, una vez que se analizan y comparan los resultados mediante el método estadístico seleccionado, se evidencia que los tiempos obtenidos de los algoritmos A* y Dijkstra son diferentes, lo cual indica que el algoritmo 1 es más rápido que el algoritmo 2 con un tiempo promedio del 3,88% puesto que se orienta por el valor heurístico y examina los nodos que reflejan una función de costo

inferior, esto se traduce en un equilibrio entre la velocidad y la precisión al determinar las rutas más cortas.

En los escenarios de prueba, se observa que el algoritmo A* tiende a converger rápidamente hacia el objetivo en comparación con otros algoritmos de planificación de rutas debiéndose a la capacidad para priorizar la expansión de nodos que tienen un valor heurístico más bajo, lo que impulsa al algoritmo a explorar áreas prometedoras en el espacio de búsqueda.

El análisis de los resultados obtenidos a través de la implementación del algoritmo de Dijkstra resalta su capacidad para encontrar rutas más cortas en escenarios donde la optimización del costo es primordial; este algoritmo que está basado en la búsqueda exhaustiva logra explorar todas las opciones posibles en el espacio de búsqueda y, por lo tanto, garantiza encontrar la ruta con el costo mínimo entre un nodo de inicio y un nodo de llegada. En los entornos estructurados creados como prueba, se observa que el algoritmo de Dijkstra es particularmente hábil para identificar las rutas óptimas en términos de distancia recorrida, pues esto se da por el enfoque de la expansión sistemática de nodos según su costo acumulado desde el nodo inicial; por ende, es especialmente efectivo en entornos donde el costo asociado a las aristas refleja la distancia física real o algún otro factor que se correlaciona directamente con la distancia.

En cuanto a la complejidad de las rutas generadas, el algoritmo de Dijkstra tiende a producir trayectorias óptimas en términos de distancia, pero no necesariamente en términos de tiempo o consideraciones específicas del entorno, mientras que, el algoritmo A* tiende a proporcionar trayectorias más directas, esto podría resultar en una mayor propensión a atascarse en obstáculos o configuraciones estrechas, ya que no considera explícitamente las restricciones de movimiento del robot.

CONCLUSIONES

El enfoque principal de esta simulación es explorar los principios de exploración y diseño de trayectorias, investigando diversos algoritmos que simplifican este procedimiento para un agente inteligente. De manera específica, este trabajo se ha centrado en el análisis y la puesta en práctica de dos algoritmos esenciales: el A* y el Dijkstra. Estos algoritmos desempeñan un papel fundamental en la búsqueda de rutas eficientes y exitosas para el agente inteligente.

La comparación entre el algoritmo A* y el algoritmo de Dijkstra destaca las fortalezas y diferencias clave entre estos dos enfoques de planificación de rutas, pues ambos algoritmos son valiosos en la búsqueda de trayectorias eficientes y óptimas, pero se destacan en diferentes contextos. Tanto el algoritmo A* como el algoritmo de Dijkstra son reconocidos por su complejidad debido a su capacidad para descubrir la ruta con el coste mínimo, la distinción entre el primer y el segundo algoritmo radica en la función heurística que utilizan para medir la distancia con respecto al destino del robot móvil y, en última instancia, para determinar la ruta.

Una de las fortalezas notables del algoritmo A* radica en su capacidad para encontrar rutas de manera más rápida gracias a la incorporación de una función heurística que guía la búsqueda hacia las áreas más prometedoras. Su habilidad para optimizar la ruta inicial después de la exploración inicial añade un nivel adicional de eficiencia, especialmente en entornos donde el tiempo es un factor crucial entendiendo que esta característica posibilita al algoritmo revisar y perfeccionar la ruta original para alcanzar un resultado de mayor excelencia.

RECOMENDACIONES

Se debe tener en consideración que tanto el algoritmo A* como Dijkstra son herramientas esenciales en la caja de herramientas de la planificación de rutas, cada uno con su propia perspectiva y fortalezas, entendiendo que la elección adecuada dependerá de las prioridades del proyecto y las condiciones del entorno en el que se implementen. Si la rapidez es primordial y se dispone de información heurística confiable, A* puede ser la mejor opción, sin embargo, si se busca una garantía de determinar la trayectoria de menor longitud en términos de distancia sin importar el tiempo, el algoritmo de Dijkstra es una elección sólida.

La elección entre el algoritmo A* y el algoritmo de Dijkstra dependerá de los objetivos del proyecto, la disponibilidad de información heurística y las características del entorno. Comprender las fortalezas y limitaciones de cada algoritmo permitirá seleccionar la opción más adecuada para lograr resultados óptimos en la planificación de rutas.

