



UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DEL ECUADOR

FACULTAD DE CIENCIAS TÉCNICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

**ASISTENTE AUTÓNOMO PARA TRANSPORTAR EQUIPO BÁSICO DE
HERRAMIENTAS MECÁNICAS DEL TALLER “ELECTRICIDAD
AUTOMOTRIZ QUIMBIULCO”**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO EN
MECATRÓNICA**

WILLIAN DAVID QUIMBIULCO TUAREZ

DIRECTOR: ING. MARCELA ACUÑA MSC.

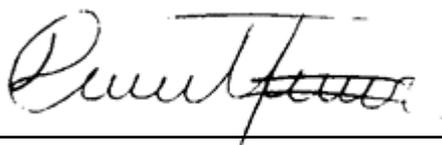
D. M. Quito,

2021

DECLARACIÓN

Yo Willian David Quimbiulco Tuarez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que se ha investigado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad Internacional del Ecuador, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por normativa institucional vigente.



Willian David Quimbiulco Tuarez

C.I. 172455027-0

CERTIFICACIÓN

El docente de la Escuela de Ingeniería Mecatrónica, Ingeniera Marcela Acuña. CERTIFICA QUE: El proyecto de investigación “Diseño de un asistente autónomo para transportar equipo básico de herramientas mecánicas del taller Electricidad Automotriz Quimbiulco”, fue desarrollado por: Willian David Quimbiulco Tuarez y ha sido debidamente revisado y está en condiciones de ser entregado para que siga lo dispuesto por la Escuela de Ingeniería Mecatrónica, correspondiente a la sustentación y defensa del mismo.



ING. MARCELA ACUÑA MSC.

DIRECTOR DE PROYECTO

Dedico a Dios por ayudarme a culminar la carrera y a mis padres por su apoyo incondicional.

Agradecimientos

Agradezco mucho la ayuda de mis padres por estar conmigo a lo largo de mi carrera universitaria, han sido una parte importante en mi formación. También quiero agradecer a mis maestros por el conocimiento impartido en cada una de las clases y a mis compañeros por estar conmigo durante este largo proceso. Finalmente, quiero agradecer a Dios por su ayuda incondicional y gracias a eso he logrado llegar a donde estoy.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1.	Tema	1
2.	Objetivos	1
2.1.	General	1
2.2.	Específicos	1
3.	Problema	2
4.	Hipótesis	2
5.	Estudio Teórico Preliminar	2
5.1.	Robots o Plataformas móviles	8
5.2.	Asistentes autónomos	11
5.3.	Mecanismos para seleccionar y transportar herramientas	13
6.	Necesidades y Requerimientos del asistente autónomo	15
7.	Dimensionamiento Geométrico	16
7.1.	Equipo básico de herramientas mecánicas	16
7.2.	Caracterización del entorno de trabajo del asistente autónomo	18
8.	Bosquejo del prototipo	19
9.	Selección de alternativas por el método de residuos ponderados	20
9.1.	Evaluación del peso específico de cada criterio	21
9.2.	Evaluación del peso específico de criterio PESO	21
9.3.	Evaluación del peso específico de criterio FACILIDAD DE ENSAM- BLAJE	22
9.4.	Evaluación del peso específico de criterio PRECIO	22
9.5.	Evaluación del peso específico de criterio ESPACIO PARA HERRA- MIENTAS	22
9.6.	Evaluación del peso específico de criterio FACILIDAD AL USUARIO	22
9.7.	Evaluación Final	23
10.	Especificaciones técnicas	23
11.	Diseño Mecánico	24
11.1.	Diseño de bandejas portaherramientas	24

11.2.	Diseño de robot móvil de tracción diferencial	42
11.3.	Selección de carrocería	56
11.4.	Diseño CAD	57
12.	Diseño Electrónico y de Control	58
12.1.	Esquema del circuito de control del asistente autónomo	58
12.2.	Selección de componentes	59
12.3.	Selección de placa y plataforma de desarrollo	62
12.4.	Dimensionamiento del banco de baterías	62
12.5.	Leds Indicadores	64
12.6.	Comunicación y Aplicación Móvil para Android	64
12.7.	Sistema de control para el asistente autónomo	66
13.	Construcción del asistente autónomo	69
13.1.	Construcción de la estructura hexagonal rotatoria	70
13.2.	Construcción del robot móvil	73
13.3.	Implementación de sistema electrónico	76
13.4.	Ensamble del asistente autónomo	78
14.	Pruebas de Funcionamiento	79
14.1.	Pruebas de Conectividad y Comunicación	79
14.2.	Pruebas de Movimiento de Estructura Hexagonal Rotatoria	81
14.3.	Pruebas de Desplazamiento del Asistente Autónomo	82
14.4.	Pruebas de Autonomía	83
14.5.	Pruebas del Sistema Completo	84
15.	Análisis de costos	85
16.	Conclusiones	86
17.	Recomendaciones	88

ÍNDICE DE FIGURAS

1. Prótesis mecánica de extremidad superior [1]	3
2. Máquina ajedrecista de Von Kempelen [2]	4
3. Brazo robótico de la Universidad de Standford [3]	5
4. Perseverance Rover, plataforma móvil de la NASA [4]	6
5. ASIMO, robot humanoide de Honda [5]	7
6. Robot bípedo DIGIT de Agility Robotics [6]	8
7. Robot japonés THESBOT-Dual de HiBot [7]	9
8. Robot acuático BionicFinWave de FESTO [8]	9
9. Dron de inspección AD2 [9]	10
10. Configuración de Ackerman para plataformas móviles con 4 ruedas [10]	10
11. Asistente para desinfectar hospitales Xenex LightStrike Germ-Zapping	12
12. Robot de Volkswagen para cargar vehículos eléctricos	13
13. Alternativa 1 - Máquina expendedora	14
14. Alternativa 2 - Robot cartesiano	14
15. Alternativa 3 - Estructura Hexagonal Rotatoria	15
16. Set de herramientas de accionamiento manual	17
17. Distribución de herramientas	18
18. Entorno de trabajo del asistente autónomo	19
19. Bosquejo del asistente autónomo	20
20. Partes de estructura de bandejas portaherramientas	25
21. Esquema Simplificado de Estructura Hexagonal Rotatoria	26
22. Análisis de Cargas en Viga Horizontal	26
23. Diagramas de Fuerza y Momento de Viga Horizontal	27
24. Análisis de Cargas en Viga Diagonal	29
25. Eje de Estructura Hexagonal con Reacciones y Cargas Soportadas	32
26. Diagramas de Fuerza, Momento y Torque de Eje de Estructura hexagonal	33
27. Factores de concentración de esfuerzos [11]	34
28. Eje de estructura hexagonal con cambios de sección	35

29. Vida de cojinetes según su aplicación [11]	38
30. Factores de aplicación de carga [11]	38
31. Dimensiones y clasificaciones básicas de carga para cojinetes de bolas [11]	39
32. Chumacera de piso de 10 mm	39
33. Dimensiones de Cuñas Recomendadas [11]	40
34. Motor DC AmpFlow E30-400-12-G [12]	42
35. Gráfica de Curva Característica de Motor AmpFlow E30-400-12-G [12]	42
36. Eje de transmisión	43
37. Cargas y Reacciones sobre el Eje de Transmisión en el plano YZ	44
38. Cargas y Reacciones sobre el Eje de Transmisión en el plano XZ	44
39. Diagramas de Fuerza y Momento del Eje de Transmisión con Respecto al Plano YZ	45
40. Diagramas de Fuerza y Momento del Eje de Transmisión con Respecto al Plano XZ	46
41. Diagramas de Torque y Momentos Totales del Eje de Transmisión	47
42. Chumacera de piso de 18 mm	49
43. Columnas de la estructura de la base	50
44. Estructura de la base con parámetros iniciales	51
45. Tensiones de Von Mises de Simulación de la Estructura Base	52
46. Desplazamientos de Simulación de la Estructura Base	52
47. Diagrama de cuerpo libre de plataforma	53
48. Velocidad vs Potencia para cadenas de rodillos [11]	55
49. Factor de servicio para cadenas de rodillos [13]	55
50. Factores de corrección de dientes [11]	56
51. Factor de torones múltiples [11]	56
52. Carrocería del Asistente Autónomo	57
53. Diseño final del asistente autónomo	58
54. Diagrama de bloques de funcionamiento del asistente autónomo	59
55. Esquema del circuito electrónico del asistente autónomo	61
56. Batería VRLA de 12 V 12 Ah	63

57. Interfaz de Aplicación Móvil	65
58. Diagrama de Flujo de App Móvil	66
59. Esquema de sistema en lazo abierto	67
60. Esquema de sistema en lazo cerrado	67
61. Final de Carrera	68
62. Algoritmo de evasión de obstáculos	69
63. Diagrama de Flujo de Asistente Autónomo	69
64. Diagrama de Bloques para Construcción de Estructura Hexagonal Rotatoria	70
65. Eje de Estructura Hexagonal Rotatoria	71
66. Estructura Hexagonal Rotatoria	72
67. Motor eléctrico con caja reductora [14]	72
68. Diagrama de Bloques para Construcción de Robot Móvil	73
69. Eje de Transmisión	74
70. Motor DC de asientos eléctricos	75
71. Motor con Base	75
72. Chasis con Adaptaciones	76
73. Diseño de PCB en software Proteus	77
74. Placa Circuito Electrónico Implementado	77
75. Diagrama de Bloques para Ensamble de Asistente Autónomo	78
76. Asistente Autónomo Ensamblado	79
77. Batería ECO POWER NS-40 [15]	84

ÍNDICE DE TABLAS

1.	Leyes de la robótica segun Asimov [16]	5
2.	Clasificación de la robótica por generaciones [17]	7
3.	Características generales de robots disponibles en el mercado	13
4.	Lista de Herramientas Seleccionadas	17
5.	Especificaciones de las herramientas más grandes	18
6.	Evaluación del peso específico de cada criterio	21
7.	Evaluación de criterio PESO	21
8.	Evaluación de criterio FACILIDAD DE ENSAMBLAJE	22
9.	Evaluación de criterio PRECIO	22
10.	Evaluación de criterio ESPACIO PARA HERRAMIENTAS	22
11.	Evaluación de criterio FACILIDAD AL USUARIO	23
12.	Evaluación Final con Resultados de Prioridad	23
13.	Especificaciones técnicas del asistente autónomo	23
14.	Características de las bandejas con las herramientas	24
15.	Datos técnicos para diseño de banda A46 [11]	30
16.	Resultados de la banda diseñada	32
17.	Cargas soportadas por el eje de estructura hexagonal rotatoria	32
18.	Esfuerzos, factores modificadores y diámetro inicial	35
19.	Resultados de diseño preliminar de eje de estructura hexagonal	35
20.	Torques y Momentos según las secciones del eje	36
21.	Resultados de diseño de eje de estructura hexagonal	36
22.	Secciones del eje con sus respectivos diámetros	37
23.	Longitudes de cuña	40
24.	Torques y Momentos según las secciones del eje de transmisión	47
25.	Resultados de diseño de eje de transmisión	48
26.	Secciones del eje de transmisión con diámetros seleccionados	48
27.	Valores y resultados para diseño de columna	51
28.	Coeficiente de resistencia a la rodadura [18]	53

29. Componentes con los números de pines necesarios	62
30. Características de placas Arduino [19]	62
31. Consumo de corriente de cada componente [20]	63
32. Resultados de las Pruebas de Conectividad y Comunicación	80
33. Resultados de las Pruebas de Movimiento de Estructura Hexagonal Rotatoria	81
34. Resultados de las Pruebas de Desplazamiento del Asistente Autónomo . . .	83
35. Resultados de las Pruebas de Autonomía	84
36. Resultados de las Pruebas del Sistema Completo	85
37. Costos Detallados del Asistente Autónomo	86

ASISTENTE AUTÓNOMO PARA TRANSPORTAR EQUIPO BÁSICO DE HERRAMIENTAS MECÁNICAS DEL TALLER “ELECTRICIDAD AUTOMOTRIZ QUIMBIULCO”

1. Tema

Diseño y construcción de un asistente autónomo para transportar equipo básico de herramientas mecánicas del taller “Electricidad Automotriz Quimbiulco”.

2. Objetivos

2.1. General

Diseñar y construir un asistente autónomo para transportar equipo básico de herramientas mecánicas del taller “Electricidad Automotriz Quimbiulco”.

2.2. Específicos

- Caracterizar las herramientas tipo que forman parte de un equipo básico en un taller mecánico.
- Investigar acerca de los tipos de mecanismos, actuadores utilizados en la industria para transportar equipo básico de herramientas mecánicas y los algoritmos para mover una plataforma de manera autónoma.
- Diseñar un sistema mecánico que transporte equipo básico de herramientas mecánicas caracterizadas anteriormente, además de la estructura base de la plataforma móvil.
- Dimensionar el banco de baterías y demás componentes eléctricos para el funcionamiento autónomo de la plataforma.
- Diseñar una aplicación móvil para Android que permita la programación y control de las variables de la plataforma como selección de las herramientas y ubicación del asistente.

- Construir el sistema resultante en un entorno específico.

3. Problema

Los talleres son áreas de trabajo comúnmente manual, donde se realizan trabajos de cerrajería, carpintería, mecánica, entre otros. En estos establecimientos es indispensable el uso de herramientas, las cuales al momento de realizar un trabajo se utilizan más de una y mientras una persona se encuentra trabajando suelen necesitar de un asistente para traerlas con el fin de que no se detenga el proceso. Para esto se requiere que el asistente conozca las herramientas, su ubicación dentro del taller y llevarlas a donde se le indique de manera rápida. Muchas veces se debe tomar un tiempo para dar estas indicaciones al asistente. Además, transportar estas herramientas es un proceso repetitivo y ocurre dentro de un área delimitada por lo que puede generar cansancio en el asistente por lo que al transportar las herramientas se toma un mayor tiempo en llevarlas de un lugar a otro, causando un retardo en los trabajos del taller.

