



Planeación de trayectorias de un Robot para la limpieza de paneles solares fotovoltaicos basado en el método Probabilistic Roadmap (PRM)

Leidy Stefanny Leal Ramírez

11481718217

Nelson Stiveen Velandia Bejarano

1148181127

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2021

Planeación de trayectorias de un Robot para la limpieza de paneles solares fotovoltaicos

Leidy Stefanny Leal Ramírez

Nelson Stiveen Velandia Bejarano

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecatrónico

Director:

Ph.D. Christian Camilo Erazo Ordoñez

Línea de Investigación:

sistemas de control

Grupo de Investigación:

GIBIO

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2021

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado
Planeación de trayectorias de un Robot
para la limpieza de paneles solares
fotovoltaicos, Cumple con los
requisitos para optar
El título de Ingeniero Mecatrónico.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá, Día Mes 2021.

AGRADECIMIENTOS

Leidy Stefanny Leal Ramírez

Primeramente, agradezco a mi familia por su comprensión, amor y confianza en los diferentes aspectos académicos, por sus consejos y apoyo que me brindan a diario y que gracias a ello me han ayudado a culminar esta etapa de mi vida. Gracias a aquellos compañeros que estuvieron a lo largo de mi carrera apoyándome tanto en momentos de felicidad como en los momentos difíciles. Y por último agradecerle el profesor Christian camilo Erazo Ordoñez por guiarnos y enseñarnos con comprensión sus conocimientos para la culminación de este proyecto.

Nelson Stiveen Velandia Bejarano

Agradezco a mis padres por todo el afecto, amor, confianza y apoyo que me han brindado en cada día de mi vida permitiéndome superar los desafíos que se me han presentado con confianza y seguridad. También agradecer al resto de mi familia, amigos y compañeros que siempre me apoyaron, acompañaron y confiaron en mí sin altruismo alguno. Y por último quiero agradecer al profesor Christian camilo Erazo Ordoñez por guiarnos con paciencia y compartirnos su conocimiento para culminar este proyecto.

Resumen

En el presente proyecto se diseñó un sistema de navegación de un robot limpiador para generar trayectorias de limpieza en paneles solares. La metodología que se lleva a cabo en el capítulo tres, donde en la primera parte se diseña el entorno gráfico planteando cinco escenarios utilizando la herramienta de Inventor, luego se diseñó el mecanismo de tracción para realizar el desplazamiento sobre las superficies irregulares, por último se diseñó el sistema de navegación utilizando el método PRM haciendo uso del software de Matlab para la planeación de trayectorias en los diferentes ambientes de trabajo, todo esto con el fin de una futura implementación de un robot limpiador de paneles solares, cabe recalcar que el proceso de validación se realizó durante el desarrollo de la cada una de las actividades propuestas. Donde se usan los principios de diseño y de control, para lograr los resultados obtenidos en el capítulo cuatro, evidenciando el sistema de navegación ejecutando la trayectoria sobre el entorno gráfico para cada uno de los escenarios propuestos.

Palabras clave:

PRM, panel solar, robot, sistema de navegación, trayectorias.

Abstract

In this project a navigation system of a cleaning robot was designed to generate cleaning paths in solar panels. The methodology that is carried out in chapter three, where in the first part the graphic environment is designed posing five scenarios using the Inventor tool, then the traction mechanism was designed to perform the displacement on irregular surfaces, finally, the navigation system was designed using the PRM method using Matlab's software for the planning of trajectories in the different working environments, all with the aim of a future implementation of a solar panel cleaning robot, It should be noted that the validation process was carried out during the development of each of the proposed activities. Where the principles of design and control are used, to achieve the results obtained in chapter four, evidencing the navigation system running the trajectory on the graphic environment for each of the proposed scenarios.

Keywords:

PRM, solar panel, robot, navigation system, trajectories.

Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS.....	II
Resumen	III
Abstract.....	IV
Introducción	1
1.1 Estado del arte	2
1.2 Planteamiento Del Problema.....	7
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo General.....	8
1.3.2 Objetivos Específicos	8
1.4 Justificación.....	9
Marco Teórico	10
2.1 Características y funcionamiento de los paneles solares	10
2.2 La navegación en la planificación de trayectorias	13
2.3 Mapeo de Rutas Probabilísticas (PRM)	14
2.3.1 Definición de la distancia de conexión	17
2.3.2 Actualización del PRM	19
2.4 Dispositivos de tracción	19
2.4.1 Orugas triangulares y rectangulares	20
2.4.2 Oruga trapezoidal escaleno	21
2.4.3 Oruga trapezoidal isósceles	21
2.5 Modelamiento espacial en <i>Simulink</i>.....	22
2.5.1 Fuerza de contacto espacial	22
2.5.2 Articulación de giro	23
Diseño Metodológico	25
3.1 Diseño Del Entorno Gráfico	25
3.1.1 Medidas y potencia de los paneles solares	25
3.1.2 Diseños de los escenarios.....	27
3.1.3 Consideraciones del área de trabajo	34
3.2 Diseño De Mecanismo De Tracción	35
3.2.1 Distribución de las ruedas	36

3.2.2 Banda sincrónica	39
3.2.3 Soporte o chasis	42
3.2.4 Cálculos del sistema	44
3.3 Diseño Sistema De Navegación De Robot Limpiador De Paneles Solares	52
3.3.2 Diseño del sistema de navegación en Matlab	52
3.4 Importación a simulink	59
Resultados Y Análisis De Resultados	63
4.1 Verificación del sistema de navegación en ambientes personalizados	63
4.1.1 Panel solar rectangular	63
4.1.2 Panel solar tragaluz	65
4.1.3 Panel solar piramidal	67
4.1.4 Panel solar chimenea	69
4.1.5 Panel solar trapezoidal	71
Conclusiones	74
Comentarios finales.....	75
Referencias Bibliográficas.....	77
Lista de tablas.....	79
Tabla de ecuaciones.....	83

CAPITULO 1

Introducción

Los robots móviles surgen como una alternativa para la limpieza y desinfección de diferentes espacios [27]. Existen diferentes tipos: a) con o sin rozamiento; b) con agua y sin agua; c) manuales y mecanizados [3]. Los sistemas de limpieza manual se caracterizan por el uso de pértigas y sistemas de agua a presión, sistemas rodillos autopropulsados, entre otros. Estos sistemas implican la contratación de más de dos personas para su funcionamiento que tengan suficiente formación y/o experiencia respecto a su manejo. Por esta razón, a largo plazo, es una desventaja para el empresario y a pesar de que los robots limpiadores de paneles solares llegan a ser costosos, tienden a poseer varias ventajas, especialmente relacionadas con el tiempo de limpieza y reducción del consumo de agua, generando así a futuro un mayor impacto en la industria colombiana.

El sistema de navegación de un robot móvil responde al interrogante dónde está el robot, o siendo más rigurosos, dónde está con referencia a un destino, para este caso el espacio de trabajo sobre el panel. Existen numerosos métodos de navegación que ofrecen resultados satisfactorios en condiciones controladas, expuestas en el estado del arte.

Además, la simulación 3D tiene un rol importante tanto en el diseño como en el control de robots móviles. El cual permite mostrar la situación del robot real o simular escenarios hipotéticos como este caso. A la vez, suministra una interfaz gráfica para visualizar la trayectoria del robot.

La planeación de trayectorias, se encarga de que el robot limpiador de paneles solar tenga la capacidad necesaria de ejecutar ciertas trayectorias de limpieza al momento de realizar las

tareas asignadas, obteniendo ventajas al implementarse estos tipos de mecanismos, tanto en el hogar como en una empresa donde se empleen paneles solares.

El presente documento se enfoca principalmente en la planeación de trayectorias para la limpieza de paneles solares, aunque al ser un robot átomo también puede ser implementado en diversos campos de la vida cotidiana, pues pueden ser utilizados en diversas estructuras irregulares.

El trabajo consta de 4 fases desarrollado en el campo metodológico, creando un entorno gráfico para validar el funcionamiento del sistema de navegación del robot, dando solución al mecanismo de tracción para que el robot se desplace sobre el panel a través, diseñando un sistema de navegación, utilizando el método PRM, para ejecutar trayectorias autónomamente y por ultimo integrando las fases anteriores para evidenciar el funcionamiento del sistema de navegación del robot en el ambiente de trabajo simulado, por medio de Simscape de Matlab.

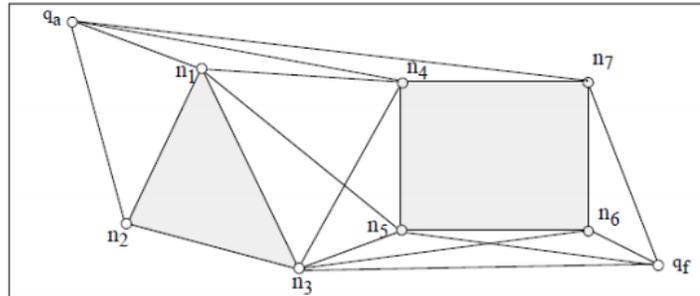
1.1 Estado del arte

Uno de los problemas fundamentales en los robots móviles es la planeación de trayectorias. Recientemente, la incorporación de nuevas tecnologías en sensores e inteligencia artificial han permitido desarrollar sistemas de navegación más eficientes y capaces de evitar obstáculos. Existen diferentes tipos de planeación de trayectorias tales como:

Grafos de visibilidad: este tipo de generación de trayectorias se basa en crear grafos de visibilidad definiendo dos puntos en el entorno como visibles, si y sólo si se pueden unir mediante segmentos rectilíneos sin la intervención de algún obstáculo a su alrededor [1].

Es considerado el nodo grafo como la unión de la posición inicial, la posición final y todos los vértices de los obstáculos tal como se muestra en la figura 1 y a través de algoritmos de búsqueda de grafos es escogida la mejor ruta.

Fig. 1 Grafo de visibilidad en un entorno de dos obstáculos

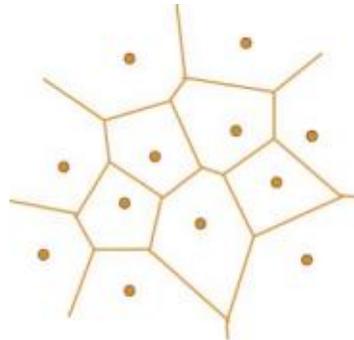


Fuente [1].

Diagramas de Voronoi: Este diagrama codifica la información de proximidad entre los objetos [26].

Los diagramas de Voronoi son una proyección de espacio libre del entorno en una red de curvas unidimensionales yacentes en dicho espacio libre y su principal objetivo es ampliar al máximo la distancia entre los robots y los obstáculos, esto da como resultado las configuraciones del lugar geométrico que se encuentra a una misma distancia de los obstáculos más próximos.

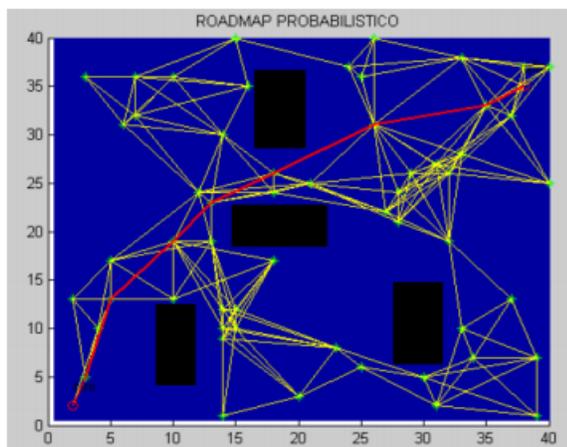
Fig. 2 Diagrama de Voronoi de obstáculos representados como puntos



Fuente [6].

Probabilistic Roadmap (PRM): este planteamiento, consiste en colocar varias configuraciones de forma aleatoria libre de colisiones en toda el área de trabajo, se conecta cada uno de los nodos más cercanos dependiendo del entorno de trabajo y se aplica un algoritmo que genere la mejor ruta [1].

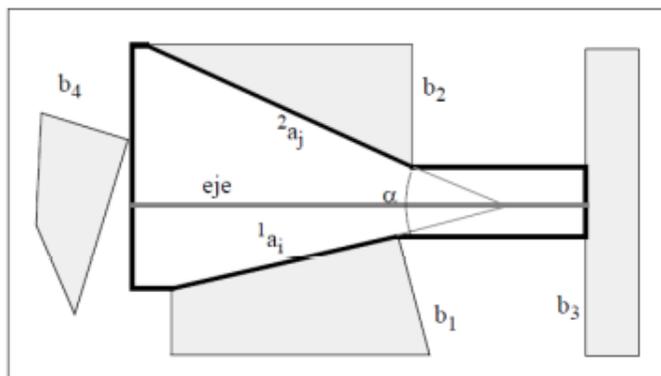
Fig. 3 Enlaces válidos en la etapa de conexión y camino entre qini y qfin mediante el algoritmo A*



Fuente [1].

Modelado del espacio libre: se lleva a cabo a través de cilindros rectilíneos generalizados y pretende navegar lo más alejado de los obstáculos generados por CRG interconectados [1].

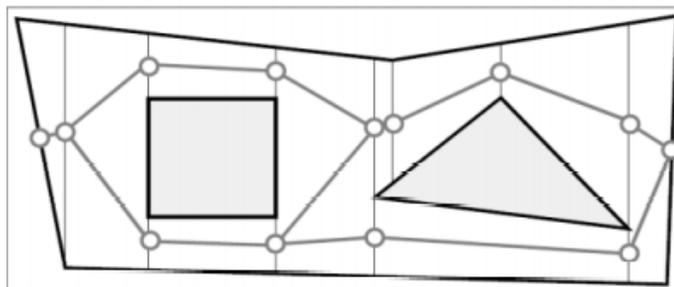
Fig. 4 Construcción de un CRG



Fuente [1].

Descomposición en celdas: De los métodos de descomposición en celdas el más sencillo es el de descomposición trapezoidal que consiste en construir rectas paralelas al eje (Y) a partir de los vértices de cada elemento del entorno [1].

Fig. 5 Grafo de conectividad de una descomposición trapezoidal



Fuente [1].

El mejor método relacionado con el trabajo de planeación de trayectorias del robot para paneles es el roadmap ya que a partir de algoritmos genera la ruta accesible y la más viable para cumplir sus labores mejores de comprender al momento de la elaboración del código en Matlab.

Desarrollar un trabajo de navegación para un robot móvil, se basa en recorrer un camino desde un puesto inicial, pasando por algunas posiciones intermedias hasta un punto final. El problema se distribuye en cuatro etapas:

- Percepción del mundo: por medio del uso de sensores externos, se produce un modelo del entorno o un mapa donde se ejecutará el trabajo de navegación del robot móvil.
- Planificación del camino: se crea una serie ordenada de posiciones intermedias que deben ser alcanzadas por el robot móvil. Esta secuencia se calcula utilizando el mapa del entorno, la descripción del trabajo que debe efectuar y el tipo de desarrollo estratégico que se debe ejecutar.
- Generación de la trayectoria: se origina una función continua que se interpola con la secuencia de posiciones intermedias creadas por el planificador. Seguidamente se procede a la discretización de esta con el fin de generar una trayectoria.
- Seguimiento de la trayectoria: se realiza durante el desplazamiento, efectuando una trayectoria mediante el diseño de navegación para el vehículo.

La necesidad de generación de energía eléctrica basados en paneles solares ha dado lugar al uso de robots móviles limpiadores. Principalmente porque un exceso de partículas y/o polvo sobre la superficie de los paneles originan puntos calientes [5], que pueden causar pérdida total del panel. Existen distintas compañías dedicadas a la limpieza de paneles solares utilizando robots

móviles que presentan diversos modos de operación. La empresa SERBOT ofrece un robot llamado “Gekko” [10], el cual necesita de un operario para realizar las trayectorias de limpieza, por medio de un control remoto con alcance de 300 m. La empresa japonesa “Miraikaika” presenta el robot Tipo 1, el cual realiza trayectorias autónomas capaces de cambiar la dirección de movimiento incluso para avanzar entre módulos fotovoltaicos que se encuentran distantes. La empresa israelí “Eccopia” ofrece el robot móvil “Ecoppia T4” [8], el cual es totalmente autónomo y puede viajar de forma independiente a los módulos vecinos a través de puentes dedicados, aprovechando los sensores integrados.

Por último, el proyecto está destinado a diseñar un sistema de navegación para un robot limpiador de paneles solares, basado en el método Probabilistic Roadmap (PRM) mencionado anteriormente. Este algoritmo es capaz de generar trayectorias automáticamente, abarcando estructuras irregulares y detectando el espacio de trabajo. La culminación del proyecto aporta al desarrollo de sistemas robóticos dedicados a la limpieza de paneles solares a nivel local.

1.2 Planteamiento Del Problema

Existen en la industria diferentes soluciones robóticas dedicadas a la limpieza de paneles solares, algunas de ellas requieren de un personal a cargo para realizar dicha tarea, es decir, los robots no pueden efectuar movimientos autónomos [10]; Por otro lado, algunos robots, requieren que el panel no tenga inclinación, cómo es el caso del robot Eccopia T4 [9], lo cual limita la capacidad máxima de generación del sistema de paneles solares [30].

En Colombia el uso de robots para la limpieza de paneles solares aún no es muy común.

En principio, porque es muy limitado el uso de paneles solares en comparación con ciertos países europeos y además por sus altos costos; Por lo tanto, la limpieza de paneles solares se realiza de forma manual con el uso de pértigas telescópicas las cuales tienen un cepillo para realizar esta labor.

Igualmente, en el país la arquitectura empleada en los tejados o azoteas no son del todo simétricas por lo consiguiente al llevar a cabo una instalación de paneles solares el objeto es colocar la mayor cantidad posible, por tal motivo el montaje resulta en una estructura irregular para ocupar la totalidad del espacio viable.

De acuerdo con lo previo, en el proyecto se plantea el diseño de un sistema de navegación autónomo para robots limpiadores de paneles solares en estructuras irregulares.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

Diseñar un sistema de navegación de un robot limpiador de paneles solares, el cual pueda operar en estructuras irregulares.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Diseñar un entorno gráfico que permita validar el funcionamiento del sistema de navegación del robot para paneles solares.
- Diseñar el mecanismo de tracción para que el robot se desplace sobre el panel a través de la herramienta de modelado 3D de Inventor.
- Diseñar un sistema de navegación para un robot limpiador de paneles solares, utilizando el método PRM, de modo que ejecute trayectorias autónomamente.
- Evaluar el funcionamiento del sistema de navegación del robot en el ambiente de trabajo simulado, haciendo uso de programas como Simscape de Matlab e Inventor.

1.4 Justificación

En Colombia el uso de energías solares según las estadísticas de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) evidencian iniciativas del 88,3% que tienen que ver con la energía solar, ya que 9 de cada 10 propuestas de generación de energía, tienen que ver con paneles solares ya que desde julio hasta noviembre han tenido un aumento del 32% [4].