Si la eficiencia en el tiempo es esencial y se cuenta con información heurística confiable sobre el problema, se recomienda utilizar el algoritmo A*. Su capacidad para guiar la búsqueda hacia soluciones prometedoras y optimizar la ruta después de la exploración inicial es valiosa en contextos donde el tiempo es una prioridad.

Si el objetivo principal es hallar el camino de menor longitud en cuanto a distancia, sin considerar el tiempo, el algoritmo de Dijkstra es una elección apropiada. Su enfoque exhaustivo garantiza una solución óptima en términos de distancia, independientemente de la velocidad de ejecución.

BIBLIOGRAFÍA

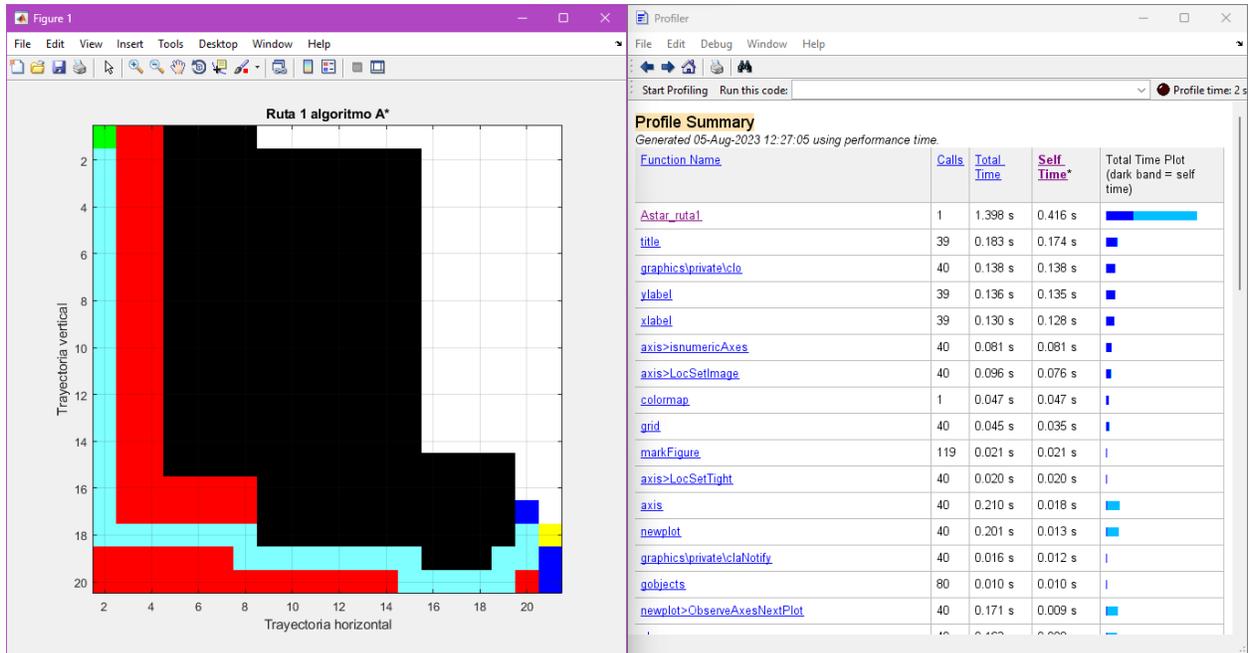
- Acosta, I. (2017). *Robot móvil para investigación en algoritmos de planeamiento de rutas: sistema de planeamiento de rutas (Bachelor's thesis)*. Ibarra: UTN.
- Adams, M. (1999). *Sensor Modelling, Design and Data Processing for Autonomous Navigation*. World Scientific.
- Aymar, S., & Barahona, G. (2019). *Inteligencia Artificial*. Nuevo Laredo: Instituto Tecnológico de Nuevo Laredo.
- Barrenechea, L. (2020). Avances en la robótica agrícola terrestre. *El agrario* .
- Cassingena, E. (24 de Octubre de 2022). *freeCodeCamp*. <https://www.freecodecamp.org/espanol/news/algoritmo-de-la-ruta-mas-corta-de-dijkstra-introduccion-grafica/>
- Castro, Y. (2016). La Ibero apuesta por la robótica móvil. *Mi patente*. <https://www.mipatente.com/la-ibero-apuesta-por-la-robotica-movil/>
- Chávarro, A., & Zambrano, K. (2016). Modelamiento, simulación y control de posicionamiento automático de un robot móvil con tracción diferencial como herramienta para apoyar la formación en robótica en ambientes de aprendizaje SENA. *Revista SENNOVA (Colombia)*, 51-69.
- Chenatti, S. (2018). Deep Reinforcement Learning in Robotics Logistic Task Coordination. *Latin American Robotic Symposium,,* 326-332.
- Coba, G. (5 de Mayo de 2021). El 69% de los empleos en Ecuador puede ser reemplazado por robots. *Primicias*, págs. <https://www.primicias.ec/noticias/economia/empleo-ecuador-reemplazo-robots-automatizacion/#:~:text=%E2%80%9CLa%20automatizaci%C3%B3n%20permite%20aumentar%20la,Integraci%C3%B3n%20y%20Comercio%20del%20BID.>
- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 269-271.
- Enago Academy. (Septiembre de 2018). *enago academy* . <https://www.enago.com/es/academy/choose-best-research-methodology/>
- Enciso, L. (2018). *Diseño de Robot Móvil de Navegación Utilizando Método Mirror Petri Net e Identificación por Radiofrecuencia*. Batu: IEEE.
- Fernández, D., & Valmaseda, C. (2010). *Planificación de trayectorias para un robot móvil*. Madrid: Universidad Complutense Madrid.
- Fernández, M., Fernandez, D., & Valmaseda, C. (2009). *“Planificación de trayectorias para un Robot Móvil*. Universidad Complutense.
- Galarza, L. (2021). Submarinos que nadan ¡como peces! *Transferencia.tec*.
- García, Á. (2019). *Navegación y control de un robot móvil omnidireccional en ROS*. Oviedo-España: Universidad de Oviedo.