4. Hipótesis

El asistente es capaz de transportar equipo básico de herramientas mecánicas de un taller de manera autónoma. Puede transportar equipo básico de herramientas para un taller automotriz con un total de 48 herramientas en su espacio interno gracias al diseño de compartimento para cada una de las herramientas. La selección de las herramientas es por medio de una aplicación móvil para Android. Finalmente, el asistente se desplaza por el área del taller de forma autónoma, es decir, evita obstáculos y encuentra el mejor recorrido para llegar a donde el usuario en el menor tiempo posible.

5. Estudio Teórico Preliminar

A lo largo de la historia se puede ver que el hombre construye máquinas para dar solución a un problema de su entorno. En esencia estas máquinas imitan un proceso realizado por una persona, las cuales se les ha otorgado el nombre de robots y en la actualidad pueden llegar a ser asistentes de un proceso en la industria. Al pasar el tiempo se ha mantenido la idea de imitar de mejor manera las acciones de una persona para implementarlas en una

máquina que lo realiza eficazmente. Desde la antigüedad se puede ver esto al implementar brazos mecánicos en las estatuas de los dioses de Egipto, y hoy en día se tiene brazos robóticos en los procesos de manufactura industrial, que parten de la idea de un brazo mecánico, pero se programan sus movimientos con el fin de para disminuir tiempos y costos de producción. El término robot aparece en el año 1920 por el dramaturgo checo Karel Capek en su obra llamada "R.U.R." (Los Robots Universales de Rossum). Este término de origen checo inicialmente era robota pero más adelante con la traducción al inglés se denominó robot lo cual hace referencia a servidumbre o trabajador forzado. [1]

Antes de tener esta idea, se empezó con varios diseños mecánicos con el fin de imitar a las personas o animales, se lo puede ver en las invenciones de Leonardo da Vinci con uno de los primeros humanoides que consistía en un caballero con armadura, capaz de agitar los brazos, mover la cabeza y abrir y cerrar la mandíbula. Más adelante a inicios del siglo XVI, Hans Bullmann fabricó una pequeña orquesta de autómatas. Poco a poco la construcción de estas máquinas fue mejorando ya que entre sus materiales no solo usaban madera, sino que se implementó el uso de hierro, cobre, y cuero. Más adelante aparece Jacques Vaucanson, conocido por construir un pato mecánico con más de 400 piezas móviles, además de que podía graznar, comer de la mano de otras personas y el día de lo se lo puede encontrar en el museo de autómatas de Grenoble. Al mismo tiempo Jean-Frédéric Leschot, especializado en crear prótesis, logra realizar un brazo izquierdo mecánico para la baronesa Strakham como se lo ve en la Figura 1.

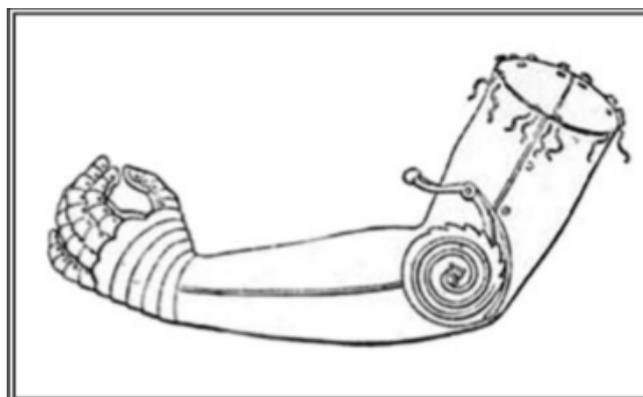


Figura 1. Prótesis mecánica de extremidad superior [1]

Entre estas importantes invenciones que han dado paso a la robótica se encuentra una máquina para jugar ajedrez por el ingeniero Johann Wolfgang Ritter von Kempelen en el año

de 1769. Como se lo puede observar en la Figura 2, dentro de la máquina se encontraba una persona que controlaba el movimiento, pero en ese tiempo fue un secreto pues esta máquina se hizo famosa tener una forma humana con movimientos mecánicos que logro vencer a personajes como Napoleón Bonaparte, emperador José II, Catalina II de Rusia, entre otras. [2]

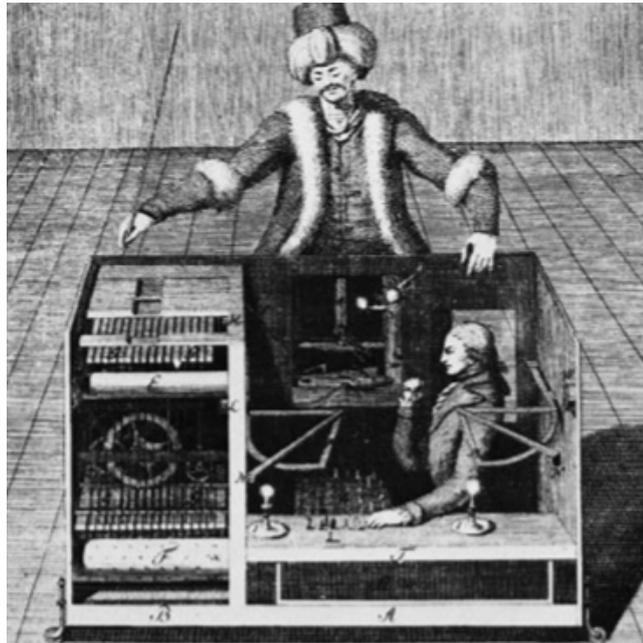


Figura 2. Máquina ajedrecista de Von Kempelen [2]

El desarrollo de inteligencia artificial fue importante para dar el siguiente paso, aunque no era la inteligencia que se conoce hoy en día, pero ya se encontraba en desarrollo los modelos matemáticos, algoritmos lógicos y las máquinas empezaban a programar sus movimientos, como ejemplo de esto es el diseño de un sistema de funcionamiento automático de los telares realizado por Joseph Marie Jacquard para la industria textil. Esto a su vez dio paso a IBM para empezar a construir sus primeras computadoras.

Posteriormente en 1898 Nicola Tesla presenta un barco teledirigido que fue presentado en el Madison Square Garden de Nueva York y se le considera como el primer robot. Después de esto las máquinas implementan circuitería electrónica en conjunto de programación básica que da paso a la robótica moderna. [1]

El termino robótica fue utilizado por primera vez por Isaac Asimov en su libro "I Robot" publicado en 1950. Asimov contribuyó con varias narraciones con respecto a robots, entre estas lo más importante y que se lo considera hasta el día de hoy son las Tres Leyes de la

Robótica detallados en la Tabla 1.

Tabla 1. Leyes de la robótica segun Asimov [16]

LEYES	DESCRIPCIÓN
1	Un robot no debe dañar a un ser humano ni, por su pasividad, dejar que un ser humano sufra daño.
2	Un robot debe obedecer las órdenes que le son dadas por un ser humano, excepto cuando estas órdenes están en oposición con la primera Ley.
3	Un robot debe proteger su propia existencia, hasta donde esta protección no esté en conflicto con la primera o segunda ley.

Además, Asimov añadió una cuarta ley o la numero cero, donde afirma que un robot no debe actuar simplemente para satisfacer intereses individuales, sino que sus acciones deben preservar el beneficio común de toda la humanidad. En general su literatura colaboró con lo que se conoce como robótica moderna. [16]

El desarrollo de la tecnología siguió avanzando con el uso de las computadoras para controlar actuadores y tener una retroalimentación. En 1946 aparecen los primeros robots en la industria para el traslado de maquinaria gracias a George Devol, quien diseña el primer robot programable para la comercialización. [21]

Más adelante en 1964 se abren laboratorios de investigación en inteligencia artificial en el MIT, el SRI (Stanford Research Institute). El SRI logro desarrollar el primer lenguaje de programación de robots y en 1971 realizan un brazo robótico con accionamiento eléctrico llamado Standford Arm, en la Figura 3. [3]

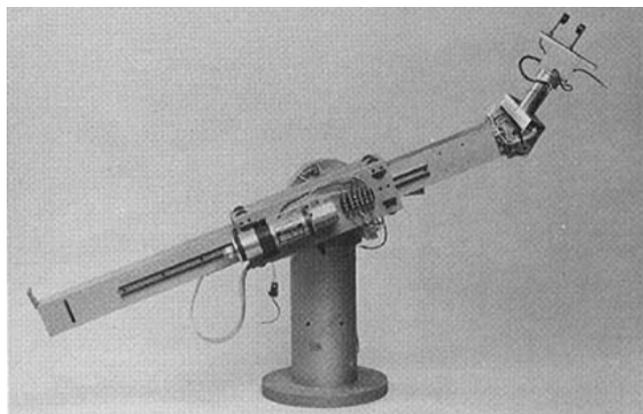


Figura 3. Brazo robótico de la Universidad de Standford [3]

La robótica continúa desarrollándose y aparecen las plataformas móviles. ELSIE(Electro-

Light-Sensitive Internal-External) fue el primer robot móvil construido en Inglaterra que contaba con sensores, realimentación, sistemas mecánicos e inteligencia básica. Luego el SRI presenta a SHACKLEY el cual contaba con características similares, pero se adicionó una cámara [3]. Además, SHACKLEY contaba con una computadora a bordo y otra que controlaba la plataforma por radio. En los setenta, la NASA inicio un programa para desarrollar plataformas móviles para la exploración, lo cual resulto en el MARS-ROVER que se observa en la Figura 4. Este es uno de los proyectos más conocidos hoy en día ya que las plataformas móviles continúan en desarrollo y son enviadas a Marte para explorar el terreno. Cuentan con alta tecnología en todos sus componentes eléctricos y mecánicos, que van acompañados de inteligencia artificial [4].

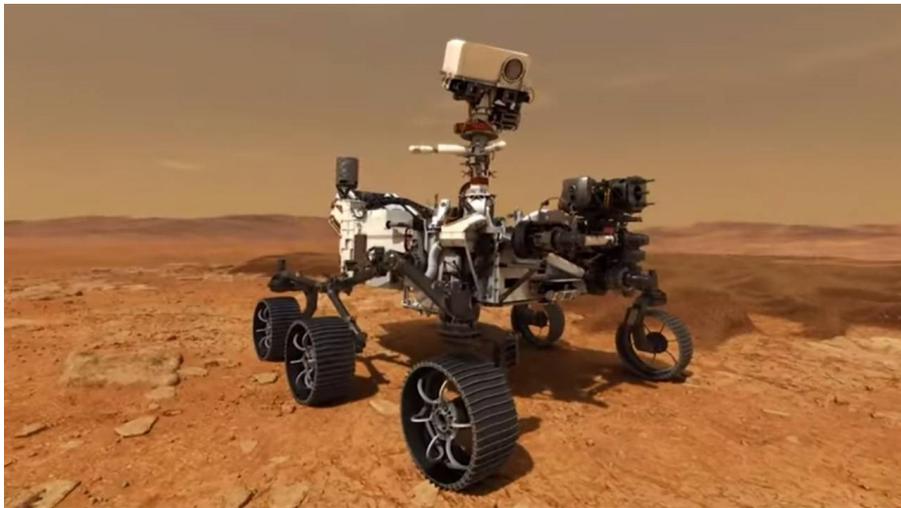


Figura 4. Perseverance Rover, plataforma móvil de la NASA [4]

Al mismo tiempo del desarrollo de las plataformas móviles comienzan los robots humanoides. Como su nombre lo indica son robots que tratan de asimilar al hombre desde su aspecto físico como en sus movimientos e interacción con su entorno. Hoy en día uno de uno de sus máximos ejemplares es ASIMO y Hubo los cuales son capaces de caminar, entablar conversaciones y realizar tareas simples.

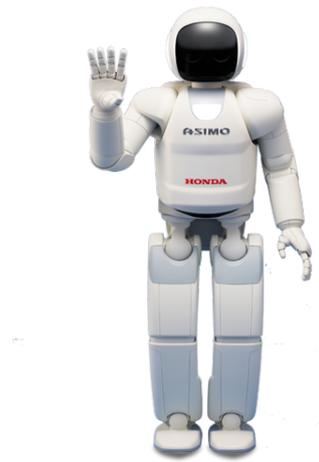


Figura 5. ASIMO, robot humanoide de Honda [5]

Finalmente la robótica puede ser clasificada en 5 generaciones detalladas en la Tabla 2 que ha sido clasificado por T. Michael Knasel. Según esta clasificación hoy en día se está desarrollando los robots con inteligencia artificial para las distintas áreas de la industria y hasta de uso doméstico. Así es como aparecen los asistentes autónomos, los cuales son robots capaces de interactuar con su entorno y tomar decisiones gracias a la inteligencia artificial, es así que pueden realizar acciones sin supervisión, comunicarse con las personas y como lo indica su nombre sirve de asistentes. Por lo que hoy en día son muy necesitados en tareas del hogar y hasta controlar un proceso de manufactura industrial [10].

Tabla 2. Clasificación de la robótica por generaciones [17]

Generación (año)	Nombre	Tipo de Control	Grado de Movilidad	Usos frecuentes
1 (1982)	Pick and Place	Finales de carrera, aprendizaje	Nulo	Manipulación, servicio a máquinas
2 (1984)	Servo	Servocontrol, trayectoria continua, programa condicional	Desplazamiento por una guía	Soldadura, pintura
3 (1989)	Ensamblado	Servos de precisión, sensores de vision y tacto	Movilidad AGV	Montajes, desbarbados
4 (2000)	Móvil	Sensores inteligentes	Patas, ruedas	Construcción, mantenimiento
5 (2010)	Especiales	Control por inteligencia artificial	Caminadores, saltadores	Militar, espacial, Industria 4.0

5.1. Robots o Plataformas móviles

La característica principal que tiene un robot móvil es la capacidad para desplazarse en un espacio físico por lo que brinda una mayor utilidad. Su movilidad puede ser llevada a cabo de distintas maneras detalladas a continuación [10].