Existen diversas soluciones robóticas de limpieza de paneles solares como anteriormente fueron descritos el Gekko, el Miraikaika, el Ecoppia T4, etc. Estos tipos de robots que no se han implementado en su totalidad en el país debido a sus altos costos al momento de transportar el equipo a Colombia y adquirir este tipo de mecanismo de limpieza; Esta investigación tiene como objetivo aumentar la venta de robots limpiadores de paneles solares con una mejor autonomía.

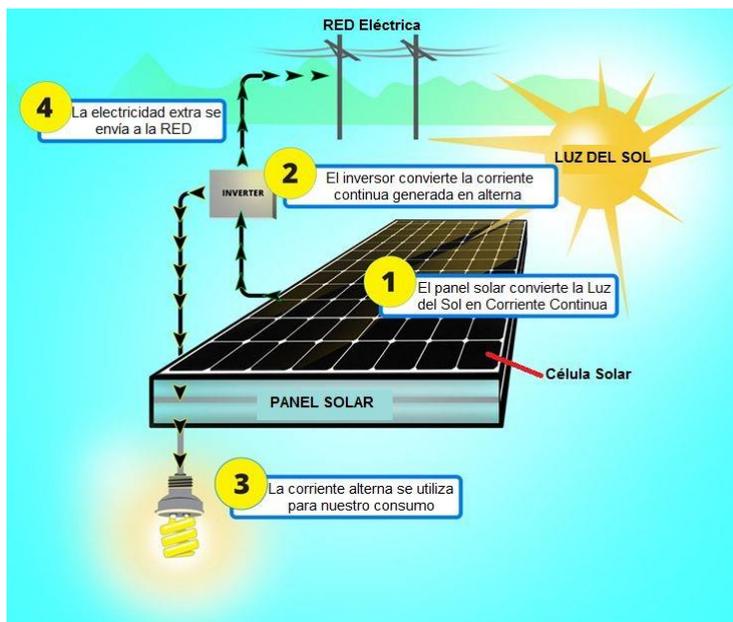
CAPITULO 2

Marco Teórico

2.1 Características y funcionamiento de los paneles solares

Los paneles solares son dispositivos capaces de aprovechar la luz solar para generar calor o electricidad, que pueden utilizarse en casas habitacionales, comercios e industrias a pequeña o gran escala. Estos dispositivos tienden a conformarse de numerosas celdas conocidas como células fotovoltaicas, puesto que son las encargadas de convertir la luz en electricidad produciendo cargas negativas y positivas en los semiconductores, elaborando un campo eléctrico capaz de generar corriente [4].

Fig. 6 Funcionamiento de panel fotovoltaico



Fuente [21].

En Colombia, la principal fuente de energía proviene de las hidroeléctricas junto con la energía térmica generada a través de gas, petróleo y carbón siendo estas las dos principales fuentes energéticas no renovables encargadas de proveer al país. Sin embargo, estos recursos han disminuido considerablemente, lo que ha obligado al país a adoptar gradualmente el uso de energías limpias. [8].

A mediados de los años 50 se empezó a utilizar energías alternativas, mediante la radiación solar para producir electricidad con recursos renovables, los primeros pasos tuvieron lugar en la ciudad de santa marta, donde se instalaron calentadores solares en las casas de los trabajadores de las bananeras. Para los años 60, la propuesta ya se habría extendido a algunas universidades de Santander y de Bogotá, y finalmente, para las décadas de los 80 y 90, la energía fotovoltaica ya se empezaba a implementar en el país. Inicialmente se instalaron pequeños generadores de energía para radioteléfonos y más adelante sistemas fotovoltaicos con mayor capacidad de generación. [4].

En general en Colombia la energía renovable avanza considerablemente, aplicando nuevos métodos para suplir la demanda energética. Para el 2015, Colombia ingresó a la Agencia Internacional De Recursos Renovables (IRENA) convirtiéndose en un país con compromisos para la implementación de tecnologías de producción de energías limpias. [8].

Gracias a estos avances se ha creado el marco legal que acompaña dichas iniciativas, como la ley 1715 de mayo del 2014 que busca promover el uso de energías renovables en el país, constituyendo un gran paso en la evolución energética con enfoque social. Permitiendo el acceso a zonas rurales en los que la energía eléctrica convencional es inexistente, a través de esta ley se apoyará la inversión, la investigación y el desarrollo de tecnologías limpias para la producción de energía, a través de incentivos tributarios con el objetivo de reducir los índices de contaminación y obteniendo avances tecnológicos en la industria eléctrica a nivel mundial [7].

Fig. 7 Instalación de paneles solares en Medellín



Fuente [7].

En el transcurso de los años, y debido a la contaminación que se presenta en el medio ambiente. Los paneles solares tienden a acumular residuos en su superficie (polvo, grasa, tierra, entre otros), lo que causa que se reduzca en gran medida la eficiencia del panel, generando a su vez zonas calientes que afectan la vida útil del panel considerablemente. Por esta razón la limpieza de un panel solar es importante para aumentar su vida útil [16].

En la figura 8 se evidencia la diferencia entre un panel limpio y un panel sucio:

Fig. 8 Panel limpio y panel sucio



Fuente [16].

2.2 La navegación en la planificación de trayectorias

Se define navegación como la metodología (o arte) que permite guiar el curso de un robot móvil a través de un entorno con obstáculos. Existen diversos esquemas, pero todos ellos poseen en común el afán por llevar el vehículo a su destino de forma segura. La capacidad de reacción ante situaciones inesperadas debe ser la principal cualidad para desenvolverse, de modo eficaz, en entornos no estructurados.

En resumen, las tareas involucradas en la navegación de un robot móvil son:

- La percepción del entorno a través de sus sensores, de modo que le permita crear una abstracción del mundo.
- La planificación de una trayectoria libre de obstáculos, para alcanzar el punto destino seleccionado.
- El guiado del vehículo a través de la referencia construida.

De forma simultánea, el vehículo puede interactuar con ciertos elementos del entorno. Así, se define el concepto de operación como la programación de las herramientas de a bordo que le permiten realizar la tarea especificada.

Como consecuente, de la navegación de robots limpiadores de paneles solares y el diseño de robots limpiadores de paneles solares, en Colombia, para el presente y a futuro puede llegar a ser una gran herramienta a la hora de la limpieza adecuada del panel solar manteniendo los cuidados de estos [19].

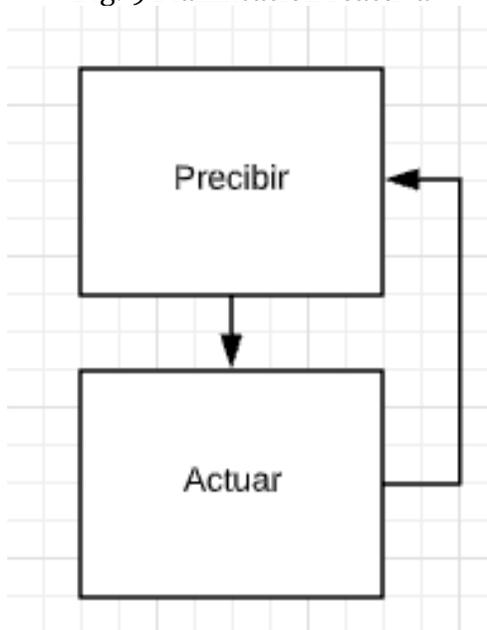
Una de las principales definiciones de planificación, sea local o global, consiste generalmente en encontrar una ruta segura y eficiente al momento de llevar el dispositivo desde la posición actual hasta la que se le especifica. La planificación de trayectorias tiene diversos tipos de programación en el que se puede manejar la dirección y lógica de sus movimientos, por lo tanto, también se debe observar las características cinemáticas y dinámicas del plano en el que se debe manejar el dispositivo y los diferentes obstáculos para asegurar la continuidad en la tarea que se le estipule. En los siguientes párrafos se propone la descripción de los métodos de planificación de trayectorias [19].

2.3 Mapeo de Rutas Probabilísticas (PRM)

Este método de planificación de movimiento para robots en estática se presenta en los espacios de trabajo, para este caso paneles solares. Este método procede en dos fases: una fase de aprendizaje y una fase de consulta. En la fase de aprendizaje, una hoja de ruta probabilística se construye y almacena como un gráfico, donde se generan nodos que corresponden a configuraciones libres de colisiones y cuyos bordes corresponden a caminos factibles entre estas configuraciones. Estas rutas se calculan utilizando un planificador local simple y rápido. En la fase de consulta, se establece una configuración de inicio y objetivo de los robots, donde estos se conectan a dos nodos de la hoja de ruta [22].

Por lo consiguiente un PRM se puede decir que es una navegación reactiva ya que, en una trayectoria, los comandos son enviados en cada iteración a los actuadores del robot como una reacción ante ciertos estímulos predefinidos. Esto lo convierte en un sistema similar a un lazo cerrado de control, el robot actúa, cambia el mundo, y posteriormente modifica su acción para reaccionar ante el mundo.

Fig. 9 Planificación reactiva



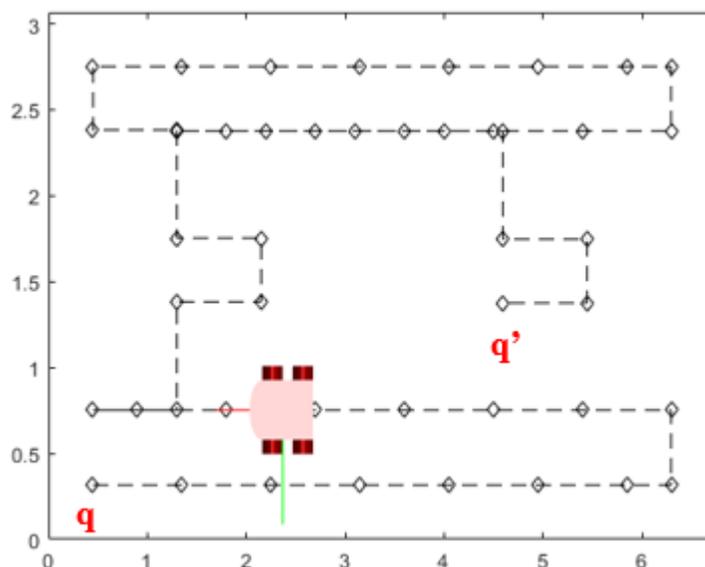
Fuente [Propia].

Para una mayor eficiencia también se puede lograr adaptando algunos componentes del método de planificador local a los robots considerados. Este método se aplica a robots articulados planos con muchos grados. de libertad [22].

Los planeadores locales son métodos determinísticos, simples y rápidos empleados para formar las conexiones entre los nodos de un roadmap y para conectar las configuraciones inicial y final durante las consultas. El planeador local produce la misma ruta cada vez que es llamado con las mismas configuraciones de entrada. Si el planeador local no es determinístico las rutas locales deben ser almacenadas en el roadmap con la desventaja de que el roadmap requerirá más espacio.

Este algoritmo calcula una ruta entre dos configuraciones dadas q y q' , denotado como $L(q, q')$, esta ruta conecta a ambas configuraciones en la ausencia de obstáculos; tales métodos son conocidos como *Planeadores Locales* y puede simplemente construir rutas en línea recta cuando los movimientos del robot no están restringidos [1].

Fig. 10 Ruta del punto q al punto q'



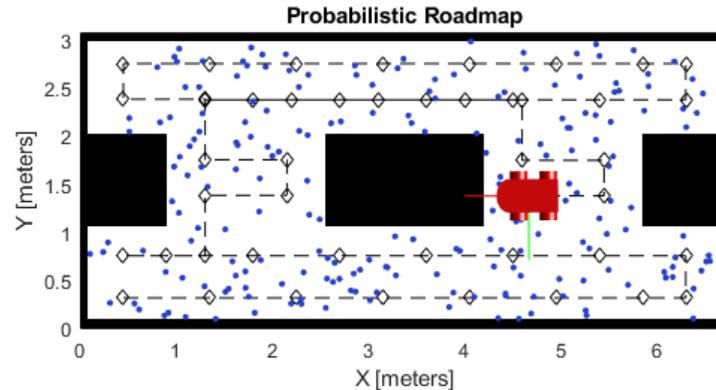
Fuente [Propia].

El planeador local conecta dos configuraciones dadas en línea recta, discretizando la distancia existente entre ellas de acuerdo con un parámetro definido por el usuario y verificando en cada una de estas partes si no existe colisión entre el robot y los obstáculos del ambiente. Si una colisión se detecta, inmediatamente el planeador reporta que la conexión entre las configuraciones no puede ser establecida [1].

A continuación, se representa el procedimiento a la hora de diseñar un planeador local:

Se convierte en distancia, significa calcular el conjunto de configuraciones c_1, \dots, c_m existentes entre las configuraciones de entrada para posteriormente verificar si el robot posicionado en cada configuración c_i está libre de colisión. Si ninguna de las configuraciones produce colisión se concluye que la ruta está libre de colisión. A este tipo de planeador se le conoce como planeador local de línea recta como en la siguiente imagen:

Fig. 11 Roadmap Probabilistic



Fuente [Propia].

Al utilizar Matlab para este tipo de trayectorias, hay que seguir los siguientes pasos como ejemplo.

2.3.1 Definición de la distancia de conexión

Se utiliza la propiedad del objeto para ajustar el algoritmo. es un umbral superior para los puntos que están conectados en la hoja de ruta. Cada nodo está conectado a todos los nodos dentro de esta distancia de conexión que no tienen obstáculos entre ellos. Al reducir la distancia de conexión, se puede limitar el número de conexiones para reducir el tiempo de cálculo y simplificar el mapa. Sin embargo, una distancia más baja limita el número de caminos disponibles desde los cuales encontrar una ruta completa sin obstáculos. Cuando se trabaja con mapas simples, se puede utilizar una distancia de conexión más alta con un pequeño número de nodos para aumentar la eficiencia. [13].

Se carga un mapa como matriz lógica y se crea una cuadrícula de ocupación

```
load exampleMaps.mat
map = binaryOccupancyMap(simpleMap,2);
```

Se crea una hoja de ruta con 100 nodos y calcula la ruta. El valor predeterminado se establece en inf. Guarde la configuración de generación de números aleatorios mediante la función `rng`. La configuración guardada le permite reproducir los mismos puntos y ver el efecto de cambiar. [13].

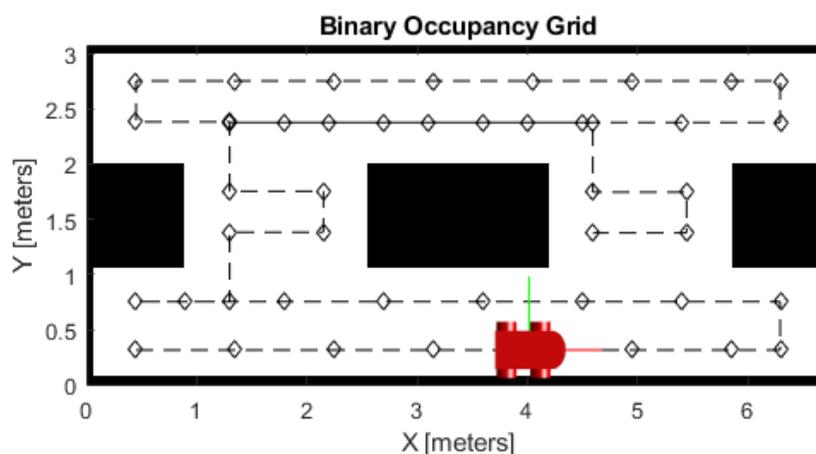
```
rngState = rng;
prm = mobileRobotPRM(map,100);
startLocation = [2 1];
endLocation = [12 10];
path = findpath(prm,startLocation,endLocation);
show(prm)
```

Vuelva a cargar la configuración de generación de números aleatorios para que PRM use los mismos nodos. Más bajo a 2 m. Mostrar la ruta calculada.

```
rng(rngState);
prm.ConnectionDistance = 2;
path = findpath(prm,startLocation,endLocation);
show(prm)
```

Como resultado se tiene que, a partir de los nodos ubicados aleatoriamente, se obtiene la ruta para un panel solar con mayor eficiencia:

Fig. 12 Ruta eficiente para la limpieza de un panel solar



Fuente [Propia].

2.3.2 Actualización del PRM

Al utilizar el objeto y modificar las propiedades, con cada nueva llamada a la función, el objeto activa los puntos de la hoja de ruta y las conexiones que se volverán a calcular. Dado que el recalculación del mapa puede ser computacionalmente intensivo, puede reutilizar la misma hoja de ruta llamando con diferentes ubicaciones de inicio y finalización [13].

Se carga de nuevo el mapa, desde un archivo como matriz lógica y cree una cuadrícula de ocupación.

```
load('exampleMaps.mat')
map = binaryOccupancyMap(simpleMap,2);
```

Se crea una hoja de ruta. Sus nodos y conexiones pueden tener un aspecto diferente debido a la ubicación aleatoria de los nodos.

```
prm = mobileRobotPRM(map,100);
show(prm)
```

Cambia un parámetro para actualizar los nodos y las conexiones a actualizar

```
update(prm)
show(prm)
```

2.4 Dispositivos de tracción

Los sistemas de tracción están diseñados con la finalidad de mejorar la capacidad de transformar la energía del motor cuando el dispositivo está en movimiento. El robot tiene la capacidad de transmitir la potencia del motor al suelo y dependiendo del tipo de tracción el dispositivo tendrá ciertas limitaciones como que alguna de las ruedas deba tener adherencia, si son dos ruedas la potencia siempre se va a dividir para saturar la capacidad de tracción de los neumáticos. Dentro de la robótica los sistemas se clasifican en terrestres, aéreos, anfíbios y acuáticos, además utiliza diferentes sistemas de desplazamiento tales como robots con ruedas, robots con patas, robots oruga, entre otros [20].

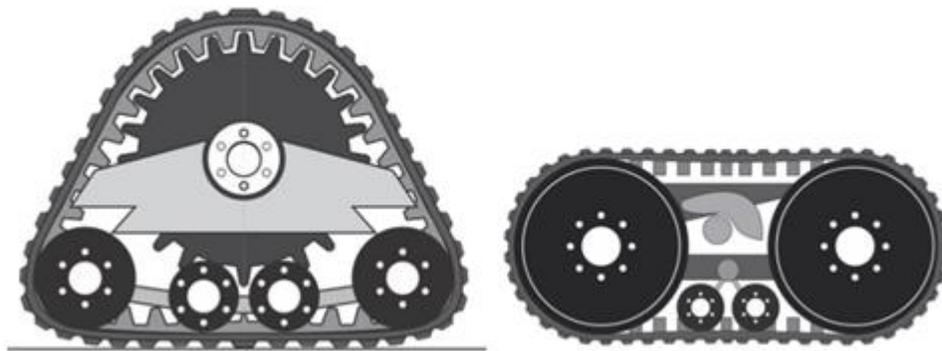
En el mecanismo de tracción del robot limpiador de paneles solares se utilizó el tipo de desplazamiento robot oruga. El sistema oruga al tener una mayor flotabilidad, genera un menor esfuerzo de potencia al desplazarse y que a largo plazo generará un menor consumo de energía útil. El sistema de tracción oruga permite una mejor estabilidad en el panel solar gracias a su 98% de tracción a diferencia de la oruga metálica, Otro punto a mención de la descripción de este mecanismo es que, gracias a su forma, el sistema de tracción en el suelo produce una presión sobre el suelo entre 4 y 2 veces menor que los que manejan una tracción de ruedas, lo que mejora el cuidado al manipular la superficie del panel solar [20].