- García, R. (2016). Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para aplicaciones de búsqueda y rescate. *ResearchGate*, 337-351.
- García, R., & Arias, M. (2016). Prototipo virtual de un robot móvil multi-terreno para aplicaciones de búsqueda y rescate. *Asociación Mexicana de Mecatrónica A.C*, 337-351.
- González, R., Rodríguez, F., & Guzmán, J. (2015). Robots Móviles con Orugas Historia, Modelado, Localización y Control. *ScienceDirect*, 12(1).
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.riai.2014.11.001>
- Grapheverywhere. (10 de Junio de 2020). *Grapheverywhere*.
https://www.grapheverywhere.com/algorithm-a/#:~:text=El%20algoritmo%20A%20*%20conocido%20como,un%20rango%20de%20aplicaci%C3%B3n%20especial.
- Hart, P., & Nilsson, N. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. *Systems Science and Cybernetics*, 4, 100-107.
- Klancar, G., Zdesar, A., & Skrjanc, I. (2017). *Wheeled mobile robotics*. Butterworth Heonemann.
<https://doi.org/978-0-12-804204-5>
- Kumar, V. (2020). *Robótica aérea*. Pennsylvania: Penn University of Pennsylvania.
- Larco, M. (2019). *Implementación de una plataforma robótica móvil diferencial para seguimiento de trayectoria, mediante un algoritmo de control no lineal*. Quito: Universidad Tecnológica Israel.
- Larco, M. (2019). *Implementación de una plataforma robótica móvil diferencial para seguimiento de trayectoria, mediante un algoritmo de control no lineal*. Quito: Universidad Tecnológica Israel.
- Malagón, C. (2018). Búsqueda heurística. *Computación e Inteligencia Artificial* .
- MathWorks. (1994-2023). *MathWorks*. <https://la.mathworks.com/discovery/modeling-and-simulation.html>
- Merchán, J., & Palencia, N. (2021). *Algoritmo para la planeación y optimización de rutas de una troncal del sistema de transporte masivo metrolínea*. Bucaramanga: Universidad Autónoma de Bucaramanga.
- Milenio - Diario, S.A. (23 de Junio de 2022). *Milenio - Diario* . <https://www.milenio.com/opinion/vari- autores/ciencia-tecnologia/sistema-hibrido-de-conduccion-para-robots-moviles>
- Ojeda, S. (25 de Enero de 2021). *DispatchTrack*. <https://www.beetrack.com/es/blog/robots-moviles>
- Pandey, A., & Parhi, D. (2017). "Mobile robot navigation and obstacle avoidance techniques: A review. *Int Rob Auto J*, 22.
- Preciado, J. (2018). *Planificación de trayectorias de robots móviles de diferentes arquitecturas*. UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA.

