



BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA COMPUTACIÓN

“DESARROLLO DE VEHÍCULO ELÉCTRICO NO
TRIPULADO CON GEOMETRÍA DE
DIRECCIONAMIENTO ACKERMAN”

TESIS
PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
**LICENCIADO EN INGENIERÍA EN CIENCIAS DE LA
COMPUTACIÓN**

PRESENTA:
MARÍA DEL CARMEN BÁEZ SALAZAR



ASESOR:
DR. JOSÉ LUIS HERNÁNDEZ AMECA

PUEBLA, PUE. MAYO 2022

Dedicatoria

El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darme fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.

A mi madre Carmina por ser el pilar más importante de mi vida, por ser mi amiga y consejera, quien pese a todas las adversidades siempre estuvo a mi lado apoyándome, por todo el amor, trabajo y sacrificios a lo largo de estos años.

A la memoria de mi padre Manuel quien siempre soñó con este día y por todo su amor. Aunque hoy no pueda abrazarlo físicamente, lo abrazo con el alma.

A mis hermanos Arturo y Noe por ser mis fieles compañeros a lo largo de la vida, por siempre tener fe en mí y darme ánimos cuando era necesario.

A mi novio Omar por todo su apoyo en el desarrollo de este proyecto, por demostrar cada día su amor y nunca dudar que lo lograría.

A mi asesor el Dr. José Luis Hernández Ameca por guiarme a lo largo de este proyecto, quien con su conocimiento, enseñanza y colaboración hizo posible la culminación de este.

A mis amigos que me apoyaron de una u otra forma a lo largo de este proceso.

Contenido

Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Descripción del problema.....	3
1.3 Objetivos Generales y Específicos del Proyecto.....	4
1.3.1 Objetivo General	4
1.3.2 Objetivos específicos.....	4
1.4 Hipótesis	4
1.5 Alcances y limitaciones	4
1.5.1 Alcances.....	4
1.5.2 Limitaciones	5
1.6 Justificación	5
1.7. Organización de la tesis	5
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 Robots móviles con ruedas.....	7
2.1.1 Configuración de los robots móviles con ruedas.....	9
2.1.1.1 Triciclo clásico.....	9
2.1.1.2 Diferencial	10
2.1.1.3 Skid steer	10

2.1.1.4 Síncronas	11
2.1.1.5 Ackerman	11
2.2 Robots de servicio	12
2.2.1 Robots de limpieza	13
2.3 Ruta robótica	15
2.3.1 Control por radiofrecuencia	15
2.3.1.1 Emisor	16
2.3.1.2 Receptor	16
2.4 Principio Ackerman.....	17
2.5 Sistema de dirección	20
2.5.1 Dirección mecánica	20
2.5.2 Dirección hidráulica	20
2.5.3 Dirección electrohidráulica	21
2.5.4 Dirección eléctrica o electromecánica.....	21
2.6 Sistema de suspensión	22
2.6.1. Suspensión rígida	22
2.6.2. Suspensión semirrígida	23
2.6.3 Suspensión independiente	23
2.7 Máquina de estados finitos.....	24

2.7.1. Ejemplo de MEF.	24
2.7.2. Tipos de Máquinas de Estado Finito.....	25
2.7.3. Ventajas de las Máquinas de Estado Finito.....	26
2.7.4 Desventajas de las Máquinas de Estado Finito.....	26
2.8 Simulación de modelo cinemático con MATLAB.....	27
2.9 SolidWorks.....	29
CAPÍTULO 3. Diseño cinemático, estructural y lógico.....	30
3.1 Requisitos para el diseño del robot Ackerman.....	30
3.2 Diseño electrónico.....	31
3.3 Diseño estructural.....	32
3.3.1 Sistema de dirección.....	32
3.3.1.1 Columna de dirección.....	33
3.3.1.2 Varillas de dirección.....	34
3.3.1.3 Manguetas.....	34
3.3.2. Sistema de suspensión delantero.....	35
3.3.2.1 Brazos de torsión.....	36
3.3.2.2 Barra estabilizadora.....	37
3.3.2.3 Amortiguador.....	38
3.3.3 Diferencial.....	38

3.3.4 Suspensión trasera.....	39
3.3.4.1 Soporte de suspensión	40
3.3.4.2 Casco de eje y diferencial.....	40
3.3.4.3 Amortiguador.....	41
3.4 Diseño lógico	42
3.5 Diseño Cinemático	43
3.5.1 Modelo matemático	43
3.5.1.1 Monociclo	44
3.5.1.2 Car-Like	47
3.6 simulación en Matlab.....	49
CAPÍTULO 4. Resultado de simulaciones.....	52
4.1 SolidWorks.....	52
4.1.1 Ensamblaje del sistema de suspensión delantero con el sistema de direccionamiento Ackerman	52
4.1.2 Ensamblaje del sistema de suspensión trasero con el diferencial	52
4.1.3 Ensamblaje completo del robot Ackerman	53
4.1.4 Detección de interferencias	54
4.2 Simulación en Matlab	55
4.3 Simulación en Proteus.....	59

CAPITULO 5. Conclusiones y trabajos futuros 60

Referencias..... 62

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes

El número de aplicaciones para vehículos terrestres automatizados ha aumentado rápidamente. Los vehículos autónomos tipo Ackerman son utilizados para numerosas aplicaciones, principalmente cuando se desea seguir un camino definido como por ejemplo los camiones mineros autónomos, tractores, vehículos militares de destino y pruebas de durabilidad de vehículos de pasajeros.

Los primeros métodos de planificación de movimiento para automóviles usaban solo líneas rectas y arcos circulares, aunque los métodos más modernos usan clotoides y curvas más generales. D. Berkemeier describe un enfoque simple que implica el ajuste de un solo parámetro, que es el momento de dejar de seguir el segmento de arco actual y comenzar a seguir el próximo segmento. Tiene un punto fijo que corresponde a la solución periódica, y evaluamos numéricamente la estabilidad de este punto fijo para determinar la estabilidad de la trayectoria periódica de tiempo continuo asociada. En los resultados experimentales, al utilizar este enfoque muestra un buen rendimiento de seguimiento [1].

Franch y Rodriguez-Fortun proponen un controlador de trayectoria y un algoritmo de generación de trayectoria para un vehículo Ackerman. La definición del sistema se basa en un modelo dinámico que permite describirlo en términos de las señales de entrada normalmente alcanzables para el conductor: el par del motor relacionado con el nivel del acelerador y el movimiento de la dirección. Este método de control se puede implementar en cualquier vehículo existente con cambios mínimos. Su algoritmo de generación de trayectoria automatiza la forma de definir una trayectoria a partir de un conjunto de puntos intermedios [2].

J.T. Economou, P.C.K. Luk, A Tsourdos, B.A. White describen el modelo de un vehículo totalmente eléctrico con dirección Ackerman de rueda delantera. El modelo se desarrolló utilizando un enfoque 'híbrido' al fusionar las dinámicas convencionales y las ecuaciones cinemáticas de movimiento, y una base inteligente de reglas difusas-Sugeno para las características de fuerza de giro de los neumáticos delanteros y traseros y un modelo estático para la corriente continua de imán permanente (PMDC) actuador. El vehículo fue simulado para una demanda de dirección de múltiples frecuencias con un aumento gradual de la velocidad. Como conclusión el análisis permitió la capacidad e idoneidad del sistema de tracción PMDC [3].

Xiaoping Ren, Zixing Cai analizaron una característica cinemática de un vehículo de conducción no tripulada basada en el principio de Ackerman, y luego se configuró el modelo cinemático. Teniendo en cuenta que el vehículo está influenciado por diferentes errores como: deslizamiento lateral, freno o deslizador. La restricción no autónoma del vehículo siempre se destruye, luego se analiza esta instancia y se configura el modelo cinemático del vehículo considerando el error. Se dieron fórmulas matemáticas sobre el ángulo de giro, el ángulo de dirección y el radio de giro para declarar el estado de movimiento del robot, mapeando el vector de error del marco de coordenadas local al marco de coordenadas global. Finalmente, la conclusión fue validada a través del experimento de simulación [4].

Hong Chen y Fen-fen Tian, desarrollaron una plataforma móvil de alta maniobrabilidad para el robot de escalada en pared basada en el principio de adsorción electromagnética. El mecanismo de doble cuerpo fue diseñado para mejorar el rendimiento de maniobra de manera efectiva. La plataforma móvil incluía un mecanismo de adsorción electromagnética y un mecanismo de doble cuerpo móvil con ruedas. Mediante el modelo tridimensional de plataforma móvil de Solidworks se estableció y se realizaron simulaciones dinámicas de negociación de obstáculos en la pared de acero. Los resultados

de la simulación indicaron que la plataforma móvil no solo puede poseer capacidad de dirección, sino que también puede cruzar obstáculos en forma de L e invertidos. El diseño del mecanismo proporcionó un alto valor de referencia para investigar el robot escalador de paredes [5].

Matthew D. Berkemeier menciona que es conveniente construir rutas deseadas a partir de un arco circular conectado tangencialmente y segmentos de línea recta, que han demostrado ser óptimos en términos de longitud de la ruta. Desafortunadamente, tales caminos no pueden ser conducidos realmente si el ángulo de dirección es producido por un servo sistema, que introduce un retraso. En trabajos anteriores, derivó esquemas óptimos para conducir tales caminos bajo el supuesto de que la transición entre segmentos no estaba planificada, es decir, simplemente cambió al nuevo segmento en algún momento antes de llegar a él. Realizó esto bajo supuestos de un retardo lineal y un actuador no lineal de velocidad limitada. Consideró el caso de un actuador de velocidad limitada, pero deseaba planificar la trayectoria que el vehículo seguirá al hacer transiciones entre segmentos. Se utilizó la teoría de control óptima, así como la resolución directa numérica de parámetros de clotoides [6].

1.2 Descripción del problema

Se aborda el problema de transportar con precisión y autonomía, una herramienta robótica sanitaria dentro de una estancia cerrada de 3 x 6 metros planos.

El problema se centraliza en el desarrollo de un robot de locomoción precisa tipo Ackerman, y el uso de sensores en su estructura móvil, que le brinden un alto grado de autonomía.

1.3 Objetivos Generales y Específicos del Proyecto

1.3.1 Objetivo General

Diseñar, simular, manipular e implementar un prototipo de robot Ackerman para transportar una herramienta robótica sanitaria.

1.3.2 Objetivos específicos

- Buscar información en revistas indexadas, libros y bases de datos.
- Diseñar modelo cinemático y máquina de estados finitos para el prototipo.
- Simular el modelo cinemático y secuencias de movimientos.
- Armar y programar el modelo del prototipo.
- Probar el funcionamiento y recopilar datos para su caracterización.
- Analizar y mostrar resultados obtenidos.
- Redactar el trabajo realizado.

1.4 Hipótesis

La cinemática y simulación son la base para el desarrollo de un prototipo de robot Ackerman enfocado a transportar una herramienta robótica sanitaria.

1.5 Alcances y limitaciones

1.5.1 Alcances

En esta investigación se desarrolló un prototipo de vehículo eléctrico no tripulado con geometría de direccionamiento Ackerman, con el objetivo de obtener las características necesarias para desarrollar un modelo, mediante la utilización de un software de diseño asistido por computadora

(CAD), también se diseñó una máquina de estados finitos para programar las secuencias de movimientos requeridas para este prototipo de robot y posteriormente aplicarse mediante un sistema empotrado. El sistema eléctrico se desarrolló para la manipulación de un motor DC y un servomotor. Por lo que este trabajo contribuye al desarrollo y aplicación de las ciencias de la computación donde se unen la electrónica, la mecánica y las matemáticas

1.5.2 Limitaciones

Las limitaciones presentadas en este proyecto fueron derivadas de la pandemia de COVID-19, lo que provocó que el regreso a clases presencial fuera suspendido indefinidamente por lo cual fue imposible imprimir en 3D y ensamblar las piezas diseñadas, así como la implementación de la máquina de estados en el sistema empotrado y por último limitó el armado físico del circuito eléctrico para el control de movimientos del prototipo.

1.6 Justificación

El presente trabajo se justifica en la contribución al desarrollo tecnológico en el área de robótica móvil, aplicando los conocimientos adquiridos durante la formación profesional en la licenciatura en ingeniería en ciencias de la computación, para así solucionar la problemática de transportar una herramienta sanitaria de forma autónoma y precisa, utilizando un robot móvil con una configuración cinemática Ackerman.

1.7. Organización de la tesis

El presente trabajo de investigación se enfoca en el desarrollo de un prototipo de vehículo eléctrico no tripulado con geometría de direccionamiento Ackerman, este trabajo se encuentra dividido en 5 capítulos los cuales se describen a continuación.

En el capítulo 1 damos los antecedentes de las aplicaciones de los robots, control de trayectoria, así como antecedentes de los robots móviles, la hipótesis de esta tesis, los objetivos, los alcances, las limitaciones y las justificaciones de esta.

En el capítulo 2 se mencionan los robots móviles con ruedas, configuración de los robots móviles con ruedas, los robots de limpieza, ruta robótica, principio de Ackerman, los diferentes tipos de dirección y suspensión, así como máquinas de estados finitos, el uso de Matlab y de Solidworks.

El capítulo 3 se enfoca en el desarrollo del diseño del vehículo eléctrico no tripulado con geometría de direccionamiento Ackerman, se presentan los requisitos para el diseño, el diseño estructural del sistema de suspensión delantero y trasero, el sistema de dirección y el diferencial, también se presenta las propuestas del diseño lógico, eléctrico y cinemático.

En el capítulo 4 se muestran los resultados del diseño del vehículo eléctrico no tripulado con geometría de direccionamiento Ackerman, se muestra el ensamble final en SolidWorks del sistema de suspensión trasera y delantera, el sistema de suspensión trasera y el diferencial, el ensamblaje completo, la detección de interferencias para corroborar la libertad de movimientos, así como la simulación en Matlab del modelo cinemático y simulación en Proteus del sistema eléctrico.

Por último, en el capítulo 5 se muestran las conclusiones, así como los trabajos futuros.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 Robots móviles con ruedas

Los robots móviles son mecanismos autónomos que constan de varios sistemas, en el presente trabajo se aborda principalmente los sistemas de locomoción con ruedas, de control y de sensores. Los robots móviles con ruedas (RMR) son utilizados para la exploración de superficies, transporte de cargas (materiales peligrosos, equipos, alimentos, brazos manipuladores, etc.) y personas.

Los primeros RMR no eran capaces de crear sus propias rutas, sino que seguían una secuencia de movimientos previamente programados. Entre 1966 y 1972 Charles Rosen creó el primer robot capaz de tomar decisiones, fue desarrollado en el Centro de Inteligencia Artificial del Instituto de Investigación de Stanford, fue nombrado “Shakey the Robot”, este influyó mucho en la robótica moderna y en las técnicas de IA. Hoy reside en el Museo de Historia de la Computación [7], su diseño se muestra en la figura 1.



Figura 1. Shakey The Robot.

En la figura 2 se muestra el robot “Lunokhod 1” desarrollado por la Unión Soviética, en 1970 aterrizó en la luna, convirtiéndose en el primer robot controlado a distancia que se desplazó en un cuerpo celeste, ayudo en la captura de imágenes y en el análisis de muestras de suelo lunar.

Después de aterrizar, el rover (vehículo de exploración espacial) condujo por una rampa hacia la superficie lunar y probó sus ocho ruedas. El rover fue impulsado por energía solar durante el día; por la noche, estacionó y dependió de la energía térmica de un calentador de radioisótopos de polonio-210 para sobrevivir al frío [8].



Figura 2. Robot Lunokhod 1.

“The Stanford Cart” que se muestra en la figura 3, fue un robot móvil con TV equipada controlado remotamente que vivió en el Laboratorio de Inteligencia Artificial de Stanford. Se escribió un programa de computadora el cual permitía al carrito conducir por espacios desordenados, ganándose así conocimiento en el mundo entero por imágenes transmitidas por su sistema integrado de TV. El robot utilizaba varios tipos de visión estéreo para localizar objetos en 3 dimensiones (3D) y deducir su propio movimiento. El sistema era confiable para recorridos cortos pero lentos. El robot se movía 1 metro cada 10-15 minutos de forma abrupta. Después de avanzar un metro

paraba, tomaba algunas fotos, incluso las procesaba por un largo tiempo, después planeaba una nueva ruta, ejecutaba una pequeña parte y pausaba de nuevo [9].