Robots andantes

De igual manera que los robots rodantes estos se desplazan por el suelo, pero sin utilizar ruedas. Su movilidad es una imitación de lo que hace una persona al caminar por lo que comúnmente tienen 2 patas, pero también pueden tener un mayor número de patas en el que imitan a animales. Dos factores importantes a considerar en su diseño es la estabilidad y el equilibrio, por lo que se encuentran un poco limitados en ciertas situaciones. Sin embargo, hoy en día se han vuelto muy utilizados con el objetivo de obtener robots cada vez mas parecidos al hombre.

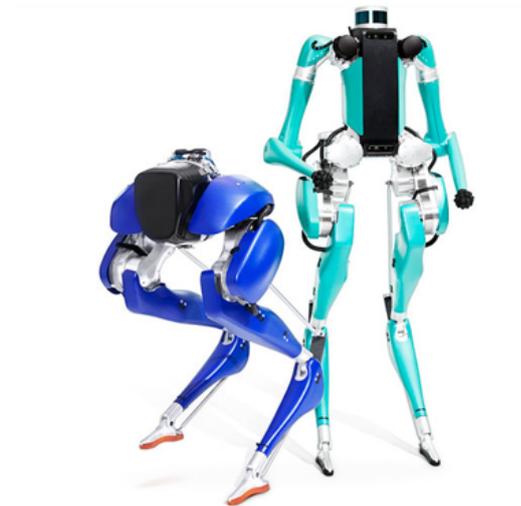


Figura 6. Robot bípedo DIGIT de Agility Robotics [6]

Robots reptadores

Como su nombre lo indica son robots que se arrastran. Aunque a simple vista no sean muy útiles, se los está desarrollando por su flexibilidad, versatilidad y adaptabilidad.



Figura 7. Robot japonés THESBOT-Dual de HiBot [7]

Robots nadadores

Su medio en el que se transportan es el agua, por lo que su uso es muy limitado. Actualmente se los utiliza para la exploración a lugares donde una persona no puede llegar, son de difícil acceso o presenta un riesgo en especial.

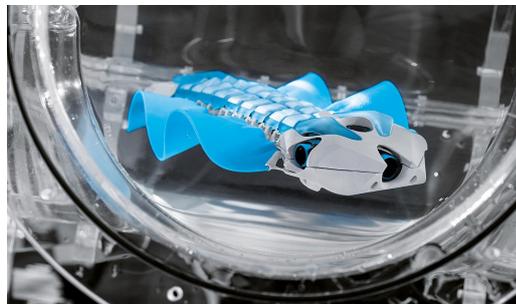


Figura 8. Robot acuático BionicFinWave de FESTO [8]

Robots voladores

Hoy en día existe un auge en estos robots donde su aplicación más conocida son los drones. Su medio en el que se desenvuelven es el aire y su desplazamiento es gracias a las hélices. Cada vez se presentan más usos gracias al control remoto y visualización en tiempo real que cuentan estos dispositivos por lo que tiene aplicaciones desde entretenimiento hasta aplicaciones industriales.



Figura 9. Dron de inspección AD2 [9]

Robots rodantes

Este tipo de robots son los más utilizados ya que su medio en el que se transporta es terrestre utilizando ruedas. Su funcionalidad puede variar dependiendo del número de llantas que de manera general va de 2 a 4 llantas. La más común es la configuración de Ackerman que se utiliza en la mayoría de los automóviles o plataformas donde se tiene 2 ruedas de tracción y 2 de dirección, además de que la rueda interior tiene un ángulo de giro más agudo que la exterior [22]. También se tiene la tracción diferencial que consta de 2 ruedas principales con control independiente de cada una, por lo que en cada una se tiene la dirección y tracción de la plataforma, que es el que se utiliza para el presente proyecto. Adicionalmente existen otros casos particulares donde tienen más de 4 llantas o el desplazamiento se lo realiza con el uso de cadenas para terrenos especiales.

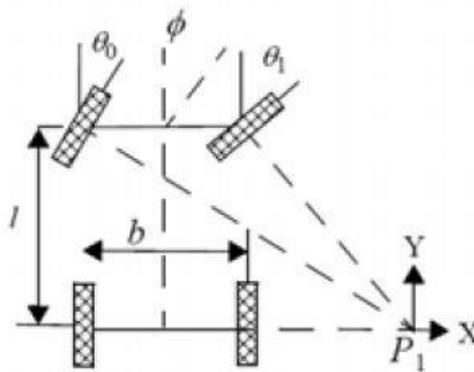


Figura 10. Configuración de Ackerman para plataformas móviles con 4 ruedas [10]

En la actualidad se puede encontrar diseños no solo de los tipos mencionados anteriormente, sino uniendo algunos de estos donde usa 2 o 3 de estos tipos. De manera general su funcionamiento siempre depende motores eléctricos para mover ya sea las ruedas, hélices o mecanismos especiales, pero principalmente se debe identificar bien el terreno donde va a trabajar el robot. Hoy en día se tiene distintas plataformas móviles y en la Tabla 3 se

detallan algunas.

5.2. Asistentes autónomos

En la actualidad el desarrollo de la inteligencia artificial esta en auge y cada vez es más común utilizarla en diversas aplicaciones, por lo que siguiente paso de los robots móviles ha sido la implementación de inteligencia artificial. Al trabajar en conjunto la plataforma móvil e inteligencia artificial aparece un nuevo termino denominado asistente robótico o asistente autónomo. El asistente autónomo es una máquina o robot el cual ha sido programado para trabajar en un área en específica, pero al mencionar robot programado no quiere decir que el robot va a realizar un proceso repetitivo como lo haría una plataforma móvil normalmente, más bien trata de interactuar con su entorno al momento de realizar un trabajo dado que tiene la capacidad para tomar decisiones basadas en eventos anteriores y puede reaccionar de manera adecuada ante sucesos inéditos. Esto ha ido incrementando poco a poco en distintas áreas de la vida cotidiana.

Tras la pandemia que ha ocurrido a nivel mundial se ha podido ver el protagonismo de estos asistentes principalmente en los hospitales. En Wuhan, la empresa CloudMinds fue una de las primeras en contribuir con estos robots para los hospitales para colaborar con la detección de síntomas en pacientes. Además, se ha implementado asistentes de enfermería para entregar comida y medicamentos a los pacientes, como es el caso del robot Peanut que tiene el objetivo de reducir el contacto entre las personas y ayudar al personal médico en los hospitales. En Quito a pesar de no tener estos asistentes que hacen contacto con los posibles contagiados se tiene 3 robots para desinfectar los hospitales, Este robot llamado Xenex LightStrike Germ-Zapping tiene la capacidad de emitir luz ultravioleta germicida. El personal asegura que este asistente logra reducir el tiempo de desinfección de los quirófanos puesto que antes se demoraba un tiempo aproximado de 1 hora, gracias al asistente se logra en 10 minutos. Estos son algunos de los asistentes que se tiene trabajando en hospitales.



Figura 11. Asistente para desinfectar hospitales Xenex LightStrike Germ-Zapping

A pesar de que el enfoque tecnológico esta direccionada a otra área, se tiene otros asistentes para diferentes áreas de trabajo. Aquí se puede encontrar robots que ayudan con las tareas hogar y no solamente con robots móviles, sino que ahora se tiene hasta asistentes virtuales que pueden llegar a tener el control de una casa. Estos asistentes también han llegado a la industria automovilística. Debido a que se está empezando a implementar lo que son los vehículos eléctricos se han creado cargadores para este tipo de medios de transporte. Entre ellos se encuentra el robot de la empresa Volkswagen, en la Figura 12. Esta máquina es capaz de desplazarse por el parqueadero hasta llegar al vehículo que necesite ser cargado. Esto se lo realiza por medio del usuario y una aplicación del celular para indicar que el vehículo necesita ser cargado y el robot adquiere los datos para toma la mejor decisión y cumplir con su trabajo satisfactoriamente. Cabe mencionar que esta máquina no tiene intervención humana por lo que es un asistente totalmente autónomo.



Figura 12. Robot de Volkswagen para cargar vehículos eléctricos

Así como estas máquinas, se tiene muchas más aplicadas en varias áreas de la industria mencionadas en la Tabla 3, donde su funcionamiento se lo puede resumir en asistentes que pueden tomar decisiones por su cuenta, mediante el análisis de los datos de sensores para posteriormente tomar la acción más óptima.

Tabla 3. Características generales de robots disponibles en el mercado

NOMBRE	VELOCIDAD [cm/s]	AUTONOMÍA [h]	TAMAÑO [cm]	APLICACIÓN
Perseveranse Rover	0.2	-	300x270x220	Plataforma móvil de investigación
Pepper	83.3	12	120x42.5	Asistente autónomo para distintas aplicaciones
Roxo FEDEX	444	24	-	Plataforma móvil para entregas de paquetes a domicilio
TUG T2	76	10	120x57x86	Asistente autónomo para hospitales

5.3. Mecanismos para seleccionar y transportar herramientas

Máquina expendedora

Se toma en cuenta el mecanismo que utilizan las máquinas expendedoras para realizar su función principal, teniendo en cuenta que con algunas modificaciones se podría aplicar para el transporte de las herramientas. A continuación, en la Figura 13, se puede observar la máquina expendedora en la cual se puede tomar el mecanismo útil.

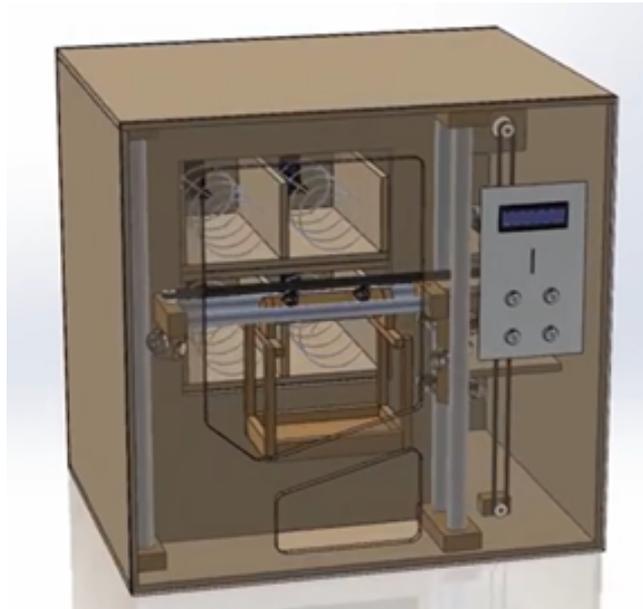


Figura 13. Alternativa 1 - Máquina expendedora

Robot Cartesiano

Los robots cartesianos son máquinas CNC donde su posicionamiento en el espacio se lleva a cabo a través de articulaciones lineales, y su nombre es debido a que su desplazamiento es lineal o vertical a lo largo de los 3 ejes cartesianos X, Y, Z. Un ejemplo de este sistema es el Farmbot que se puede observar en la Figura 14. La ventaja de este sistema es que tiene una gran adaptabilidad para diversas funciones como tomar herramientas de unas coordenadas y llevarlas a una posición predeterminada, lo cual es la idea que se tiene para el presente trabajo.

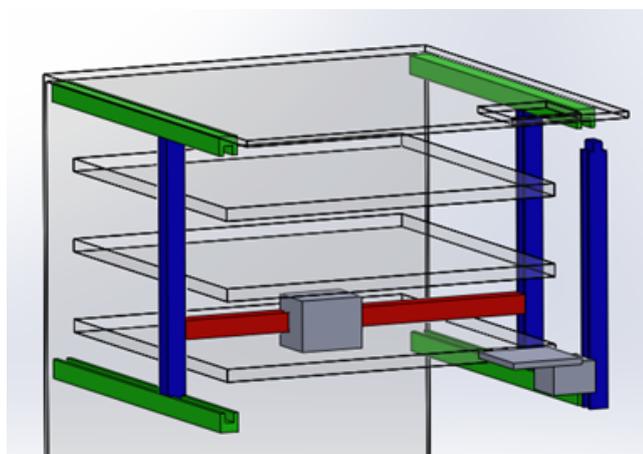


Figura 14. Alternativa 2 - Robot cartesiano

Estructura Hexagonal Rotatoria

Se plantea una idea propia que se visualiza en la Figura 15 , esta consiste en una estructura hexagonal donde en cada lado de la estructura se coloca una bandeja con las distintas herramientas. Esta estructura rota de tal forma que se pueden seleccionar las herramientas que se necesitan agrupándolas en conjuntos con características similares.

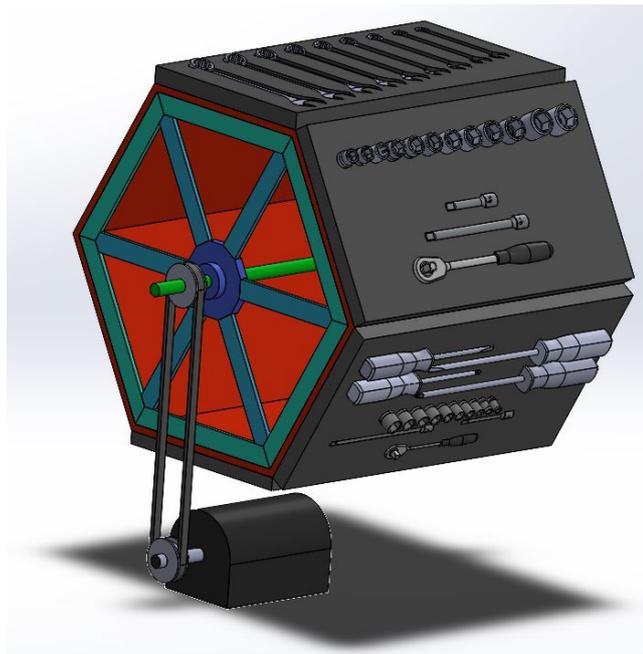


Figura 15. Alternativa 3 - Estructura Hexagonal Rotatoria

6. Necesidades y Requerimientos del asistente autónomo

Previo al diseño del asistente autónomo se determina las necesidades y requerimientos mínimos que debe cumplir el asistente para desenvolverse dentro del taller mecánico, por lo que a continuación se plantea las siguientes características.