- Quicaliquin, M. (2019). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT TIPO ORUGA PARA EXPLORACIÓN EN CASO DE SISMOSCONTROLADO INALAMBRICAMENTE*. Universidad Tecnológica Israel.
- Rodríguez, A. (2022). Robots subacuáticos, qué son y cómo funcionan. *Nanova*. <https://sectormaritimo.es/los-diez-robots-submarinos-que-mas-profundidad-alcanzan-en-la-actualidad>
- Ruiz, C. (2022). *Control de un exoesqueleto para motricidad en niños por medio de comandos de voz y asistentes virtuales*. Quito: Universidad Tecnológica Israel.
- Salas, L. (2015). *DISEÑO DE UN SISTEMA DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMO PARA ROBOTS MÓVILES USANDO FUSIÓN DE SENSORES Y CONTROLADORES NEURO DIFUSOS*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Sasig, E. (28 de Enero de 2021). *roboticos*. <https://roboticoss.com/modelo-cinematico-y-simulacion-con-python-robot-movil-diferencial/#:~:text=Modelo%20cinem%C3%A1tico%20de%20un%20robot%20diferencial&text=Este%20modelo%20relaciona%20las%20velocidades,momentos%20de%20inercia%20y%20rozmientos>).
- Silva, A., & Peña, C. (2013). Inspection and monitoring system using an aerial robot guided by artificial vision. *Iteckne*.
- Sirpa, E. (10 de Abril de 2017). *Medium.com*. <https://medium.com/@ericksirpa/robots-m%C3%A9todos-de-locomoci%C3%B3n-terrestre-2964c68a9523>
- Toapanta, C. (2019). *IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT BÍPEDO CON TECNOLOGÍA XBEE PARA LA DETECCIÓN DE OBSTÁCULOS PREDETERMINADOS*. Quito: Universidad Tecnológica Israel.
- Valencia, J., Montoya, A., & Ríos, L. (2009). Cinematic model of mobile robot differential type and Navigation from the odometric estimation. *Scientia et Technica* (41), 191-196. <https://doi.org/ISSN 0122-1701>
- Virtual, U. S. (31 de julio de 2023). *Ude Santiago Virtual*. <http://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/mod/book/tool/print/index.php?id=24906>
- Yllera, G. (28 de Noviembre de 2011). El vehículo que conquistará Marte. *Noticias Coches*. <https://noticias.coches.com/noticias-motor/un-vehiculo-a-la-conquista-de-marte/44017>