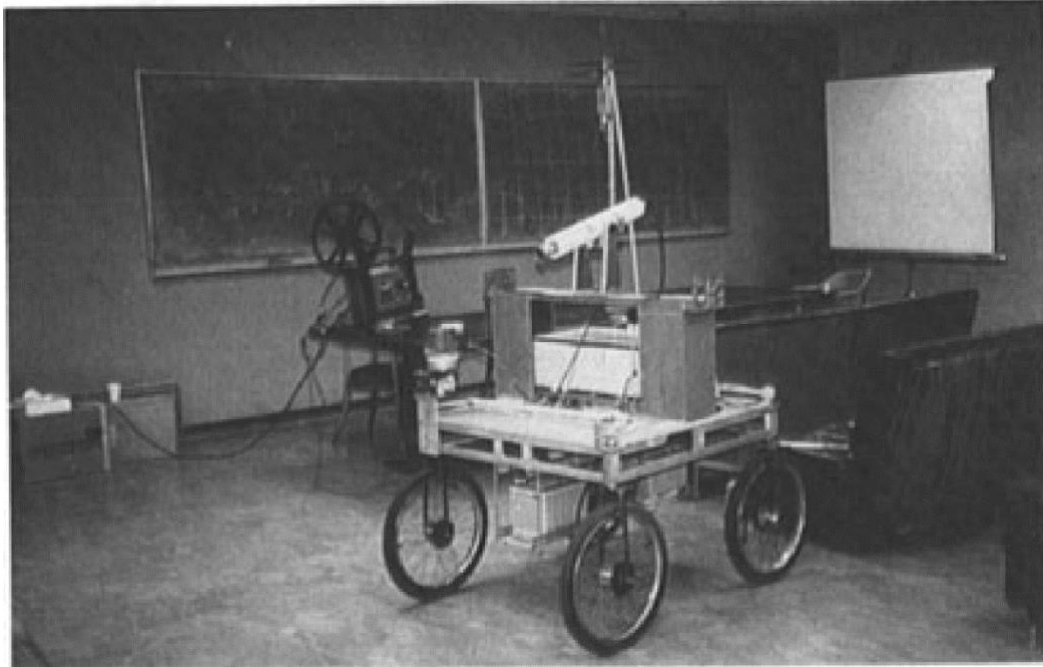


Figura 3. The Stanford Cart.

Las aplicaciones de los robots varían en función directa con la actividad para la cual se pretende incorporar un sistema robótico y de la flexibilidad que sea capaz de brindar al proceso en cuestión [10].

2.1.1 Configuración de los robots móviles con ruedas

Los robots móviles con ruedas son una solución simple para la movilidad en terrenos sólidos y regulares, los RMR se clasifican de acuerdo con su configuración cinemática, dichas clasificaciones se describen a continuación.

2.1.1.1 Triciclo clásico

La rueda delantera es tanto directriz como motriz, mientras que el par de ruedas traseras son pasivas y están conectadas por un eje, como se

muestra en la figura 4. Tiene un nivel alto de maniobrabilidad, pero presenta problemas de estabilidad en terrenos irregulares.

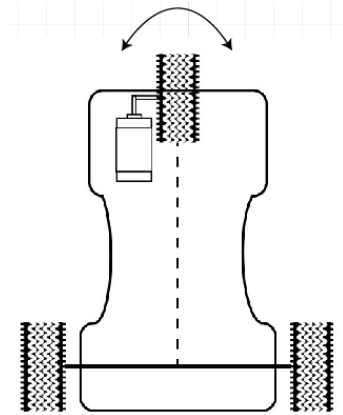


Figura 4. Configuración de triciclo clásico.

2.1.1.2 Diferencial

Sus ruedas laterales son motrices y su direccionamiento va en función a la velocidad de estas, tiene una o más ruedas de apoyo. Se utiliza en robots para interiores, su configuración se muestra en la figura 5.

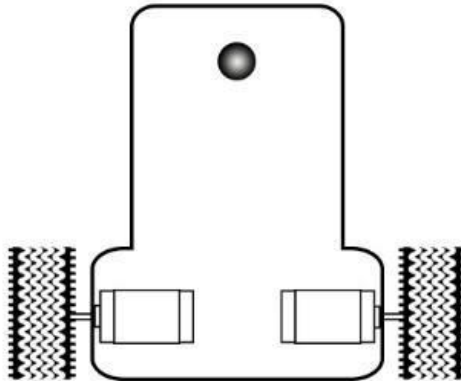


Figura 5. Configuración diferencial.

2.1.1.3 Skid steer

Consta de un número par de ruedas repartidas a los lados de este vehículo, todas motrices; el direccionamiento es el resultado de la combinación de velocidades de las ruedas derechas con relación a las izquierdas como se muestra en la figura 6.

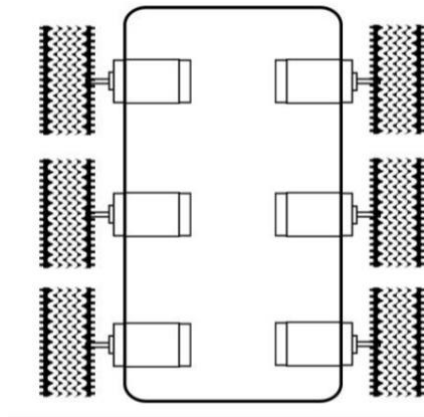


Figura 6. Skid steer.

2.1.1.4 Síncronas

Como se muestra en la figura 7 esta configuración consiste en la actuación simultánea de sus ruedas que giran en forma síncrona para avanzar y girar. La transmisión se consigue mediante coronas de engranaje (synchro drive) o con correas concéntricas [11]. Su complejidad mecánica es mayor, pero con buena estabilidad.

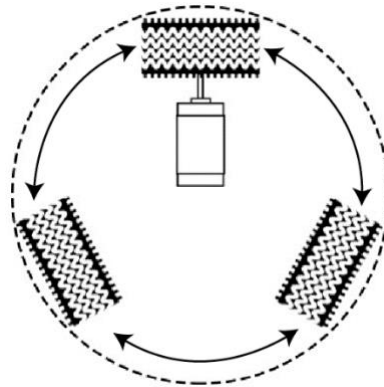


Figura 7. Síncronas.

2.1.1.5 Ackerman

El sistema Ackerman es el que utilizan los autos convencionales con gran estabilidad, su desventaja principal es que no puede girar sin avanzar o retroceder. Se basa en un diseño con cuatro ruedas, (dos traseras y dos delanteras) como se muestra en la figura 8, los diseños de dirección más utilizados son:

- a) Ruedas delanteras directrices y traseras motrices.
- b) Ruedas delanteras motrices y directrices.
- c) Ruedas ambos pares directrices y con tracción delantera, traseras o ambas.

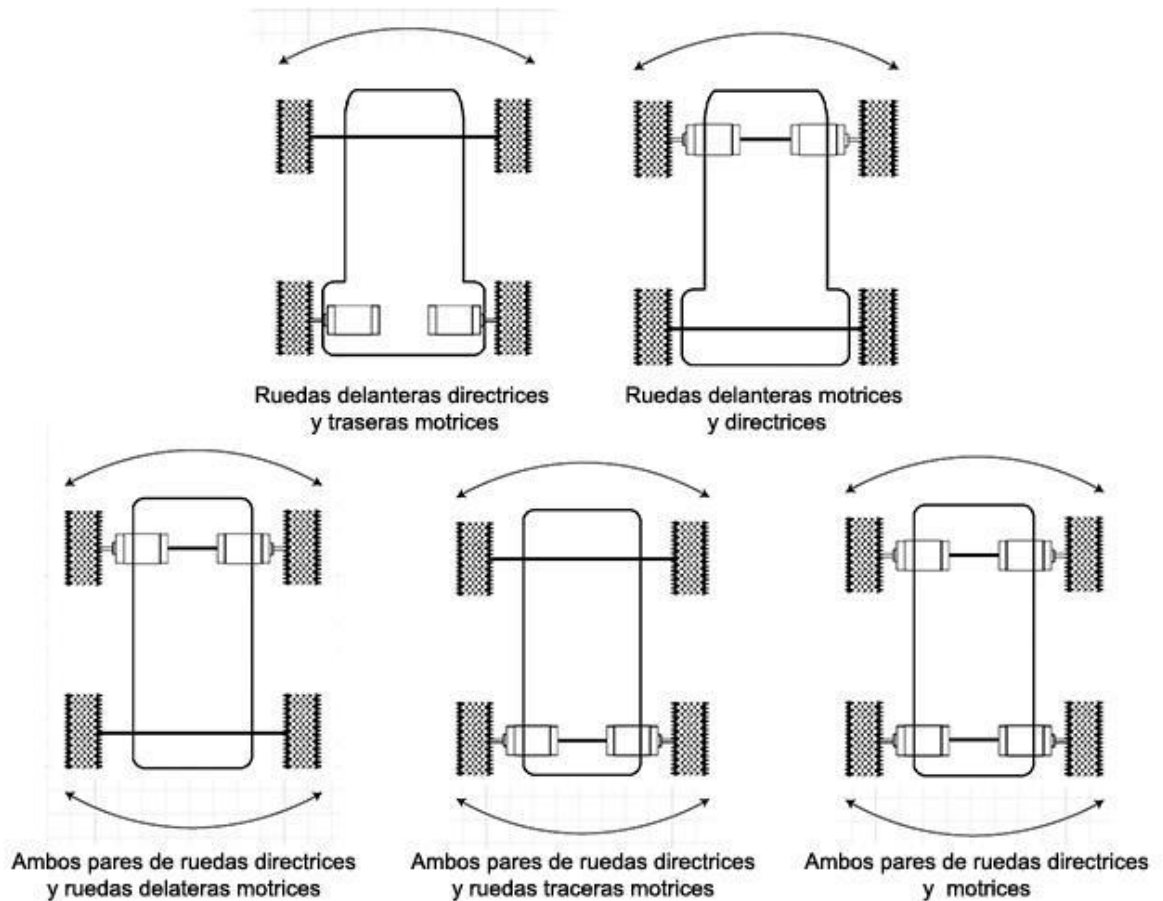


Figura 8. Diseños de configuración Ackerman.

2.2 Robots de servicio

La Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UNECE) y la Federación Internacional de Robótica (IFR), definen a los robots de servicio profesional o robot de servicio para uso profesional como un robot de servicio utilizado para tareas comerciales, generalmente operado por un operador entrenado. Por ejemplo, robots de limpieza para lugares públicos, robots de delivery en oficinas u hospitales, robots bomberos, robots

de rehabilitación y robots de cirugía en los hospitales. En este contexto, un operador es una persona asignada para arrancar, monitorear y detener la operación de un robot o de un sistema robótico [12].

2.2.1 Robots de limpieza

Los robots móviles son utilizados en diversas tareas de limpieza, como limpiar conductos de aire por su reducido tamaño y poco peso, además de permitir capturar imágenes, un ejemplo de esto es el robot EVCleanXL que se muestra en la figura 9 [13].



Figura 9. EVCleanXL.

En el mercado actual existen robots aspiradores que ayudan a la limpieza de pisos en los hogares, algunos de estos pueden ser controlados desde teléfonos móviles, su diseño consta de ruedas motrices (generalmente 2), la dirección la tienen en la parte delantera, poseen sensores de choque y caída para su navegación automática.

Irobot creó el robot Verro que se muestra en la figura 10, un limpia piscinas que se sumerge entre 60 y 90 minutos, utilizando cepillos, limpia las

paredes y el fondo de la piscina para eliminar suciedad y bacterias, también cuenta con un filtro para remover hojas, cabello, algas o arena [14].



Figura 10. Robot Verro.

En la figura 11 se muestra el Robot UVD fabricado por Blue Ocean Robotics, dicho robot es una herramienta de limpieza para hospitales, ayuda en la desinfección de habitaciones y quirófanos, fue utilizado durante la pandemia de COVID-19 en el año 2020, estos aseguran que en 10 minutos puede eliminar al 99.99% de las bacterias y virus que existieran en las habitaciones gracias a la luz ultravioleta que poseen.

El robot es seguro, confiable y elimina el error humano. Además, es fácil de usar y está diseñado para ser operado por el personal de limpieza todos los días. El robot UVD ha sido clínicamente probado y verificado en el Hospital Universitario de Odense y en laboratorios microbiológicos independientes [15].



Figura 11. Robot UVD

2.3 Ruta robótica

Se reconoce a la planeación de trayectorias como la búsqueda de una sucesión de posiciones de un robot que permiten llevarlo de un estado inicial a uno final, entendiéndose como estado a la descripción de la ubicación del robot referenciada a un marco absoluto generalmente expresada por la combinación de las coordenadas cartesianas del centro del robot y la posición angular del eje principal de éste. La configuración que adquiere la trayectoria se define por la distribución de los obstáculos a lo largo de todo el ambiente de trabajo y por supuesto de la geometría del robot, así como de sus capacidades del movimiento [16].

2.3.1 Control por radiofrecuencia

Este tipo de sistemas utilizan ondas de radiofrecuencia (RF) como señales de referencia para transmitir y recibir información. Dos aproximaciones son las más comúnmente utilizadas:

Medir la potencia de la señal recibida: Este es el método más sencillo para extraer la información relativa en base a una señal de radiofrecuencia. La mayoría de los sistemas de radiofrecuencia proporcionan junto con la señal recibida una medida de la potencia (con el fin de poder determinar la calidad de la señal recibida).

Medir el retardo de la señal recibida: Si se disponen de varios transmisores y/o receptores sincronizados entre sí, es posible extraer el tiempo que tarda en propagarse la señal de referencia entre transmisor y receptor (o la diferencia de tiempo entre varios receptores o respecto a varios transmisores) [17].

2.3.1.1 Emisor

Un Emisor de RF es un dispositivo electrónico que permite generar una señal llamada señal modulada, que aplicada a una antena se transmitirá a través del espacio de forma electromagnética.

La señal modulada está compuesta por una o varias ondas senoidales llamada(s) portadora(s) a las que se le modifica algún parámetro (amplitud, frecuencia o fase) en función de otra señal llamada moduladora que contiene la información a transmitir.

2.3.1.2 Receptor

Un receptor es un dispositivo capaz de aceptar y demodular una señal de radio frecuencia, a fin de obtener la información contenida en ella. La señal de entrada al receptor generalmente presenta una amplitud extremadamente baja, un receptor típico debe ser capaz de amplificar la señal de entrada por un factor del orden de algunos miles, para que esta tenga suficiente amplitud para ser utilizada.

2.4 Principio Ackerman

Para vencer los problemas relacionados a las direcciones de un solo eje, surgieron las direcciones de dos semiejes o también conocidos cuadriláteros articulados.

Estos sistemas se basan en otro avance técnico, el pivote de dirección, derivado del buje que permite no solo que cada rueda pueda girar independientemente de la otra, sino también que pueda pivotar sobre su propio eje de pivote. El sistema se denomina el "cuadrilátero" porque está constituido por cuatro elementos, el eje delantero, una "barra" de dirección situada por detrás de este (habitualmente la propia cremallera) y dos "tirantes" o semiejes articulados que unen esta barra con los pivotes de dirección de cada una de las ruedas. La geometría de dirección de Ackerman es una determinada disposición geométrica de estos cuatro elementos, descrita por primera vez por el constructor de transporte alemán Lankensperger en 1817 para coches de caballos y patentada por su agente en Inglaterra Rudolph Ackerman en 1818. Aunque existen precedentes, como los estudios sobre sistemas de dirección mejorada para carruajes publicados por Erasmus Darwin en 1758 (ya con un eje fijo y las ruedas pivotando paralelas en torno a vástagos -spindles- interconectados), su forma definitiva no apareció hasta las patentes de Karl Benz en 1893 y de Edward Butler en 1897 [18].

Diseñada en su concepción actual para lograr que la rueda interior y exterior tracen círculos de diferentes radios, el sistema original fue concebido intuitivamente para mantener las ruedas paralelas, lo que resultó ser inadecuado. El problema es que, a diferencia de los sistemas basados en un único pivote de dirección central, en los que el eje se desplaza coincidiendo con el radio de la circunferencia de ambas ruedas, aquí el eje permanece fijo. Esto implica que para que ambos pivotes se orienten al centro del radio de

giro, cada uno debe hacerlo en un grado ligeramente distinto del otro debido a la anchura del propio eje. De mantenerse paralelos, ninguno de los pivotes se orientaría a ese punto común, sino que se dirigirían a dos puntos separados precisamente por la anchura del eje y el vehículo giraría en torno a un punto intermedio entre ambos como se muestra en la figura 12, con el resultado de que también en este caso cada rueda será continuamente arrastrada por la otra, perjudicando la estabilidad.