Existen diferentes tipos de rodamientos de oruga tales como orugas triangulares, orugas rectangulares, orugas trapezoidales isósceles y orugas trapezoidales escalenos.

2.4.1 Orugas triangulares y rectangulares

Las orugas triangulares y rectangulares son caracterizadas por presentar una buena distribución de masa en el sistema obteniendo un mejor apoyo en la banda de rodamiento generando una alta eficiencia de tracción y reduciendo la compactación que se origina en el suelo [20].

Fig. 13 Oruga triangular y rectangular

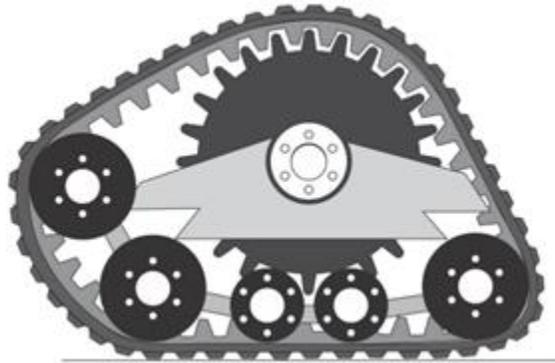


Fuente [20]

2.4.2 Oruga trapezoidal escaleno

Las orugas trapezoidales escalenos, se caracteriza por tener un rodillo delantero ocioso, transformando parte de la masa de la máquina en el rodillo, gracias al rodillo suspendido instalado permite obtener un alto poder de tracción aun en condición de suelos anegados [20].

Fig. 14 Oruga trapezoidal

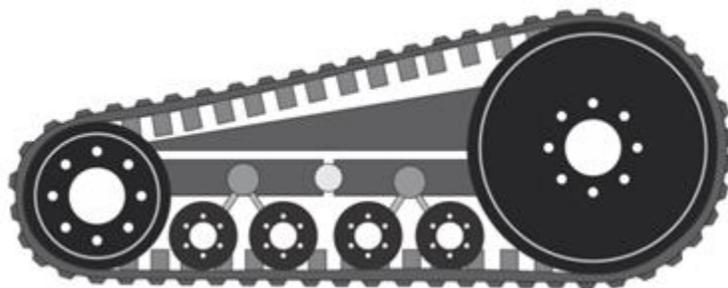


Fuente [20]

2.4.3 Oruga trapezoidal isósceles

Por último, el sistema de tracción utilizado en el dispositivo es la de oruga trapezoidal isósceles, este tipo de desplazamiento tiene una disposición geométrica que logra mantener una buena visibilidad de trabajo gracias a que uno de sus rodamientos es menor que el otro, distribuye muy bien su peso en la superficie, reduciendo el daño que se puede generar en el panel solar y mejorando la tracción del robot [20].

Fig. 15 Oruga trapezoidal isósceles



Fuente [20]

2.5 Modelamiento espacial en *Simulink*

2.5.1 *Fuerza de contacto espacial*

Este bloque es el encargado de modelar el contacto entre un par de cuerpos utilizando el método de penalización. Este método permite calcular las fuerzas de contacto, a partir de la aplicación de fuerzas normales y friccionales entre la base conectada y los cuerpos seguidores [2].

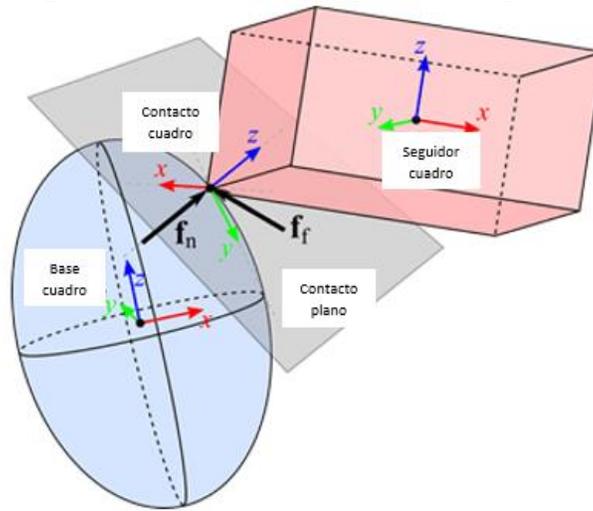
Este tipo de fuerzas se calcula a partir de la ecuación clásica de fuerzas del sistema de amortiguación de resorte, esto quiere decir que, durante el contacto, la fuerza de contacto normal es proporcional a la profundidad y velocidad de penetración que tiene dicho objeto. El ancho de la región de transición especifica la región de transición a las ecuaciones de fuerza. En tanto a la profundidad de penetración del mismo se traslada a través de la región de transición, el objeto va aumentando suavemente la fuerza. Se genera una transición en el regio final, se le aplica la rigidez y la amortiguación completa. Cuando el objeto rebota, la rigidez como las fuerzas que amortiguan el sistema se reducen a cero. La transición logra que se eliminen los eventos del cruce cero y la discontinuidad de la ecuación de fuerza [2].

La forma más sencilla de detectar cuando el valor de Ancho en la región de transición es pequeño, se genera una detección opcional de cruce cero en la fuerza de contacto espacial del bloque y estos eventos solo ocurren cuando la distancia de separación cambia de positiva o cero a negativa y viceversa [2].

Cada cuerpo es distinto dependiendo del cuerpo la normalidad de contacto cambia, por ejemplo, si la superficie es lisa cerca al punto de contacto, la normalidad de contacto es la superficie externa normal en el por de contacto, Por el otro caso donde la superficie no es lisa, la normalidad de contacto se calcula con distintos métodos [2].

En la siguiente figura se puede observar el marco de contacto para el cuerpo base:

Fig. 16 Marco de contacto para el cuerpo base



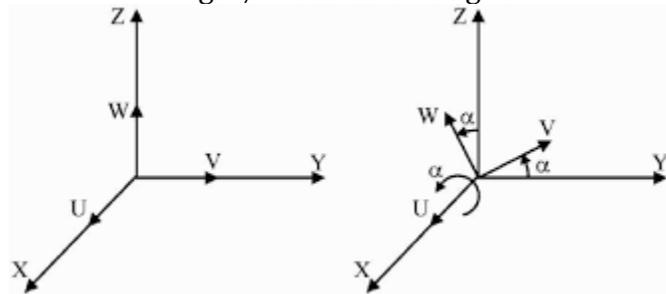
Fuente [2]

2.5.2 Articulación de giro

Este bloque representa una articulación con un grado de libertad de rotación y los orígenes de la base y el marco siguen siendo concordantes durante la simulación [2]

Los parámetros mecánicos internos nos dan a explicar el almacenamiento de energía y disipación de cada articulación. Los resortes ejercen una tarea como almacenamiento de energía, soportando cualquier intento de desplazamiento en la articulación desde su posición de equilibrio y los amortiguadores de las articulaciones funcionan como disipadores de energía. Estos dos últimos son estrictamente lineales [2].

Fig. 17 Articulación de giro



Fuente [2]

Para el cumplimiento de los límites, a cara amortiguador de resorte se le implementa una articulación, cuanto más rígido sea el resorte, tendrá más dificultar el momento de detenerse o rebotar cuando hallan oscilaciones y cuanto más fuerte sea el amortiguador, hay mayor probabilidad de perdidas viscosas que disminuyen gradualmente en las oscilaciones de contacto [2].

2.5.2.1 Parámetros

Para obtener los datos importantes de un objetivo con los valores deseados en la articulación de giro, la posición y la velocidad son de gran importancia y dependiendo del nivel de prioridad se determina la precisión con la que se debe cumplir el objetivo [2].

2.5.2.1.1 Especificar objetivo de posición

Se selecciona esta opción para especificar la posición conjunta deseada en el tiempo cero. Este Angulo de rotación, se mide alrededor del eje de articulación, del marco seguidor con respecto al marco base. El Objetivo se debe resolver en el marco base. Al ser seleccionado, se expondrán los capos con mayor valor y prioridad [2].

2.5.2.1.2 Especificar objetivo de velocidad

Se selecciona esta opción con el fin de especificar la velocidad deseada en el tiempo cero. Esta velocidad angular se mire alrededor del eje articular del marco seguidor con respecto al marco base El objetivo se debe resolver en el marco base. Al seleccionar esta opción, se expondrán igual que en el anterior los campos con mayor valor y prioridad [2].

2.5.2.1.3 Prioridad

Se selecciona esta opción con el fin de obtener la prioridad del objetivo de estado. Este es el nivel más importante ya que si no se pueden cumplir simultáneamente todos los objetivos estatales el nivel de prioridad determinara que objetivos se deben cumplir primero y que tan cerca se está de satisfacer los objetivos. Esta opción se aplica tanto a los objetivos de posición como los de velocidad [2].

Capítulo 3

Diseño Metodológico

En este capítulo se procede a desarrollar la metodología empleada para desarrollar un sistema de navegación de un robot limpiador de paneles solares.

3.1 Diseño Del Entorno Gráfico

En esta sección se recrea un ecosistema realizando un montaje virtual conformado por el espacio de trabajo del panel solar delimitando el espacio libre para cinco escenarios distintos.

3.1.1 Medidas y potencia de los paneles solares

El panel solar tiene como función captar la radiación producida por el sol transformándola en energía eléctrica.

A su vez el panel está compuesto por células solares de silicio siendo las más comunes y las que se encuentran mayormente en el mercado, teniendo una configuración de 60 y 72 células, donde el número determina las dimensiones aproximadas.

Basado en lo anterior y con información suministrada por la empresa SUNFIELDS con más de 15 años de experiencia en sector fotovoltaico, se presenta la siguiente tabla con las medidas más habituales para paneles solares:

Tabla 1 medidas de paneles solares

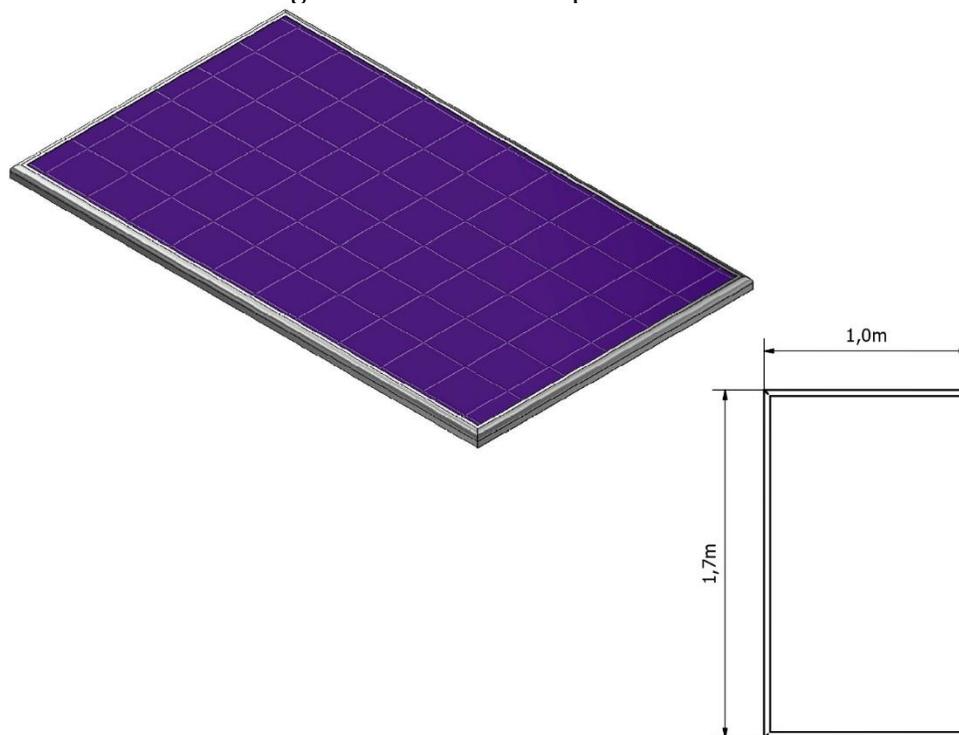
Potencia del Panel	Medidas placas solares	Número de células
Panel Solar de 250 W	1,7 m x 1,0 m	60
Panel Solar de 260 W	1,7 m x 1,0 m	60
Panel Solar de 270 W	1,7 m x 1,0 m	60
Panel Solar de 280 W	1,7 m x 1,0 m	60
Panel Solar de 300 W	1,7 m x 1,0 m	60
Panel Solar de 310 W	1,7 m x 1,0 m	60

Panel Solar de 320 W	1,7 m x 1,0 m	60
Panel Solar de 330 W	1,7 m x 1,0 m	60
Panel Solar de 330 W	2,0 m x 1,0 m	72
Panel Solar de 340 W	2,0 m x 1,0 m	72
Panel Solar de 350 W	2,0 m x 1,0 m	72
Panel Solar de 370 W	2,0 m x 1,0 m	72
Panel Solar de 380 W	2,0 m x 1,0 m	72
Panel Solar de 390 W	2,0 m x 1,0 m	72
Panel Solar de 400 W	2,0 m x 1,0 m	72
Panel Solar de 410 W	2,0 m x 1,0 m	72

Fuente [21]

Teniendo en cuenta que en el país la arquitectura empleada en los tejados o azoteas no son del todo simétricas, por consiguiente para garantizar sus objetivos en la instalación de paneles solares se deben implementar la mayor cantidad posible, para esto se escoge la mínima cantidad de células priorizando un menor tamaño y se elige el de mayor potencia que se puede generar con las células seleccionadas , optando por la configuración de 330 W, con unas dimensiones aproximadas de 1,7 m x 1,0 m contando con 60 células solares.

Fig. 18 Dimensiones de panel solar



Fuente [Propia].

3.1.2 Diseños de los escenarios

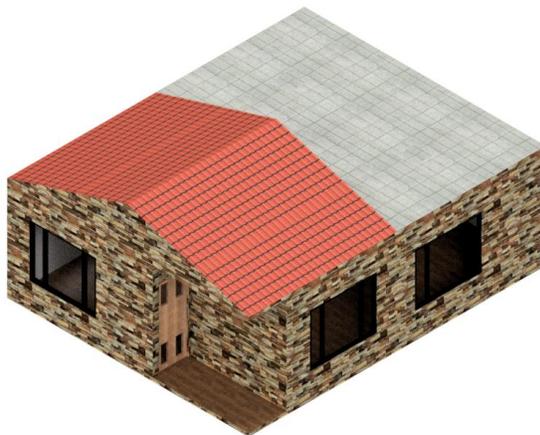
En segundo lugar, basado en los planos del anexo 1, se moldea y modifica algunos parámetros con el fin de tener un lugar donde realizar el montaje de los paneles solares, los resultados se presentan durante la explicación de cada escenario.

A continuación, se plantan 5 diferentes entornos para la simulación donde se generan las trayectorias del robot limpiador de paneles solares:

3.1.2.1 Panel solar normal (ideal)

Escenario 1:

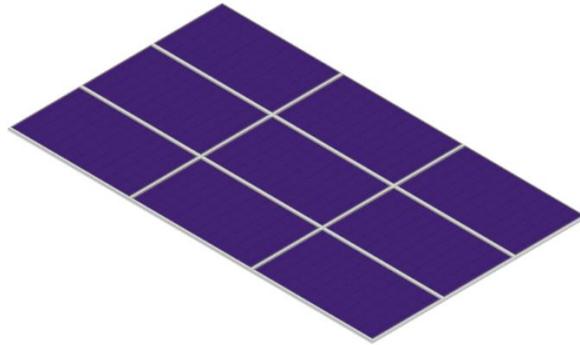
Fig. 19 Escenario de prototipo de casa



Fuente [Propia].

Para este primer escenario se denomina como el caso ideal donde no existe ningún obstáculo en el terreno donde se puede emplear todo el espacio disponible, por lo consiguiente se le da la siguiente distribución a los paneles solares:

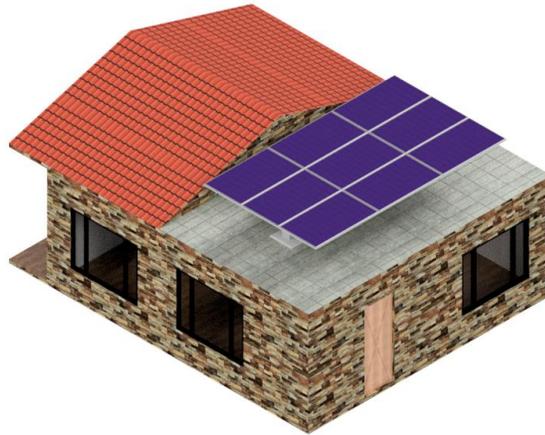
Fig. 20 Panel solar rectangular



Fuente [Propia]

Escenario 1 para evaluar trayectoria:

Fig. 21 Escenario y panel rectangular



Fuente [Propia]

3.1.2.2 Panel Solar tragaluz

Escenario 2:

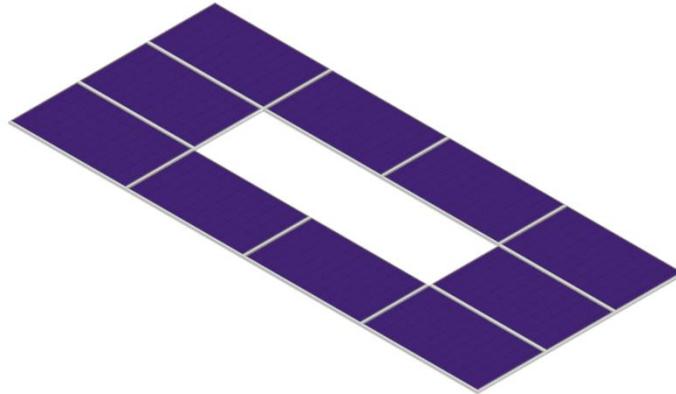
Fig. 22 Escenario de prototipo de casa con tragaluz



Fuente [Propia]

Con respecto al escenario 1 se visualiza un cambio en donde la distribución de los paneles varia dado que la casa cuenta con un tragaluz, por esta razón este panel consta de un orificio en la mitad del panel. En este diseño la planificación de la trayectoria tendrá que generar el orificio como un obstáculo que tendrá que evitar.