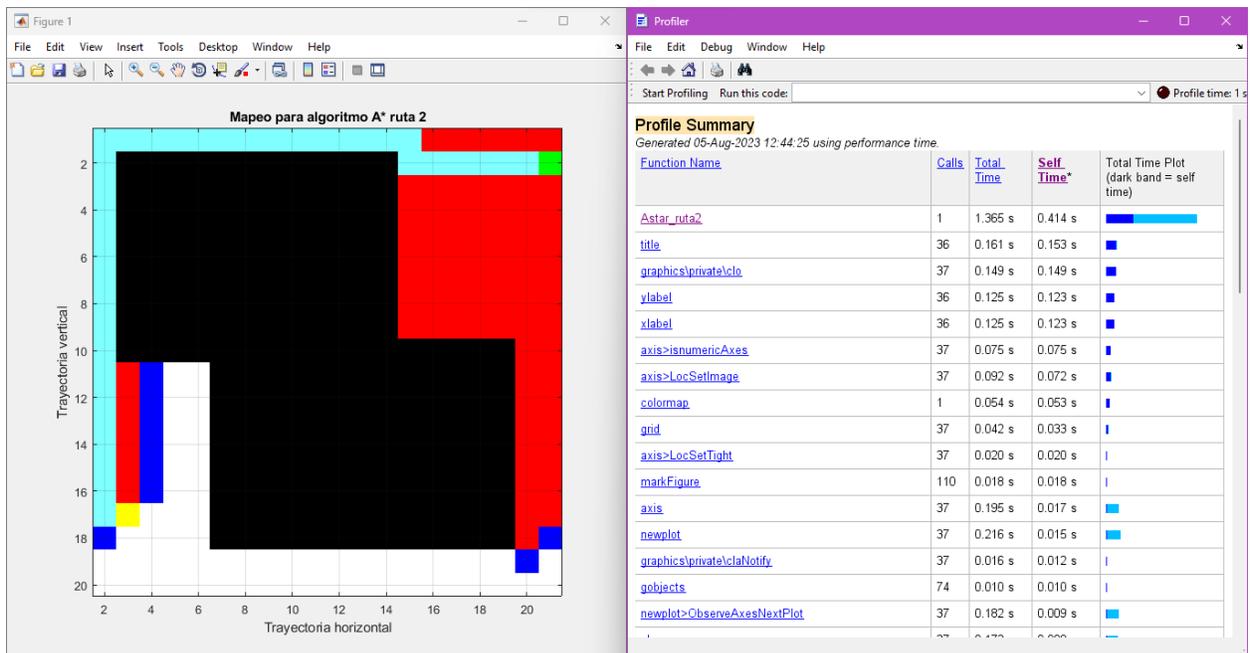
ANEXO 1

Parámetros de evaluación algoritmo A* ruta 1



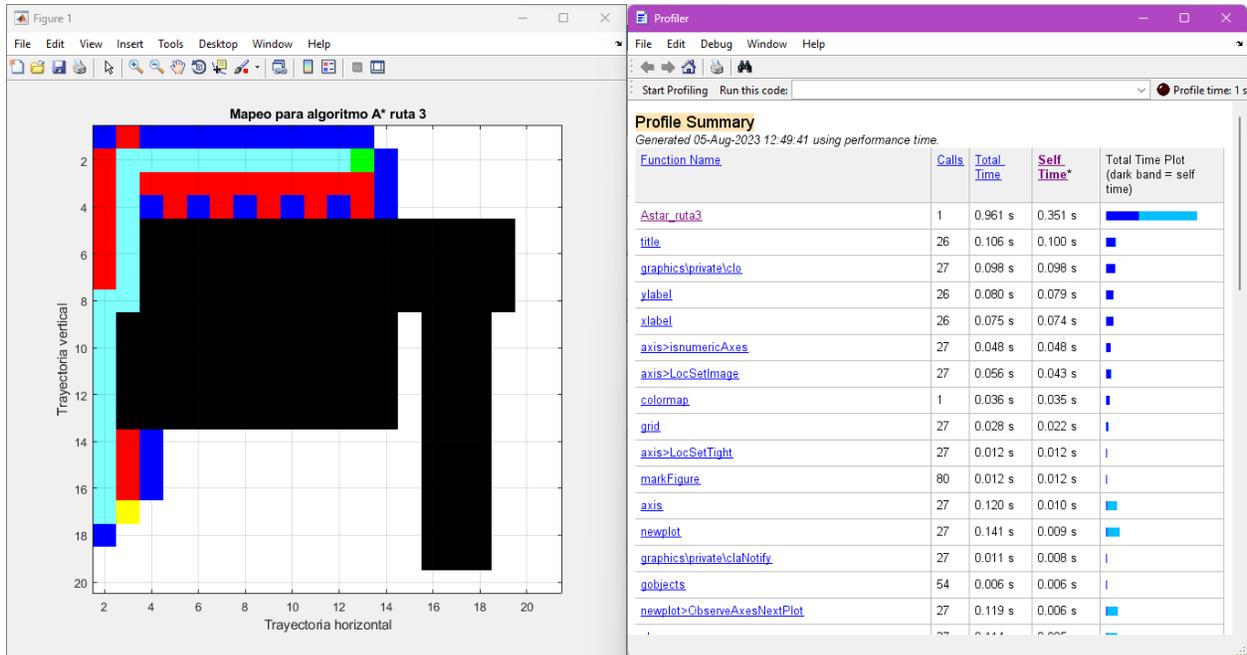
ANEXO 2

Parámetros de evaluación algoritmo A* ruta 2



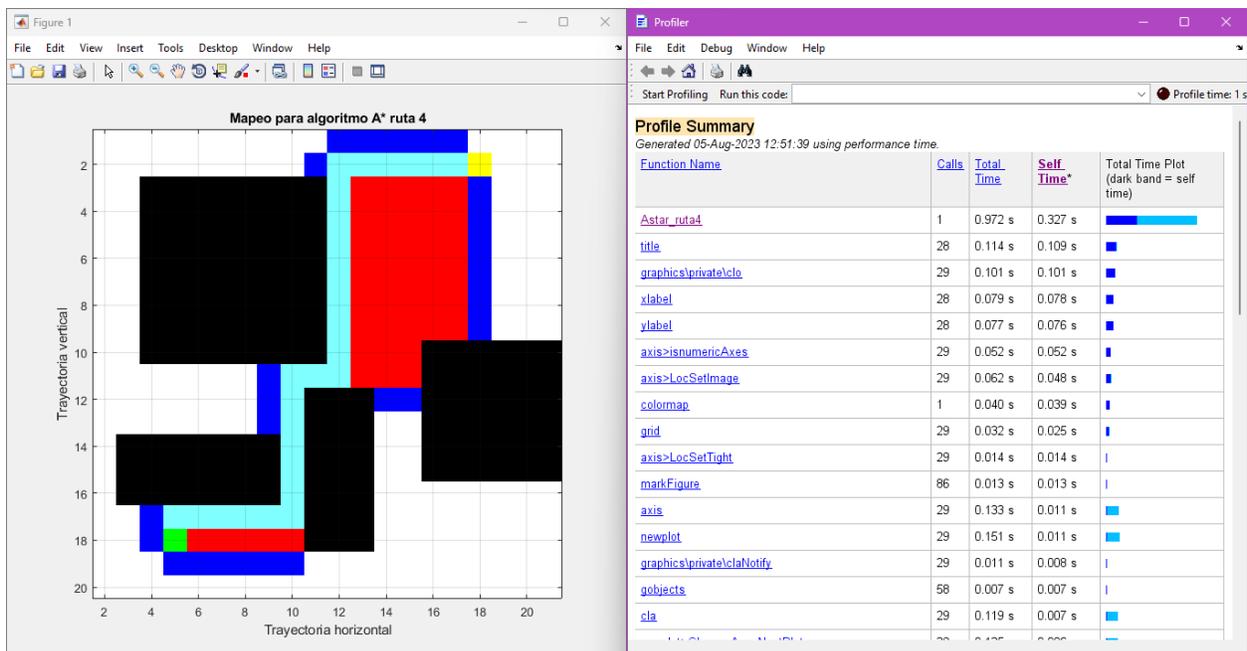
ANEXO 3

Parámetros de evaluación algoritmo A* ruta 3



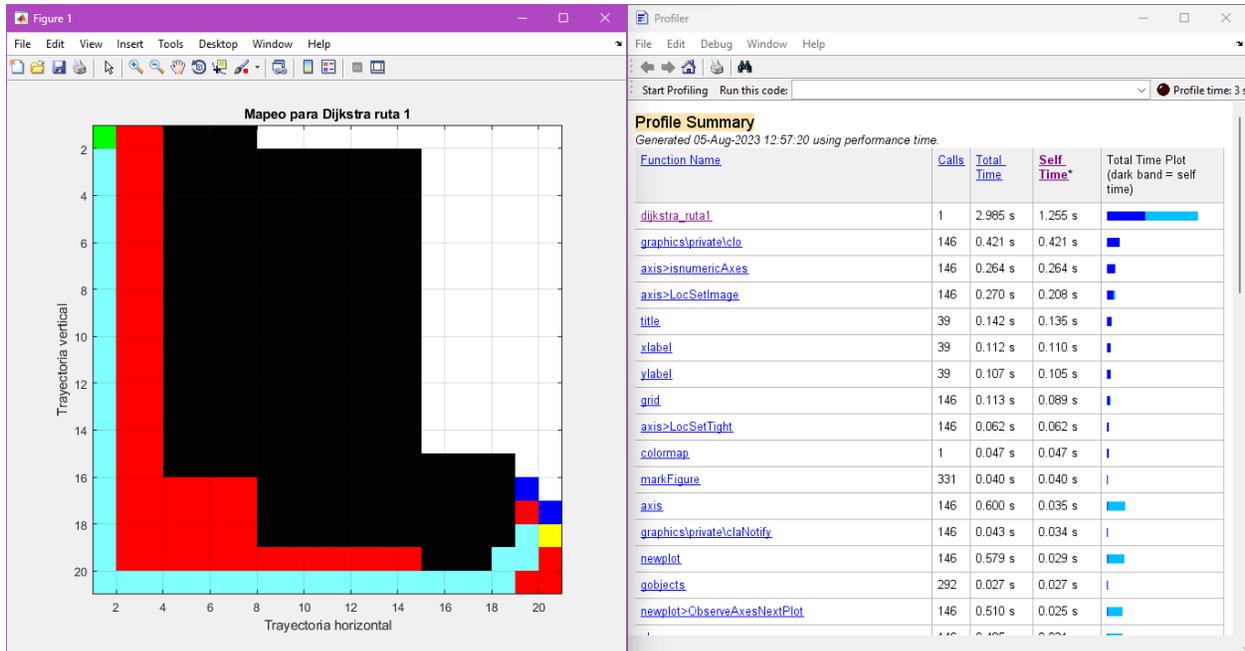
ANEXO 4

Parámetros de evaluación algoritmo A* ruta 4



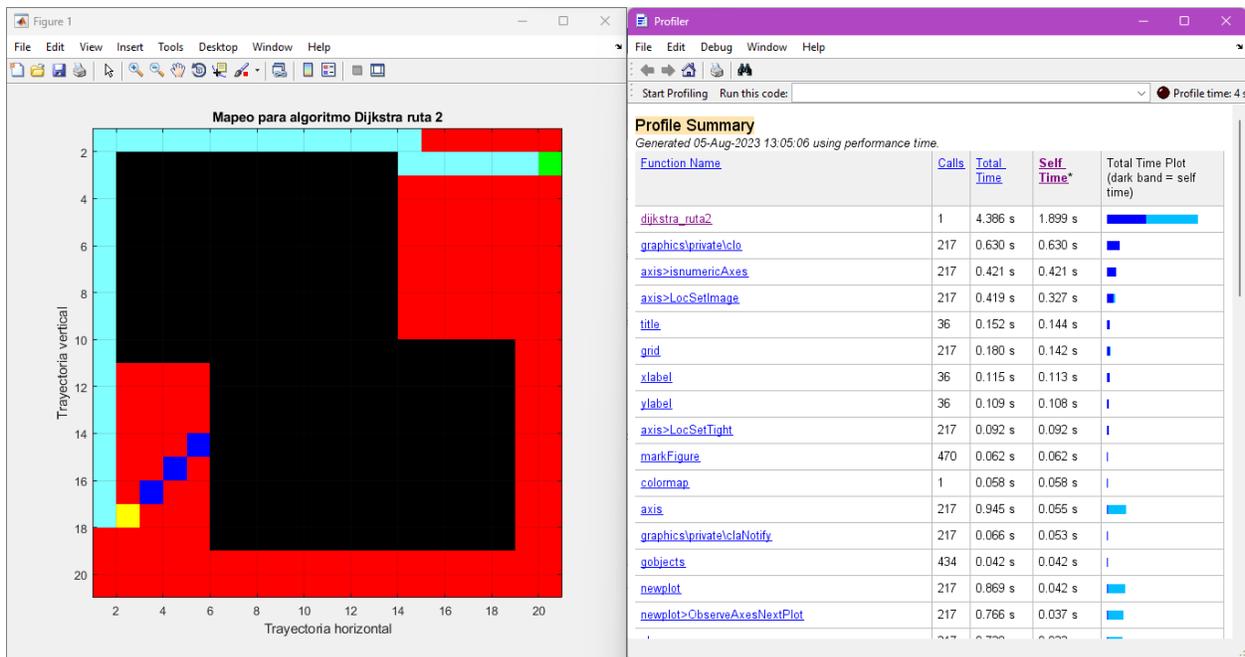
ANEXO 5

Parámetros de evaluación algoritmo Dijkstra ruta 1



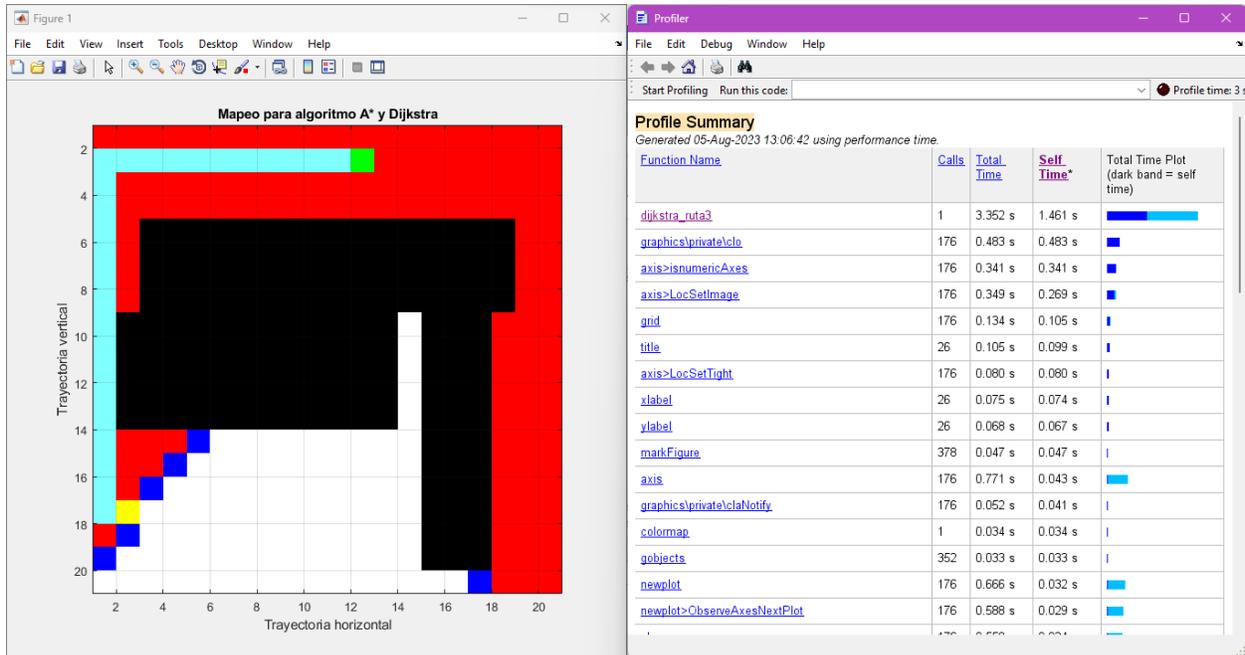
ANEXO 6

Parámetros de evaluación algoritmo Dijkstra ruta 2



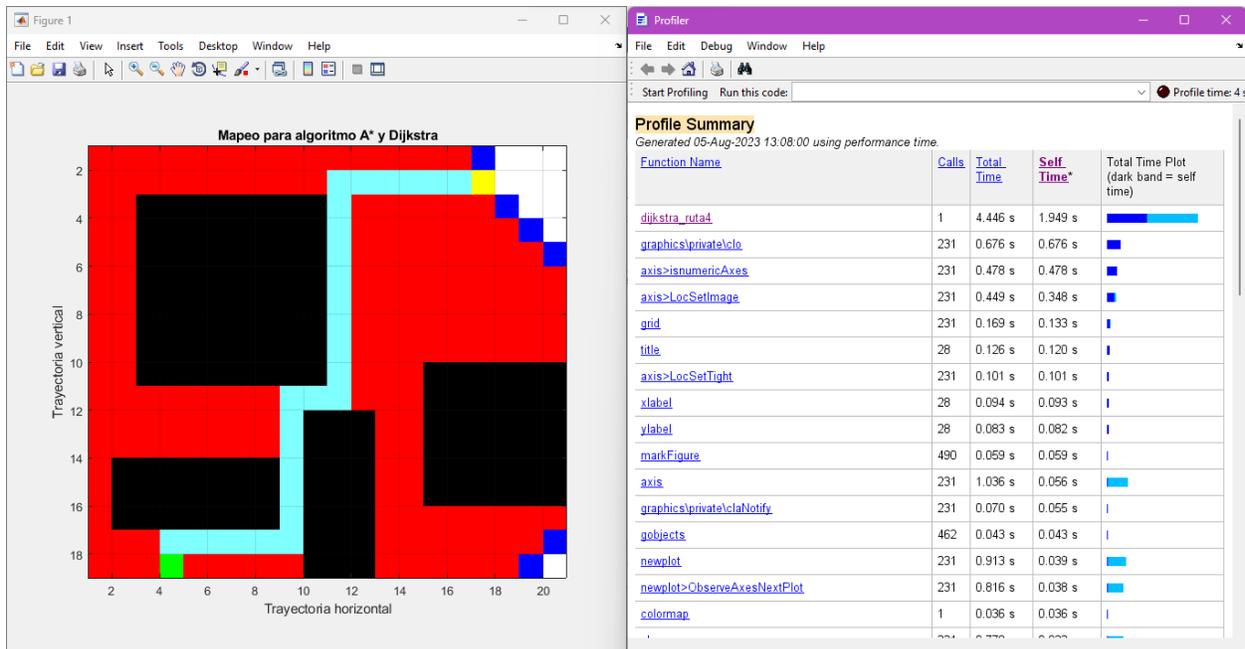
ANEXO 7

Parámetros de evaluación algoritmo Dijkstra ruta 3



ANEXO 8