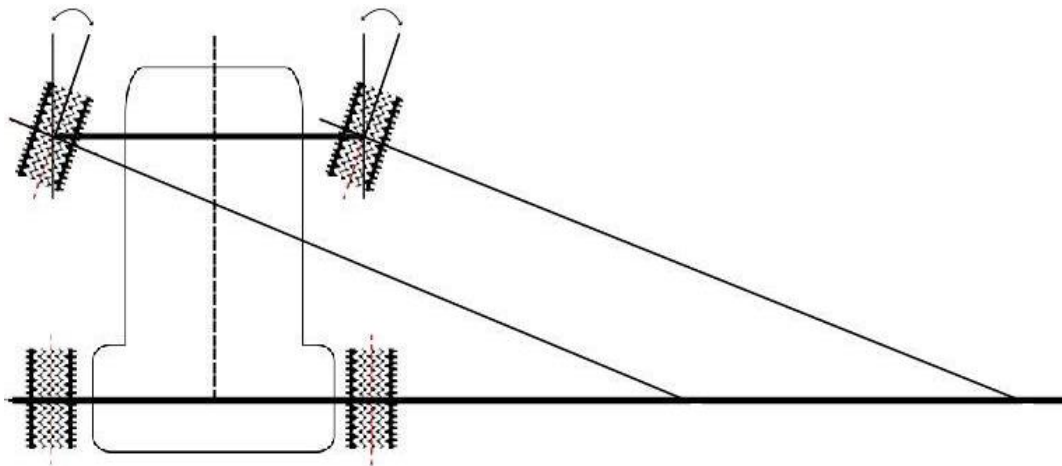


Figura 12. Giro de vehículo sin geometría ackerman.

La hoy denominada geometría de Ackerman resolvió definitivamente el objetivo de alinear cada pivote con el radio de su circunferencia de una manera simple y efectiva. La solución vino de la mejora conocida como trapecio de Jeantaud, que hizo posible dirigir de modo coordinado cada rueda en la dirección elegida por el conductor, simplemente alineando los tirantes con el centro del eje trasero en lugar de ser paralelos entre sí. De este modo se lograba el objetivo de hacer que la rueda interior adoptara un ángulo más cerrado que la exterior, puesto que el tirante interior transmite un movimiento mayor que en la exterior, como se observa en la figura 13.

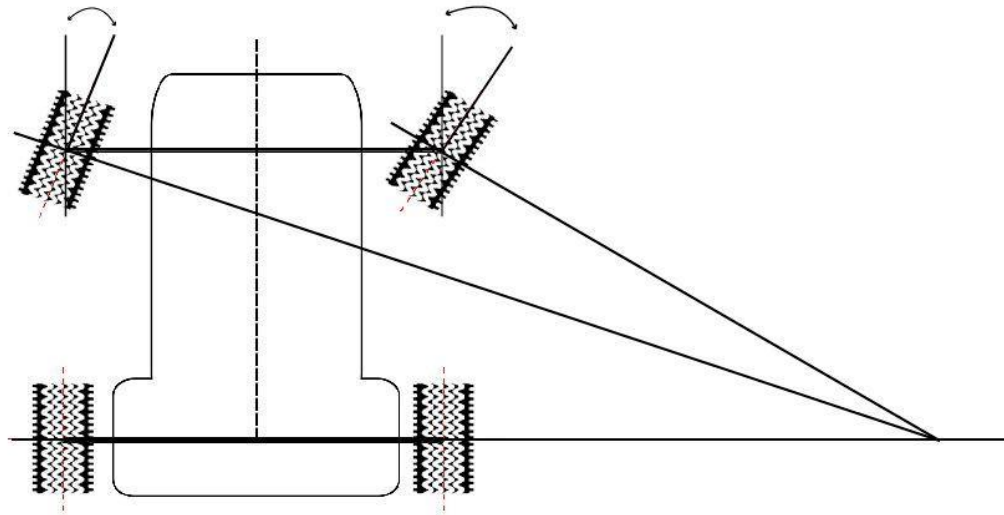


Figura 13. Giro de vehículo con geometría ackerman.

Un ejemplo de temprana utilización de esta mejora se encuentra en el sistema de dirección diseñado por Onésiphore Pecqueur para L'Obéissante, vehículo de vapor de Amédée Bollée que se muestra en la figura 14 este ya contaba con suspensión independiente y dirección por cremallera [19].

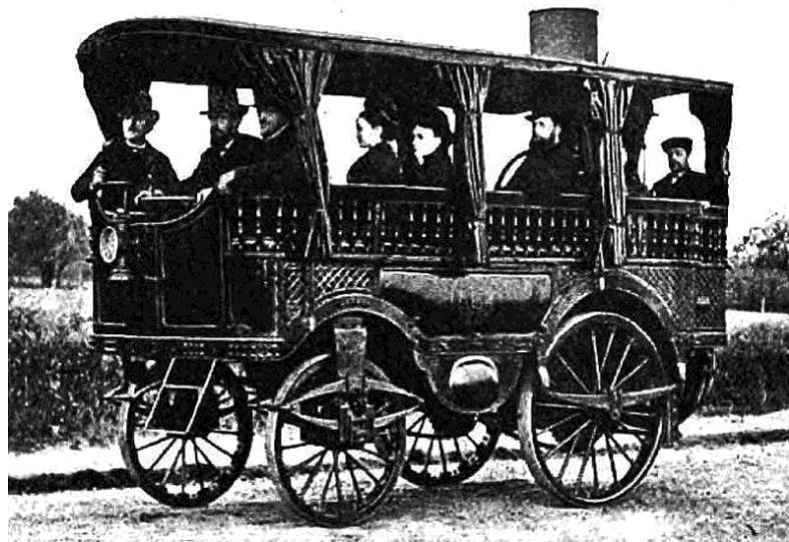


Figura 14. Vehículo de vapor de Amédée Bollée 1875.

Los vehículos actuales rara vez recurren a una geometría de Ackerman "pura", siendo habitual jugar con los ángulos de las ruedas interior y exterior para aumentar el agarre o minimizar el desgaste [20].

2.5 Sistema de dirección

El sistema de dirección es un conjunto de mecanismos cuya finalidad es orientar las ruedas delanteras también conocidas como directrices para guiar el vehículo, sus tipos se describen a continuación.

2.5.1 Dirección mecánica

Fue el primer sistema de dirección utilizado para los vehículos. Esta dirección trabajaba con la fuerza que empleaba el conductor al momento de maniobrar el volante. Al hacerlo un sistema de piñones (ruedas de metal dentadas) giraban únicamente por el esfuerzo generado por el usuario.

2.5.2 Dirección hidráulica

Estas direcciones fueron los primeros modelos de dirección asistida que se usaron junto con las de vacío; pero las primeras terminaron por imponerse. Son las más habituales en toda clase de vehículos, aunque están siendo sustituidas por las electrohidráulicas y eléctricas.

Esta clase de dirección utiliza energía hidráulica para generar la asistencia, por lo que se hace necesario el uso de una bomba hidráulica que va conectada al motor.

Este sistema funciona a través de una bomba, que presuriza un fluido que es enviado por medio de tubos y mangueras a la caja de dirección. En su interior, hay sellos que al recibir esta presión impulsan las varillas de acoplamiento que unen las llantas con la caja de dirección. Esto se activa únicamente cuando el motor del vehículo se encuentra encendido.

2.5.3 Dirección electrohidráulica

También llamada EHPS (Electro-Hydraulic Powered Steering) es considerada la evolución de la dirección hidráulica. Esta dirección utiliza un motor eléctrico para mover la bomba hidráulica. Su mayor ventaja es que al no estar conectada al motor del vehículo sorteando los problemas mecánicos asociados a una transmisión por correa. Adicionalmente esta dirección reduce el consumo de combustible. En este caso la bomba hidráulica sólo funciona cuando y al ritmo que se necesita para operar la dirección; la alimentación del motor que mueve la bomba se hace por medio de la batería. Las direcciones electrohidráulicas han ido sustituyendo a las direcciones hidráulicas progresivamente.

En el caso de esta dirección, la bomba se acciona por un motor eléctrico en el cual el funcionamiento se adapta al nivel de dirección asistida requerido. Cuando el vehículo circula a bajas velocidades o está quieto, se incrementa el ritmo de bombeo de la bomba hidráulica para poder proporcionar un alto nivel de dirección asistida. Cuando se circula a altas velocidades, se reduce la velocidad de la bomba porque no se requiere asistencia.

2.5.4 Dirección eléctrica o electromecánica

Las direcciones eléctricas o EPS (Electrical Powered Steering) son el tipo de dirección asistida más reciente. Se llaman así porque utilizan un motor eléctrico para generar la asistencia en la dirección. Su ventaja frente a las hidráulicas y electrohidráulicas es que, al no utilizar energía hidráulica son más ligeras y simples, pues no necesitan de bomba hidráulica. La diferencia con la dirección hidráulica es que los vehículos equipados con dirección asistida electromecánica se benefician de tener un menor consumo de combustible y de nuevas funciones de seguridad y confort.

Atendiendo al lugar donde se aplica la asistencia, las direcciones eléctricas se dividen:

- **Column drive:** aplica la asistencia en la columna de dirección.
- **Pinion drive:** aplica la asistencia en el piñón de la dirección.
- **Rack drive:** aplica la asistencia en la cremallera de la dirección.

En el caso de esta dirección, la bomba se acciona por un motor eléctrico en el cual el funcionamiento se adapta al nivel de dirección asistida requerido.

2.6 Sistema de suspensión

El sistema de suspensión de un vehículo es el conjunto de componentes mecánicos que unen la parte suspendida del vehículo con la superficie rodante, con el objetivo primordial de mantener siempre el contacto de la rueda con el terreno, de manera que se consiga, por una parte, un mayor control y seguridad del vehículo dado que toda suspensión va a contribuir a mejorar la estabilidad del vehículo, mejorando la adherencia y la respuesta de la dirección, y por otra, que también sirva para absorber las irregularidades del terreno. Existen diferentes tipos de suspensión las cuales se describen a continuación.

2.6.1. Suspensión rígida

Las primeras suspensiones estaban formadas por un eje rígido, en cuyos extremos se montaban las ruedas. Como consecuencia de ello, todo el movimiento que afecta a una rueda se transmite a la otra del mismo eje. Este montaje es muy resistente y más económico de fabricar, pero tiene la desventaja de ser poco cómodo para los pasajeros y una menor seguridad

Como principal ventaja, los ejes rígidos destacan por su sencillez de diseño y no producen variaciones significativas en los parámetros de la rueda

como caída, avance, etc. El principal uso de esta disposición de suspensión se realiza sobre todo en vehículos industriales: autobuses, camiones y vehículos todo terreno.

2.6.2. Suspensión semirrígida

Estas suspensiones son muy parecidas a las anteriores, su principal diferencia es que las ruedas están unidas entre sí y en el eje rígido, pero transmitiendo de una forma parcial las oscilaciones que reciben de las irregularidades del terreno. En cualquier caso, aunque la suspensión no es rígida total, tampoco es independiente. La función motriz se separa de la función de suspensión y de guiado, o lo que es lo mismo, el diferencial se une al bastidor y no es soportado por la suspensión.

2.6.3 Suspensión independiente

El sistema de suspensión independiente tiene un montaje elástico independiente que no está unido a otras ruedas. A diferencia del sistema rígido, el movimiento de una rueda no se transmite a la otra y la carrocería resulta menos afectada.

Actualmente, la suspensión independiente a las cuatro ruedas se va utilizando cada vez más debido a que es la óptima desde el punto de vista de confort y estabilidad, al reducir de forma independiente las oscilaciones generadas por el pavimento sin transmitir las de una rueda a otra del mismo eje. La principal ventaja añadida de la suspensión independiente es que posee menos masa no suspendida que otros tipos de suspensión, por lo que las acciones transmitidas al chasis son de menor magnitud.

El diseño de este tipo de suspensión debe garantizar que las variaciones de caída de rueda y ancho de ruedas en dichas ruedas directrices deben ser pequeñas para conseguir una dirección segura del vehículo. Por el contrario, para cargas elevadas esta suspensión puede presentar problemas. Actualmente este tipo de suspensión es el único que se utiliza

para las ruedas directrices. El número de modelos de suspensión independiente es muy amplio y además posee numerosas variantes.

2.7 Máquina de estados finitos

Una máquina de estados finitos (MEF) representa una secuencia de instrucciones a ser ejecutadas, donde cada instrucción depende del estado actual de la máquina y del actual estímulo [21].

2.7.1. Ejemplo de MEF.

Consideremos un muy simplificado sistema de control de un ascensor como se muestra en la figura 15.

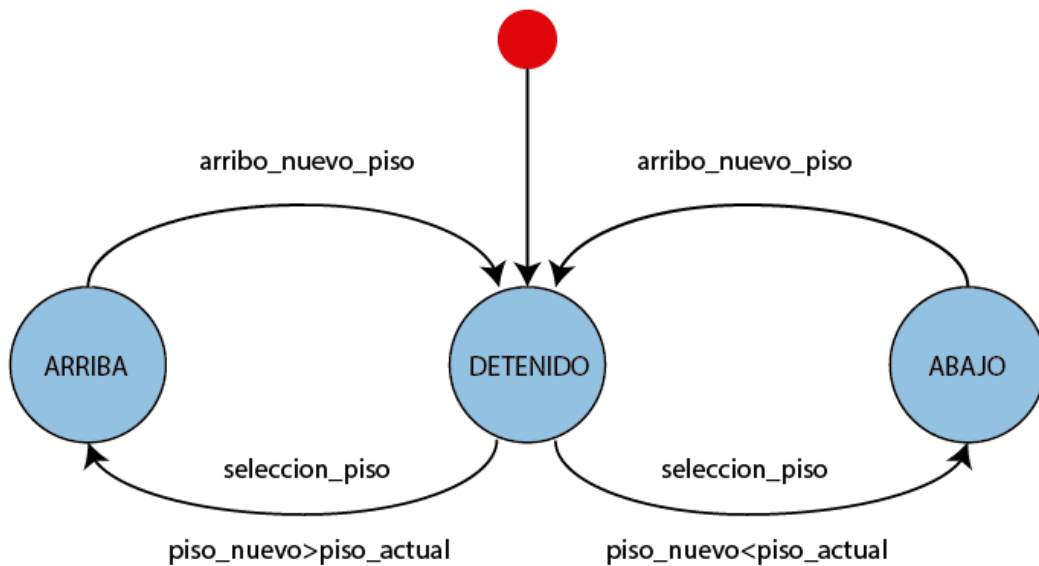


Figura 15. Máquina de Estados Finito para un elevador.

Estados: El sistema está formado por tres estados: DETENIDO, ARRIBA y ABAJO. Los diferentes estados se representan mediante bloques cuadrados o círculos.

Transiciones: Las transiciones se las representan mediante flechas que indican la dirección de transición de un estado a otro.

Eventos: Los eventos para el sistema en este ejemplo son los siguientes:

- **seleccion_piso:** Es un evento externo que se genera toda vez que un usuario selecciona un piso o llama al ascensor desde otro piso.
- **arribo_nuevo_piso:** Es un evento interno que se genera cada vez que los sensores detectan que se ha arribado al nuevo piso seleccionado por el usuario.

Los eventos se anotan en el gráfico por encima de las flechas de transición.

Condiciones de Transición: Dos transiciones en este sistema de ejemplo tienen asociadas sus respectivas Condiciones de Transición. No todas las transiciones poseen Condiciones de Transición.

- **piso_nuevo > piso_actual:** Es la condición necesaria para que se produzca una transición del estado DETENIDO al estado ARRIBA.
- **piso_nuevo < piso_actual:** Es la condición necesaria para que se produzca una transición del estado DETENIDO al estado ABAJO.

Las Condiciones de Transición se anotan por debajo de las flechas de transición.

Una pseudotransición inicial del punto rojo al estado DETENIDO identifica a este último como el estado inicial de la MEF.

2.7.2. Tipos de Máquinas de Estado Finito

Existen principalmente dos tipos de Máquinas de Estado Finito: Las Reconocedoras o Detectoras y las Transductoras.