Fig. 23 Panel solar tragaluz



Fuente [Propia]

Escenario 2 para evaluar trayectoria:

Fig. 24 Escenario y panel tragaluz



Fuente [Propia]

3.1.2.3 Panel Solar piramidal

Escenario 3:

Fig. 25 Escenario de prototipo de casa con antenas satelitales

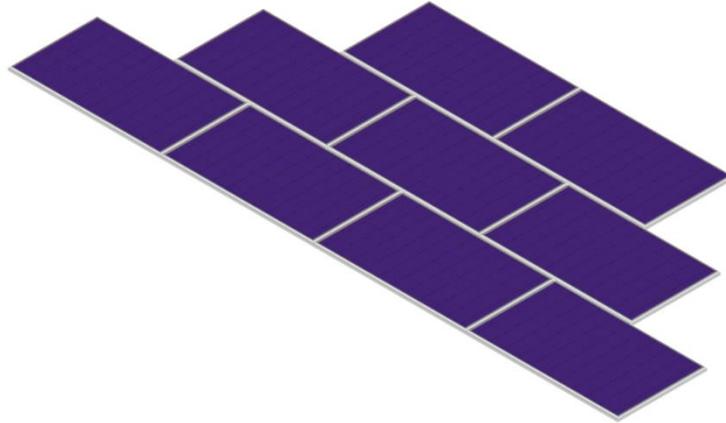


Fuente [Propia]

En este caso, como se observa en la figura 25, existen dos dispositivos añadidos a la casa, como pueden ser antenas satelitales, entre otras, por lo mismo, este panel consta de una forma piramidal para tener una mayor cantidad de paneles solares con las limitaciones del escenario. El

robot limpiador de paneles solares diseñará una ruta adecuada generando obstáculos en los puntos donde pueda perder el equilibrio.

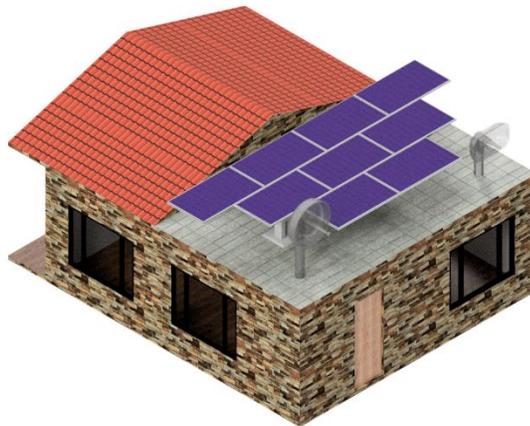
Fig. 26 Panel solar piramidal



Fuente [Propia]

Escenario 3 para evaluar trayectoria:

Fig. 27 Escenario y panel piramidal

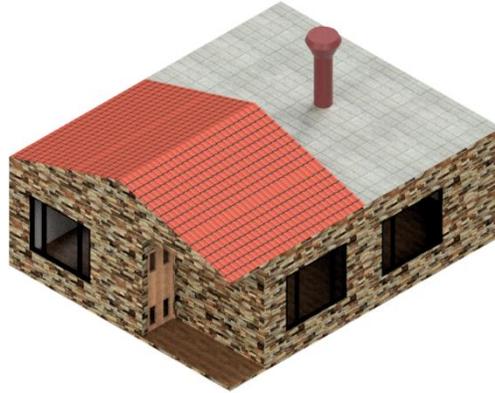


Fuente [Propia]

3.1.2.4 Panel Solar chimenea

Escenario 4:

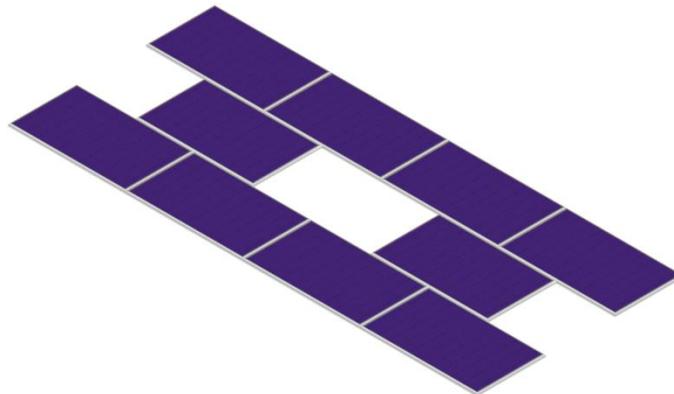
Fig. 28 Escenario de prototipo de casa con chimenea



Fuente [Propia]

De la misma forma que en el escenario 2 la solución del panel consta de un orificio en la mitad del panel ya que la casa cuenta con una chimenea. En este diseño la planificación de la trayectoria tendrá que generar la chimenea como un obstáculo para no tropezar y ocasionar daños en su sistema, de igual modo generar obstáculos en los vacíos de sus laterales.

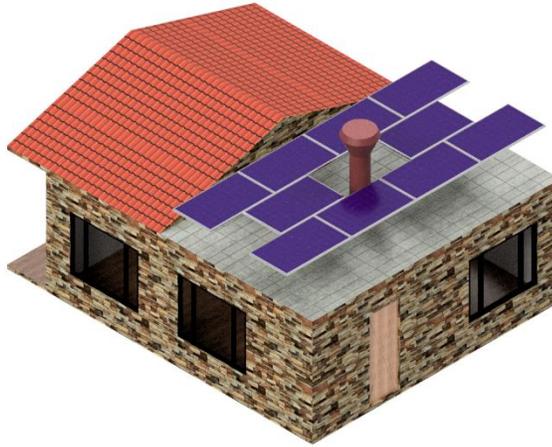
Fig. 29 Panel solar chimenea



Fuente [Propia]

Escenario 4 para evaluar trayectoria:

Fig. 30 Escenario y panel con chimenea



Fuente [Propia]

3.1.2.4 Panel Solar trapezoidal

Escenario 5:

Fig. 31 Escenario de prototipo de casa con tanque esquinero

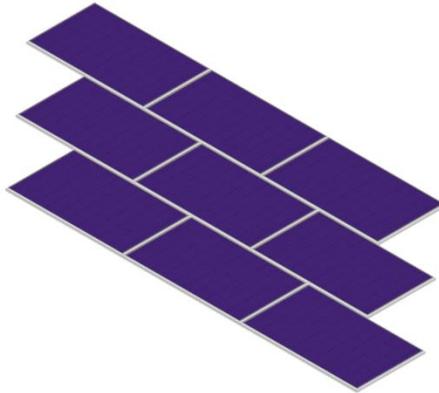


Fuente [Propia]

Ya para terminar, en este último caso el panel consta de una forma trapezoidal ya que como se observa en la figura, existe un tanque de agua en la superficie donde está instalado el panel solar. Para mejorar la eficiencia del panel y no disminuir su tamaño se diseñan paneles trapezoidales o de otra figura con el fin de aumentar la cantidad de energía administrada. El robot

limpiador de paneles solares diseñará una ruta adecuada generando obstáculos en los puntos donde pueda perder el equilibrio.

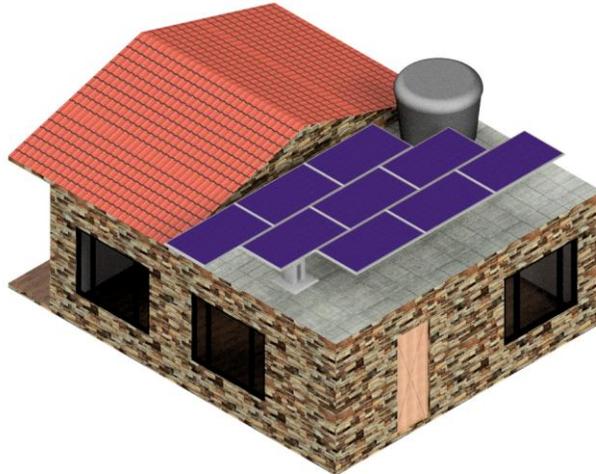
Fig. 32 Panel solar trapezoidal



Fuente [Propia]

Escenario 5 para evaluar trayectoria:

Fig. 33 Escenario y panel trapezoidal



Fuente [Propia]

3.1.3 Consideraciones del área de trabajo

Dentro de las consideraciones del área de trabajo, se perciben dos grupos, los cuales corresponden a características de la estructura irregular de trabajo y medioambientales, tomando

como referencia parámetros ideales. Este entorno se escogió como un espacio delimitado donde el robot móvil se pueda desplazar.

Tabla 2 Características de la superficie de trabajo

características de la superficie de trabajo (Cristal)			características medioambientales		
μ	M_s [kg]	ρ_{vidrio} [kg/m ³]	T_a [°C]	ρ_{aire} [kg/m ³]	V_0 [m/s]
0,7	20	2500	20	1,2041	343

Fuente [Propia]

Finalizando con esta primera etapa, se plantearon 5 escenarios a fin de dar solución a través del sistema de navegación para que un robot limpiador de paneles solares realice un mantenimiento de manera autónoma, en estas formas irregulares de instalaciones de paneles solares.

3.2 Diseño De Mecanismo De Tracción

Antes de empezar con el mecanismo, se seleccionan las dimensiones para el robot móvil tomando en cuenta las de los robots móviles nombrados en la siguiente tabla:

Tabla 3 Dimensiones robots móviles

ROBOT	ANCHO	LARGO
SERBOT	125 cm	180 cm
Miraikaika	90 cm	100 cm
Eccopia	35 cm	63 cm

Fuente [Propia]

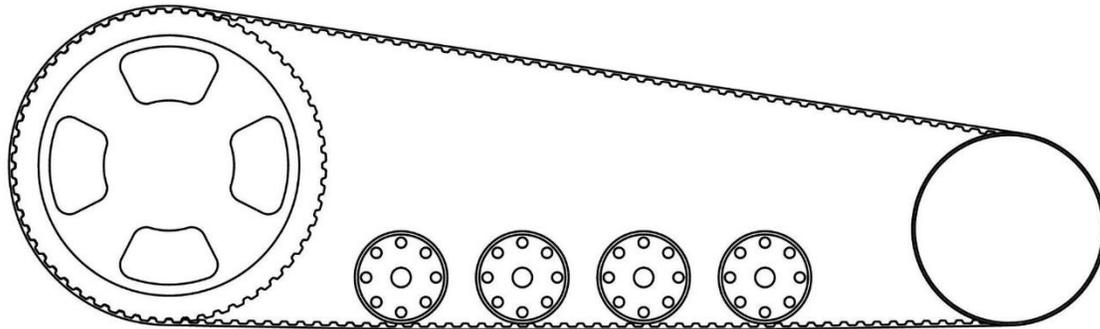
Según la tabla 3, se determina un rango de 63 cm hasta 180 cm de largo y de ancho 35 cm a 125 cm, a lo cual se seleccionan las siguientes medidas del robot móvil en 90 cm de largo x 63 cm de ancho, para tener en cuenta en el diseño del mecanismo de tracción.

El sistema de tracción a utilizar será de tipo oruga trapezoidal isósceles, por su parte cuenta con dos orugas con movimiento independiente para realizar giros de hasta 180°.

Para el diseño del modelado tridimensional el programa utilizado es Autodesk Inventor en su versión para estudiantes. Este software CAD/CAM presenta una gran cantidad de soluciones no solo para el ámbito 3D, sino también para análisis de tensiones y resistencias de carga.

El modelo del sistema con dimensiones de 90 cm de largo y 7.6 cm de ancho, teniendo un espesor de 3 milímetros con los dientes, se puede observar en la figura 34 el uso de 2 ruedas dentadas, la de mayor diámetro con 242.552 mm y la de menor diámetro con 145.531 mm y 4 rodillos de apoyo con un diámetro de 71.000 mm, una vez clara la distribución y la cantidad de componentes a utilizar, se procede a el diseño 3D.

Fig. 34 Sistema oruga



Fuente [Propia]

por medio de las referencias comerciales de dispositivos de la misma clase se pretende que el sistema oruga tenga una facilidad y sencillez para su montaje. para este diseño se dividió en tres secciones: distribución de las ruedas, banda sincrónica y soporte o chasis

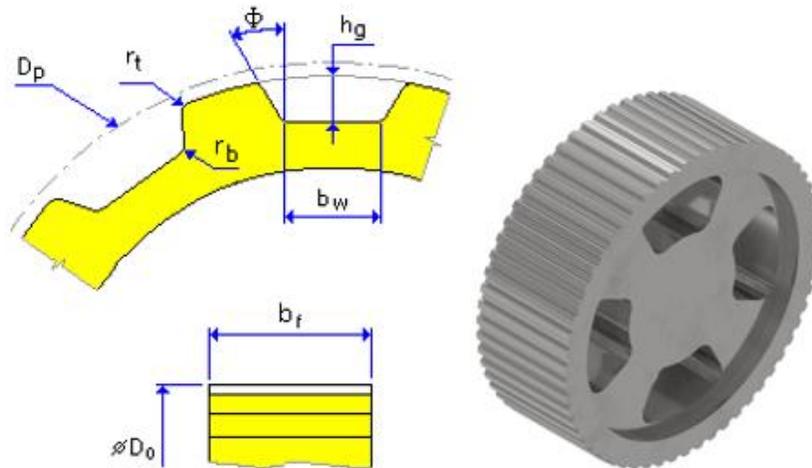
3.2.1 Distribución de las ruedas

En este caso se plantea una rueda dentada motriz de mayor tamaño teniendo un diámetro de 242.552 mm, situada en la parte frontal donde está ubicado el motor de la oruga, seguida de una segunda rueda dentada de menor tamaño con un diámetro de 145.531 mm, que distribuye muy bien su peso en el espacio de trabajo, por último 4 rodillos de apoyo con un diámetro de 71 mm, cuya función es mantener en línea sobre la superficie la correa sobre el panel. Cabe señalar que estas ruedas cuentan con una cierta libertad de movimiento, lo que permite tensionar y ajustar la banda a el mecanismo.

Se presentan las dimensiones de las 2 ruedas dentadas y del rodillo de apoyo

3.2.1.1 Rueda dentada principal

Fig. 35 Rueda dentada grande



Fuente [Propia]

Tabla 4 Dimensiones rueda dentada grande

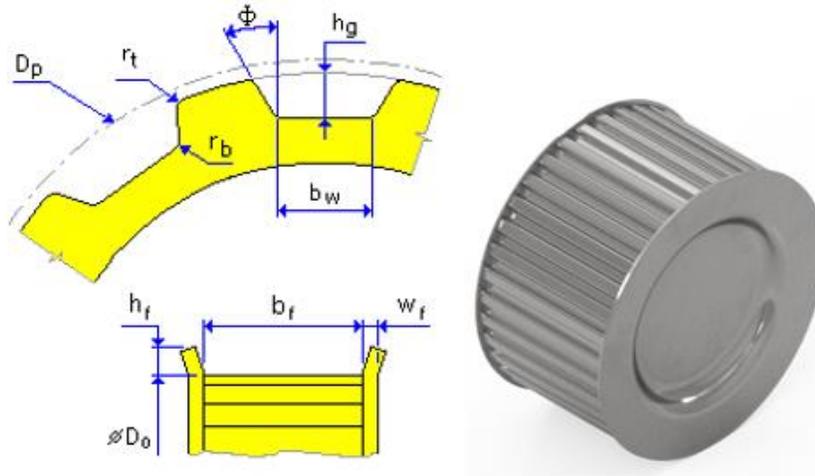
DIMENSIONES	SIMBOLOGÍA	MEDIDAS
Numero de dientes	Z	60 su
Diámetro de separación	Dp	242.552 mm
Diámetro exterior de polea	Do	241.181 mm
Anchura de polea	bf	83.566 mm
Arco de contacto	β	187.61 gr
Distancia entre raíz cabeza	Hg	3.048 mm
Ancho de espacio	Bw	4.191 mm
Radio de entalle	Rb	1.600 mm
Radio de cabeza	Rt	1.600 mm

Fuente [Propia]

Gracias a la rueda principal al tener un mayor diámetro de 242.552 mm, se genera una gran capacidad de tracción, impidiendo la traficabilidad.

3.2.1.2 Rueda dentada 2

Fig. 36 Rueda dentada pequeña



Fuente [Propia]

Tabla 5 Dimensiones rueda dentada pequeña

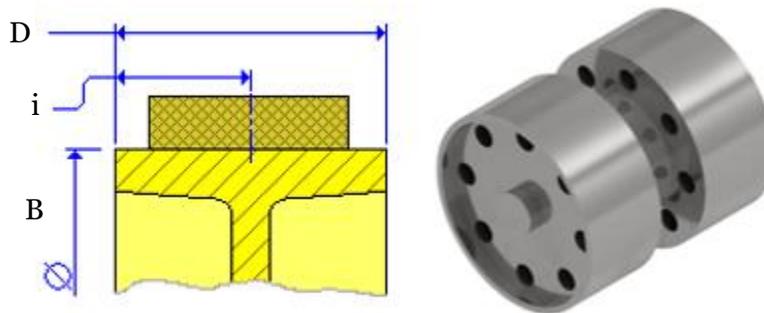
DIMENSIONES	SIMBOLOGÍA	MEDIDAS
Numero de dientes	Z	60 su
Diámetro de separación	Dp	242.552 mm
Diámetro exterior de polea	Do	241.181 mm
Anchura de polea	bf	83.566 mm
Arco de contacto	β	187.61 gr
Coefficiente de transmisión	i	0.6 su
Numero de dientes en contacto	Zc	18 su
Ancho del espacio	Bw	4.191 mm
Distancia entre raíz cabeza	Hg	3.048 mm
Radios de entalle	Rb	1.600 mm
Radio de cabeza	Rt	1.600 mm

Fuente [Propia]

La rueda dentada 2 el tener un menor tamaño contribuye a distribuir muy bien el peso en el apoyo de la banda del rodamiento aliviando la tracción y disminuyendo los efectos de compactación que se generan en el suelo y evitando fisuras en el panel solar.

3.2.1.3 Rodillo

Fig. 37 rodillo



Fuente [Propia]

Tabla 6 Dimensiones rodillo

DIMENSIONES	SIMBOLOGÍA	MEDIDAS
Anchura de polea	B	83.820 mm
Coefficiente	i	0.317 su
Diámetro	D	71.000 mm

Fuente [Propia]

Los rodillos en el prototipo de tracción tipo oruga trapezoidal generalmente se encargan de reducir la fricción entre los ejes y las piezas conectadas, de tal forma que facilita el desplazamiento del dispositivo en este caso el limpiador de paneles solares.

3.2.2 Banda sincrónica

En esta sección se escoge la correa por medio de los parámetros de la rueda dentada principal, en donde se debe realizar la transmisión de potencia de una rueda dentada a la otra manteniendo o disminuyendo la velocidad y el torque.

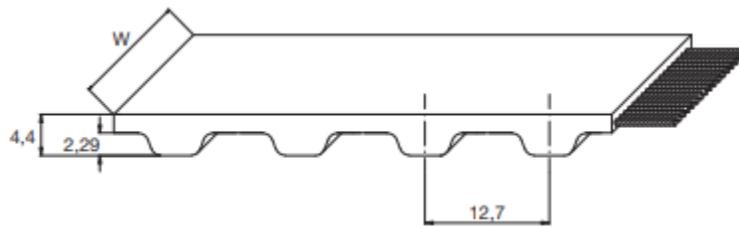
3.2.2.1 Elección de la banda sincrónica

Para escoger esta banda, se tiene en cuenta el paso entre los dientes y la anchura de la rueda dentada principal, ya que esta genera la potencia del mecanismo.