- Debe desplazarse libremente dentro del taller, es decir, sin necesidad de estar conectado a una base que limite su alcance y con los componentes necesarios que garanticen su movilidad tomando en cuenta la velocidad a la que se desplaza y el control por el usuario.
- La fuente de alimentación, que en este caso es una batería o banco de baterías, debe ser con el voltaje que se trabaja en el taller.

- El asistente funciona durante 1 día de trabajo.
- El control del asistente es fácil de utilizar para los operarios en el taller.
- Se debe tener una capacidad para transportar las herramientas más comunes utilizadas dentro del taller.
- El diseño debe tomar en cuenta el entorno de trabajo ya que pueden presentarse golpes o choques con objetos del taller y debe ser de un material que sea resistente.
- Para el tamaño del asistente se toma en cuenta el entorno de trabajo para que se desplace sin ocupar mucho espacio dentro del taller, similar a los carros porta herramientas.

7. Dimensionamiento Geométrico

7.1. Equipo básico de herramientas mecánicas

En un taller las herramientas son objetos indispensables para realizar los trabajos requeridos, su función principal es facilitar el trabajo en tareas mecánicas. Las herramientas pueden ser clasificadas en 2 grandes grupos.

Herramientas de accionamiento no manual o con motor

Como lo indica su nombre, son herramientas que necesitan de una fuente de energía externa como un motor. Además, se las utiliza para procesos donde se necesita una mayor fuerza por lo que son de un mayor tamaño. Se pueden dividir en:

- Eléctricas.
- Neumáticas.
- Hidráulicas.
- Combustión interna.

En este grupo se encuentran las fresadoras, tornos, prensa hidráulica, taladros, entre otros.

Herramientas de accionamiento manual o sin motor

Son aquellas en las que se emplea la fuerza muscular del hombre, pueden ser consideradas como el equipo básico que debe tener un taller puesto que, a diferencia de las de accionamiento no manual, no ocupan mucho espacio y son de fácil manipulación. Hoy en día existe una gran diversidad de herramientas manuales, como las de la Figura 16, por lo que en el presente trabajo se limita a las siguientes herramientas de la Tabla 4, consideradas como las más importantes.

Tabla 4. Lista de Herramientas Seleccionadas

	NOMBRE	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN
1	Llaves de vaso	25	1/4(4,5,5,5,6,7,8,9,10,11,12,13,14)[mm] 3/8(10,11,12,13,14,15,16,17,18,20,21,22,24)[mm]
2	Llaves	9	10,11,12,13,14,15,16,17,18 [mm]
3	Trinquetes	6	1/4 y 3/8 con aumento largo y corto cada uno
4	Destornilladores	4	Phillips (Largo,corto) y Flat (Largo,corto)
5	Alicates	4	Universal,Ajustable,de corte diagonal,de boca larga



Figura 16. Set de herramientas de accionamiento manual

Una vez seleccionado un grupo de herramientas, se toman las herramientas más grandes para establecer las dimensiones del espacio que van a ocupar las herramientas, las cuales se detallan en la Tabla 5.

Tabla 5. Especificaciones de las herramientas más grandes

NOMBRE	LARGO [mm]	ANCHO [mm]	MASA [g]
Llave de vaso 24	52	35	86
Llave 18	220	38.7	138
Trinquete 3/8	250	40	275
Destornillador Phillips	200	35	65
Alicate Universal	200	60	327

Además, se realiza la distribución de herramientas de las 6 bandejas, de las cuales 4 ya son definidas para la localización de las herramientas, como se observa en la Figura 17. De las 2 bandejas faltantes una de ellas es utilizada para la posición inicial por lo que no va a tener herramientas, mientras que la otra bandeja sirve para que el usuario pueda almacenar artículos extra, como por ejemplo franelas.

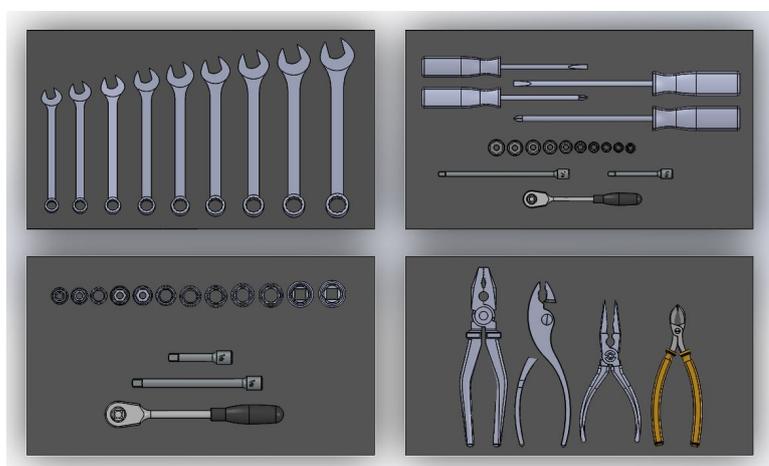


Figura 17. Distribución de herramientas

7.2. Caracterización del entorno de trabajo del asistente autónomo

El espacio de trabajo donde se va a desarrollar el asistente autónomo es el taller automotriz “Electricidad Automotriz Quimbiulco” que tiene una extensión aproximada de 200 m², con un suelo de cemento mayormente plano sin inclinaciones distribuido como en la Figura 18.

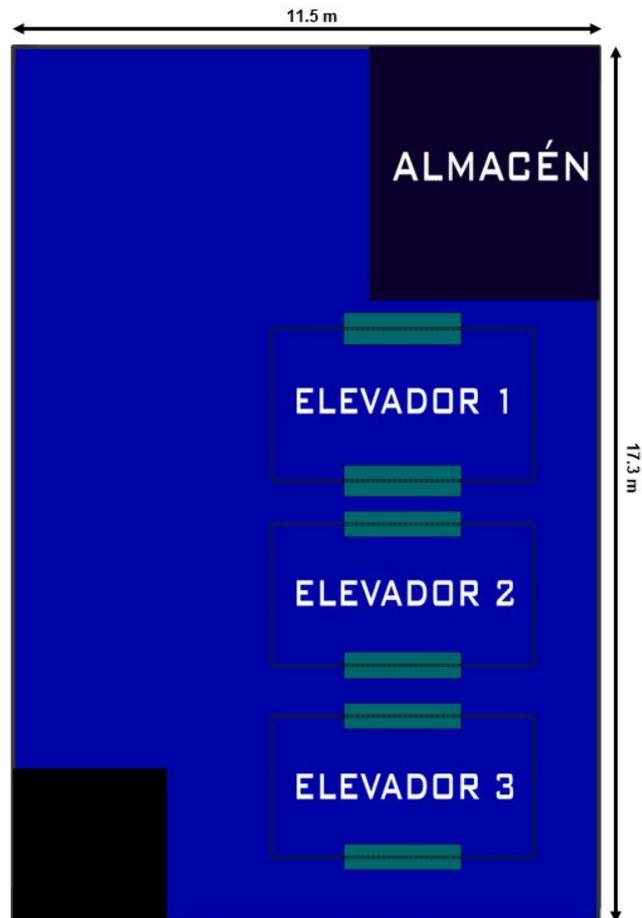


Figura 18. Entorno de trabajo del asistente autónomo

8. Bosquejo del prototipo

La máquina consta de dos partes importantes como es la plataforma para la movilidad del asistente autónomo y la estructura y mecanismo para la selección y almacenamiento de las herramientas. Primero, para la selección y almacenamiento de las herramientas se tiene la estructura hexagonal rotatoria, como lo indica su nombre. La forma principal de la estructura es un hexágono regular que cuenta con un eje en el centro de tal forma que pueda girar posicionando los 6 distintos lados de la estructura. En cada lado se coloca una bandeja con las herramientas indicadas anteriormente en la Figura 17. Por optimización de espacio el movimiento no se lo realiza con un motor acoplado directamente al eje, sino que por medio de transmisión de bandas y poleas se tiene un motor paralelo al eje de rotación, el cual genera el movimiento de la estructura y posiciona la bandeja de herramientas que se requiera. Finalmente, se tiene un mecanismo tipo pistón, cuando la bandeja llega a la posición calibrada se activa para mantener fija la estructura, el motor principal solo se encarga

del movimiento más no de mantener la posición fija.

Para la movilidad del asistente autónomo se cuenta con una configuración de tracción diferencial. La tracción diferencial cuenta con dos ruedas para tracción y dirección en cada una de ellas, además de una o dos ruedas de apoyo para brindar estabilidad, en este proyecto la configuración utilizada trabaja con dos ruedas del lado izquierdo controladas por un motor que transmite el movimiento por medio de cadenas y piñones, y de igual manera se tiene para las dos ruedas del lado derecho. Es decir, se tiene un robot móvil de tracción diferencial con dos ruedas independientes sin necesidad de una rueda extra para estabilización.

Se realiza un bosquejo en el software CAD SolidWorks que se presenta en la Figura 19.

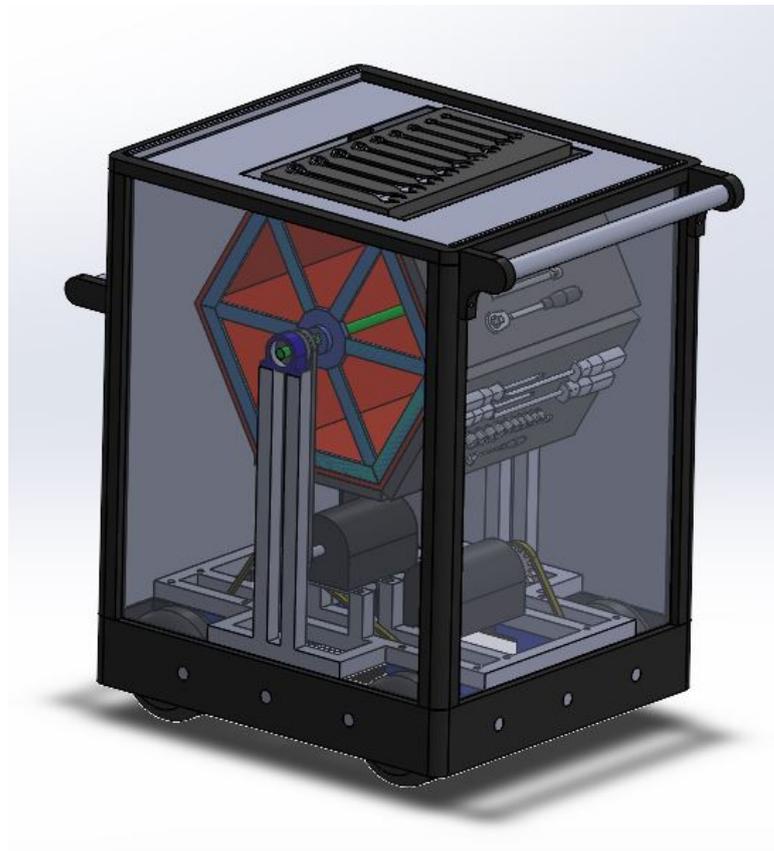


Figura 19. Bosquejo del asistente autónomo

9. Selección de alternativas por el método de residuos ponderados

Para seleccionar el mejor mecanismo se utiliza el método de residuos ponderados, por lo que se plantean los criterios de valoración que se indican a continuación.

- **Facilidad de ensamblaje:** se analiza el número de componentes que necesita, no

solo las piezas fijas y móviles sino también los actuadores necesarios y el sistema de control.

- **Precio moderado:** se analiza la facilidad de adquisición de los componentes con el precio respectivo y al tener un precio más bajo reduce el costo de construcción del mismo.
- **Espacio para herramientas:** se analiza que todas las herramientas seleccionadas puedan adaptarse al espacio de trabajo del mecanismo, que su organización sea sencilla y modificable.
- **Peso:** Ya que es un mecanismo que forma parte de un robot móvil un menor peso ayuda a una mejor movilidad.
- **Facilidad al usuario:** Se busca que las herramientas sean entregadas con facilidad al usuario y que sea de forma eficiente.