Reconocedoras o Detectoras: Llamadas también Detectoras de Secuencia, realizan básicamente la detección de patrones o secuencias determinadas en respuesta a las entradas recibidas. Por su definición teórica

este tipo de sistema no proveen señales de salida (acciones), simplemente transicional desde un estado inicial a un estado final de "Éxito", en cuyo caso se entiende que un patrón o secuencia ha sido reconocida exitosamente.

Las MEF Detectoras de Secuencia son útiles en aplicaciones en las que se necesita verificar contraseñas, códigos o la validación de paquetes de datos en transmisión digital, este último un ejemplo muy típico de su uso.

Transductoras: Las MEFs transductoras se caracterizan por generar acciones o salidas dependiendo de las entradas y/o estados; se implementan en sistemas embebidos típicamente para aplicaciones de control. Un ejemplo de este tipo de sistema es el ejemplo del ascensor ya analizado en la primera parte de este artículo.

2.7.3. Ventajas de las Máquinas de Estado Finito

- Son intuitivas y fáciles de entender.
- Abstraen convenientemente detalles secundarios que no son necesarios para el análisis del sistema a un alto nivel y se centran en aspectos claves de este.
- Aportan un componente visual que facilita el análisis y diseño del sistema.
- Son universalmente aplicables.
- Su uso es común en sistemas de transmisión de datos y el uso de protocolos de comunicación.
- En programación minimiza grandemente la tendencia a escribir "código espagueti" y puede ayudar a reducir la cantidad de variables globales necesarias, aumentando al mismo tiempo la confiabilidad del sistema.

2.7.4 Desventajas de las Máquinas de Estado Finito

- No son aplicables a todos los problemas de diseño.

- Funcionan bien en sistemas pequeños con una cantidad de estados en el orden de las decenas.
- No funcionan bien en sistemas con una cantidad de estados en el orden de las centenas o miles de estados, aunque en estos casos es posible la estructuración mediante una combinación de MEFs más pequeñas.
- La adición de funcionalidad es un poco inflexible.
- Son "planas" por naturaleza, no poseen estructura definida y no permiten una jerarquización de los componentes que minimice la repetición innecesaria de ciertos estados. Una mejor alternativa en este caso es el uso de las Cartillas de Estado (Statecharts) y el uso de UML (Unified Modelling Language).
- Es fácil caer en el error de definir demasiados estados para el sistema, lo cual minimiza la eficiencia, o de definir menos estados de lo que es necesario, lo cual contradice al propósito de las MEFs de reducir la cantidad de código (demasiadas sentencias condicionales del tipo "if - then - else").

2.8 Simulación de modelo cinemático con MATLAB

Se plantea utilizar el software Matrix Laboratory (MATLAB) en conjunto con la herramienta Robotics System Toolbox™ la cual ayuda a diseñar, simular y probar manipuladores, robots móviles y robots humanoides. Para los manipuladores y los robots humanoides, esta toolbox incluye algoritmos para comprobación de colisiones, generación de trayectorias, cinemática de avance e inversa y dinámica mediante una representación de árbol de cuerpo rígido. En el caso de los robots móviles, incluye algoritmos para mapeo, localización, planificación de trayectorias, seguimiento de trayectorias y control de movimiento. La toolbox ofrece ejemplos de referencia de aplicaciones robóticas industriales habituales.

También incluye una librería de modelos de robots industriales disponibles en el mercado que puede importar, visualizar y simular.

Es posible desarrollar un prototipo de robot funcional combinando los modelos cinemáticos y dinámicos proporcionados. La toolbox permite co-simular sus aplicaciones robóticas mediante la conexión directa con el simulador robótico de Gazebo. Para verificar su diseño en hardware, puede conectar con plataformas robóticas para generar y desplegar código.

El modelo cinemático Ackerman es un modelo similar a un coche modificado que asume la dirección de Ackerman. En la mayoría de los vehículos similares a los automóviles, las ruedas delanteras no giran sobre el mismo eje, sino que encienden ejes ligeramente diferentes para asegurarse de que se montan en círculos concéntricos sobre el centro del giro del vehículo. Esta diferencia en el ángulo de giro se llama dirección Ackerman, y normalmente se aplica mediante un mecanismo en vehículos reales. Desde el punto de vista de la cinemática del vehículo y la rueda, se puede aplicar tratando el ángulo de dirección como una entrada de velocidad. [22].

```
carLike = ackermannKinematics;
```

`ackermannKinematics` crea un modelo de vehículo similar a un automóvil que utiliza la dirección de Ackerman. Este modelo representa un vehículo con dos ejes separados por la distancia, `WheelBase`. El estado del vehículo se define como un vector de cuatro elementos, $[xy \theta \psi]$, con una posición xy global, especificada en metros. El rumbo del vehículo, θ y ángulo de dirección, ψ se especifican en radianes. El rumbo del vehículo se define en el centro del eje trasero. Los ángulos se dan en radianes. Para calcular los estados derivados del tiempo para el modelo, use la función `derivative` con comandos de dirección de entrada y el estado actual del robot.

2.9 SolidWorks

SolidWorks es un software de diseño asistido por computadora (CAD), de diseño mecánico, que utilizando un entorno gráfico basado en Microsoft Windows permite de manera intuitiva y rápida la creación de Modelos sólidos en 3D, Ensamblajes y Dibujos. Se basa en el modelado paramétrico, reduciendo el esfuerzo necesario en modificar y crear variantes en el diseño, ya que las cotas y relaciones usadas para realizar operaciones se almacenan en el modelo.

SolidWorks, proporciona un software de diseño de fácil uso y poderosas herramientas para los ingenieros y diseñadores, permitiéndoles cubrir todo el proceso (crear, validar, comunicar y gestionar) de desarrollo de producto, asegurándose de que este es correcto antes de fabricarlo. De esta manera es posible conseguir costes de fabricación más bajos y acelerar la introducción de productos en el mercado debido a la mejora en el flujo de información y comunicación del diseño de estos en toda la empresa, además de entre sus proveedores y clientes.

El proceso de diseño de piezas en SolidWorks es la que se presenta en la figura 17.

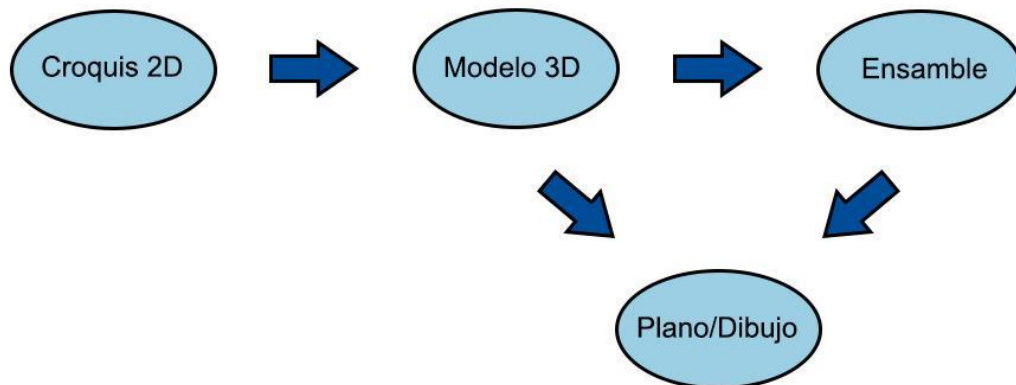


Figura 17. Proceso de diseño en solidworks

SolidWorks tiene soluciones para industrias de plásticos, lamina delgada, eléctrica, simulación y análisis por elementos finitos, el programa incluye un módulo inteligente de detección de errores de diseño y módulos para diseño sustentable. Como herramienta de diseño 3D es fácil de usar, acompaña al ingeniero mecánico y el diseñador industrial en su desempeño diario [23].

Con Solidworks puedes diseñar piezas mecánicas en 3D, evaluar ensambles de varias piezas y producir dibujos de fabricación para el taller, además podrás manejar los datos de diseño en su sistema de administración PDM y llevar un control de las versiones de dibujos.

Al diseñar puedes evaluar el impacto ambiental del diseño, simular virtualmente las condiciones y análisis del diseño en situaciones reales y optimizar su desempeño. El programa está basado en un motor de modelado de sólidos y también contiene comandos de creación, edición de superficies complejas, además es asociativo entre los modelos 3D y sus dibujos.

CAPÍTULO 3. Diseño cinemático, estructural y lógico

3.1 Requisitos para el diseño del robot Ackerman

De acuerdo con las problemáticas a resolver el robot deberá tener determinadas características, las cuales se mencionan a continuación. El robot deberá contar con un servomotor y un motorreductor de torque mínimo de 10 kilogramos, el material con el que será construido tanto el chasis como sus partes interiores deberá ser resistente para poder soportar el peso de la herramienta sanitaria que trasportará, contará con un espacio adecuado en su parte superior para fijar dicha herramienta.

Deberá ser capaz de almacenar y trasportar 1 litro de agua, podrá desplazarse sobre superficies húmedas y/o resbalosas por lo que el material de las ruedas es importante, las dimensiones del robot optimas serian de aproximadamente 70 centímetros de largo, 25 centímetros de ancho y 25 centímetros de alto.

Deberá contar con un sistema independiente de dirección para tener una adecuada maniobrabilidad del robot, así mismo tendrá un sistema de suspensión que ayudará al vehículo a tener mayor estabilidad ya que este es el que absorbe las vibraciones y movimientos de las ruedas durante el desplazamiento.

El control del robot será mediante radiofrecuencia pues este tipo de comunicación nos permite controlar el robot en un radio de hasta 30 metros y nos permite dirigirlo adecuadamente.

3.2 Diseño electrónico

El diseño electrónico se divide en dos, el primero constará de un módulo transmisor, un microcontrolador y botones para dar las diferentes direcciones del vehículo, como lo son; avanzar recto hacia adelante, retroceder recto hacia atrás, avanzar hacia a la izquierda, avanzar hacia a la derecha, retroceder hacia a la izquierda, retroceder hacia a la derecha y detenerse, en la figura 18 se muestra el diseño electrónico del emisor.

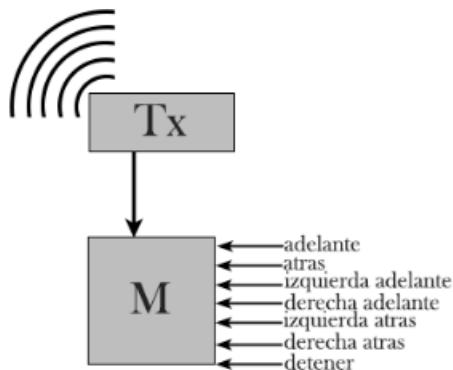


Figura 18. Diseño electrónico del transmisor.

El segundo se conformará por un módulo receptor, un microcontrolador, un circuito integrado L293D, un servomotor y un motor como se muestra en la figura 19.

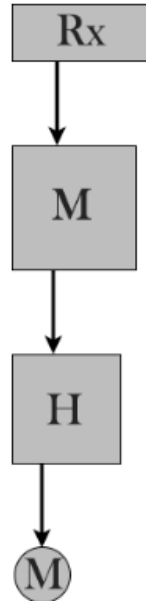


Figura 19. Diseño electrónico del receptor.

3.3 Diseño estructural

3.3.1 Sistema de dirección

Se propone un sistema de dirección que consta de una columna de dirección, un servomotor, dos varillas de dirección y un par de manguetas.

El servomotor está conectado a la columna de dirección, conectada a dos varillas de dirección; una izquierda y una derecha, en el extremo de cada una de ellas va una mangueta que se coloca en cada una de sus ruedas delanteras como se muestra en la figura 20.

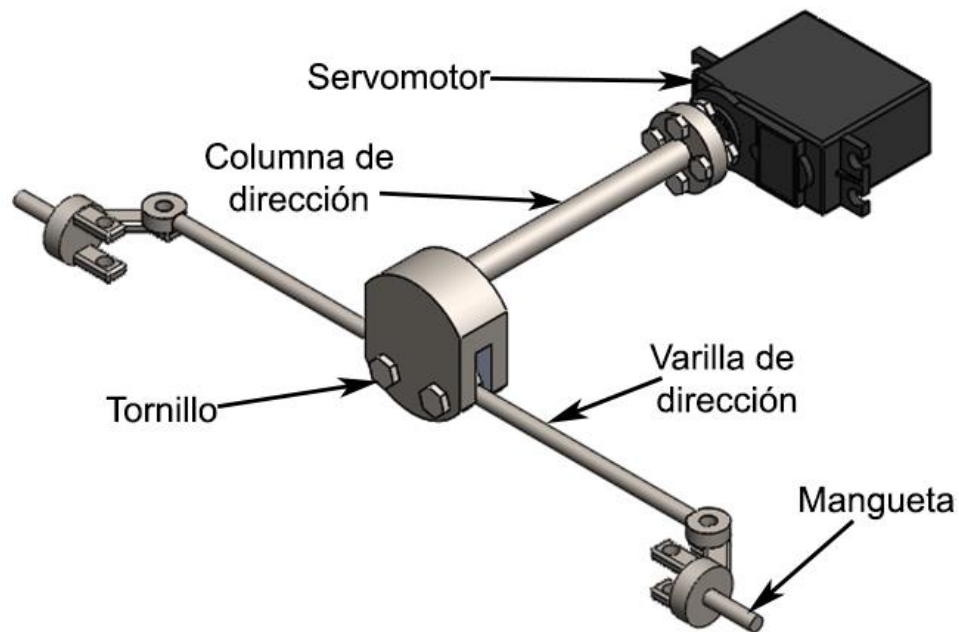


Figura 20. Diseño propuesto de sistema de dirección.

En el siguiente apartado se explicará a detalle la función de cada una de las piezas que conforman esta propuesta del sistema de dirección, así como se mostrará una vista más detallada de cada uno de ellos.

3.3.1.1 Columna de dirección

En este diseño la Columna de Dirección conecta al servomotor y a las varillas de dirección, efectuando un movimiento rotativo que permite desplazar las varillas en conjunto con las manguetas delanteras, dando así giro a las ruedas directrices, en la figura 21 se muestra la columna de dirección propuesta.

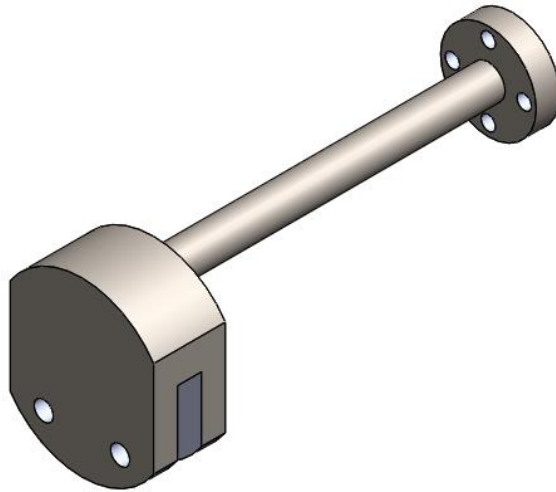


Figura 21. Diseño propuesto de columna de dirección.

3.3.1.2 Varillas de dirección

Las dos varillas de dirección irán acopladas a la columna de dirección, permitiendo dar movimiento a las ruedas mediante las manguetas. En la figura 22 se muestra la propuesta del diseño de las varillas de dirección.

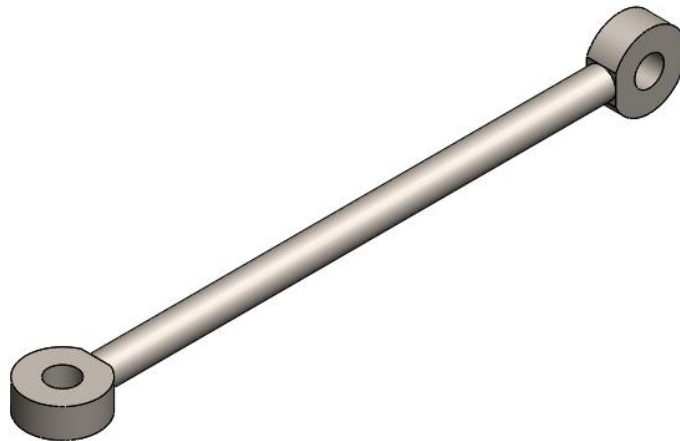


Figura 22. Diseño propuesto de varilla de dirección.