Para la elección de esta banda sincrónica por medio de la rueda dentada principal. Existen unas bandas con ciertas características proporcionadas por las empresas MEGADYNE y OPTIBELT que se ajustan a las necesidades del proyecto y con base a las referencias comerciales que se encuentran en el mercado suministradas por estas empresas se tuvo en cuenta el diseño a continuación.

Para este caso se sabe que el paso entre dientes es de aproximadamente de 12.62 mm la empresa MEGADYNE en su catálogo de correas abiertas de caucho, presenta la H OPEN-END (CORTE RECTO) con las siguientes medidas y características.

Fig. 38 Corte en espiral



Fuente [16]

Tabla 7 características de correa 1

Características	
Compuesto estándar	Cloropreno 74±4 ShA
Cubierta de diente estándar	Tela de nailon
Cable estándar	Vidrio
Tolerancia de ancho estándar	± 0.8 mm
Tolerancia de espesor estándar	±0.60 mm
Tolerancia de longitud estándar	±0.8 mm/m

Fuente [16]

por último, se escoge el ancho de la correa teniendo como referencia el espesor de la rueda dentada principal, cuyo valor es de 83.5 mm

Tabla 8 Medidas de la correa

Ancho estándar (in)	50	75	100	150	200	300
Ancho estándar (mm)	12.7	19.05	25.40	38.10	50.80	76.20
Peso(gr/m)	55	82	110	165	220	330
Longitud estándar del rollo y tolerancia(m)	50±5	50±5	50±5	50±5	50±5	50±5

Fuente [16]

Tabla 9 Parámetros de cálculo de la correa

Ancho de cinturón (in)	Fuerza (N)
50	4800
75	8710
100	10495
150	15370
200	20990
300	30740

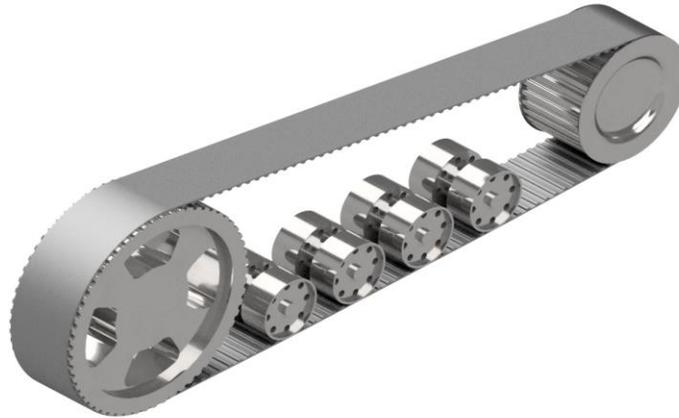
Fuente [16]

Según la tabla 9 el ancho de la correa sería de 76,20 mm donde su fuerza de ruptura, elongación y resistencia de tracción será de 30740 N, dando como referencia ante la empresa la correa sincrónica 750H300 con una longitud de 1905 mm.

Para culminar, es importante recalcar que la distancia entre los dos mecanismos tipo oruga es larga, por esta razón al momento de realizar un giro con un radio amplio se consumirá más energía del sistema que al recorrer una distancia recta.

Ensamble final

Fig. 39 Ensamble tipo oruga



Fuente [Propia]

El diseño previo de la distribución de las ruedas ayuda a crear una determinada estructura y soporte que se debe tener en cuenta.

3.2.3 Soporte o chasis

En este punto del diseño se plantea una alternativa, tomando como referencia la misma forma del mecanismo oruga.

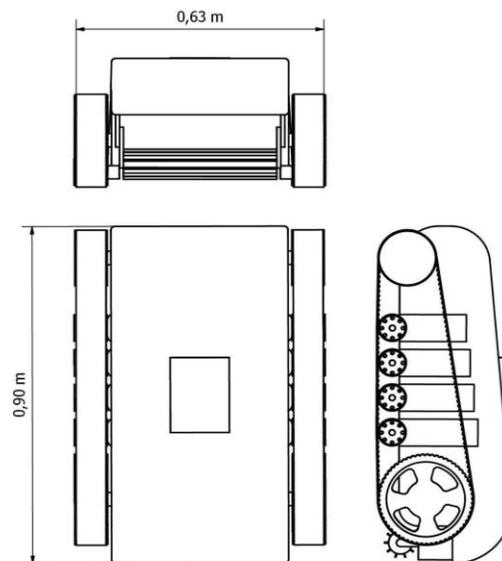
Fig. 40 Estructura de limpiador de paneles solares



Fuente [Propia]

Se determina el cumplimiento de las medidas establecidas al comienzo del capítulo:

Fig. 41 Vistas limpiador de paneles solares



Fuente [Propia]

En resumen, el diseño de este prototipo contribuye a la innovación del mercado actual. Este mecanismo tipo oruga está implementado de forma fija en el chasis, en caso de obtener este tipo de sistemas, pueden ser capaces de circular por terrenos irregulares o planos como son los paneles solares.

Las piezas del mecanismo, como la goma y las ruedas, pueden ser piezas con un precio accesible para las empresas y fáciles de obtener en el mercado actual.

3.2.4 Cálculos del sistema

Para que las piezas diseñadas y la banda sincrónica escogida cumpla con las necesidades se requiere un estudio de algunos aspectos mecánicos, por tal motivo se ha tomado en consideración algunos factores importantes en el sistema a la hora del desplazamiento del robot móvil. Los factores a tener en cuenta son: torque y potencia necesaria, transmisión de potencia al mecanismo y esfuerzo sobre la correa. Esto influye en determinar si la banda sincrónica es capaz de transmitir el torque generado sobre el robot sin que se produzca una rotura sobre esta.

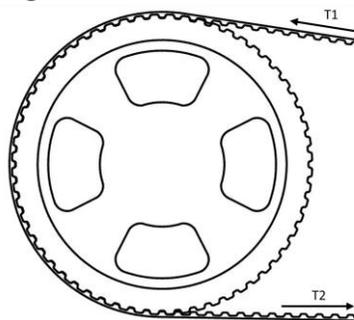
3.2.4.1 torque y potencia necesaria

Para calcular la potencia del sistema se parte de tener una rueda dentada motriz única, como se muestra en la figura, en donde la banda sincrónica pasa por ella generando una tensión de entrada (T_1) y una tensión de salida (T_2), estas fuerzas producen un par de fuerzas de la misma magnitud. La potencia por transmitir según sumatoria de fuerzas sería:

$$F = T_1 - T_2 \quad 1$$

siendo estas tomadas como la fuerza de rozamiento que se debe contraponer (F_r).

Fig. 42 Rueda motriz dentada



Fuente [Propia]

Se considera como coeficiente de fricción 0.7 en goma sobre vidrio, sacado de un estudio empírico en “Onset of frictional sliding of rubber–glass contact under dry and lubricated conditions” por Ari Juhani Tuononen de Aalto University; Cabe destacar que estos cálculos se toman en cuenta sobre una superficie plana, sin tener en consideración ningún porcentaje de inclinación, por lo tanto, la fuerza de rozamiento es el producto del coeficiente de las ruedas por el peso aproximado del prototipo.

$$F_r = w \cdot \mu \quad 2$$

$$= \left(20\text{kg} \cdot 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot 0.7 = 137\text{N}$$

Seguidamente se calcula el momento o torque igual a cero $T = F_r \cdot r$, donde r es el radio de la rueda dentada principal (121.25 mm), el momento de la rueda dentada es 16,61 Nm, pero este torque es calculado durante el movimiento, sin tener en cuenta el arranque donde el torque tiende a ser mayor. Para simplificar los cálculos del torque se aplica un factor de 1.5 para sobrepasar el torque de arranque. El torque final sería de 24,92 Nm.

Finalmente, para obtener la potencia, es necesario multiplicar el torque final con la velocidad angular sobre la rueda dentada, esta última es necesario establecer una velocidad lineal sobre el dispositivo dividiéndola en el radio de la rueda dentada. En este caso se propone un promedio de la velocidad que otros fabricantes poseen en sus dispositivos la cual es 1.46 km/h; se realiza el cálculo

$$\frac{1.46 \text{ km/h}}{0.0835 \text{ m}} \rightarrow \frac{0.4056 \text{ m/s}}{0.0835 \text{ m}}$$

dando como resultado la velocidad angular igual a 4,857 rad/s

la potencia final sería:

$$P = T \cdot \omega$$

$$= 24,92 \text{ Nm} \cdot 4,857 \text{ rad/s} = 121,02 \text{ W}$$

3.2.4.2 transmisión de potencia al mecanismo tipo oruga

Se procura que durante la transmisión de potencia no se realicen pérdidas de esta ni del par de fuerzas, por ello se inclinó el proyecto a usar la transmisión mediante el uso de engranajes rectos con una relación de transmisión igual 1 manteniendo neutro la relación, ya que si es menor a 1 reduciría la potencia y si es mayor multiplica la potencia. Por esta razón, se tendrá una rueda conductora (rueda dentada principal) y otra rueda conducida (Rueda dentada 2), con diferentes dimensiones.

Primero debe cumplir con la relación de transmisión para correas y poleas; Donde al estar en movimiento, ambas ruedas dentadas tendrán la misma velocidad lineal (1.46 km/h) manteniendo la siguiente relación:

$$\frac{\pi \cdot D_{p1} \cdot v_{a1}}{2 \pi} = \frac{\pi \cdot D_{p2} \cdot v_{a2}}{2 \pi}$$

Simplificando nos queda:

$$D_{p1} \cdot v_{a1} = D_{p2} \cdot v_{a2}$$

Determinando la proporción de la relación de transmisión entre las ruedas como

$$r_t = \frac{v_{a1}}{v_{a2}} = \frac{D_{p2}}{D_{p1}} \quad 7$$

Donde para garantizar la relación de transmisión igual a 1 falta calcular la v_{a2} :

$$v_{a2} \rightarrow \frac{D_{p1} \cdot v_{a1}}{D_{p2}} \quad 5$$

$$= \frac{0.2425 \text{ m} \cdot 4.857 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}{0.1455 \text{ m}}$$

dando como resultado **8.095 rad/s**

cumpliendo con la relación de transmisión:

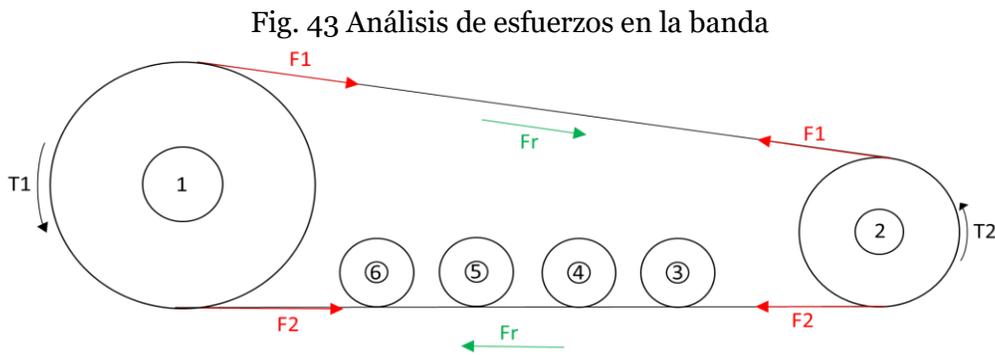
$$r_t = \frac{D_{p1} \cdot v_{a1}}{D_{p2} \cdot v_{a2}}$$

$$= \frac{0.2425 \text{ m} \cdot 4.857 \text{ rad/s}}{0.1455 \text{ m} \cdot 8.095 \text{ rad/s}} = 1$$

3.2.4.3 esfuerzos sobre la correa

Es oportuno realizar el análisis de esfuerzos presentes sobre la banda sincrónica de goma, con el objetivo de no superar la fuerza de ruptura.

En primer lugar, se plantea el problema y se colocan en equilibrio las fuerzas como se muestra en la figura siguiente.



Fuente [Propia]

Se suponen fuerzas sobre la correa (F_1, F_2), donde estas tensan la banda generando desplazamiento y llegando a provocar una rotura. Junto a estas fuerzas se presenta la fuerza de rozamiento (F_r) que es opuesta al desplazamiento del mecanismo y una fuerza extra denominada fuerza de tensión o de presión (F_t), la cual se ejerce sobre cada rueda dentada y la banda sincrónica para tensionar y ejercer su funcionamiento. Cabe añadir que los elementos 3, 4, 5, 6 no producen ni transportan ninguna fuerza.

los datos tomados en cuenta están plasmados con anterioridad en el documento.

por lo tanto, el equilibrio de las fuerzas es el siguiente:

$$F_1 + F_2 = 2 * F_t + 2 * F_r$$

la goma genera fricción en las dos ruedas

$$F_1 - F_2 - 2 * F_r = \left(\frac{T_1}{r_{p1}} \right) = \left(\frac{T_2}{r_{p2}} \right) \quad 6$$

Se calcula el torque de rueda 2

$$\left(\frac{T_1}{r_{p1}} \right) = \frac{24.92Nm}{0.12125m} = 205.53N$$

$$T_2 = 205.53N * 0.07275Nm$$

Por consiguiente, la fuerza de tensión o presión se calcula por medio del diámetro de las ruedas dentadas, donde menor sea el diámetro mayor es el peso que ejerce. Para diámetros entre 100 y 200 mm ejerce una masa de 1.6 kg y para diámetros entre 200 y 300 mm ejerce una masa de 1.3 kg, dando como Fuerzas de tensión

$$F_{t1} = 15.68N$$

$$F_{t2} = 12.75N$$

se sustituyen los valores en las ecuaciones de equilibrio:

$$F_1 + F_2 = 15.68N + 12.75N + 2 * 137N$$

$$\mathbf{F_1 + F_2 = 302.43N}$$

$$F_1 - F_2 - 2 * 137N = 205.53N$$

$$F_1 - F_2 = 205.53N + 2 * 137N$$

$$\mathbf{F_1 - F_2 = 479.53N}$$

Para terminar el cálculo de los esfuerzos sobre la correa, se resuelve el sistema de dos incógnitas, dos ecuaciones.

$$F_1 + F_2 = 302.43N$$

$$F_1 - F_2 = 479.53N$$

Teniendo como resultado que:

$$F_1 = 390.98N$$

$$F_2 = -88.55N$$

indicado que va en sentido contrario que la fuerza 1

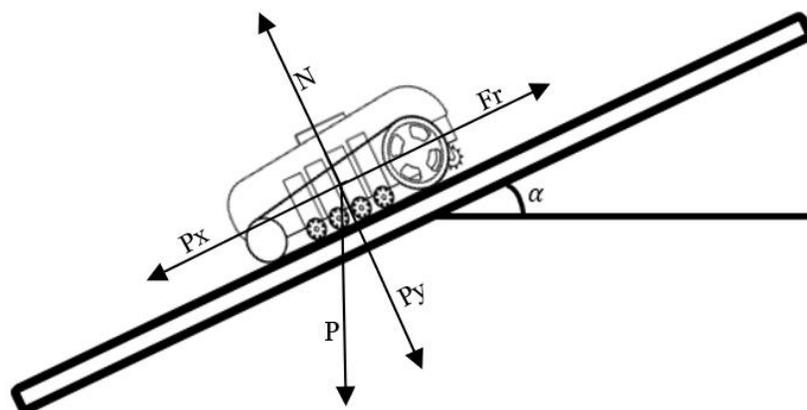
En conclusión, al observar el sistema se observó que en la parte superior y en la parte inferior se cuenta con una fuerza de 390,98 N y 88,55 N respectivamente. Estos datos son coherentes, dado que la parte superior del mecanismo siempre se encuentra tensionado y la parte inferior se ve contrarrestada por la fuerza de fricción. Estas fuerzas al no superar la fuerza de ruptura no hay inconveniente con la banda de goma.

se evidencio que el toque calculado para el mecanismo es lo suficientemente capaz para generar una potencia que mueve el mecanismo sin observar inconvenientes en la banda sincrónica y las ruedas dentadas.

3.2.4.3 Angulo máximo de inclinación que soporta el mecanismo

Para determinar el Angulo máximo tenemos que tener en cuenta la más del prototipo, el coeficiente de fricción, la velocidad lineal y el ancho de cada escenario.

Fig. 44 Angulo



Fuente [Propia]

Aplicando la segunda ley de newton realizamos sumatoria de fuerzas

$$\sum f = m \cdot a$$

$$Px - Fr = m \cdot ax = m \cdot a$$

$$N - Py = m \cdot ay = 0$$

Simplificando las ecuaciones, queda lo siguiente

$$Px - Fr = m \cdot a$$

$$N = Py$$

Descomponemos el peso en sus variables X y Y respectivamente

$$Px = m \cdot g \cdot \sin \alpha$$

$$Py = m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

Calculamos la fuerza de rozamiento con ángulo de giro

$$Fr = \mu \cdot N = \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha$$

Sustituimos en la ecuación de sumatoria de fuerzas en X

$$m \cdot g \cdot \sin \alpha - \mu \cdot m \cdot g \cdot \cos \alpha = m \cdot a$$

Como se visualiza la masa está multiplicando todos los términos, por lo tanto, se simplifica

$$g \cdot \sin \alpha - \mu \cdot g \cdot \cos \alpha = a$$

Aplicamos factor común de la gravedad

$$g(\sin \alpha - \mu \cdot \cos \alpha) = a$$

Reemplazando por los valores, tenemos que

$$9,8 \text{ m/s}^2 (\sin \alpha - 0,7 \cdot \cos \alpha) = 1.216 \text{ m/s}^2$$

Despejando la variable $\alpha = 40.8^\circ$ como ángulo máximo que soporta el mecanismo sobre el panel, pero este ángulo máximo es calculado en situaciones extremas, sin tener en cuenta factores como el motor de las ruedas y la humedad sobre el panel. Para dar el ángulo máximo se le aplica un factor de 1.5 intentado disminuir los factores anteriormente nombrados. El ángulo de giro que soporta el robot es de 27.2° .

3.3 Diseño Sistema De Navegación De Robot Limpiador De Paneles Solares

Se diseña un sistema de navegación a partir de algoritmos en estructuras irregulares. Para la programación se utiliza para dar solución al conjunto de criterios que pueden afectar el diseño, y mediante el cual se evalúa posteriormente, tomando como punto de apoyo el método PRM, que se fundamenta en un gráfico de red de posibles rutas en un espacio libre y ocupado para un mapa determinado, trabajado en el programa Matlab el cual tiene como objetivo generar nodos aleatorios y crear conexiones entre ellos en función de los parámetros del algoritmo, este método puede adaptarse a la complejidad del mapa y generar una ruta al momento del desplazamiento por medio del espacio de trabajo manejado.