9.1. Evaluación del peso específico de cada criterio

Peso >Facilidad de ensamblaje = Precio >Espacio para herramientas >Facilidad al usuario

Tabla 6. Evaluación del peso específico de cada criterio

Criterio	Peso	F.Ensamblaje	Precio	E.Herramientas	F.Usuario	$\sum +1$	Ponderación
Peso	-	1	1	1	1	5	0.333
F.Ensamblaje	0	-	1	1	1	3.5	0.233
Precio	0	0	-	1	1	3.5	0.233
E.Herramientas	0	0	0	-	1	2	0.133
F.Usuario	0	0	0	0	-	1	0.067
					Suma	15	1

9.2. Evaluación del peso específico de criterio PESO

Alternativa 1 >Alternativa 3 >Alternativa 2

Tabla 7. Evaluación de criterio PESO

Criterio	Alternativa 1	Alternativa 3	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 1	-	1	1	3	0.5
Alternativa 3	0	-	1	2	0.333
Alternativa 2	0	0	-	1	0.167
				Suma	6
					1

9.3. Evaluación del peso específico de criterio FACILIDAD DE ENSAMBLAJE

Alternativa 3 > Alternativa 1 > Alternativa 2

Tabla 8. Evaluación de criterio FACILIDAD DE ENSAMBLAJE

Criterio	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 3	-	1	1	3	0.5
Alternativa 1	0	-	1	2	0.333
Alternativa 2	0	0	-	1	0.167
			Suma	6	1

9.4. Evaluación del peso específico de criterio PRECIO

Alternativa 3 > Alternativa 1 > Alternativa 2

Tabla 9. Evaluación de criterio PRECIO

Criterio	Alternativa 3	Alternativa 1	Alternativa 2	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 3	-	1	1	3	0.5
Alternativa 1	0	-	1	2	0.333
Alternativa 2	0	0	-	1	0.167
			Suma	6	1

9.5. Evaluación del peso específico de criterio ESPACIO PARA HERRAMIENTAS

Alternativa 3 = Alternativa 2 > Alternativa 1

Tabla 10. Evaluación de criterio ESPACIO PARA HERRAMIENTAS

Criterio	Alternativa 3	Alternativa 2	Alternativa 1	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 3	-	0.5	1	2.5	0.417
Alternativa 2	0.5	-	1	2.5	0.417
Alternativa 1	0	0	-	1	0.167
			Suma	6	1

9.6. Evaluación del peso específico de criterio FACILIDAD AL USUARIO

Alternativa 3 > Alternativa 2 = Alternativa 1

Tabla 11. Evaluación de criterio FACILIDAD AL USUARIO

Criterio	Alternativa 3	Alternativa 2	Alternativa 1	$\sum +1$	Ponderación
Alternativa 3	-	1	1	3	0.5
Alternativa 2	0	-	0.5	1.5	0.25
Alternativa 1	0	0.5	-	1.5	0.25
			Suma	6	1

9.7. Evaluación Final

Tabla 12. Evaluación Final con Resultados de Prioridad

Conclusión	Peso	F.Ensamblaje	Precio	E.Herramientas	F.Usuario	\sum	Prioridad
Alternativa 1	0.167	0.078	0.078	0.022	0.017	0.361	2
Alternativa 2	0.056	0.039	0.039	0.056	0.017	0.206	3
Alternativa 3	0.111	0.117	0.117	0.056	0.033	0.433	1

Se puede ver que la mejor solución es la alternativa 3, seguida de la alternativa 1 y finalmente la alternativa 2. Por lo tanto, el mecanismo a utilizar para el movimiento y distribución de las herramientas es la estructura hexagonal rotatoria.

10. Especificaciones técnicas

Tomando en cuenta las secciones anteriores se realiza la Tabla 13, que contiene las especificaciones técnicas que debe tener el prototipo para cumplir con su objetivo. Cabe aclarar que son datos aproximados que van a variar con el diseño que se realiza posteriormente.

Tabla 13. Especificaciones técnicas del asistente autónomo

Alimentación	110 V AC
Autonomía	1 Día de Trabajo (Máximo 10 horas continuas)
Capacidad: Número de Herramientas	48
Conectividad	Inalámbrica
Configuración de Robot Móvil Control	Tracción Diferencial
Dimensiones	750x515x997 mm [23]
Movilidad	Autónoma
Resistente a Golpes	Si
Tipo de Herramientas	Herramientas de Accionamiento Manual
Velocidad de Desplazamiento Máximo	70 cm/s
Velocidad de Rotación Máxima	10 rpm

11. Diseño Mecánico

El diseño mecánico se lo ha dividido en 2 secciones. La primera parte consta de las herramientas y la estructura que porta las herramientas, junto con el mecanismo y motor necesario para realizar el movimiento. Por otro lado, se tiene el diseño de la plataforma móvil, esta consta de la estructura general del proyecto, junto con el mecanismo hexagonal y componentes necesarios para la movilidad del asistente autónomo. De manera general, el procedimiento realizado está basado en el diseño a fatiga de “Diseño en Ingeniería Mecánica” de Shigley, en su mayoría las ecuaciones, tablas y recomendaciones son tomadas de dicha referencia.

11.1. Diseño de bandejas portaherramientas

Con base en la sección anterior se tiene la distribución de las herramientas en las distintas bandejas, la Tabla 14 que contiene la masa de cada una de ellas con el fin de tomar la de mayor masa para todos los lados de la estructura y así diseñar tomando en cuenta el caso más crítico. Cabe recalcar que no se toma en cuenta la bandeja 5 y 6 ya que la 5 no presenta una masa considerable y la 6 solamente es la posición inicial.

Tabla 14. Características de las bandejas con las herramientas

Bandeja	Masa [kg]	Fuerza [kN]
1	3.975	38.995
2	4.243	41.624
3	4.497	44.145
4	4.452	43.674

Además, para entenderlo mejor, se indican a continuación las piezas a diseñar y seleccionar y también se puede ver algunas de ellas en la Figura 20.

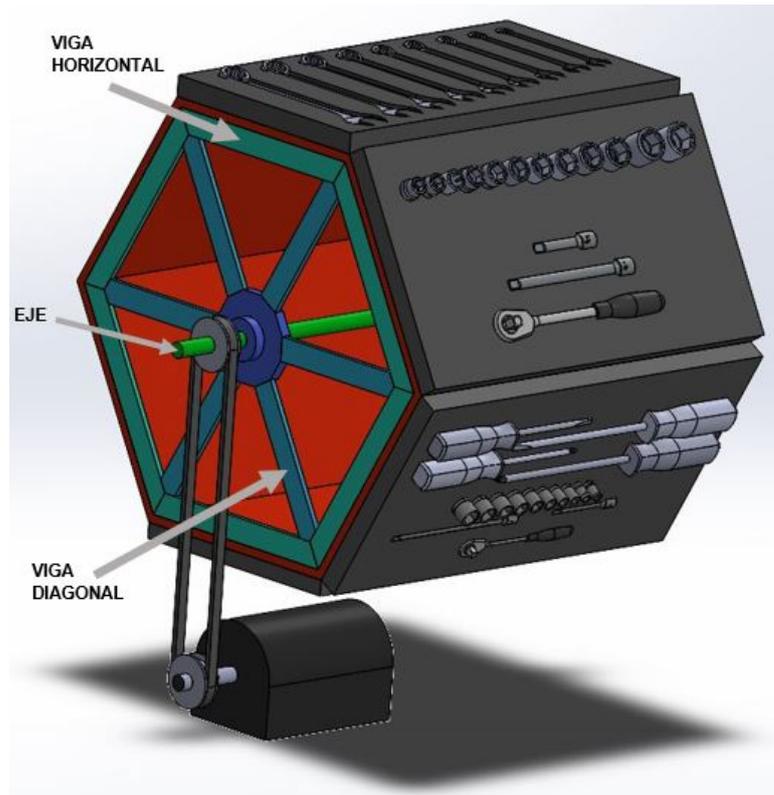


Figura 20. Partes de estructura de bandejas portaherramientas

Diseño de estructura hexagonal rotatoria

Para la estructura que soporta las bandejas portaherramientas se realiza el análisis de una de ellas para el caso más crítico que es la bandeja 3 por lo que va a cumplir satisfactoriamente para los demás lados de la estructura hexagonal, además de que se tiene una mayor seguridad en el diseño. Para entenderlo de mejor manera se tiene la Figura 21, donde se indican las fuerzas y soportes que intervienen en el análisis de uno de los lados de la estructura hexagonal, teniendo en cuenta que se debe realizar el diseño de la viga horizontal como diagonal, señalada en la Figura 20. Cabe mencionar que la carga soportada por la bandeja se divide para la mitad, debido a que las bandejas se sujetan en una viga frontal y posterior.

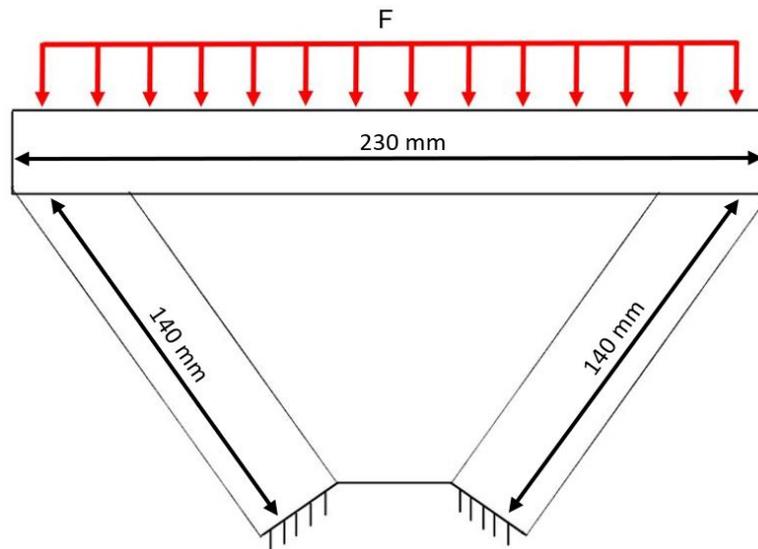


Figura 21. Esquema Simplificado de Estructura Hexagonal Rotatoria

Diseño a fatiga de la viga horizontal

Como se pudo ver en la Figura 21, la carga correspondiente al peso de las herramientas y otros componentes se la representa como una carga distribuida a lo largo de la viga y los puntos donde se junta con la siguiente viga se los puede considerar como soportes fijos. Para analizar el caso más crítico se toma como una carga puntual en el centro de la viga, es decir, a la mitad de la longitud de la viga. Con base en el diseño a fatiga de vigas se obtienen los diagramas de fuerza y momento mostrados en la Figura 22, la cual ayuda para obtener el esfuerzo, posteriormente se verifica que la viga soporta la carga con un factor de seguridad mayor a 2.

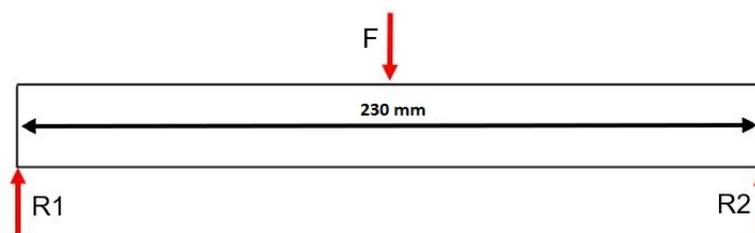


Figura 22. Análisis de Cargas en Viga Horizontal

Reacciones y diagramas de fuerza y momento

Para empezar, se encuentran las reacciones de los soportes mediante sumatoria de fuerza y de momentos.

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + R_2 = 22,0725 \text{ N}$$

$$\sum M_y = 0$$

$$R_2 \cdot L - F \cdot L/2 = 0$$

$$0,23R_2 = 22,0725 \cdot 0,115$$

$$R_1 = 11,0363 \text{ N}$$

$$R_2 = 11,0363 \text{ N}$$

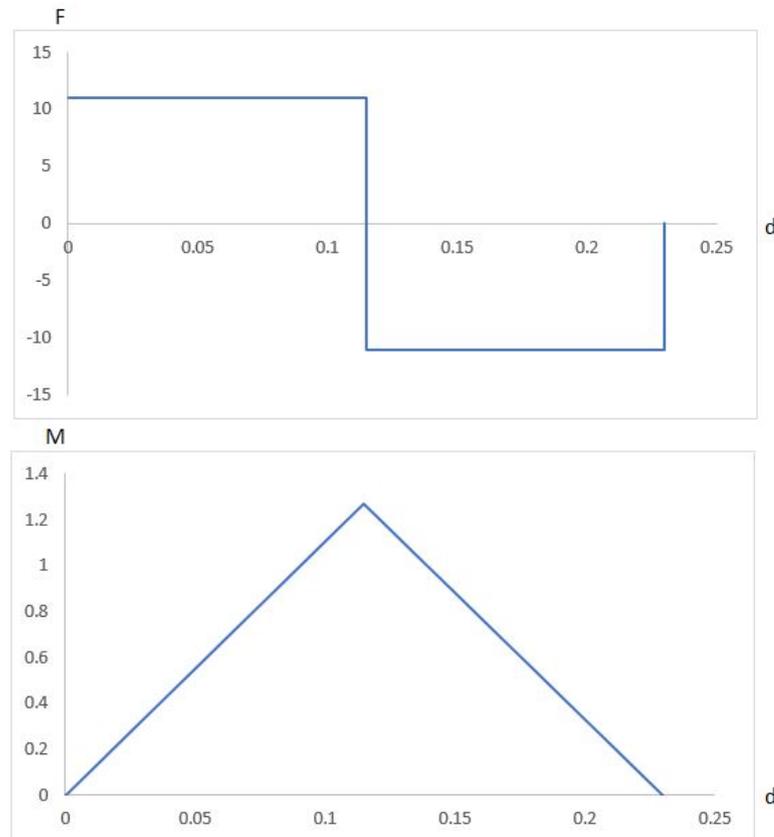


Figura 23. Diagramas de Fuerza y Momento de Viga Horizontal

Donde el momento máximo según la Figura 23 es de 1.2692 N.

Luego se selecciona una varilla cuadrada de 5 mm de acero ASTM A36 de ADELCA, la cual brinda la información necesaria para el diseño, entre ellas sus propiedades mecánicas [24].

Con estos datos se encuentra el esfuerzo que debe soportar la varilla y si cumple con el factor de seguridad de 2 para satisfacer el diseño a fatiga [11].

Primero, se encuentra el esfuerzo que soporta la viga con (1), donde M es el momento presente en la viga, c es la distancia del centro de masa al punto de análisis, que para esta

viga es la mitad de uno de los lados de la geometría cuadrada de la viga, y finalmente I es la inercia con respecto al área transversal.