3.3.1.3 Manguetas

Este elemento contiene el cubo o vástago sobre el que gira la rueda, conectándola al mismo tiempo con los componentes de la suspensión y de la dirección. De este modo, la rueda se sujeta al cubo o vástago mediante un buje que, rota, mientras es portado por la mangueta que sigue los

movimientos de la suspensión y gira sobre su eje de pivote geométrico, su diseño se muestra en la figura 23.

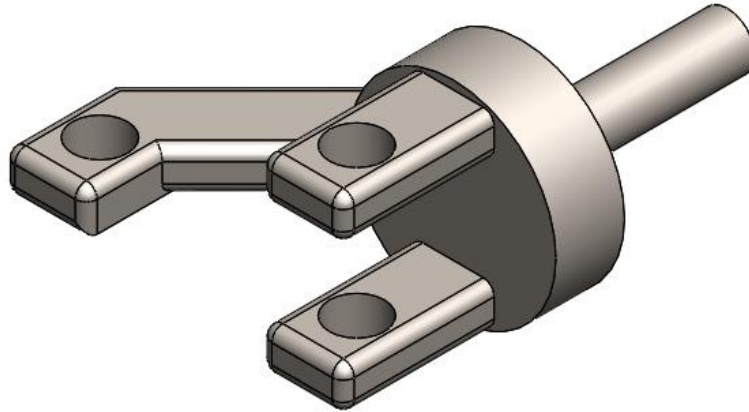


Figura 23. Diseño propuesto de manga.

3.3.2. Sistema de suspensión delantero

Es importante el diseño de un sistema de suspensión dado que este prototipo transportará una herramienta sanitaria, así como agua en su interior por lo cual necesitará una buena estabilidad.

En la figura 24 se muestra la propuesta del diseño del sistema de suspensión para el robot tipo Ackerman, dicho sistema constara de una barra de suspensión unida a dos brazos de torsión superiores y dos brazos de torsión inferiores y los cuales estarán unidos a las manguetas y estas a su vez estarán conectadas a las ruedas con un balero. Entre la parte superior de la barra de suspensión y el brazo de torsión inferior estará fijado un amortiguador, este con el fin de controlar las oscilaciones de la suspensión causadas por las posibles irregularidades del camino.

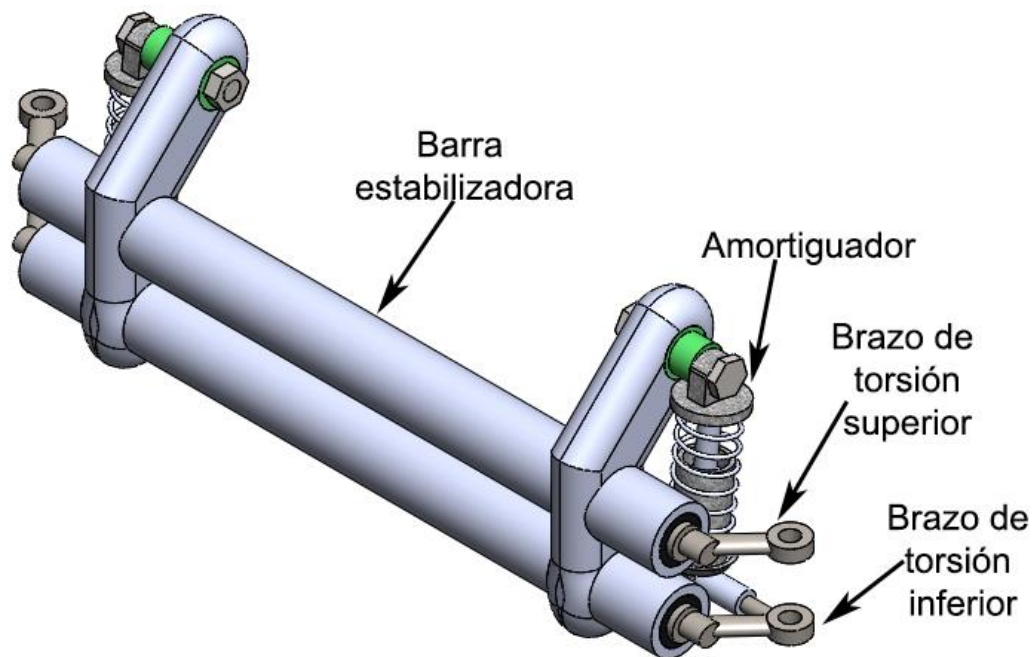


Figura 24. Propuesta de diseño de sistema de suspensión delantero.

A continuación, se explicará a detalle la función de cada una de las piezas que conforman esta propuesta del sistema de suspensión.

3.3.2.1 Brazos de torsión

Un brazo de suspensión es un eslabón de bisagra de la suspensión que conecta el chasis y la suspensión que sostiene la rueda.

Hay dos tipos de brazos de torsión: superiores e inferiores, este sistema cuenta con 4 brazos de torsión, un par de cada lado; conformado por uno superior y otro inferior, estos se sujetarán a la mangueta de las ruedas. La mangueta inferior cuenta con un tornillo que ira unida a un amortiguador. La propuesta de diseño de los brazos superior e inferior se muestra en la figura 25.

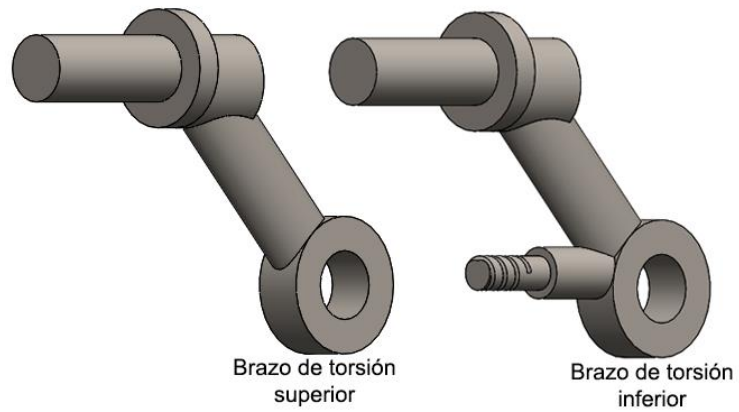


Figura 25. Propuesta de diseño de brazos superior e inferior.

3.3.2.2 Barra estabilizadora

La barra estabilizadora ayuda a minimizar el movimiento vertical de las ruedas, y minimizando la inclinación lateral en las curvas, va unida al chasis del robot tipo Ackerman. En la figura 26 se muestra el diseño propuesto de la barra estabilizadora.

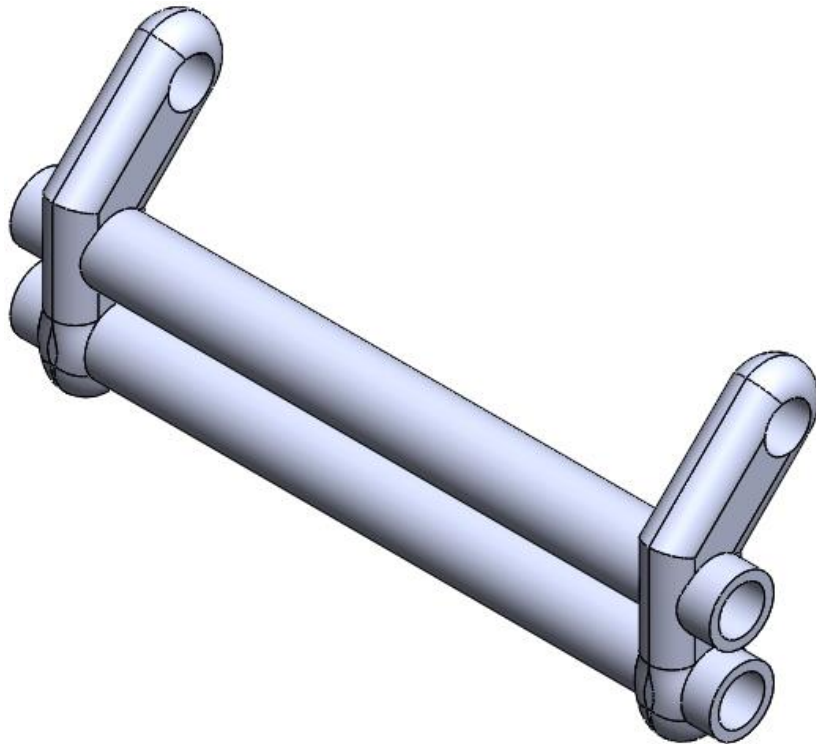


Figura 26. Propuesta de diseño de barra estabilizadora.

3.3.2.3 Amortiguador

Los amortiguadores ayudaran a minimizar el movimiento excesivo del robot y a mantener la correcta alineación de las ruedas además de reducir el rebote. En la figura 27 se muestra el amortiguador propuesto.

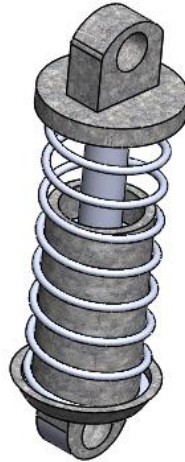


Figura 27. Propuesta de amortiguador.

3.3.3 Diferencial

El diferencial es un sistema de engranajes que se encarga de regular la velocidad de giro de las dos ruedas que están unidas por un solo eje. La rueda del lado interno de la curva ha de recorrer menos metros que la que está en el lado exterior. Esto quiere decir que, si se quiere mantener la misma capacidad de tracción en ambos lados, una de las ruedas debe girar más lento que la otra. En la figura 28 se muestra el diferencial completo y en la figura 29 se muestra el engranaje del diferencial más cerca para poder apreciarlo mejor a detalle.

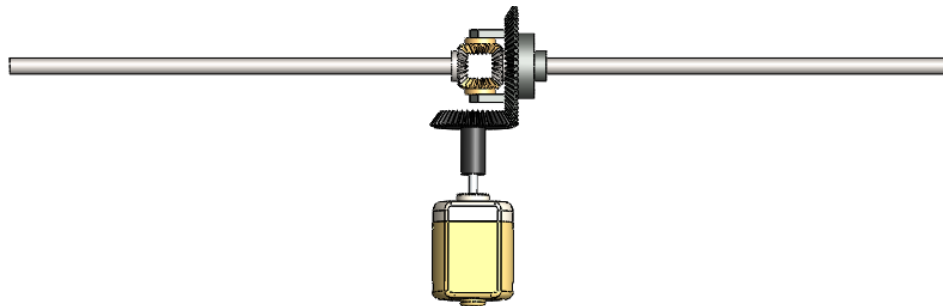


Figura 28. Prpuesta de diferencial.

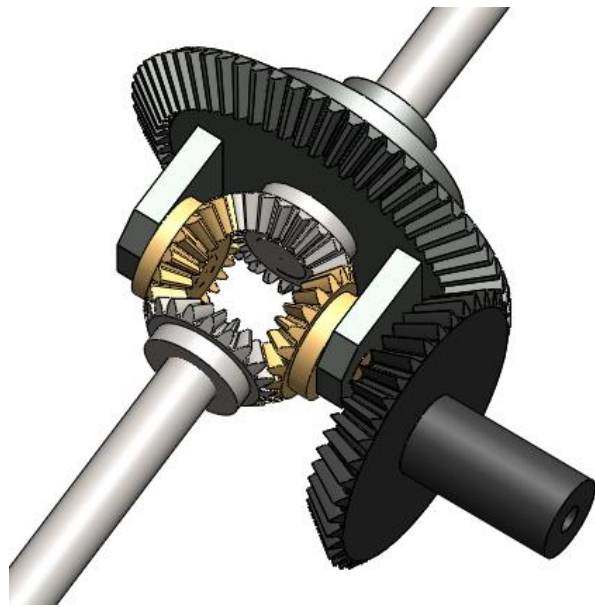


Figura 29. Propuesta de diferencial.

3.3.4 Suspensión trasera

En la figura 30, se puede observar el ensamblaje de la suspensión trasera del robot, que se conforma por un casco que cubre el diferencial y dará soporte al eje trasero de las ruedas, un par de brazos que unirán la suspensión al chasis del robot y un par de amortiguadores.

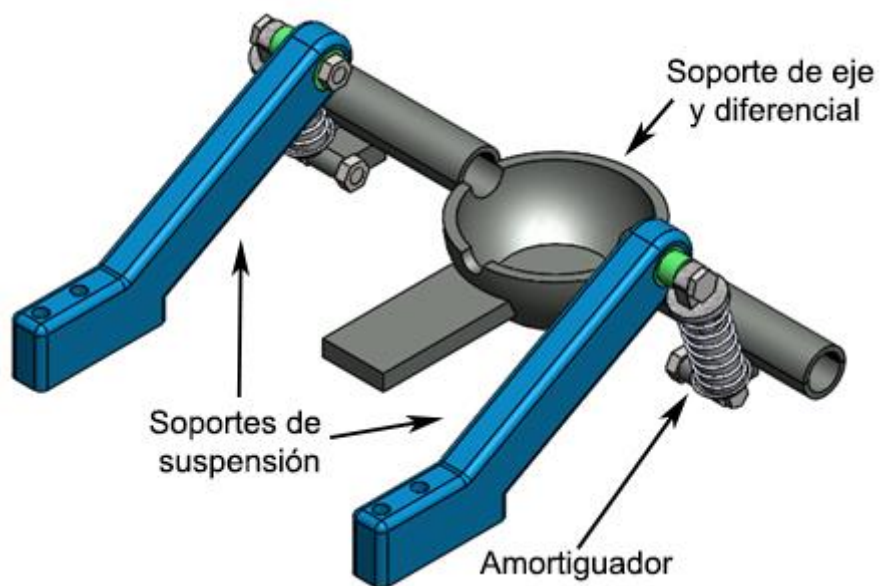


Figura 30. Propuesta de suspensión propuesta.

3.3.4.1 Soporte de suspensión

En la figura 31 se muestra la propuesta del diseño de un brazo de suspensión, se propone utilizar dos para brindar un mejor soporte, contara con espacio para unir cada uno con un amortiguador y dos perforaciones más para colocar tornillos y así fijar los brazos al chasis del robot.

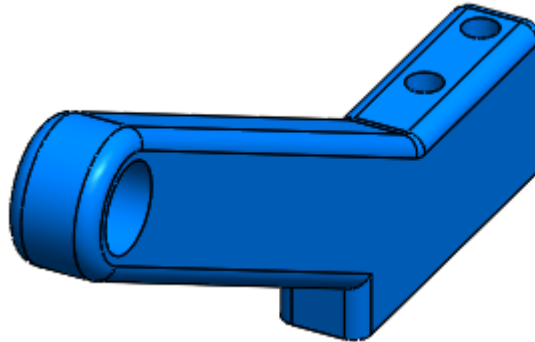


Figura 31. Propuesta de diseño de soporte de suspensión.

3.3.4.2 Casco de eje y diferencial

El sistema de suspensión trasero contara con un casco para proteger el diferencial, dar soporte al motor y dar soporte a los ejes traseros. Este irá unido a los amortiguadores traseros, el diseño propuesto se muestra en la figura 32.

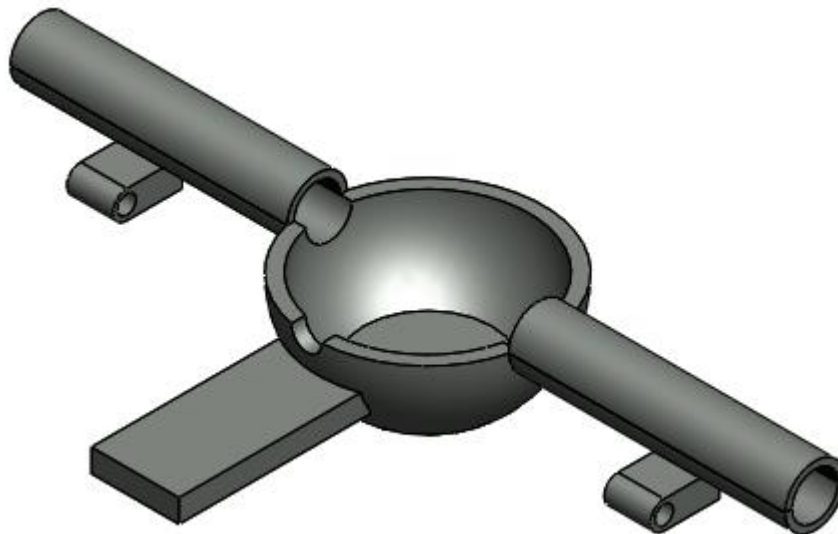


Figura 32. Propuesta de diseño de casco de eje y diferencial.