3.3.2 Diseño del sistema de navegación en Matlab

El programa que mejor se acopla al diseño del sistema navegación para crear trayectorias es Matlab y se estructura de la siguiente manera:

1. Se crean los datos del robot en metros y a partir de ellos sus medidas estipuladas que en este caso son 0.63 m ancho por 0.9 m de largo.

```
ancho=0.63; %m
largo=0.9; %m
```

2. Después se importa la imagen del mapa ya diseñada anteriormente con el código

```
image = imread('cuadrado.png');
```

3. Próximamente se convierten la imagen a escala de grises y a blancos y negros en función del umbral especificado para que la visibilidad del espacio de trabajo sea más fácil al momento de la creación de la trayectoria

```
grayimage = rgb2gray(image);
bwimage = grayimage < 0.5;
```

4. Se genera una cuadrícula de ocupación con el fin de obtener diferentes puntos aleatoriamente para la obtención de la trayectoria más eficiente por donde el robot deba dirigirse.

```
mapa = binaryOccupancyMap(bwimage,100);  
show(mapa)
```

5. Posteriormente se extraen los datos del plano X y Y; Se establece el número de nodos por el que va a pasar el dispositivo en el espacio de trabajo del panel solar.

```
x=mapa.XLocalLimits(1,2);  
y=mapa.YLocalLimits(1,2);  
n=x*y*10;  
n= round(n);
```

6. Se crea una ruta de hoja sencilla con el número de nodos desde la posición inicial que en este caso es 0,0 y generando la ruta de limpieza con más eficiencia a la hora de limpiar (esto puede variar dependiendo el caso, para la explicación se usa el escenario 1)

```
t=[0 0];
px=largo/2;
py=ancho/2;
lix=largo/2;
lsx=x-lix;
liy=ancho/2;
lsy=y-liy;
k=y/ancho;
k= round(k);
while j<k
    if px==lsx
        while px>lix
            t1=[px py];
            t=[t;t1];
            px=px-largo;
        end
        px=lix;
        t1=[px py];
        t=[t;t1];
        py=py+ancho;
        if(py>lsy)
            py=lsy;
        end
    else
        while px<lsx
            t1=[px py];
            t=[t;t1];
            px=px+largo;
        end
        px=lsx;
        t1=[px py];
        t=[t;t1];
        py=py+ancho;
        j=j+1
        if(py>lsy)
            py=lsy;
        end
    end
end
end
```

```

t(1,:) = [];

robotInitialLocation = t(1,:);
robotGoal = t(end,:);
initialOrientation = 0;
robotCurrentPose = [robotInitialLocation initialOrientation]';
robot = differentialDriveKinematics("TrackWidth", 1, "VehicleInputs",
"VehicleSpeedHeadingRate");

figure
plot(t(:,1), t(:,2), 'k--d')
xlim([0 x])
ylim([0 y])

controller = controllerPurePursuit;
controller.Waypoints = t;
controller.DesiredLinearVelocity = 0.405;
controller.MaxAngularVelocity = 8.09;
controller.LookaheadDistance = 0.3;
goalRadius = 0.1;
distanceToGoal = norm(robotInitialLocation - robotGoal);

```

7. Se inicializa el bucle de la simulación con el fin de recorrer toda la trayectoria de principio a fin

```

sampleTime = 0.1;
vizRate = rateControl(1/sampleTime);

figure

frameSize = robot.TrackWidth/1.5;

```

8. Se genera un nuevo bucle while y se Calcula las salidas de controlador ósea las entradas del robot

```

while( distanceToGoal > goalRadius )

[v, omega] = controller(robotCurrentPose);

```

9. Obtiene la velocidad del robot usando el controlador de entrada

```

vel = derivative(robot, robotCurrentPose, [v omega]);
robotCurrentPose = robotCurrentPose + vel*sampleTime;
distanceToGoal = norm(robotCurrentPose(1:2) - robotGoal(:));

hold off

```

10. Después se traza la ruta para que permanezca persistente mientras la malla del robot

```
plot(t(:,1), t(:,2), "k--d")  
hold all
```

11. Se traza la trayectoria del robot como conjunto de transformaciones

```
plotTrVec = [robotCurrentPose(1:2); 0];  
p=plotTrVec;  
p1=[p1 ; p];  
plotRot = axang2quat([0 0 1 robotCurrentPose(3)]);  
m=plotRot;  
m1=[m1 ; m];  
plotTransforms(plotTrVec', plotRot, "MeshFilePath",  
"groundvehicle.stl", "Parent", gca, "View", "2D", "FrameSize", frameSize);  
light;  
xlim([0 x])  
ylim([0 y])  
  
waitfor(vizRate);  
end
```

12. se genera la trayectoria en el panel solar al que se debe adecuar según los parámetros obtenidos.

```

mapInflated = copy(mapa);
inflate(mapInflated, 0.01);
prm = robotics.PRM(mapInflated);
prm.NumNodes = n;
prm.ConnectionDistance = 0.01;
startLocation = t(1,:);
endLocation = t(end,:);
path = t
show(prm);
release(controller);
controller.Waypoints = path;
robotInitialLocation = t(1,:);
robotGoal = t(end,:);
initialOrientation = 0;
robotCurrentPose = [robotInitialLocation initialOrientation]';
distanceToGoal = norm(robotInitialLocation - robotGoal);
goalRadius = 0.1;
reset(vizRate);

figure
while( distanceToGoal > goalRadius )

    [v, omega] = controller(robotCurrentPose);
    vel = derivative(robot, robotCurrentPose, [v omega]);
    robotCurrentPose = robotCurrentPose + vel*sampleTime;
    distanceToGoal = norm(robotCurrentPose(1:2) - robotGoal(:));

    hold off
    show(mapa);
    hold all

plot(path(:,1), path(:,2), "k--d")

    plotTrVec = [robotCurrentPose(1:2); 0];
    plotRot = axang2quat([0 0 1 robotCurrentPose(3)]);
    plotTransforms(plotTrVec', plotRot, 'MeshFilePath',
'groundvehicle.stl', 'Parent', gca, "View","2D", "FrameSize",
frameSize);
    light;
    xlim([0 x])
    ylim([0 y])

    waitfor(vizRate);
end

```

```
while( distanceToGoal > goalRadius )

    [v, omega] = controller(robotCurrentPose);
    vel = derivative(robot, robotCurrentPose, [v omega]);
    robotCurrentPose = robotCurrentPose + vel*sampleTime;
    distanceToGoal = norm(robotCurrentPose(1:2) -
robotGoal(:));

    hold off
    show(mapa);
    hold all

plot(path(:,1), path(:,2), "k--d")

    plotTrVec = [robotCurrentPose(1:2); 0];
    plotRot = axang2quat([0 0 1 robotCurrentPose(3)]);
    plotTransforms(plotTrVec', plotRot, 'MeshFilePath',
'groundvehicle.stl', 'Parent', gca, "View", "2D", "FrameSize",
frameSize);
    light;
    xlim([0 x])
    ylim([0 y])

    waitfor(vizRate);
end
```

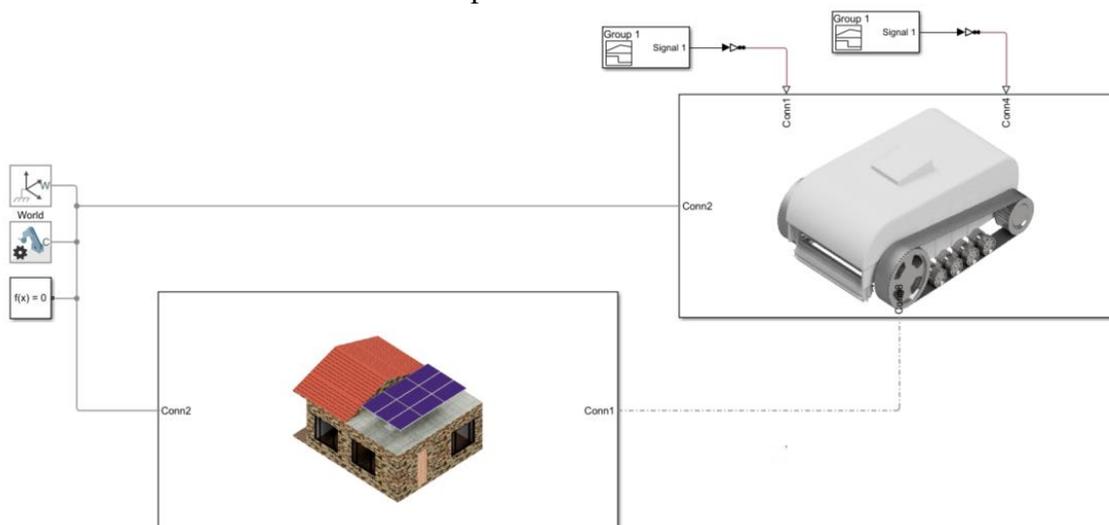
3.4 Importación a simulink

Matlab cuenta con plugin llamado Simscape™ Multibody™ Link, el cual puede instalarse en aplicaciones CAD para exportar modelos o ensamblaje a Simscape Multibody. Específicamente, el complemento exporta un modelo de ensamblaje CAD como un archivo XML y archivos de geometría del cuerpo, que puede convertir en modelos Simscape Multibody utilizando la función smimport.

Pero, los modelos importados se generan como solidos en estado regido, por eso a los modelos se le realizan unas modificaciones, incluyendo una fuerza de contacto espacial sobre el panel y el mecanismo del robot móvil para generar el movimiento.

Como se observa en la figura 44, se divide la simulación en dos partes, la parte rígida, siendo esta la casa sobre la que se va a realizar el mantenimiento y la parte variable, en este caso el robot móvil.

Fig. 45 Importación a simulink de prototipo de casa con panel solar y robot limpiador de paneles solares



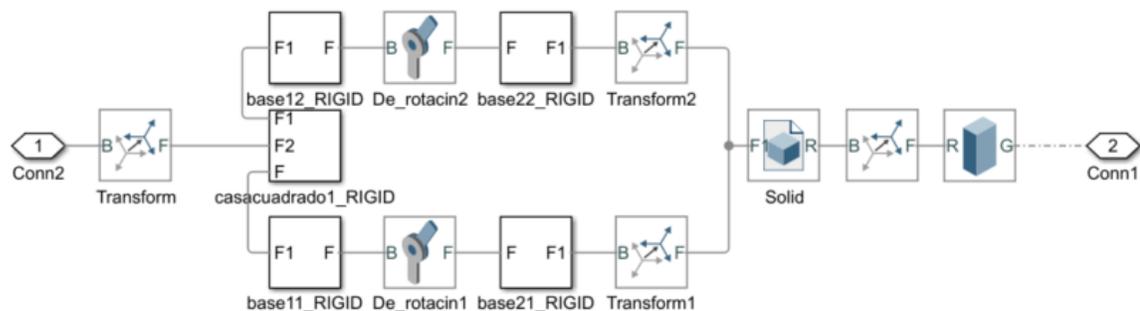
Fuente [Propia]

Al profundizar en la parte rígida, se encuentran tres partes fundamentales, en primer lugar, se tiene la casa, siendo la única parte rígida junto a la mitad de las bases para la instalación de los paneles solares, unido a este se localiza una articulación de giro donde cuenta con la función de poner los límites o el ángulo de giro que se desee, pero para los casos explicados anteriormente no se cuenta con dicho ángulo, es decir es igual a cero.

En segundo lugar, se incluye la parte superior de las bases de instalación y la cara inferior del panel solar, esta sección tiene como función reaccionar a la articulación de giro y mantener dicho ángulo.

En tercero lugar, se cuenta con el resto de panel junto a la unión de fuerza de contacto espacial, justo en esta unión se establecen los límites de contacto, es decir el espacio de trabajo del robot móvil.

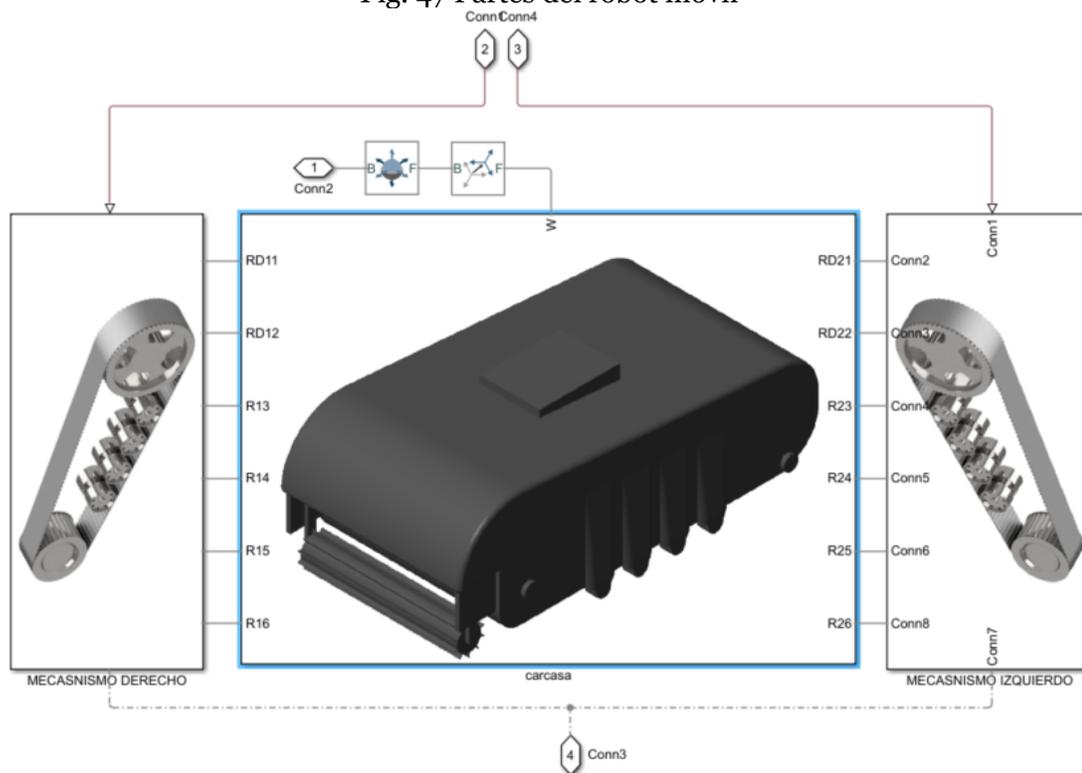
Fig. 46 Diagrama de bloques casa-panel solar



Fuente [Propia]

Al introducirse en la parte variable, se puede percibir que hay tres secciones; mecanismo izquierdo, carcasa y mecanismo derecho, siendo el primero y los último exactamente iguales solo cambiando su posición espacial, figura 46 se puede observar lo anterior mente dicho.

Fig. 47 Partes del robot móvil

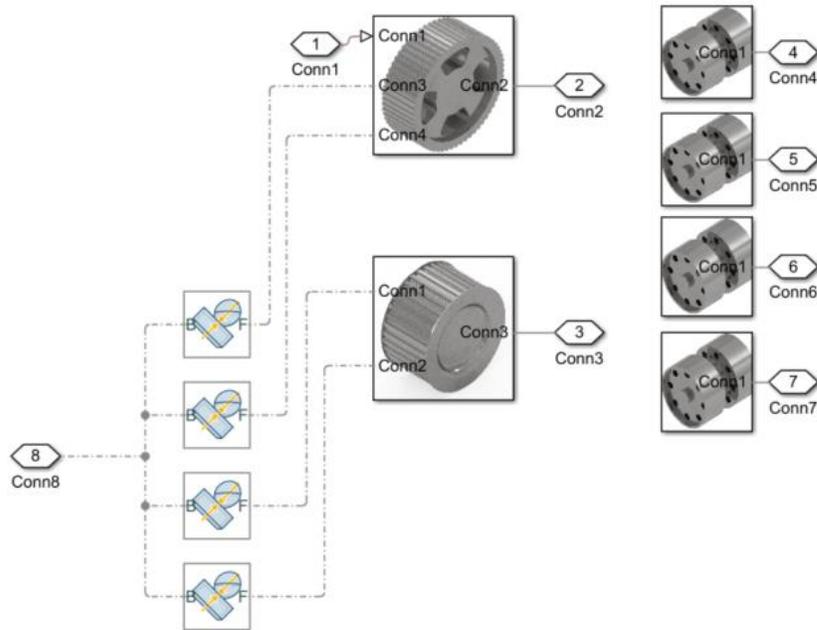


Fuente [Propia]

Si se despliega la sección del mecanismo como se presenta en la figura 47 se encuentran las ruedas dentadas y los rodillos diseñados en la sección 3.2; junto a la otra parte de la unión de fuerza de contacto espacial que va directamente desde el mecanismo de tracción hasta el panel.

Cabe aclarar que solamente las ruedas dentadas son las únicas que generan movimiento, por esta razón los rodillos no cuentan con unión de fuerza de contacto espacial, ya que al colocarles dicha unión se estaría sobrecargando el programa disminuyendo el rendimiento sin justa razón.

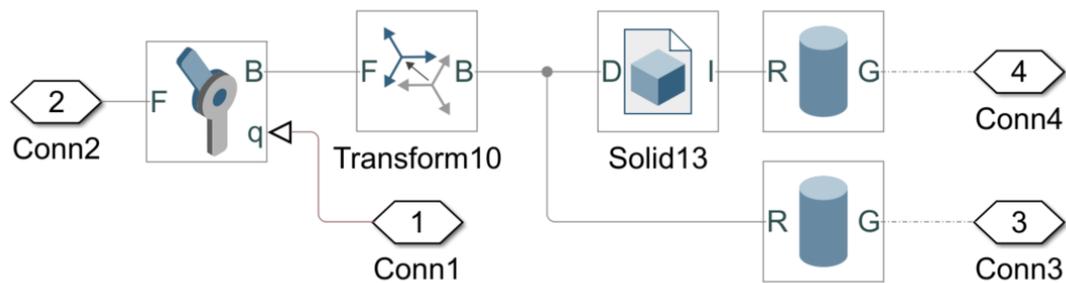
Fig. 48 Mecanismo de tracción



Fuente [Propia]

Por último, cada rueda dentada o cada rodillo cuenta con una articulación de giro, para desplazarse sobre el panel, y esta articulación al igual que la fuerza de contacto espacial es encargada de realizar el movimiento sobre el espacio de trabajo.

Fig. 49 Diagrama de bloque rueda dentada



Fuente [Propia]

CAPITULO 4

Resultados Y Análisis De Resultados

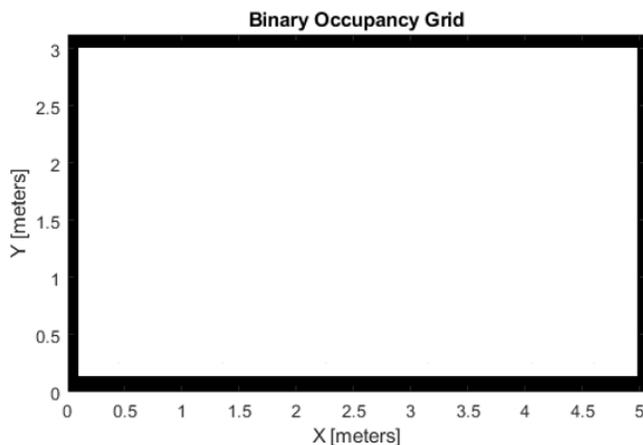
En este capítulo se presentan los resultados numéricos obtenidos tras la validación del sistema de navegación y tracción en diferentes campos de trabajo.