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad (1)$$

$$I = 5,2083 \cdot 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$c = 0,0025 \text{ m}$$

$$\sigma = 60,9201 \text{ MPa}$$

Luego se debe encontrar el esfuerzo límite de resistencia a la fatiga (S_e), que es afectado por varios factores modificadores que dependen del material, manufactura, entorno, diseño y el esfuerzo del material que toma en cuenta las propiedades mecánicas del fabricante.

$$S_e = K_a \cdot K_b \cdot K_c \cdot K_d \cdot K_e \cdot K_f \cdot S'_e \quad (2)$$

$$S'_e = 0,506 \cdot S_{ut} \quad (3)$$

$$K_a = a \cdot S_{ut}^b \quad (4)$$

$$K_a = 4,51 \cdot 400^{-0,265} = 0,9218$$

$$K_b = 1,24 \cdot d^{-0,107} \quad (5)$$

$$d = \text{diámetro equivalente} = 4,04 \text{ mm}$$

$$K_b = 1,24 \cdot 4,04^{-0,107} = 1,0438 \approx 1$$

$$K_c = K_d = K_e = K_f = 1$$

$$S_e = 0,9218 \cdot 202,4 = 186,5697 \text{ MPa}$$

Una vez encontrado este valor se comprueba que cumple con el factor de seguridad indicado anteriormente diseñado a vida finita, lo cual se tiene de la siguiente manera.

$$n = \frac{S_f}{\sigma} \quad (6)$$

$$S_f = a_1 \cdot N^{b_1} \quad (7)$$

$$a_1 = \frac{(0,9 \cdot S_{ut})^2}{S_e} \quad (8)$$

$$b_1 = -\frac{1}{3} \cdot \log \left(\frac{0,9 \cdot S_{ut}}{S_e} \right) \quad (9)$$

$$S_f = 694,6465 \cdot 1000000^{-0,0952} = 149,8606 \text{ MPa}$$

$$n = \frac{149,8606}{60,9201} = 2,46$$

Por lo tanto se puede comprobar que la varilla cuadrada seleccionada satisface para la aplicación.

Diseño a fatiga de la viga diagonal

Como se observa en la Figura 24, se tienen 2 vigas, para su análisis solo se diseña una de ellas ya que tienen las mismas dimensiones y soportan la misma carga. Cabe recalcar que como la carga R1 y R2 son iguales se las denota por R para el diseño de la viga.

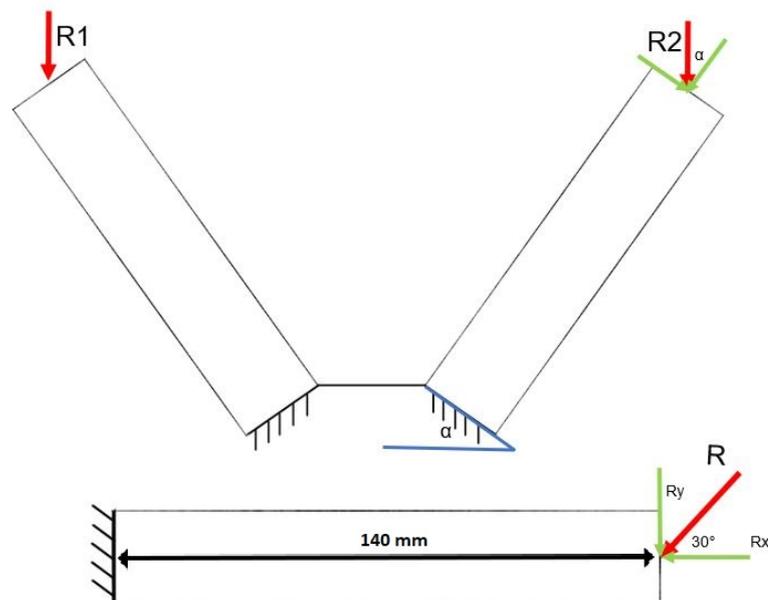


Figura 24. Análisis de Cargas en Viga Diagonal

Se selecciona la misma varilla cuadrada de la viga anterior y con los datos conocidos se encuentra el esfuerzo que debe soportar la varilla pero en esta ocasión se tiene 2 tipos de esfuerzos que se calculan con (1) y (12), y se obtiene un esfuerzo total que es debido a que en la fuerza existe una inclinación. Además, para el momento se conoce que es la fuerza

por el brazo de palanca que en este caso es la fuerza R por longitud de la viga.

$$R_x = R \cdot \cos \alpha \quad (10)$$

$$R_y = R \cdot \sin \alpha \quad (11)$$

$$R_x = 11,2993 \text{ N}$$

$$R_y = 6,5237 \text{ N}$$

$$\sigma_2 = \frac{R_x}{A} \quad (12)$$

$$M = 0,9133 \text{ Nm}$$

$$\sigma_1 = \frac{0,9133 \cdot 0,0025}{I} = 43,8389 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{11,2993}{0,005 \cdot 0,005} = 0,4520 \text{ MPa}$$

$$\sigma_T = \sigma_1 + \sigma_2 = 44,2909 \text{ MPa}$$

Ya que los demás valores son los mismos de la viga, debido a que se utiliza la misma varilla, se verifica que el factor de seguridad mayor sea a 2 y se concluye que la viga diseñada cumple satisfactoriamente.

$$n = \frac{149,8606}{44,2909} = 3,3836$$

Diseño y Selección de bandas y poleas

Primero se asume la relación de transmisión a utilizar que es de 1 a 2 por lo que las poleas son de 2" y 4", luego se selecciona una banda y los datos técnicos se toma de [11] (Tabla 15).

Tabla 15. Datos técnicos para diseño de banda A46 [11]

Parámetro	Valor
K_s	1.1
n_d	1
H_{tab}	0.47
K_1	0.7666
K_2	0.9
K_b	220
K_c	0.561

Luego se debe encontrar la tensión inicial de la banda (F_i) y verificar que el factor de seguridad (n_{fs}) sea uno o ligeramente mayor a uno por lo que se trabaja con (13) y (14).

$$F_i = \frac{F_1 + F_2}{2} - F_c \quad (13)$$

$$n_{fs} = \frac{H_a \cdot N_b}{H \cdot K_s} \quad (14)$$

Para obtener estos valores primero se deben encontrar ciertos parámetros de distancias, ángulos, potencia, tensiones, entre otros factores que se los indica en las siguientes ecuaciones. Además de que ya se conocen los valores de diámetro de polea mayor y menor, distancias, velocidad y potencia del motor.

$$L_p = 2C + \pi(D + d)/2 + (D - d)^2/(4) \quad (15)$$

$$\theta_d = \pi - 2 \arcsin \left(\frac{D - d}{2} \right) \quad (16)$$

$$H_a = K_1 \cdot K_2 \cdot H_{tab} \quad (17)$$

$$H_d = K_s \cdot n_d \cdot H \quad (18)$$

$$F_c = K_c \left(\frac{V}{1000} \right)^2 \quad (19)$$

$$\Delta F = \frac{63025 H_d / N_d}{n(d/2)} \quad (20)$$

$$e_1 = e^{0,5123 \cdot \theta} \quad (21)$$

$$F_1 = F_c + \frac{\Delta F \cdot e_1}{e_1 - 1} \quad (22)$$

$$F_2 = F_1 - \Delta F \quad (23)$$

$$N_b = \frac{H_d}{H_a} \quad (24)$$

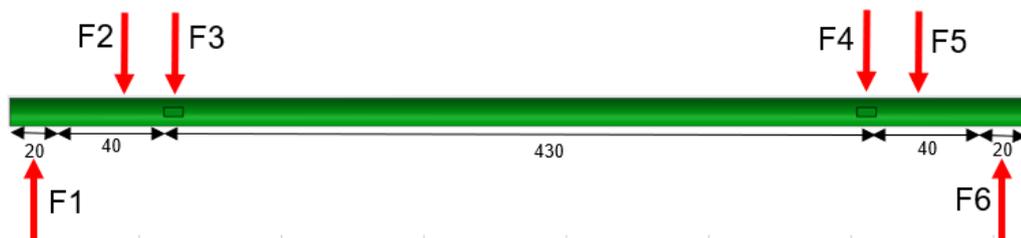
Tomando en cuenta cada una de las ecuaciones anteriores se encuentran los valores respectivos que se tienen en la Tabla 16 y así se verifica que la banda seleccionada satisface la aplicación requerida.

Tabla 16. Resultados de la banda diseñada

Variable	Valor
L_p	37.1860 in
θ	171.7157
H_a	0.3242 HP
H_d	0.0575 HP
F_c	$1.538 \cdot 10^{-5}$ lbf
ΔF	2.0437
F_1	2.6047 lbf
F_2	0.5610 lbf
F_i	1.5829 lbf
n_{fs}	1

Diseño a fatiga del eje de la estructura hexagonal rotatoria

Para empezar con el diseño del eje se determinan las cargas que va a soportar y, de manera preliminar, se plantea un eje con un mismo diámetro en toda su longitud que lo presenta en la Figura 25. Más adelante se diseña con diámetros distintos para cada una de las secciones del eje. Cabe recalcar que el material seleccionado para el eje es acero AISI 1018 con un esfuerzo último a la tensión (S_{ut}) de 64 Ksi.

**Figura 25.** Eje de Estructura Hexagonal con Reacciones y Cargas Soportadas

Basado en la Figura 25 se describe cada una de las cargas en la Tabla 17.

Tabla 17. Cargas soportadas por el eje de estructura hexagonal rotatoria

Carga	Valor [N]	Descripción
F1 y F6		Reacciones que generan las chumaceras como soportes
F2	16.2097	Tensión de la banda
F3 = F4	161.865	Peso de la estructura hexagonal con todos sus componentes
F5	16.1036	Tensión de la banda

Reacciones y Diagramas de fuerza y momento del eje de la estructura hexagonal

Como se realizó anteriormente en el diseño de vigas, se deben encontrar las reacciones

de los soportes que para este caso corresponden a F_1 y F_6 . Posteriormente se grafican los diagramas de fuerza, momento y torque del eje de estructura hexagonal en la Figura 26.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_1 + F_6 = 356,0433 \text{ N}$$

$$\sum M_y = 0$$

$$F_6 \cdot L - F_2 \cdot 0,042 - F_3 \cdot 0,075 - F_4 \cdot 0,475 - F_5 \cdot 0,508 = 0$$

$$F_1 = 178,3588 \text{ N}$$

$$F_6 = 177,6845 \text{ N}$$

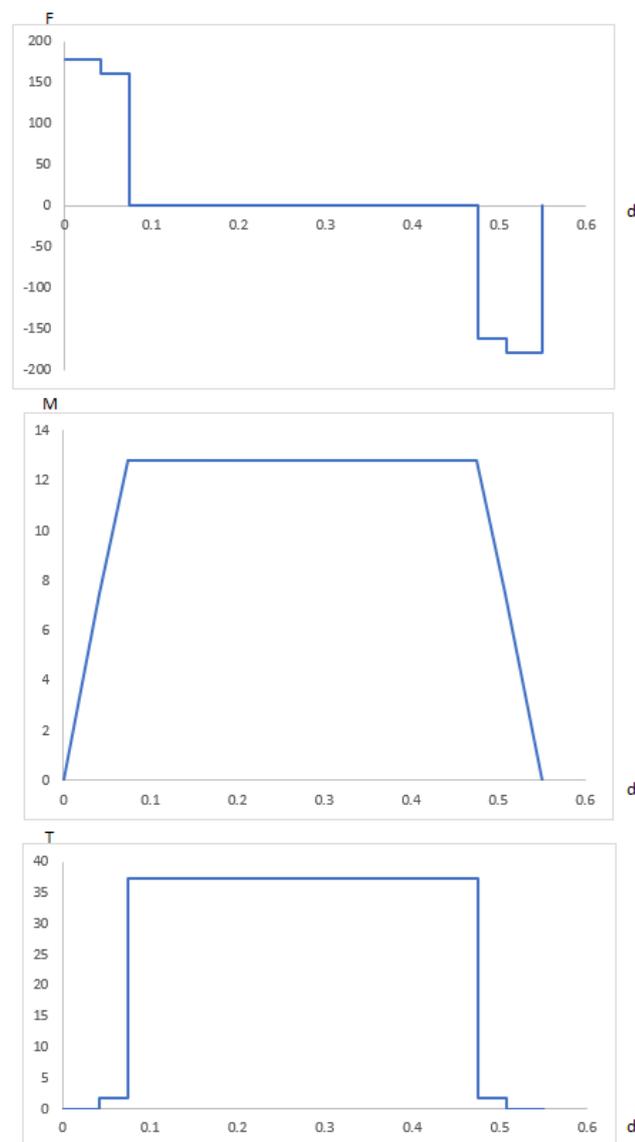


Figura 26. Diagramas de Fuerza, Momento y Torque de Eje de Estructura hexagonal

Con base en los diagramas se toman los siguientes valores de torques y momentos medios y alternantes.

$$M_a = 113,4388 \text{ lbf in}$$

$$M_m = 0 \text{ lbf in}$$

$$T_a = 0 \text{ lbf in}$$

$$T_m = 329,5035 \text{ lbf in}$$

Diseño preliminar del eje de la estructura hexagonal

En el diseño preliminar se toma en cuenta la carga máxima que soporta el eje para obtener solamente un diámetro para toda la longitud por medio de (25). Luego se debe aproximar el diámetro a uno comercial por lo que se verifica que su factor de seguridad sea mayor o igual a 2 haciendo uso de (26), por lo que para hacer uso de estas ecuaciones se debe encontrar los concentradores de esfuerzo por medio de (27) y (28).

$$d = \left(\frac{16n}{\pi} \left(\frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{0,5} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{0,5} \right) \right)^{1/3} \quad (25)$$

$$\frac{1}{n} = \left(\frac{16}{\pi d^3} \right) \left(\frac{1}{S_e} [4(K_f M_a)^2 + 3(K_{fs} T_a)^2]^{0,5} + \frac{1}{S_{ut}} [4(K_f M_m)^2 + 3(K_{fs} T_m)^2]^{0,5} \right) \quad (26)$$

$$K_f = 1 + q(K_f - 1) \quad (27)$$

$$K_{fs} = 1 + q_{cort}(K_{fs} - 1) \quad (28)$$

Al realizar un primer diseño se deben asumir ciertos valores para los concentradores de esfuerzo por lo que se utiliza la Figura 27, donde primero se debe encontrar el esfuerzo límite de resistencia a la fatiga (S_e) con (2), la cual que depende de factores modificadores de los cuales se tienen tablas y fórmulas tomadas de la referencia que se indica al inicio del diseño mecánico [11]. En la Tabla 18, se presentan los factores tomados además del esfuerzo S_e y el diámetro inicial.