3.3.4.3 Amortiguador

Los amortiguadores traseros tendrán el mismo diseño que los amortiguadores de la suspensión delantera como se muestra en la figura 33, estos unirán los brazos de suspensión con el casco del eje y diferencial, para así poder reducir los movimientos excesivos que pudieran ser provocados por irregularidades del camino.

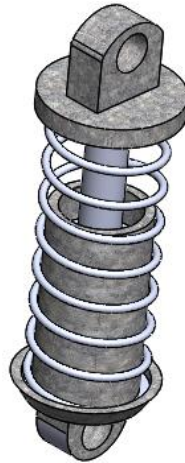


Figura 33. Propuesta de amortiguador.

3.4 Diseño lógico

El sistema tiene 7 estados; DETENIDO es el estado inicial y se hará la transición a este estado siempre que la señal recibida sea 0, en ese momento el motor estará detenido 0 0 y el servomotor en una posición de 90°. El estado AVANZA_RECTO será cuando la señal recibida sea A y cambiará el estado del motor a activo 1 0 y el servomotor en un ángulo de 90°. El estado AVANZA_DERECHA será cuando la señal recibida sea B o C, en esta el estado de motor se mantiene 1 0, pero el servomotor cambia su posición a 0°. Cuando reciba D pasara al estado RETROCEDE_DERECHA en este, el estado del motor cambia 0 1 y el servomotor se conserva en 0°. Para el estado RETROCEDE_RECTO la señal recibida será E el motor conserva su estado 0 1 y el servomotor vuelve a 90°. Al recibir F pasara al estado RETROCEDE_IZQUIERDA el motor sigue con su estado 0 1 y el servomotor cambia a 180° Y cuando reciba la señal G o H el estado pasara a AVANZA_IZQUIERDA el motor cambia a 1 0 y el servomotor en 180°. Las transiciones serán cuando se haga una selección de dirección, siempre que la señal recibida sea 0 el estado cambiara a DETENIDO, todo lo anterior se puede apreciar en la figura 34.

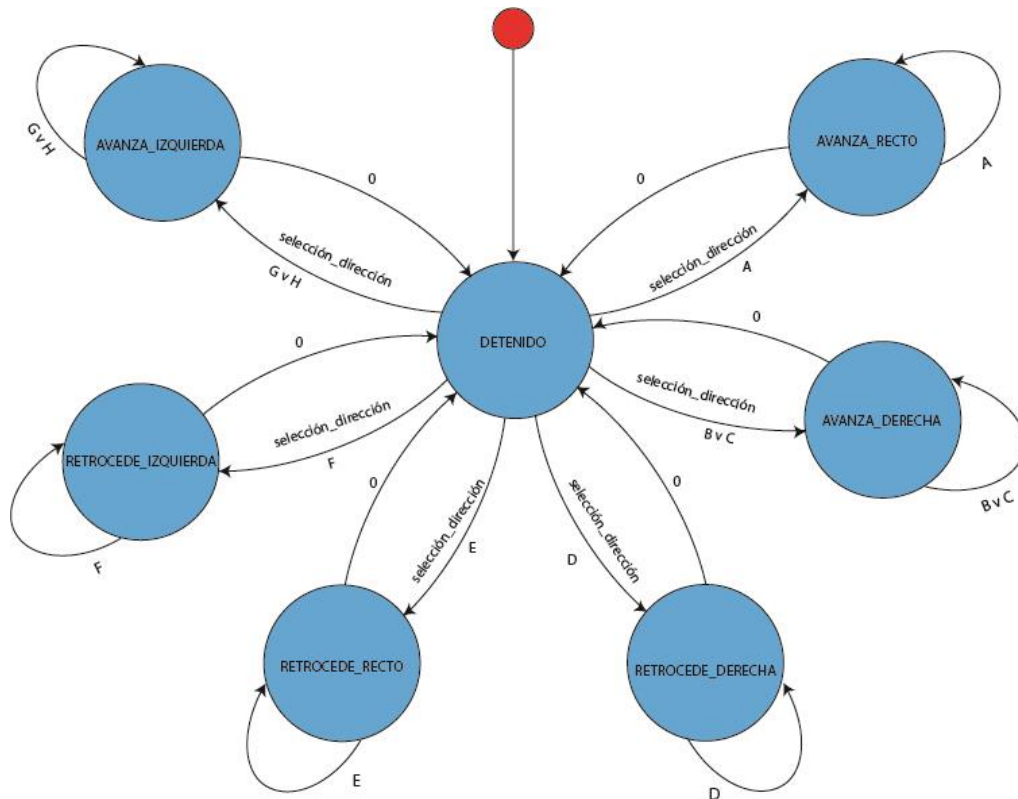


Figura 34. Máquina de estados finitos

3.5 Diseño Cinemático

La cinemática es una rama de la Física que estudia el movimiento de los cuerpos en el espacio, como un fenómeno aislado. La dinámica estudia las causas del movimiento. En robótica se representa el movimiento de un sistema electromecánico a través de modelos cinemáticos y dinámicos.

Las restricciones relacionadas con la locomoción del robot, posición, velocidad, aceleración, ángulo de desplazamiento se representan en un modelo cinemático.

3.5.1 Modelo matemático

Comenzaremos con el modelo matemático del monociclo en el que nos basaremos para posteriormente obtener el modelo matemático del matemático del diferencial.

3.5.1.1 Monociclo

En la figura 35 podemos observar el sistema de cuerpo libre, donde (x, y) es la posición del robot, ψ es la orientación, μ_l es la velocidad lineal de la rueda izquierda, μ_r es la velocidad lineal de la rueda derecha, $h(x, y)$ muestra el punto de interés (en este caso en específico es el centro), μ es la velocidad lineal (que permite que el robot avance y retroceda) y ω que es nuestra velocidad angular (permite que el robot gire).

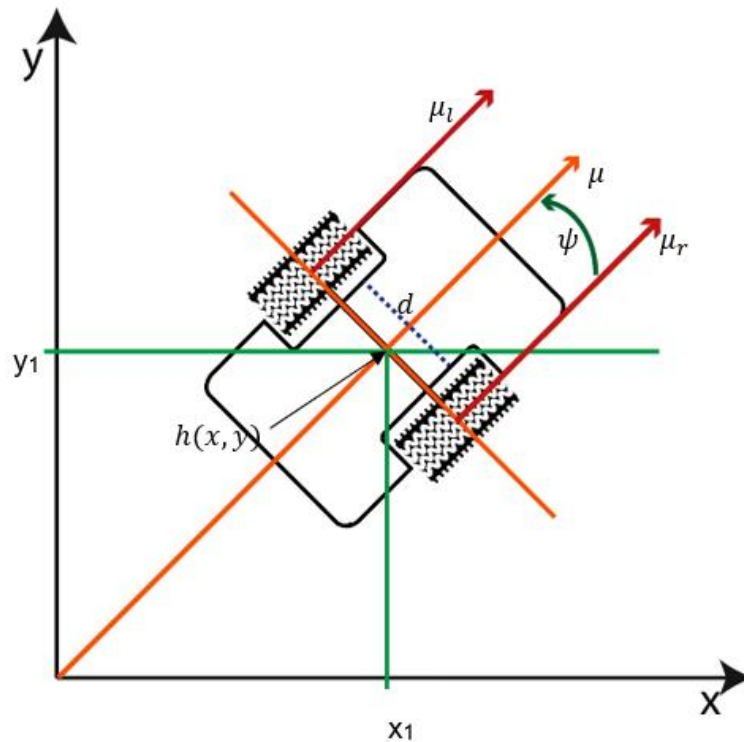


Figura 35. Sistema de cuerpo libre.

El robot se desplaza en x

$$h_x = x_1 \quad (1)$$

En robot se desplaza en y

$$h_y = y_1 \quad (2)$$

Para obtener la velocidad lineal debemos derivar la posición

$$\dot{h}_x = \mu \cos \psi \quad (3)$$

$$\dot{h}_y = \mu \sin \psi \quad (4)$$

La derivada de la orientación nos dará la velocidad angular.

$$\dot{\psi} = \omega \quad (5)$$

Para obtener la velocidad total del sistema debemos descomponer las velocidades de las ruedas en función de los motores. Por lo tanto, la velocidad total del sistema va a ser igual al promedio de la rueda derecha más la llanta izquierda

$$\mu = \frac{\mu_r + \mu_l}{2} \quad (6)$$

La velocidad angular es la velocidad lineal de la rueda derecha menos la velocidad lineal de la rueda izquierda sobre la distancia entre las ruedas.

$$\omega = \frac{\mu_r - \mu_l}{d} \quad (7)$$

Reemplazamos μ en las ecuaciones 3 y 4, según la ecuación 6, por lo que tenemos

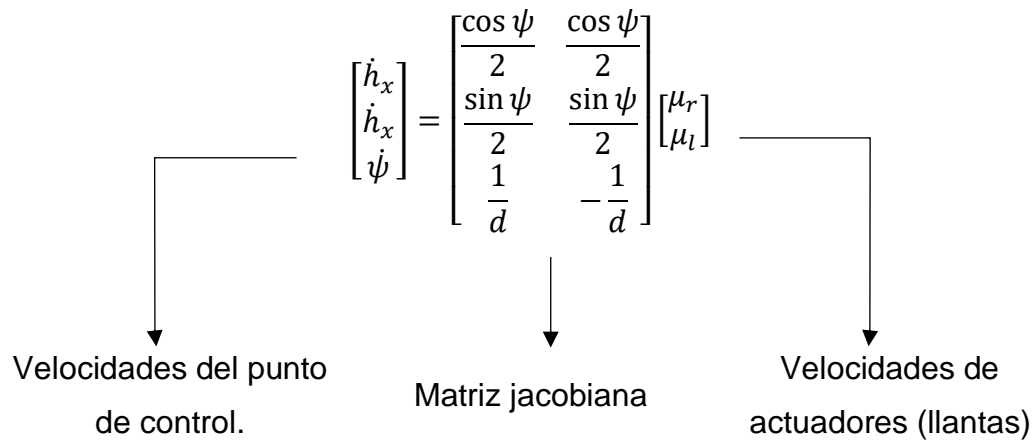
$$\dot{h}_x = \frac{\mu_r + \mu_l}{2} \cos \psi \quad (8)$$

$$\dot{h}_y = \frac{\mu_r + \mu_l}{2} \sin \psi \quad (9)$$

Reemplazaremos ω en la ecuación 5

$$\dot{\psi} = \frac{\mu_r - \mu_l}{d} \quad (10)$$

Lo ideal es trabajar matricialmente así que tenemos



Para hacer la matriz jacobiana debemos despejar todo lo que multiplica a μ_r en la ecuación 8, que sería:

$$\frac{\cos \psi}{2}$$

Posteriormente todo lo que multiplica a μ_l que sería

$$\frac{\cos \psi}{2}$$

Para \dot{h}_y de igual forma seleccionamos todo lo que multiplica a μ_r en la ecuación 9

$$\frac{\sin \psi}{2}$$

Posteriormente todo lo que multiplica a μ_l que sería

$$\frac{\sin \psi}{2}$$

Para $\dot{\psi}$ seleccionamos todo lo que multiplica a μ_r en la ecuación 10

$$\frac{1}{d}$$

Después todo lo que multiplica a μ_l en la ecuación 10

$$-\frac{1}{d}$$

Así se obtiene el modelo matemático el cual relaciona las velocidades con el punto de control con las velocidades de los actuadores mediante la matriz jacobiana.

Basándonos en esto haremos el modelo matemático de nuestro robot con direccionamiento Ackerman.

3.5.1.2 Car-Like

En la figura 36 podemos observar el modelo de cuerpo libre donde ϕ es el ángulo de orientación, ψ es el ángulo de dirección, μ representa la velocidad lineal total del robot, d es la distancia entre el eje delantero y trasero, h es el punto de interés (en este caso el centro del eje delantero) y μ_ω es la velocidad lineal en el eje central de las ruedas delanteras.

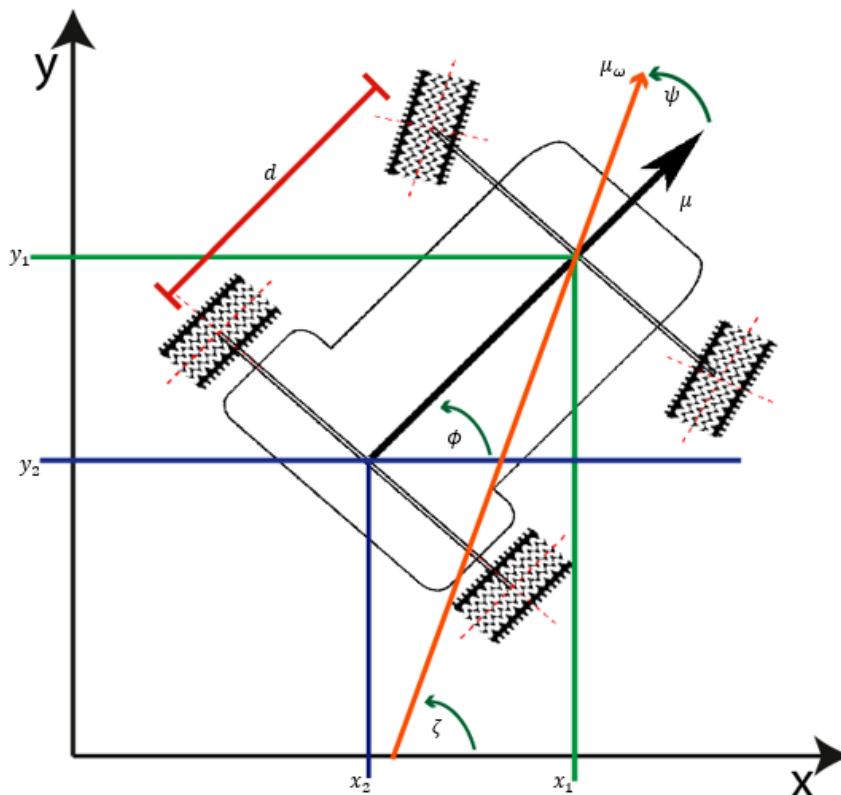


Figura 36. Modelo de cuerpo libre.

En el eje x es igual a $x_2 + x_1$, lo obtenemos del triángulo rectángulo que se forma, tenemos la distancia de la hipotenusa que es d , por lo que x_1 lo podemos obtener por medio de

$$d \cos \phi$$

Por lo que tenemos que h_x es

$$h_x = x_2 + d \cos \phi \quad (1)$$

Para obtener la componente en y se sigue el procedimiento anterior

$$h_y = y_2 + d \sin \phi \quad (2)$$

Se debe hallar la derivada del conjunto de ecuaciones 1 y 2. Se deriva aplicando la regla de la cadena (se deriva con respecto al tiempo).

$$\dot{h}_x = \dot{x}_2 - d \dot{\phi} \sin \phi \quad (3)$$

$$\dot{h}_y = \dot{y}_2 + d \dot{\phi} \cos \phi \quad (4)$$

El modelo está en función de las variables de control por lo tanto se reemplaza $\dot{\phi}$ y todo queda en función del ángulo de dirección ψ

$$\dot{\phi} = \frac{1}{d} \mu_\omega \sin \psi \quad (5)$$

Para obtener la velocidad lineal se derivó la posición.

$$\dot{x}_2 = \mu \cos \phi \quad (6)$$

$$\dot{y}_2 = \mu \sin \phi \quad (7)$$

$$\dot{\psi} = \omega_\psi \quad (8)$$

$$\cos \psi = \frac{\mu}{\mu_\omega} \quad (9)$$

Se despeja μ_ω de la ecuación 9 y se reemplaza en la ecuación 5

$$\dot{\phi} = \frac{1}{d} \mu \tan \psi \quad (10)$$

Se reemplaza \dot{x}_2 \dot{y}_2 de las ecuaciones 6 y 7 en las ecuaciones 3 y 4.

$$\dot{h}_x = \mu \cos \phi - d\dot{\phi} \sin \phi \quad (11)$$

$$\dot{h}_y = \mu \sin \phi - d\dot{\phi} \cos \phi \quad (12)$$

Se reemplaza $\dot{\phi}$ de la ecuación 10 en las ecuaciones 11 y 12.

$$\dot{h}_x = \mu \cos \phi - \mu \tan \psi \sin \phi$$

$$\dot{h}_y = \mu \sin \phi - \mu \tan \psi \cos \phi$$

El modelo final es

$$\dot{h}_x = \mu \cos \phi - \mu \tan \psi \sin \phi$$

$$\dot{h}_y = \mu \sin \phi - \mu \tan \psi \cos \phi$$

$$\dot{\phi} = \frac{1}{d} \mu \tan \psi$$

$$\dot{\psi} = \omega_\psi$$

En función de la velocidad lineal μ , se tiene el ángulo ψ y el ángulo de orientación ϕ .