4.1 Verificación del sistema de navegación en ambientes personalizados

4.1.1 Panel solar rectangular

Se parte del primer diseño de panel solar mostrado en la siguiente imagen, con una forma rectangular, este cuenta con 9 paneles de 1 m de ancho x 1.7 m de largo

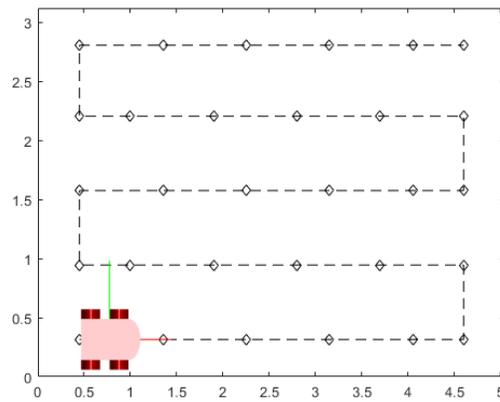
Fig. 50 Panel solar rectangular en Matlab



Fuente [Propia]

Donde a partir de los parámetros explicados en el capítulo anterior se obtiene la trayectoria observada en la siguiente figura, en la que el robot limpiador de paneles solares limpiaría con una mayor eficiencia sobre el espacio de trabajo.

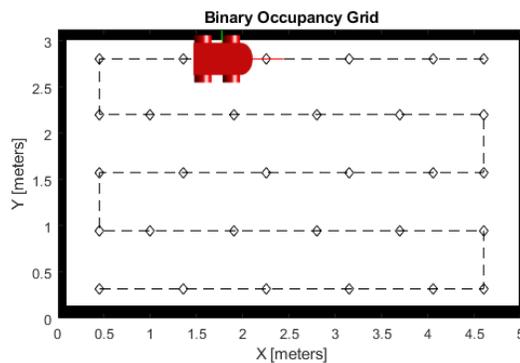
Fig. 51 Trayectoria para panel solar rectangular en Matlab



Fuente [Propia]

En este apartado, se muestra el sistema en la trayectoria en el panel solar asignado según su forma, donde el robot limpiador de paneles solares desempeñará su labor de limpieza.

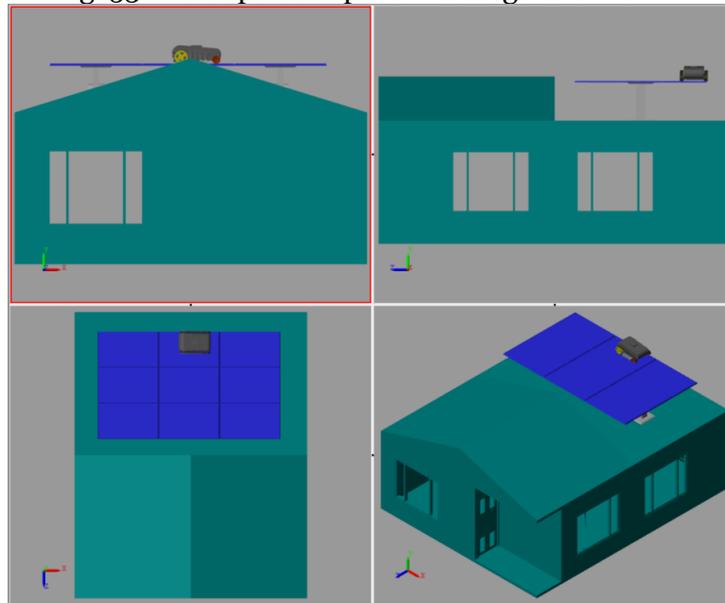
Fig. 52 Trayectoria acoplada al panel solar rectangular en Matlab



Fuente [Propia]

Por último, en la siguiente figura se observa el funcionamiento de la trayectoria del panel rectangular acoplado en la casa, en el plano 3D de simulink.

Fig. 53 Prototipo casa-panel rectangular simulink

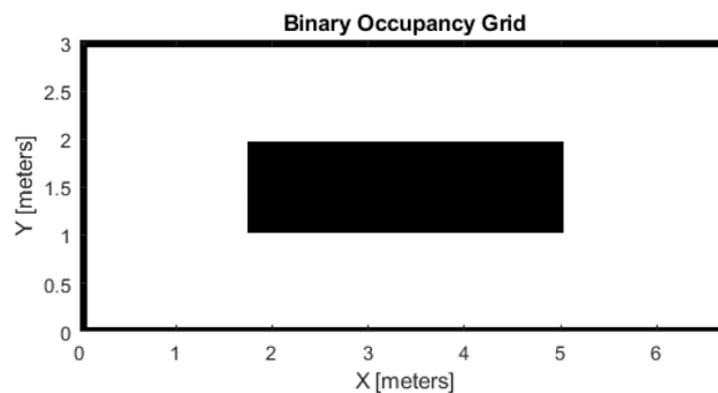


Fuente [Propia]

4.1.2 Panel solar tragaluz

Para el diseño del panel solar tragaluz mostrado en la siguiente figura, tiene un total de 10 paneles de 1 m de ancho x 1.7 m de largo y un orificio en la mitad del panel, para el aprovechamiento de la luz que nos ofrece el tragaluz dentro de la casa sin que el panel sea un impedimento.

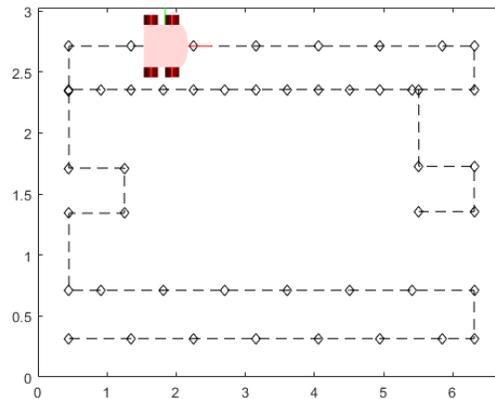
Fig. 54 Panel solar tragaluz en Matlab



Fuente [Propia]

Por consiguiente, a partir de los parámetros como en este caso es el aprovechamiento de luz en la casa, se puede observar en la siguiente figura, la trayectoria en la que el robot limpiador de paneles solares limpiaría con una mayor eficiencia sobre el espacio de trabajo.

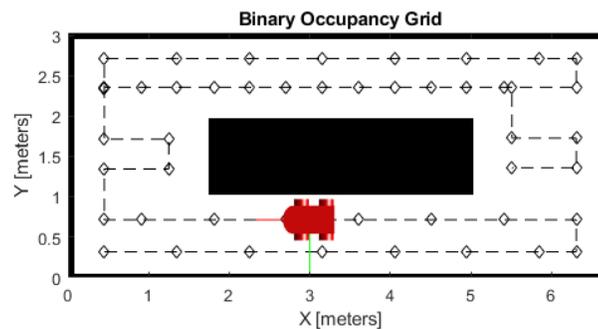
Fig. 55 Trayectoria para panel solar tragaluz en Matlab



Fuente [Propia]

En este apartado, se muestra el sistema de la trayectoria en el panel solar tragaluz, donde el robot limpiador de paneles solares desempeñará su labor de limpieza.

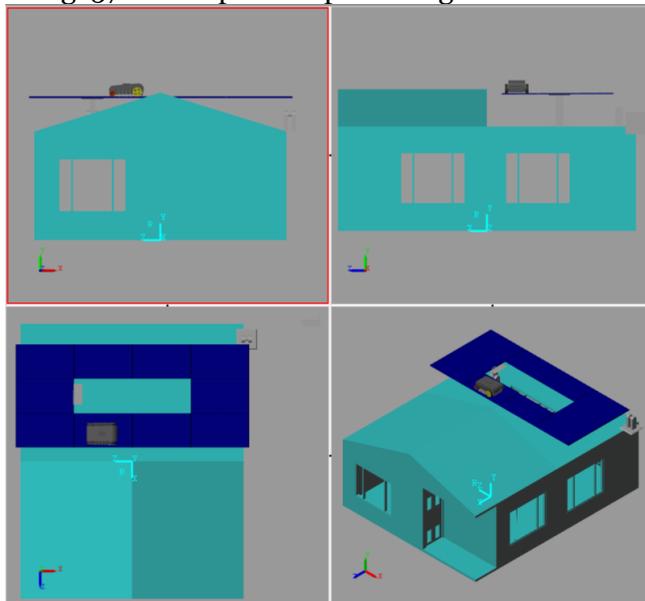
Fig. 56 Trayectoria acoplada al panel solar tragaluz en Matlab



Fuente [Propia]

Por último, en la siguiente figura se observa el funcionamiento de la trayectoria del panel con tragaluz acoplado en la casa, en el plano 3D de simulink

Fig. 57 Prototipo casa-panel tragaluz simulink

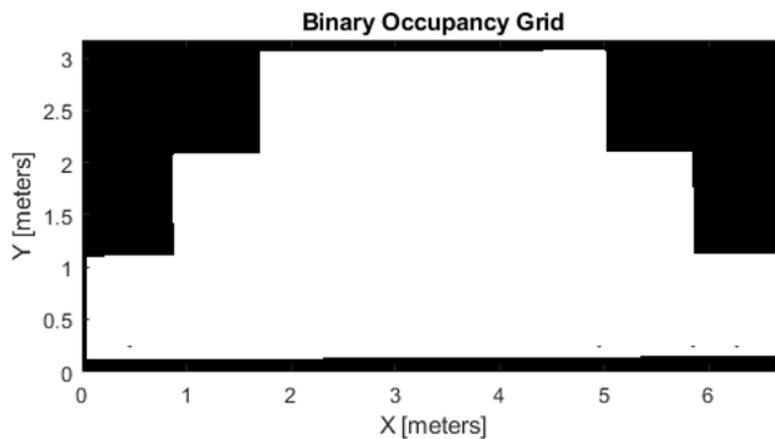


Fuente [Propia]

4.1.3 Panel solar piramidal

Para el diseño del panel solar piramidal que se observa en la siguiente figura, tiene un total de 9 paneles de 1 m de ancho x 1.7 m de largo y dos orificios en los lados superiores medios del panel, con el fin de cumplir los objetivo, que en este caso eran un satélite y una antena que obstruye la implementación de un panel solar rectangular, pero sin disminuir su capacidad de tamaño a la hora de generar luz eléctrica.

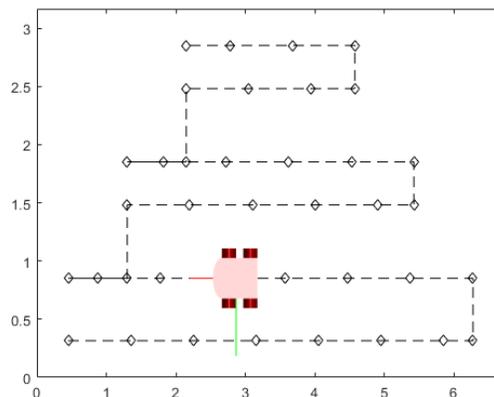
Fig. 58 Panel solar piramidal en Matlab



Fuente [Propia]

Por consiguiente, a partir de los parámetros como en este caso es el buen provecho de un panel sin limitarse por los obstáculos que se le presenten, se puede observar en la siguiente figura, la trayectoria en la que el robot limpiador de paneles solares limpiaría con una mayor eficiencia sobre el espacio de trabajo.

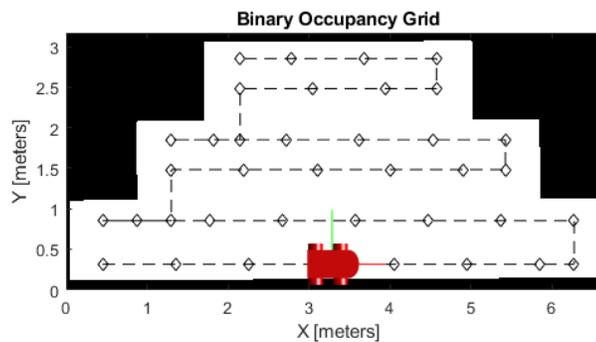
Fig. 59 Trayectoria para panel solar piramidal en Matlab



Fuente [Propia]

En este apartado, se muestra el sistema de la trayectoria en el panel solar piramidal, donde el robot limpiador de paneles solares desempeñará su labor de limpieza.

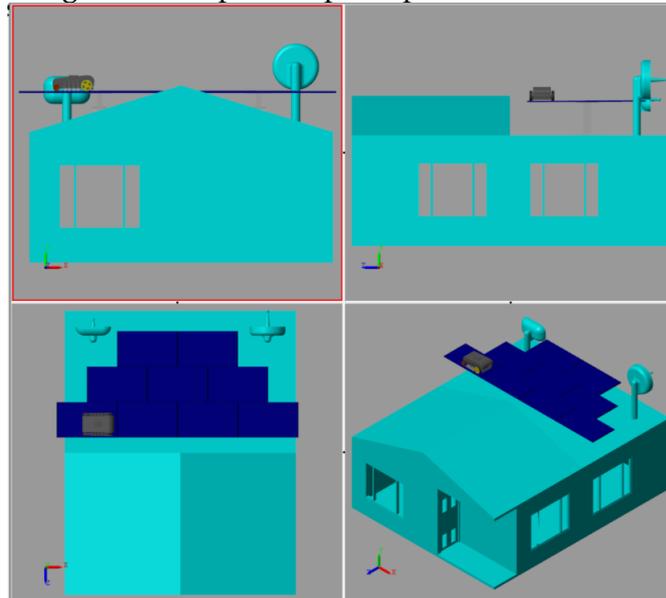
Fig. 60 Trayectoria acoplada al panel solar piramidal en Matlab



Fuente [Propia]

Por último, en la siguiente figura se observa el funcionamiento de la trayectoria del panel piramidal acoplado en la casa, en el plano 3D de simulink

Fig. 61 Prototipo casa-panel piramidal simulink

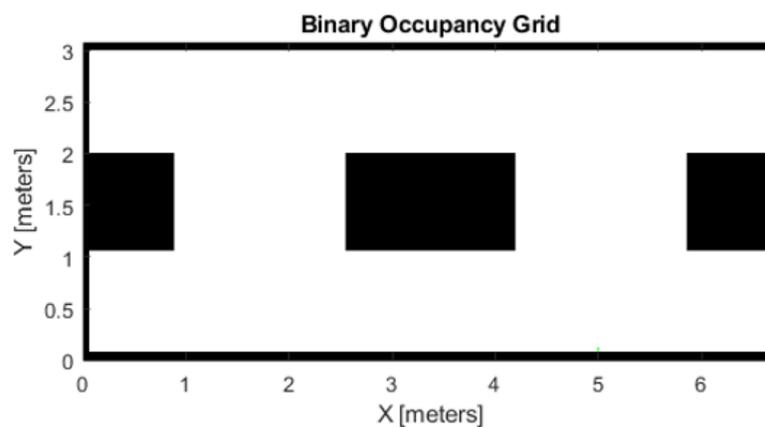


Fuente [Propia]

4.1.4 Panel solar chimenea

Para el diseño del panel solar chimenea se observa en la siguiente figura, tiene un total de 10 paneles de 1 m de ancho x 1.7 m de largo y tres orificios, uno en el centro medio y dos en sus laterales medios, con el fin de cumplir los objetivos, que en este caso es una chimenea en el centro del espacio de trabajo de la casa.

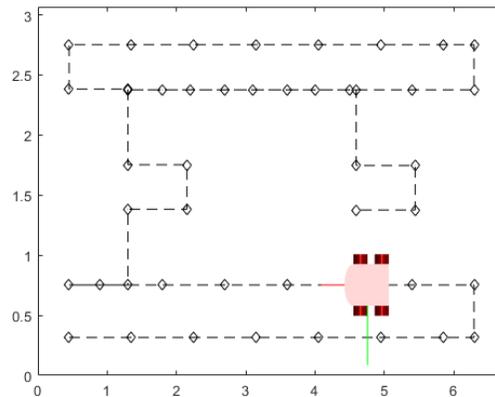
Fig. 62 Panel solar chimenea en Matlab



Fuente [Propia]

Por consiguiente, a partir de los parámetros como en este caso es el buen provecho de un panel sin limitarse por los obstáculos que se le presenten como es una chimenea, se puede observar en la siguiente figura, la trayectoria en la que el robot limpiador de paneles solares limpiaría con una mayor eficiencia sobre el espacio de trabajo.

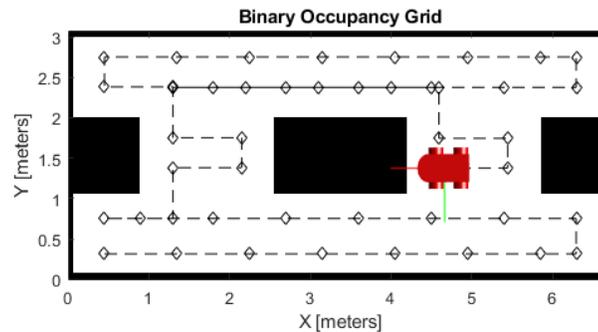
Fig. 63 Trayectoria para panel solar chimenea en Matlab



Fuente [Propia]

En este apartado, se muestra el sistema de la trayectoria en el panel solar chimenea, donde el robot limpiador de paneles solares desempeñará su labor de limpieza.

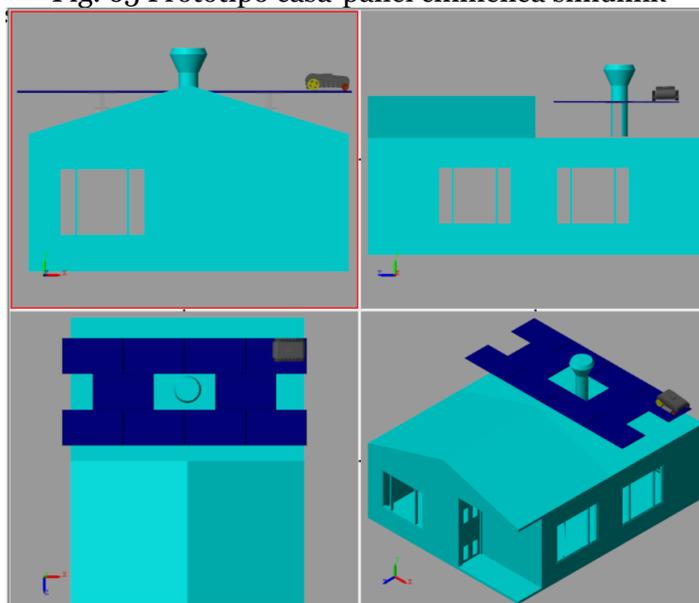
Fig. 64 Trayectoria acoplada al panel solar chimenea en Matlab



Fuente [Propia]

Por último, en la siguiente figura se observa el funcionamiento de la trayectoria del panel con chimenea acoplado en la casa, en el plano 3D de simulink

Fig. 65 Prototipo casa-panel chimenea simulink

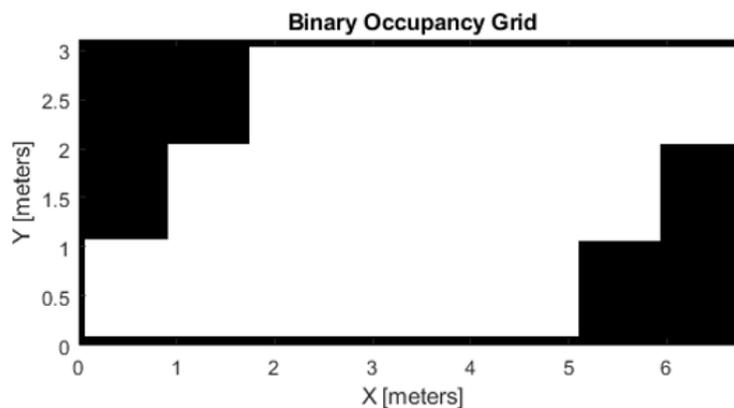


Fuente [Propia]

4.1.5 Panel solar trapezoidal

Para el diseño del panel solar trapezoidal se observa en la siguiente figura, tiene un total de 10 paneles de 1 m de ancho x 1.7 m de largo y dos orificios, uno en la parte superior media izquierda y el otro en la parte inferior media derecha, con el fin de cumplir los objetivos, que en este caso es un tanque de agua esquinero en el espacio de trabajo de la casa.