	Flexión	Torsión	Axial
Filete de hombro: agudo ($r/d = 0.02$)	2.7	2.2	3.0
Filete de hombro: bien redondeado ($r/d = 0.1$)	1.7	1.5	1.9
Cuñero fresado ($r/d = 0.02$)	2.2	3.0	—
Cuñero de patín o trapezoidal	1.7	—	—
Ranura para anillo de retención	5.0	3.0	5.0

Figura 27. Factores de concentración de esfuerzos [11]

Tabla 18. Esfuerzos, factores modificadores y diámetro inicial

Variable	Valor
S'_e	32 Ksi
K_a	0.8969
K_b	1
K_c	1
K_d	1
K_e	0.814
K_f	1
S_e	23.3615 Ksi
d	0.7852 in

Con base en el cálculo anterior se trabaja con un diámetro de 0.625 in, en el cual se verifica el factor de seguridad y cumple satisfactoriamente (Tabla 19).

Tabla 19. Resultados de diseño preliminar de eje de estructura hexagonal

Variable	Valor
K_t	2.14
K_{ts}	3
K_f	1
K_{fs}	1
K_b	0.9243
S_e	21.5939 Ksi
n	2.4679 in

Diseño Final del eje de la estructura hexagonal

Con el diseño anterior como referencia y tomando las medidas de la Figura 25, se calcula un eje con secciones de diámetros diferentes indicado en la Figura 28.

**Figura 28.** Eje de estructura hexagonal con cambios de sección

Se utilizan los diagramas de la Figura 26 para obtener los torques y momentos medios y alternantes correspondientes a las secciones, se lo resume en la Tabla 20.

Tabla 20. Torques y Momentos según las secciones del eje

SECCIÓN	Tm	Ma	Ta	Mm	
1	0	1.7807	0	0	Nm
	0	15.7602	0	0	lbf in
2	15	7.5208	0	0	Nm
	132.7610	66.5645	0	0	lbf in
3	15	12.8169	0	0	Nm
	132.7610	113.4388	0	0	lbf in
4	15	7.4751	0	0	Nm
	132.7610	66.1598	0	0	lbf in
5	0	1.7798	0	0	Nm
	0	15.7524	0	0	lbf in

El proceso a realizar es el mismo que en el diseño preliminar, pero en esta ocasión se debe repetir lo mismo para cada una de las secciones definidas, es decir, se encuentra un diámetro que se aproxima a un valor comercial o que sea un número entero, lo que facilita el proceso de fabricación del eje. Luego se verifica que cumpla con un factor de seguridad igual o mayor a 1.5 por medio del cálculo de varios parámetros que se encuentran descritos en la Tabla 21. Cabe recalcar que para la sección 3 no es necesario volver a realizar el cálculo porque se utiliza el diámetro del diseño anterior.

Tabla 21. Resultados de diseño de eje de estructura hexagonal

Variables	Sección 1	Sección 2	Sección 4	Sección 5
d	0.3087 in	0.6162 in	0.6156 in	0.3086 in
d seleccionado	0.3937 in	0.5 in	0.5 in	0.3937 in
r/d	0.0508	0.04	0.04	0.0508
D/d	1.5875	1.25	1.25	1.27
K_t	2.05	1.9	1.9	1.88
K_{ts}	1.7	1.6	1.6	1.7
K_f	1.5775	1.495	1.495	1.484
K_{fs}	1.427	1.366	1.366	1.427
K_b	0.9712	0.9467	0.9467	0.9712
Se	23.3615	22.1156	22.1156	23.3612
n	5.6295	1.7648	1.7718	5.9871

Finalmente, se tienen los diámetros finales para cada una de las secciones del eje en la Tabla 22.

Tabla 22. Secciones del eje con sus respectivos diámetros

SECCIÓN	DIÁMETRO [in]
1	0.3937
2	1/2
3	5/8
4	1/2
5	0.3937

Selección de Rodamientos

Para el dimensionamiento de los rodamientos se debe encontrar el coeficiente de carga por medio de las ecuaciones (29) y (30).

$$C_{10} = F_D \left[\frac{x_D}{x_0 + (\theta - x_0)(1 - R_D)^{1/b}} \right]^{1/a} \quad (29)$$

Donde x_D es la relación entre la vida de diseño y la vida nominal de un rodamiento, L_D vida deseada en horas, n_D la velocidad deseada en rpm, L_R la vida nominal en horas, n_R la velocidad nominal en rpm, F_D la carga de diseño y R_D la confiabilidad, en este caso de 0.99.

$$x_D = \frac{60 L_D n_D}{60 L_R n_R} \quad (30)$$

Además, se tienen parámetros definidos por la distribución Weibull como es x_0 , b y θ .

$$x_0 = 0,2$$

$$\theta - x_0 = 4,439$$

$$b = 1,483$$

Otros valores a considerar dependen del rodamiento en si y recomendaciones del fabricante según el tipo de carga (Figura 29) y tipo de aplicación por tiempo de vida (Figura 30).

Tipo de aplicación	Vida, kh
Instrumentos y aparatos de uso poco frecuente	Hasta 0.5
Motores de aeronaves	0.5-2
Máquinas de operación corta o intermitente, donde la interrupción del servicio resulta de poca importancia	4-8
Máquinas de servicio intermitente donde una operación confiable es de gran importancia	8-14
Máquinas para servicio de 8 h, que no siempre se usan completamente	14-20
Máquinas para servicio de 8 h, que se utilizan plenamente	20-30
Máquinas para servicio continuo las 24 h	50-60
Máquinas para un servicio continuo de 24 h, donde la confiabilidad es de suma importancia	100-200

Figura 29. Vida de cojinetes según su aplicación [11]

Tipo de aplicación	Factor de carga
Engranajes de precisión	1.0-1.1
Engranajes comerciales	1.1-1.3
Aplicaciones con sellos deficientes en los cojinetes	1.2
Maquinaria sin impactos	1.0-1.2
Maquinaria con impactos ligeros	1.2-1.5
Maquinaria con impactos moderados	1.5-3.0

Figura 30. Factores de aplicación de carga [11]

Para cojinetes de bolas: $a = 3$

Recomendación del fabricante: $60 L_R n_R = 10^6$

Factor de carga: $F_c = 1,3$

Vida: $L_D = 5$ kh

Confiabilidad: $R_D = 0,99$

Con los datos obtenidos se encuentra el coeficiente de carga a partir de la carga máxima que soporta el rodamiento.

$$F_D = 231,8664 \text{ N}$$

$$X_D = 6$$

$$C_{10} = 0,6997 \text{ kN}$$

Diámetro interior, mm		DE, mm	Radio del entalle, mm		Diámetro del hombro, mm		Clasificaciones de carga, kN			
mm		mm	Ancho, mm	mm	d_s	d_H	Ranura profunda		Contacto angular	
							C_{10}	C_0	C_{10}	C_0
10	30	9	0.6	12.5	27	5.07	2.24	4.94	2.12	
12	32	10	0.6	14.5	28	6.89	3.10	7.02	3.05	
15	35	11	0.6	17.5	31	7.80	3.55	8.06	3.65	
17	40	12	0.6	19.5	34	9.56	4.50	9.95	4.75	
20	47	14	1.0	25	41	12.7	6.20	13.3	6.55	
25	52	15	1.0	30	47	14.0	6.95	14.8	7.65	
30	62	16	1.0	35	55	19.5	10.0	20.3	11.0	
35	72	17	1.0	41	65	25.5	13.7	27.0	15.0	
40	80	18	1.0	46	72	30.7	16.6	31.9	18.6	
45	85	19	1.0	52	77	33.2	18.6	35.8	21.2	
50	90	20	1.0	56	82	35.1	19.6	37.7	22.8	
55	100	21	1.5	63	90	43.6	25.0	46.2	28.5	
60	110	22	1.5	70	99	47.5	28.0	55.9	35.5	
65	120	23	1.5	74	109	55.9	34.0	63.7	41.5	
70	125	24	1.5	79	114	61.8	37.5	68.9	45.5	
75	130	25	1.5	86	119	66.3	40.5	71.5	49.0	
80	140	26	2.0	93	127	70.2	45.0	80.6	55.0	
85	150	28	2.0	99	136	83.2	53.0	90.4	63.0	
90	160	30	2.0	104	146	95.6	62.0	106	73.5	
95	170	32	2.0	110	156	108	69.5	121	85.0	

Figura 31. Dimensiones y clasificaciones básicas de carga para cojinetes de bolas [11]

Finalmente con este valor y el diámetro de la sección encontrado anteriormente se verifica que el rodamiento de 10 mm es el adecuado por medio de la Figura 31. Por lo tanto, se utiliza la chumacera de la Figura 32. Este elemento no es más que un rodamiento montado sobre una base el cual es muy utilizado para ejes de rotación además de que permite la lubricación lo cual hace ideal para la aplicación requerida.



Figura 32. Chumacera de piso de 10 mm

Diseño de chavetas

Para el diseño de cuñas existen tablas con recomendaciones de las medidas de alto y espesor según el eje en el que se va a utilizar, en este caso se utiliza la información de la

Figura 33.

Diámetro del eje		Tamaño de la cuña		Profundidad del cuñero
Más de	Hasta (inclusive)	w	h	
$\frac{5}{16}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{3}{32}$	$\frac{3}{32}$	$\frac{3}{64}$
$\frac{7}{16}$	$\frac{9}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{3}{32}$	$\frac{3}{64}$
		$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$
$\frac{9}{16}$	$\frac{7}{8}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{1}{8}$	$\frac{1}{16}$
		$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{32}$
$\frac{7}{8}$	$1\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{3}{16}$	$\frac{3}{32}$
		$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
$1\frac{1}{4}$	$1\frac{3}{8}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
		$\frac{5}{16}$	$\frac{5}{16}$	$\frac{5}{32}$
$1\frac{3}{8}$	$1\frac{3}{4}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{1}{4}$	$\frac{1}{8}$
		$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{16}$
$1\frac{3}{4}$	$2\frac{1}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{3}{8}$	$\frac{3}{16}$
		$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
$2\frac{1}{4}$	$2\frac{3}{4}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{7}{16}$	$\frac{7}{32}$
		$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{8}$	$\frac{5}{16}$
$2\frac{3}{4}$	$3\frac{1}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$
		$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{4}$	$\frac{3}{8}$

Figura 33. Dimensiones de Cuñas Recomendadas [11]

El dato faltante, que es la longitud de la cuña, se lo calcula por medio de (31) y (32), que representan la resistencia al cortante y por aplastamiento respectivamente, además de tomar en cuenta la carga que va a soportar que se conoce de la sección anterior en el diseño del eje.

$$\frac{S_{sy}}{n} = \frac{F}{tL} \quad (31)$$

$$\frac{S_y}{n} = \frac{F}{tL/2} \quad (32)$$

$$S_{sy} = 0,577 \cdot S_y \quad (33)$$

Para la cuña se utiliza un acero A36 que tiene una resistencia a la fluencia $S_y = 250$ MPa y se obtiene la longitud de la cuña con un factor de seguridad de 2.5 así se obtiene los resultados de la Tabla 23.

Tabla 23. Longitudes de cuña

Resistencia	Longitud(L)[mm]
Cortante	12.89
Aplastamiento	14.88

Por lo que la cuña diseñada tiene las dimensiones de 15x5x5 mm.

Diseño y selección de motor

Una vez diseñado y seleccionado cada uno de los componentes de la estructura hexagonal rotacional, se tiene la masa de cada una de estas piezas y el peso aproximado total que es de 200 N. Esta es la carga que el motor debe mover, por lo que con base en este valor se debe encontrar la potencia, torque y velocidad por medio de (34) y (35). Además, para la velocidad del motor se asume un valor aproximado de 10 rpm que es seleccionado por medio de simulaciones del movimiento de la estructura rotacional.

$$T = F \cdot d \quad (34)$$

$$P = T \cdot w \quad (35)$$

Por lo tanto se obtiene los siguientes valores.

$$w = 10 \text{ rpm} = 1,047 \text{ rad/s}$$

$$d = 0,23 \text{ m}$$

$$T = 46 \text{ Nm}$$

$$P = 48,171 \text{ Watts}$$

Se debe tomar en cuenta que al utilizar la transmisión por bandas y poleas se estableció una relación de 2 a 1 por lo que los datos para el motor corresponden a la mitad de los datos obtenidos.

Finalmente, tras una investigación de los motores DC disponibles en el mercado, se selecciona la marca AmpFlow al tener una gran diversidad de motores eléctricos y dentro de ellos el motor DC E30-400-12-G que se observa en la Figura 34.