Se tiene la representación matricial.

$$\begin{bmatrix} \dot{h}_x \\ \dot{h}_y \\ \dot{\phi} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi - \tan \psi \sin \phi & 0 \\ \sin \phi + \tan \psi \cos \phi & 0 \\ \frac{1}{d} \tan \psi & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu \\ \omega_\psi \end{bmatrix}$$

3.6 simulación en Matlab

Se utiliza el código mostrado a continuación para realizar la simulación de este modelo. Donde se define el tiempo de muestreo, el ploteo, el ángulo de dirección, la distancia entre los ejes, la posición inicial en (x, y) , la velocidad lineal, el ángulo de orientación y el ángulo de dirección.

Se utiliza un bucle de simulación donde aplicaremos las acciones de control al modelo matemático que se obtuvo previamente, para así obtener

nuestro punto de control. Después de se realiza una integración numérica (método de Euler) para obtener las posiciones en los instantes de muestreo.

Posteriormente se realiza la emulación para verificar que el modelo funcione correctamente, para lo cual se deben ingresar las velocidades.

Teniendo la velocidad inicial si se da 0 en el ángulo de inclinación el robot ira hacia adelante. Mientas que, si es negativo ira hacia atrás. Para simular os giros se debe dar el dato del ángulo de inclinación.

Código en Matlab para simular el modelo:

```
clc
clear
close all

ts=0.1;
t=0:ts:40;

u=0.1*ones(1,length(t));
% wsi=(15*(pi/180))*sin(0.01*t);
psi=0.2*cos(0.2*t);

D=0.75;

x1(1)=0;
y1(1)=0;
phi(1)=0;
psi(1)=0;

hx(1)=x1(1)+D*cos(phi(1));
hy(1)=y1(1)+D*sin(phi(1));

for k=1:length(t)
    hxp(k)=u(k)*cos(phi(k))-u(k)*tan(psi(k))*sin(phi(k));
    hyp(k)=u(k)*sin(phi(k))+u(k)*tan(psi(k))*cos(phi(k));
    phip(k)=(1/D)*u(k)*tan(psi(k));

    hx(k+1)=hx(k)+ts*hxp(k);
    hy(k+1)=hy(k)+ts*hyp(k);
    phi(k+1)=phi(k)+ts*phip(k);
```

```

        x1(k+1)=hx(k+1)-D*cos(phi(k+1));
        y1(k+1)=hy(k+1)-D*sin(phi(k+1));
end

scene=figure;
tam=get(0,'ScreenSize');
set(scene,'position',[tam(1) tam(2) tam(3) tam(4)]);

axis equal;
axis([0 6 -1 1 -0.1 1]);
grid on;
MobileCarlike;
M1=CarlikePlot(x1(1),y1(1),phi(1),psi(1));
hold on
M2=plot(hx(1),hy(2),'r');
xlabel('x(m)'); ylabel('y(m)'); zlabel('z(m)');
step=10;

for i=1:step:length(t)
    delete (M1)
    delete (M2)
    M1=CarlikePlot(x1(i),y1(i),phi(i),psi(i)); hold on
    plot(hx(1:i),hy(1:i),'b','LineWidth',2);
    pause(ts)
end

```

CAPÍTULO 4. Resultado de simulaciones

4.1 SolidWorks

4.1.1 Ensamblaje del sistema de suspensión delantero con el sistema de direccionamiento Ackerman

Para formar la parte frontal del robot con geometría de direccionamiento Ackerman conforma del sistema de suspensión delantero y el sistema de dirección, mediante las manguetas que van unidas a las ruedas como se muestra en la figura 37. Para mejorar la visibilidad y así tener una mejor apreciación de los componentes en la segunda imagen se modificó la transparencia de las ruedas .

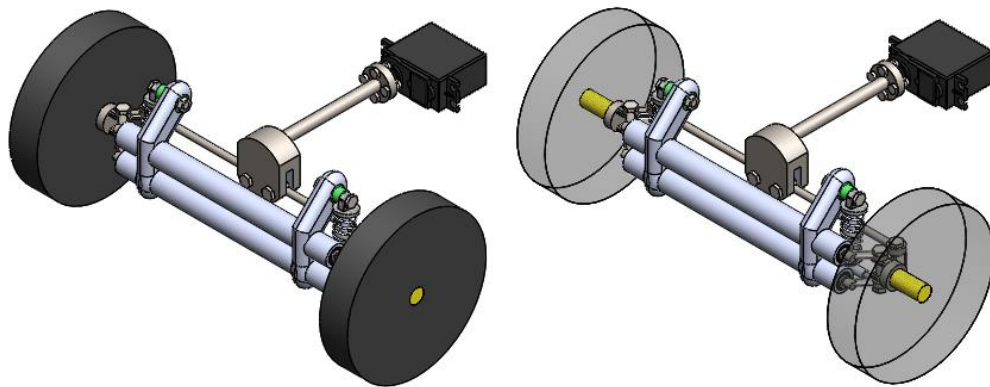


Figura 37. Ensamblaje del sistema de suspensión delantero con el sistema de direccionamiento Ackerman.

4.1.2 Ensamblaje del sistema de suspensión trasero con el diferencial

La parte trasera se conforma por el diferencial y el sistema de suspensión trasero, se conectan gracias a un casco creado para proteger el diferencial y recubrir los ejes de las ruedas traseras como se muestra en la figura 38, para mejorar la visibilidad y así tener una mejor apreciación de los

componentes en la segunda imagen se modificó la transparencia de las ruedas.

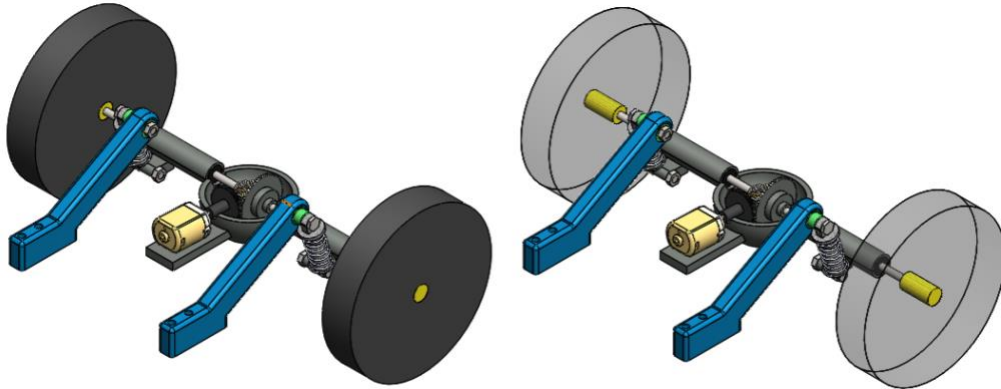


Figura 38. Ensamblaje del sistema de suspensión trasero con el diferencial.

4.1.3 Ensamblaje completo del robot Ackerman

En la figura 39 se muestran las diferentes vistas del robot, trasera, frontal, lateral e isométrica donde ya se encuentran unidos los diferentes sistemas, incluyendo lo él servomotor que ayudará a darle dirección y el motor que les dará tracción a las ruedas traseras. Se diseño un chasis adecuado para permitirle los giros y que el sistema de suspensión cumpla su función,

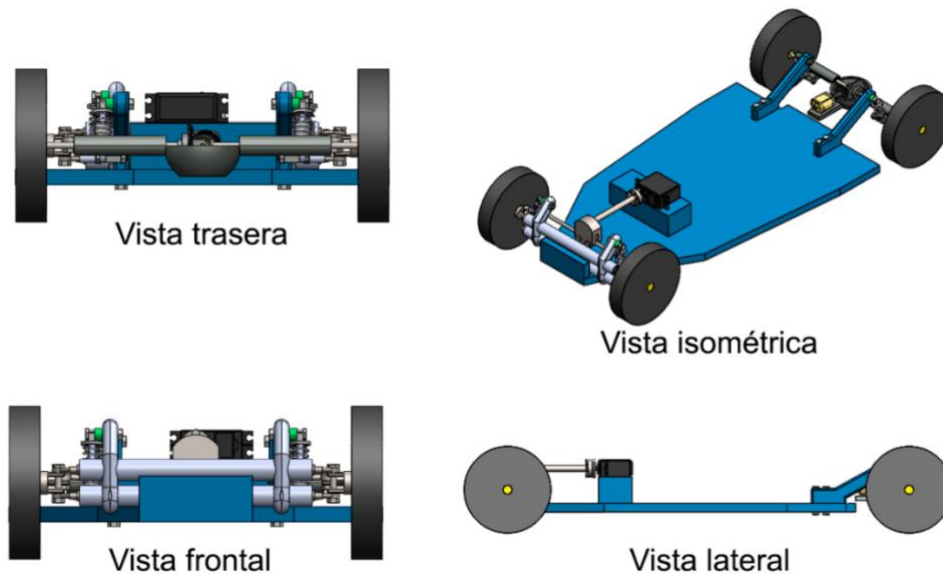


Figura 39. Vistas del ensablaje del robot.

En la figura 40 se muestran las vistas isométricas del robot Ackerman con y sin la carcasa, este componente cuenta con un espacio diseñado para colocar un brazo que ayudara con la limpieza.

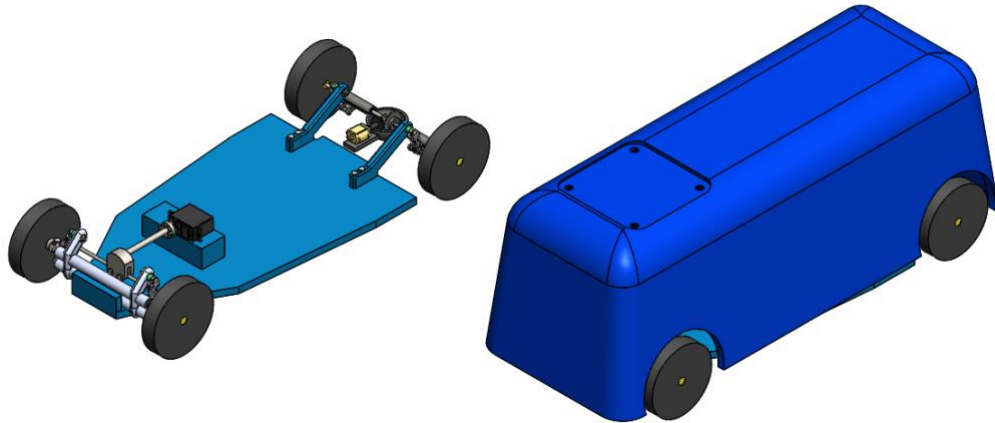


Figura 40. Vista isométrica del robot sin y con carcasa.

4.1.4 Detección de interferencias

La detección de interferencias ayuda a identificar las interferencias entre los componentes y proporciona asistencia para examinarlas. Esta herramienta nos ayuda cuando hay ensamblajes complejos como en este caso ya que es difícil determinarlas a simple vista. En la figura 41 se muestran los resultados de la detección de interferencias en el ensamble final tanto con chasis como sin chasis respectivamente y con los movimientos propios del robot para corroborar su correcto funcionamiento sin interferencias ni colisiones.

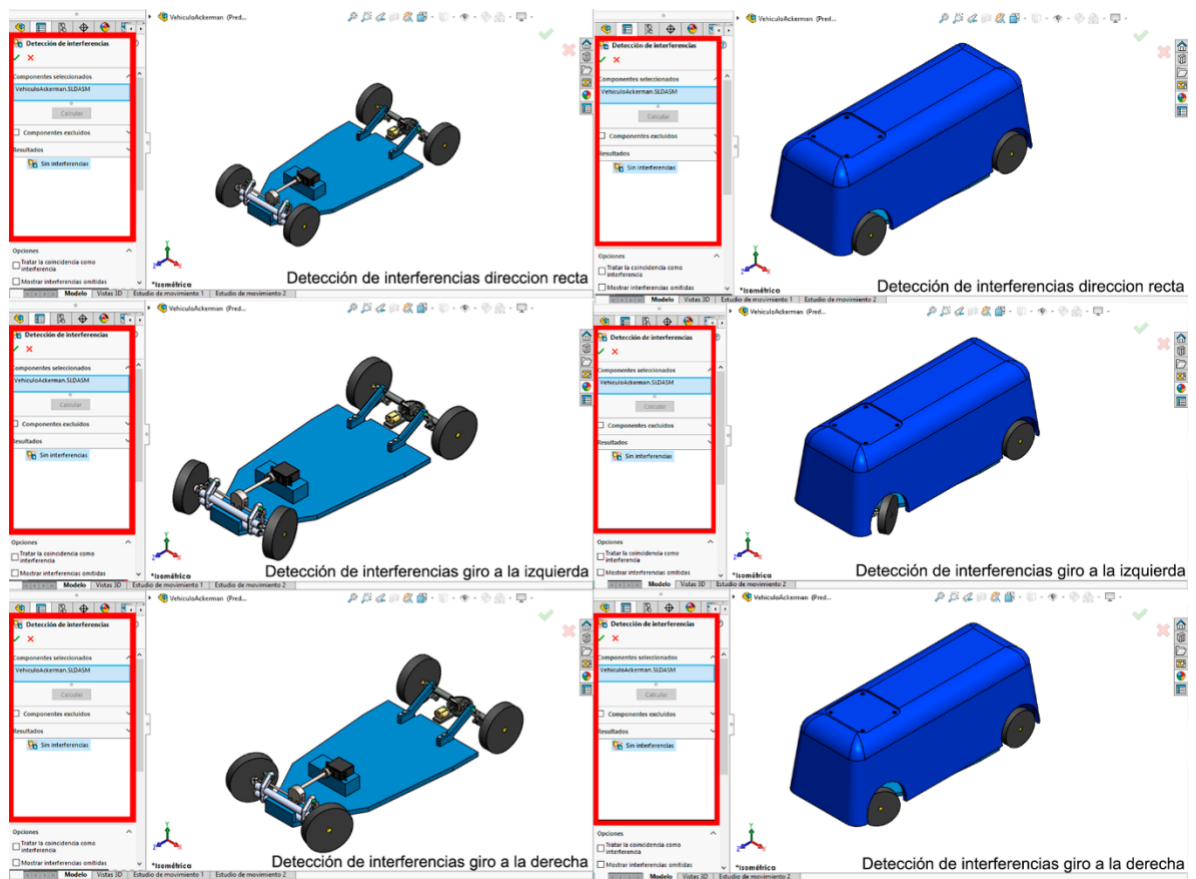


Figura 41. Pruebas de detección de interferencias.

4.2 Simulación en Matlab

Se utiliza el código mostrado en la figura n para realizar la simulación de este modelo. Donde se define el tiempo de muestreo (t), el ángulo de dirección, la distancia entre los ejes (D), la posición inicial en (x,y) , la velocidad lineal (u), el ángulo de orientación (ϕ) y el ángulo de dirección (ψ).

Se utiliza un bucle de simulación donde aplicaremos las acciones de control al modelo matemático que se obtuvo previamente, para así obtener nuestro punto de control. Después de se realiza una integración numérica (método de Euler) para obtener las posiciones en los instantes de muestreo.

Posteriormente se realiza la emulación para verificar que el modelo funcione correctamente, para lo cual se deben ingresar las velocidades.

Teniendo la velocidad inicial si se da 0 en el ángulo de inclinación el robot ira hacia adelante. Mientas que, si es negativo ira hacia atrás. Para simular los giros se debe dar el dato del ángulo de inclinación.