Parámetros de evaluación algoritmo Dijkstra ruta 4



ANEXO 9

Aprobación del Validador MSc Manolo Paredes Calderón.



Yo, **Darwin Manolo Paredes Calderón**, con C.I **1803138005**, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: **SIMULACIÓN DE DOS MODELOS MATEMÁTICOS EN MATLAB PARA PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE ROBOTS MÓVILES CON RUEDAS**.

Elaborado por la Ing. **Mélaney Jazmín Yarad Jácome**, con C.I **1716242993**, estudiante de la Maestría en Electrónica y Automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 23 de agosto de 2022



Darwin Manolo Paredes Calderón

C.I 1803138005

Registro SENESCYT : 104131

ANEXO 10

Aprobación del Validador Ing. Diego González Sacoto. MI



Yo, **Diego Patricio González Sacoto**, con C.I **1717183675**, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: **SIMULACIÓN DE DOS MODELOS MATEMÁTICOS EN MATLAB PARA PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE ROBOTS MÓVILES CON RUEDAS**.

Elaborado por la Ing. **Mélaney Jazmín Yarad Jácome**, con C.I **1716242993**, estudiante de la Maestría en Electrónica y Automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 23 de agosto de 2022



**DIEGO PATRICIO
GONZALEZ SACOTO**

Diego Patricio González Sacoto

C.I 1717183675

Registro SENESCYT : 7241120126

ANEXO 11

Aprobación del Validador Ing. Christian Ortega Mgs.



Yo, **Christian Andrés Ortega Hidalgo**, con C.I **1719651190**, en mi calidad de validador de la propuesta del proyecto titulado: **SIMULACIÓN DE DOS MODELOS MATEMÁTICOS EN MATLAB PARA PLANIFICACIÓN DE RUTAS DE ROBOTS MÓVILES CON RUEDAS.**

Elaborado por la Ing. **Mélany Jazmín Yarad Jácome**, con C.I **1716242993**, estudiante de la Maestría en Electrónica y Automatización de la Universidad Tecnológica Israel (UISRAEL), como parte de los requisitos para obtener el Título de Magister, me permito declarar haber revisado el proyecto y realizado la evaluación de criterios.

Quito D.M., 23 de agosto de 2022

CHRISTIAN ANDRES ORTEGA HIDALGO
Firmado digitalmente por CHRISTIAN ANDRES ORTEGA HIDALGO
Fecha: 2023.08.24 13:01:09 -05'00'
Christian Andrés Ortega Hidalgo

C.I 1719651190

Registro SENESCYT : 7241136789