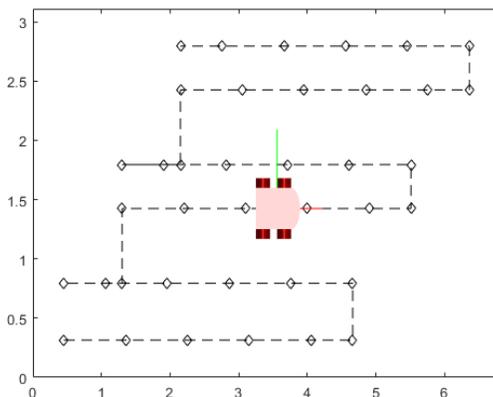
Fig. 66 Panel solar trapezoidal en Matlab



Fuente [Propia]

Por consiguiente, a partir de los parámetros como en este caso es el buen provecho de un panel sin limitarse por los obstáculos que se le presenten como es un tanque de agua, se puede observar en la siguiente figura, la trayectoria en la que el robot limpiador de paneles solares limpiaría con una mayor eficiencia sobre el espacio de trabajo.

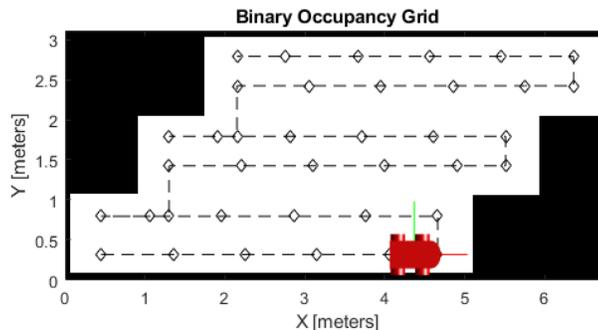
Fig. 67 Trayectoria para panel solar trapezoidal en Matlab



Fuente [Propia]

En este apartado, se muestra el sistema de la trayectoria en el panel solar trapezoidal, donde el robot limpiador de paneles solares desempeñará su labor de limpieza.

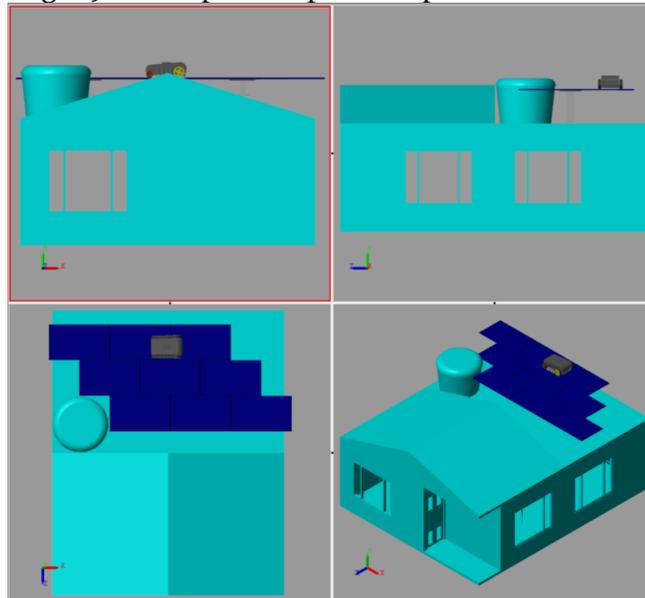
Fig. 68 Trayectoria acoplada al panel solar trapezoidal en Matlab



Fuente [Propia]

Por último, en la siguiente figura se observa el funcionamiento de la trayectoria del panel con tanque de agua acoplado en la casa, en el plano 3D de simulink

Fig. 69 Prototipo casa-panel trapezoidal simulink



Fuente [Propia]

Al analizar los resultados se evidencia que, en cada uno de los distintos tipos de paneles solares, el funcionamiento de la trayectoria se acopla a los diferentes objetivos que se le proponen, sin liminar los estándares de un panel solar rectangular, ni generando una disminución de tamaño en el mismo, ya que se produciría una disminución al generar la energía solar y diferentes resultados al momento de obtener los recursos que brindan estos paneles fotovoltaicos.

Capítulo 5

Conclusiones

En este proyecto se presentó un sistema de navegación para un robot móvil que tiene como objetivo principal la limpieza de paneles solares con estructuras irregulares. En la concepción y validación de este sistema se utilizaron herramientas de diseño mecánico y electrónico. Específicamente:

- El entorno gráfico permitió validar el funcionamiento del sistema de navegación del robot limpiador de paneles solares en el programa simulink, estableciendo cinco posibles trayectorias a las que fue sometido el robot para su correcto funcionamiento.
- El sistema de tracción por su parte demostró un funcionamiento adecuado, durante el desplazamiento sobre el panel solar, diseñado a través de un modelado 3D en el programa de inventor, junto a la selección apropiada de la banda sincrónica y el cálculo de parámetros mecánicos, para garantizar su operación en el panel solar.
- La implementación del método PRM, el sistema de navegación para el robot limpiador de paneles solares, permitió generar trayectorias autónomamente, alcanzando una correcta ejecución, acondicionando el desplazamiento del robot sobre las diferentes estructuras de cada escenario.
- La coordinación de las fases 1, 2 y 3 se llevó a cabo en el software simscape de Matlab, se evidenció un funcionamiento apropiado al evaluar el comportamiento del sistema de navegación sobre el entorno gráfico diseñado en inventor, logrando resultados satisfactorios en la planeación de trayectorias de un robot limpiador para la limpieza de paneles fotovoltaicos.

Comentarios finales

- Para darle continuidad al proyecto en el caso de la percepción del entorno a través sensores y tener en cuenta la inclinación de los paneles, lo más indicado es hacer una implementación del prototipo dado que esto permitirá por un lado validar el sistema de navegación y por otro lado incorporar esa percepción del entorno a través de sensores e inclinación de los paneles de alguna u otra forma dándole mayor robustez al proceso de limpieza de los paneles solares. Ya que implementarlo es la forma más sencilla de continuar con esos aspectos.
- Actualmente, los dispositivos comerciales de limpieza de paneles tienen la desventaja de no operar en superficies con una inclinación moderada. En la literatura, no se han reportado documentos claros referentes a los coeficientes estáticos de fricción entre materiales incluidos en la banda sincrónica y el cristal. Trabajos teóricos presentados por Ari Juhani Tuononen, han ayudado a aclarar ciertos aspectos en este problema sin embargo no existe validación experimental que permita evaluar los resultados.
- La planeación de trayectorias y sus distintos métodos, son una herramienta nueva en el mercado colombiano que, a futuro, puede aportar grandes avances tecnológicos, no solo en la limpieza de paneles solares, si no en cualquier prototipo de robot que necesite mantener una ruta con diferentes obstáculos.
- Mantener los sistemas de paneles solares es tan impotente que hay variedad de ofertas en el mercado para realizar esta tarea, en esta investigación se propone la implementación de trayectorias para robots limpiadores de paneles solares que desempeñen eficientemente las labores de limpiezas mediante el sistema de posicionamiento y el sistema de tracción.
- En cuanto a la frecuencia e intensidad de la limpieza de los paneles solares, el desempeño y la automatización en la planeación de trayectorias de robot un robot limpiador de paneles solares resulta fundamentales para que logre los objetivos propuestos. La frecuencia con que debe efectuar la limpieza de las placas fotovoltaicas a pesar de las variadas condiciones topográficas y climáticas no incidirán de manera directa en su buen desempeño si se le realiza el debido mantenimiento preventivo.
- En cuanto a la frecuencia e intensidad de la limpieza de los paneles solares, el desempeño y la automatización en la planeación de trayectorias de robot un robot

limpiador de paneles solares resulta fundamentales para que logre los objetivos propuestos. La frecuencia con que debe efectuar la limpieza de las placas fotovoltaicas a pesar de las variadas condiciones topográficas y climáticas no incidirán de manera directa en su buen desempeño si se le realiza el debido mantenimiento preventivo.

Referencias Bibliográficas

- [1] A. Ollero, “Planificación de trayectorias para Robots Móviles,” Universidad de Málaga, 1995
- [2] Apply contact forces between a pair of connected bodies – MATLAB. Disponible en: MathWorks.com. [16 de octubre de 2021].
- [3] Biring.us.es “Análisis de distintas tecnologías de limpieza”[En línea] Disponible en:6-ANALISIS+DE+DISTINTAS+TECNOLOGIAS+DE+LIMPIEZA.pdf (us.es)[6 febrero de 2021].
- [4] CELSIA. “Todo lo que debes saber sobre energía solar en Colombia”[en línea]. Disponible: <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia>. [6 de enero de 2021].
- [5] D.G. f.r. Sonnenenergie, Planning and installing photovoltaic systems: a guide for installers, architects, and engineers: Earthscan; 2008
- [6] E. Rodríguez, “Diagramas de Voronoi,” Cinvestav-Tamaulipas, 2010
- [7] En Medellín instalan paneles solares en las estaciones del Metrocable’ Disponible en: ELTIEMPO.COM [16 de octubre de 2021]
- [8] Energía solar en Colombia” [En línea] Disponible en: laguiasolar.com [20 de octubre de 2021]
- [9] Entrega de rendimiento máximo del panel”. [En línea]. Disponible: Products and Services - Ecoppia - Robotic Solar Cleaning Solution[05 enero de 2021]
- [10] Fabricantes de equipos de limpieza de cristales en altura”, Osmoglass.com, 2021. [Online]. Available: <https://www.osmoglass.com/index.php/productos>. [05 febrero 2021]
- [11] Grafo de visibilidad Disponible en: researchgate.net [16 de octubre de 2021]
- [12] Herrmann W, Wiesner W, Vaassen W, Hot spot investigations on PV modules new concepts for a test standard and consequences for module design with respect to bypass diodes. In: Photovoltaic Specialists Conference. 1997, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE; 1997. p. 1129–1132
- [13] Hojas de ruta probabilísticas (PRM) Disponible en: la.mathworks.com [16 de octubre de 2021]
- [14] J. Borja de los Santos, “Planificación de Trayectorias – El algoritmo PRM,” España, 2007
- [15] Joint with one revolute primitive - MATLAB Disponible en: MathWorks.com. [16 octubre de 2021]
- [16] La importancia de mantener unos paneles fotovoltaicos limpios y como seguirlo” Disponible en: www.intergia.es [18 de octubre de 2021]
- [17] Load variables Disponible en: la.mathworks.com [16 de octubre de 2021]
- [18] md_manu_rubber_open_end. Disponible en: megadynegroup.com. [18 octubre de 2021]
- [19] Navegación en robots móviles Disponible en: cap2.pdf (uma.es) [18 de octubre de 2021]
- [20] Orugas de goma, flotacion, transitabilidad y traficabilidad. Disponible en: inta_-_orugas_de_goma_-_09-12-15.pdf. [16 octubre de 2021]
- [21] Paneles solares Funcionamiento Tipos Usos” Disponible en: areatecnologia.com [16 de octubre de 2021]
- [22] Probabilistic Roadmaps for Path Planning in High-Dimensional Configuration Spaces - Robotics and Automation, IEEE Transactions on Disponible en: cmu.edu. [16 octubre de 2021]
- [23] Rendimiento de Placas Solares - Dimensiones, Potencias y Eficiencia Disponible en: sfe-solar.com[18 octubre de 2021]
- [24] Robot GEKKO Solar”, Serbot.ch, 2021. [Online]. Available: <https://www.serbot.ch/es/limpieza-paneles-solares/robot-gekko-solar>. [04 enero de 2021]
- [25] Robótica y aplicación de Diagramas de Voronoi. Disponible en: fisicotronica.com [16 de octubre de 2021]
- [26] Seguimiento de ruta para un robot de accionamiento diferencial Disponible en: la.mathworks.com [16 de octubre de 2021]

- [27] Soluciones de desinfección con robots móviles equipados con luces UV Disponible en: https://www.interempresas.net/Limpieza_Industrial/Articulos/311790-Soluciones-de-desinfeccion-con-robots-moviles-equipados-con-luces-UV.html
- [28] Soluciones de desinfección con robots móviles equipados con luces UV Disponible en: https://www.interempresas.net/Limpieza_Industrial/Articulos/311790-Soluciones-de-desinfeccion-con-robots-moviles-equipados-con-luces-UV.html
- [29] Udesantiagovirtual.cl. 2019. 5.1. Planificación de Trayectorias: Planificación de Trayectorias. [online] Available at: <http://www.udesantiagovirtual.cl/moodle2/mod/book/view.php?id=24819#:~:text=La%20planificaci%C3%B3n%20de%20trayectorias%20es,un%20marco%20de%20referencia%20absoluto.>> [Accessed 7 May 2021].
- [30] Yandún, Aracely & Sotomayor, Nelson. (2012). Planeación y seguimiento de trayectorias para un robot móvil. [Accessed 7 May 2021].

Lista de tablas

Tabla 1 medidas de paneles solares	25
Tabla 2 Características de la superficie de trabajo	35
Tabla 3 Dimensiones robots móviles.....	35
Tabla 4 Dimensiones rueda dentada grande	37
Tabla 5 Dimensiones rueda dentada pequeña.....	38
Tabla 6 Dimensiones rodillo.....	39
Tabla 7 características de correa 1	40
Tabla 8 Medidas de la correa.....	40
Tabla 9 Parámetros de cálculo de la correa	41

Tabla de figuras

Fig. 1 Grafo de visibilidad en un entorno de dos obstáculos	2
Fig. 2 Diagrama de Voronoi de obstáculos representados como puntos	3
Fig. 3 Enlaces válidos en la etapa de conexión y camino entre q_{ini} y q_{fin} mediante el algoritmo A^*	4
Fig. 4 Construcción de un CRG.....	4
Fig. 5 Grafo de conectividad de una descomposición trapezoidal.....	4
Fig. 6 Funcionamiento de panel fotovoltaico	10
Fig. 7 Instalación de paneles solares en Medellín	12
Fig. 8 Panel limpio y panel sucio	13
Fig. 9 Planificación reactiva.....	15
Fig. 10 Ruta del punto q al punto q'	16
Fig. 11 Roadmap Probabilistic	17
Fig. 12 Ruta eficiente para la limpieza de un panel solar	18
Fig. 13 Oruga triangular y rectangular.....	20
Fig. 14 Oruga trapezoidal.....	21
Fig. 15 Oruga trapezoidal isósceles	21
Fig. 16 Marco de contacto para el cuerpo base	23
Fig. 17 Articulación de giro	23
Fig. 18 Dimensiones de panel solar	26
Fig. 19 Escenario de prototipo de casa.....	27
Fig. 20 Panel solar rectangular.....	28
Fig. 21 Escenario y panel rectangular	28
Fig. 22 Escenario de prototipo de casa con tragaluz	29
Fig. 23 Panel solar tragaluz.....	29

Fig. 24 Escenario y panel tragaluz	30
Fig. 25 Escenario de prototipo de casa con antenas satelitales	30
Fig. 26 Panel solar piramidal.....	31
Fig. 27 Escenario y panel piramidal.....	31
Fig. 28 Escenario de prototipo de casa con chimenea.....	32
Fig. 29 Panel solar chimenea	32
Fig. 30 Escenario y panel con chimenea.....	33
Fig. 31 Escenario de prototipo de casa con tanque esquinero	33
Fig. 32 Panel solar trapezoidal.....	34
Fig. 33 Escenario y panel trapezoidal	34
Fig. 34 Sistema oruga.....	36
Fig. 35 Rueda dentada grande	37
Fig. 36 Rueda dentada pequeña	38
Fig. 37 rodillo	39
Fig. 38 Corte en espiral.....	40
Fig. 39 Ensamble tipo oruga.....	42
Fig. 40 Estructura de limpiador de paneles solares	43
Fig. 41 Vistas limpiador de paneles solares	43
Fig. 42 Rueda motriz dentada.....	44
Fig. 43 Análisis de esfuerzos en la banda	47
Fig. 44 Angulo.....	49
Fig. 45 Importación a simulink de prototipo de casa con panel solar y robot limpiador de paneles solares	59
Fig. 46 Diagrama de bloques casa-panel solar	60
Fig. 47 Partes del robot móvil.....	61
Fig. 48 Mecanismo de tracción.....	62

Fig. 49 Diagrama de bloque rueda dentada.....	62
Fig. 50 Panel solar rectangular en Matlab.....	63
Fig. 51 Trayectoria para panel solar rectangular en Matlab	64
Fig. 52 Trayectoria acoplada al panel solar rectangular en Matlab.....	64
Fig. 53 Prototipo casa-panel rectangular simulink.....	65
Fig. 54 Panel solar tragaluz en Matlab.....	65
Fig. 55 Trayectoria para panel solar tragaluz en Matlab	66
Fig. 56 Trayectoria acoplada al panel solar tragaluz en Matlab	66
Fig. 57 Prototipo casa-panel tragaluz simulink	67
Fig. 58 Panel solar piramidal en Matlab.....	67
Fig. 59 Trayectoria para panel solar piramidal en Matlab	68
Fig. 60 Trayectoria acoplada al panel solar piramidal en Matlab	68
Fig. 61 Prototipo casa-panel piramidal simulink.....	69
Fig. 62 Panel solar chimenea en Matlab.....	69
Fig. 63 Trayectoria para panel solar chimenea en Matlab	70
Fig. 64 Trayectoria acoplada al panel solar chimenea en Matlab	70
Fig. 65 Prototipo casa-panel chimenea simulink	71
Fig. 66 Panel solar trapezoidal en Matlab	71
Fig. 67 Trayectoria para panel solar trapezoidal en Matlab	72
Fig. 68 Trayectoria acoplada al panel solar trapezoidal en Matlab.....	72
Fig. 69 Prototipo casa-panel trapezoidal simulink.....	73

Tabla de ecuaciones

1 sumatoria de fuerzas	44
2 Fuerza de rozamiento	45
3 Potencia final	45
4 Relacion de tranmision	45
5 Velocidad angular	46
6 Equilibrio de fuerzas	46