Se realizo la simulación con diferentes valores para las variables mencionadas al inicio del capítulo, donde se obtuvieron las figuras 42 y 43. en el lado derecho de cada una de las simulaciones se puede observar una tabla con los datos de las variables con las que se realizó la simulación

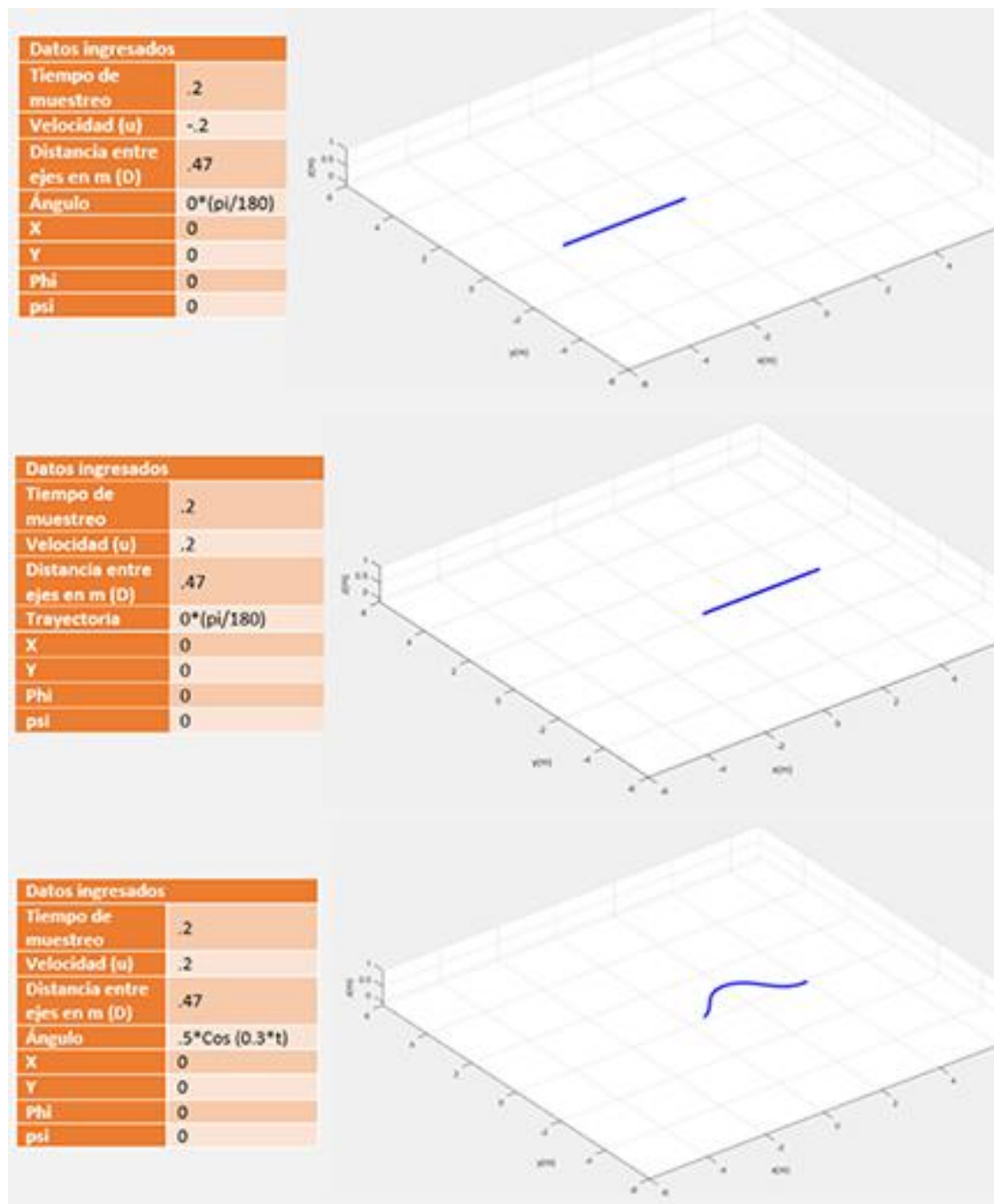


Figura 42. Simulación del sistema ciasmático.

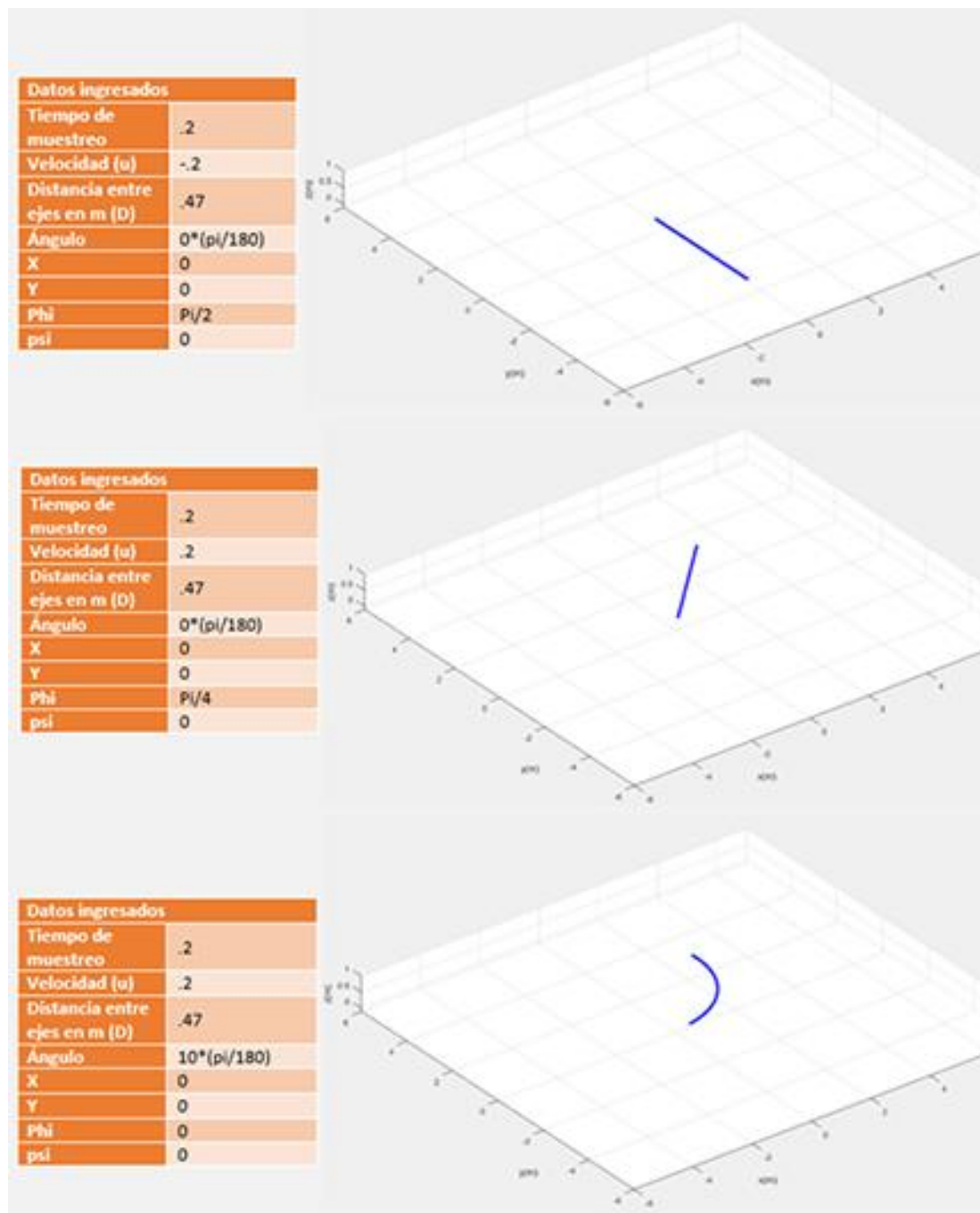


Figura 43. Simulación del sistema cinemático.

4.3 Simulación en Proteus

Se realizó la simulación del sistema eléctrico para corroborar el correcto funcionamiento mencionado en el capítulo 3.2 el cual se conforma por dos partes, una de emisión y otra de recepción.

La parte emisión se conforma por un módulo emisor de radiofrecuencia, un Arduino, 7 botones cada uno para realizar un movimiento diferente y 7 resistencias de 10k cada una, se le cargo el programa que sigue el diseño lógico mostrado en el capítulo 3.4, donde envía los datos al receptor de los botones que son presionados.

La parte receptora se conforma por un módulo receptor de radiofrecuencia, un Arduino, un servomotor, un motor DC, un circuito integrado L293D y una fuente. se le cargo el programa que sigue el diseño lógico mostrado en el capítulo 3.4, donde recibe los datos del emisor, y dependiendo el dato recibido enviara una señal al servomotor y al motor.

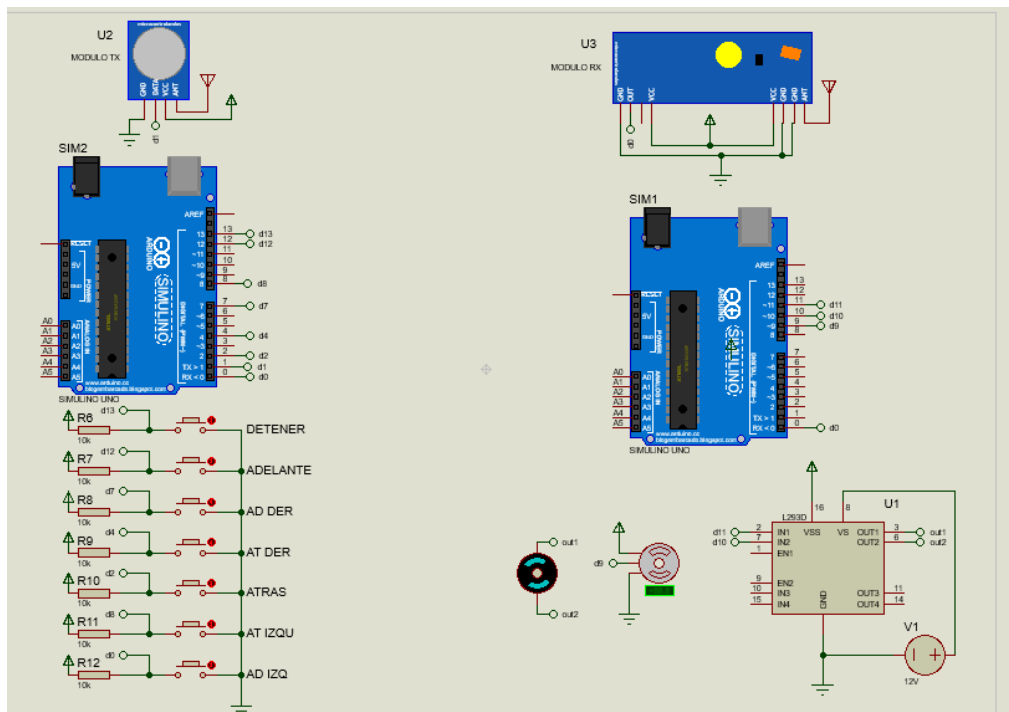


Figura 44. Simulación del sistema eléctrico.

CAPITULO 5. Conclusiones y trabajos futuros

El objetivo general de la tesis fue diseñar, simular, manipular e implementar un prototipo de robot Ackerman para transportar una herramienta robótica sanitaria, dicho objetivo fue logrado gracias al cumplimiento en tiempo y forma de los objetivos específicos planteados: búsqueda de información en revistas indexadas, libros y bases de datos, diseño de modelo cinemático y máquina de estados finitos para el prototipo, simulación del modelo cinemático y secuencias de movimientos, armado y programado del modelo del prototipo, pruebas del funcionamiento y recopilación de datos para su caracterización, análisis y muestra de resultados obtenidos y redacción del trabajo realizado.

Se concluye que las herramientas de software (Matlab y SolidWorks) son óptimas para el diseño matemático y estructural de prototipos, debido a que nos dan la posibilidad de visualizar los datos/modelos de forma clara aun sin implementarlos físicamente. Por lo que se tuvo la certeza de que el diseño, ensamble y simulación cumple con los requisitos planteados en la cinemática. El diseño eléctrico comprobó que el diseño de la máquina de estados permite manipular los movimientos del robot los cuales dependen del tipo de hardware, material y el tiempo de uso.

Basados en la simulación de Matlab se corroboró que las trayectorias del robot con direccionamiento tipo Ackerman dependen de parámetros específicos como: velocidad, distancia entre ejes, ángulo y posición de inicio del robot.

Como trabajo futuro se propone desarrollar las diversas líneas de investigación como: realizar la impresión de las piezas con una impresora 3D, corroborar que físicamente la simulación corresponde a la realidad, detectar fallas y hacer las mejoras correspondientes, la implementación física del diseño eléctrico y trabajar en conjunto con diversos proyectos que

actualmente se están realizando dentro del laboratorio de sistemas robóticos SIRO donde existe la necesidad de contar con un sistema de movilidad que sea estable y preciso de acuerdo a diversas necesidades.

Referencias.

- [1] Berkemeier, M. D. (2013). Optimal, Stable Switching between Arcs during Low-Speed Ackerman Path Tracking. *American Control Conference (ACC)*.
- [2] Franch, J., Rodriguez-Fortun, J. M. (2009). Control and Trayectory Generation of an Ackerman Vehicle by Dynamic Linearization. *Proceedings of the European Control Conference*.
- [3] Economou, J.T., Luk, C.K., Tsourdos, A., White, B.A. (2003). Hybrid Modelling of an All-Electric Front-Wheel Ackerman Steered Vehicle. *IEEE*.
- [4] Ren, X., Cai, Z. (2010). Kinematics Model of Unmanned Driving Vehicle. Proceedings of the 8th World Congress on Intelligent Control and Automation.
- [5] Chen, H., Tian F., Cao, G., Lui, Y., Xie, N., Lin, T. (2014). Mechanism Design and Dynamic Simulation of High Maneuverable Mobile Platform for Wall-climbing Robot. *IEEE*.
- [6] Berkemeier, M. D. (2013). Clothoid Segments for Optimal Switching between Arcs during Low-Speed Ackerman Path Tracking with Rate-Limited Steering. *American Control Conference (ACC)*
- [7] *Shakey the Robot*. (s.f.). Obtenido de SRI International: <https://www.sri.com/hoi/shakey-the-robot/>
- [8] Nasa. (18 de marzo de 2010). *Soviet Union Lunar Rovers*. Obtenido de NASA: https://www.nasa.gov/mission_pages/LRO/multimedia/lroimages/lroc-20100318.html
- [9] Moravec, H. P. (1990). The Stanford Cart and the CMU Rover. *I. J. Cox et al. (eds.), Autonomous Robot Vehicles*.
- [10] Ortigoza R. S., A. M. (2012). Wheeled Mobile Robots: A Review. *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 10*.

- [11] Baturone, A. O. (2001). *ROBÓTICA Manipuladores y robots móviles*. Barcelona(España): Marcombo .
- [12] Federación Internacional de Robótica. (2019). Estos son los robots de servicio. *AADECA*, 38-40.
- [13] *Eventronic Systems*. (s.f.). Obtenido de EVClean series: <http://robotlimpiezaconductos.es/>
- [14] *iRobot* ®. (s.f.). Obtenido de Verro OWNER'S MANUAL Model 300: https://www.irobotweb.com/-/media/Files/Support/Home/Verro/iRobot-Verro-300-Manual.pdf?sc_lang=en
- [15] *UVD ROBOTS*. (s.f.). Obtenido de Reduce Hospital Acquired Infections with The UV Disinfection Robot: <http://www.uvd-robots.com/>
- [16] Mariscal-García, E. (2005). Planeación y seguimiento de trayectorias de robots móviles en una simulación de un ambiente real. *Ra Ximhai*, 177-200.
- [17] Muñoz, R. C. (2017). CONTROL Y GUIADO DE UN ROBOT MÓVIL.
- [18] King-Hele, D., & F.R.S. (2002). Erasmus Darwin's Improved Design for Steering Carriages--And Cars. *Journal of the Royal Society Interface*, 41-62
- [19] Larson, L. (2008). *Dreams to automobiles*. Xlibris, Corp.
- [20] Milliken, W. F., & Milliken, D. L. (1995). *Race Car Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers Inc.
- [21] C., J. L. (2013). Análisis de Máquinas de Estados Finitos. En J. L. C., *Sistema MultiAgentes y sus Aplicaciones en Automatizacion Industrial*. Venezuela
- [22] *MathWorks*. (s.f.). Obtenido de Simular diferentes modelos cinemáticos para robots móviles: <https://la.mathworks.com/help/robotics/examples/simulate-different-kinematic-models-for-mobile-robots.html>
- [23] SolidWorks. (s.f.). *MySolidWorks*. Obtenido de <https://my.solidworks.com>