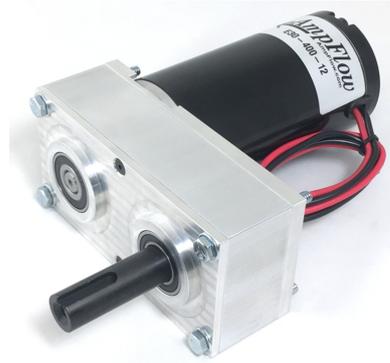


Figura 34. Motor DC AmpFlow E30-400-12-G [12]

El fabricante brinda las características del motor observadas en la Figura 35, por lo que se comprueba que cumple con los requerimientos diseñados previamente. [12]

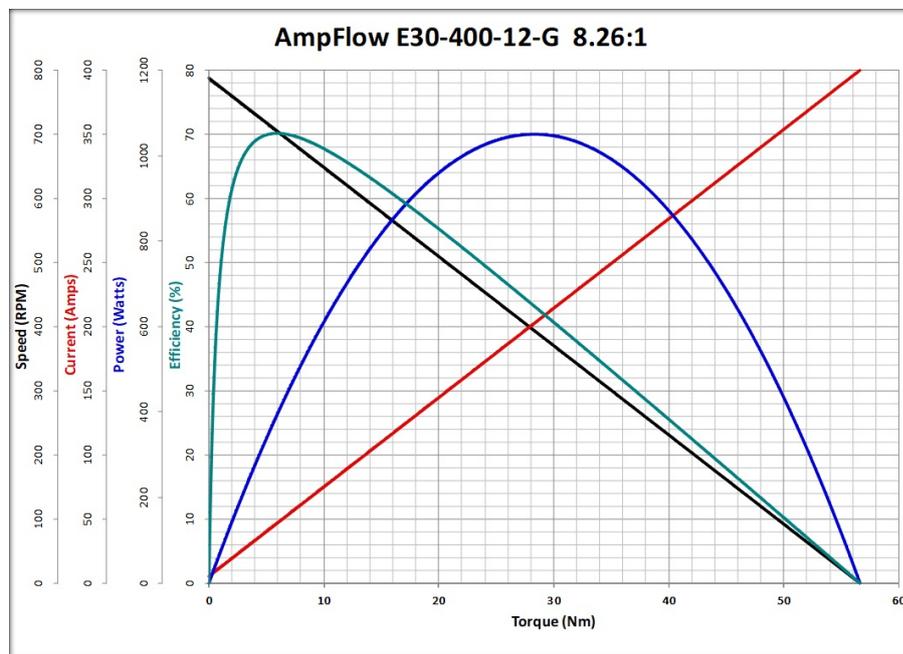


Figura 35. Gráfica de Curva Característica de Motor AmpFlow E30-400-12-G [12]

11.2. Diseño de robot móvil de tracción diferencial

Para el diseño de esta sección se deben tomar en cuenta los ejes y sus componentes que intervienen como son rodamientos, chavetas, piñón y cadena. Cabe recalcar que cada llanta cuenta con un eje independiente conectado al motor respectivo, y como se indicó anteriormente, se tienen 2 motores donde cada uno controla el movimiento de 2 llantas. Además, se realiza el diseño de la estructura base para todo el asistente autónomo y los motores que deben movilizarlo. Finalmente se selecciona un chasis para cubrir todo el mecanismo y tener un mejor acabado estético.

Diseño a fatiga del eje de transmisión

El eje a diseñar es el que se encarga de la transmisión del movimiento de toda la máquina que será utilizado, uno por cada llanta. De manera similar al eje diseñado anteriormente se utiliza el mismo material además de que el proceso de diseño a fatiga es igual. Inicialmente se tienen 6 secciones donde cada una se describe a continuación y se lo puede visualizar en la Figura 36.

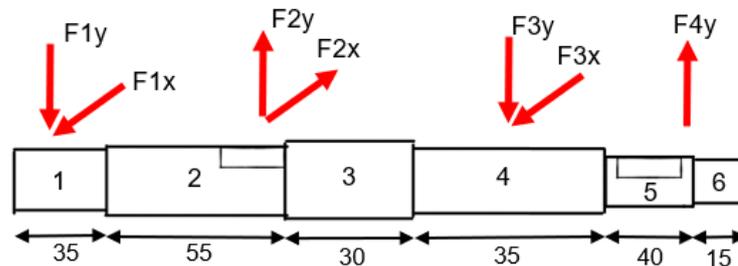


Figura 36. Eje de transmisión

Secciones

- 1 y 4: Se ubican los rodamientos.
- 2: Recibe la potencia del motor donde se ubica la o piñón.
- 5: Se ubica la rueda.
- 6: Sección con rosca para asegurar la rueda.

Cargas

- F1 y F3: Reacciones de los rodamientos.
- F2: Fuerza de la al transferir torque al eje, 500 N.
- F4: Fuerza de la llanta al tener contacto con el suelo, 490.5 N en y.

Reacciones y Diagramas de fuerza y momento del eje de transmisión

Para empezar el diseño del eje se identifican las cargas y se encuentran las reacciones de los rodamientos tomando en cuenta la Figura 36 para las longitudes y las cargas que se trabaja en los planos YZ y XZ según las Figuras 37 y 38, respectivamente. A su vez esto

ayuda a encontrar los diagramas de fuerza y momento con respecto a los planos respectivos.

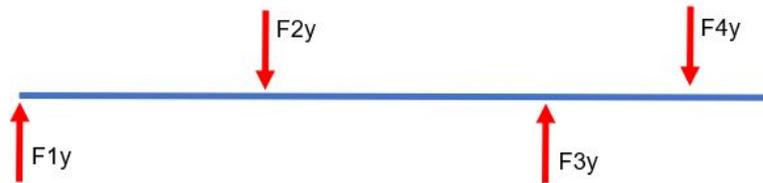


Figura 37. Cargas y Reacciones sobre el Eje de Transmisión en el plano YZ

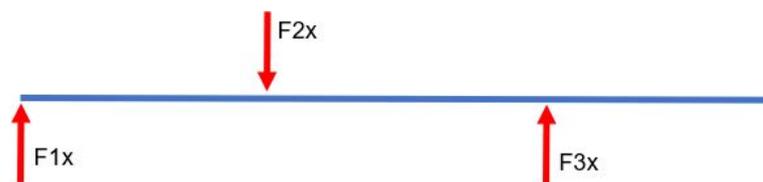


Figura 38. Cargas y Reacciones sobre el Eje de Transmisión en el plano XZ

Primero se debe tomar en cuenta que la carga F2 de la tiene un ángulo de inclinación de 51.673° debido a la ubicación dentro de la máquina, por lo que se encuentra las componentes en x,y para trabajar en los distintos planos.

$$F_{2x} = F_2 \cos \alpha = 310,0744 \text{ N}$$

$$F_{2y} = F_2 \sin \alpha = 392,2421 \text{ N}$$

Por medio de sumatorias de fuerzas y momentos se obtienen las reacciones de los rodamientos para luego tener el diagrama de fuerza y momento con respecto a los planos YZ y XZ de las Figuras 39 y 40 respectivamente.

$$\sum F_y = 0$$

$$F_{1y} + F_{3y} = 882,7421 \text{ N}$$

$$\sum M_y = 0$$

$$F_{3y} \cdot 0,135 - F_{2y} \cdot 0,0675 - F_{4y} \cdot 0,165 = 0$$

$$F_{1y} = 87,121 \text{ N}$$

$$F_{3y} = 795,6211 \text{ N}$$

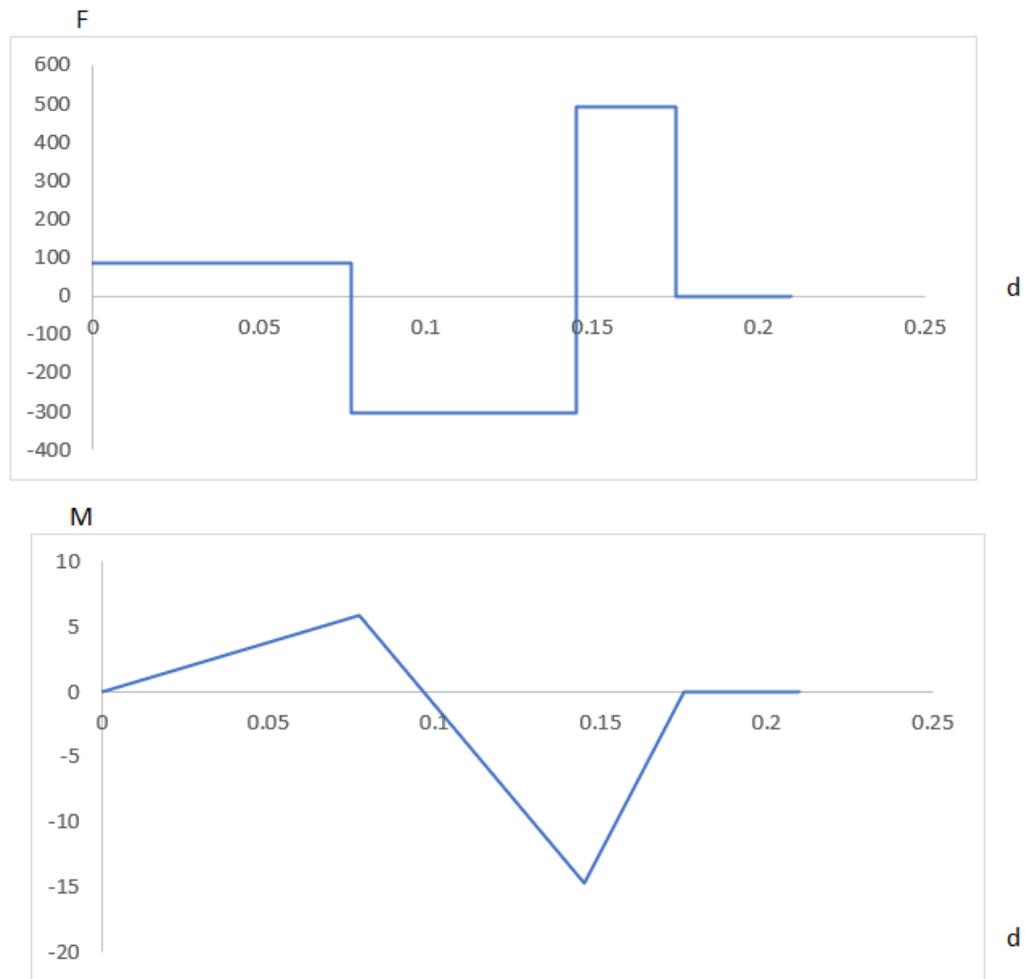


Figura 39. Diagramas de Fuerza y Momento del Eje de Transmisión con Respecto al Plano YZ

$$\sum F_x = 0$$

$$F_{1x} + F_{3x} = 310,0744 \text{ N}$$

$$\sum M_x = 0$$

$$F_{3x} \cdot 0,135 - F_{2x} \cdot 0,0675 = 0$$

$$F_{1x} = 155,0372 \text{ N}$$

$$F_{3x} = 155,0372 \text{ N}$$

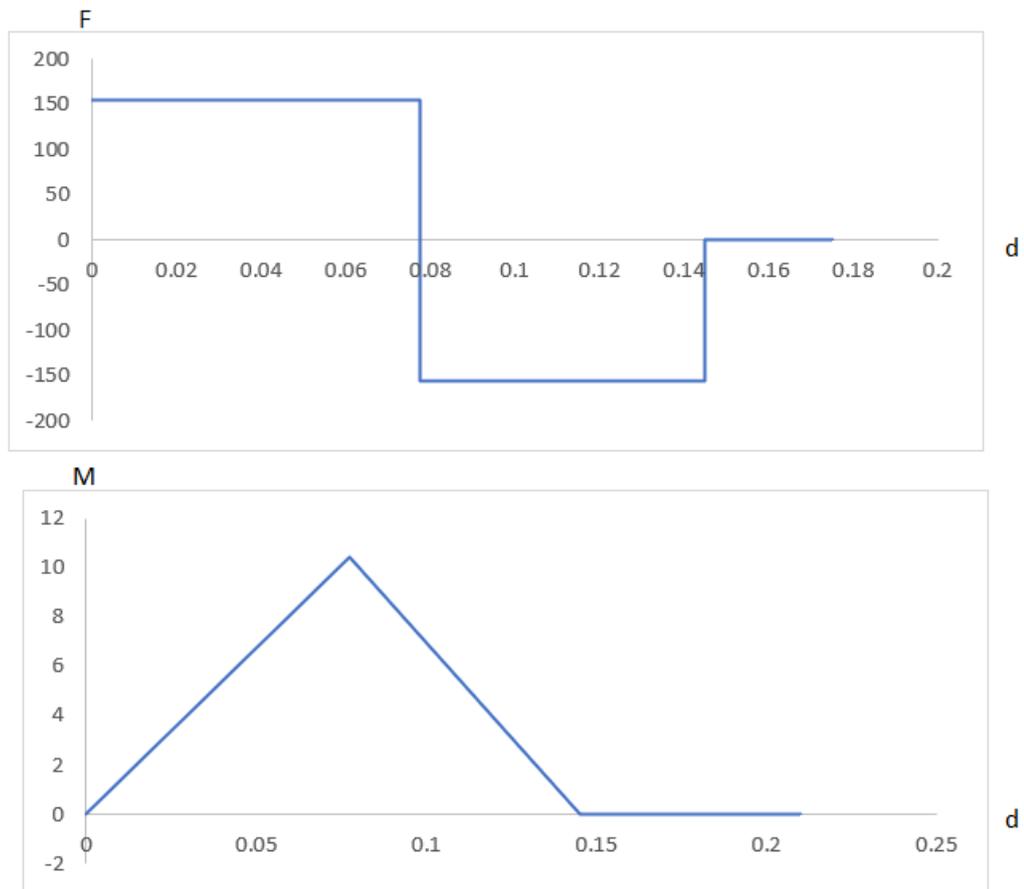


Figura 40. Diagramas de Fuerza y Momento del Eje de Transmisión con Respecto al Plano XZ

Al trabajar en 2 planos se obtiene un diagrama de momentos totales por medio de (39). Además, se encuentra el diagrama de torques que es necesario para el proceso de más adelante. Finalmente se puede visualizar los diagramas en la Figura 41.

$$M_T = \sqrt{(M_{xz})^2 + (M_{yz})^2} \quad (36)$$

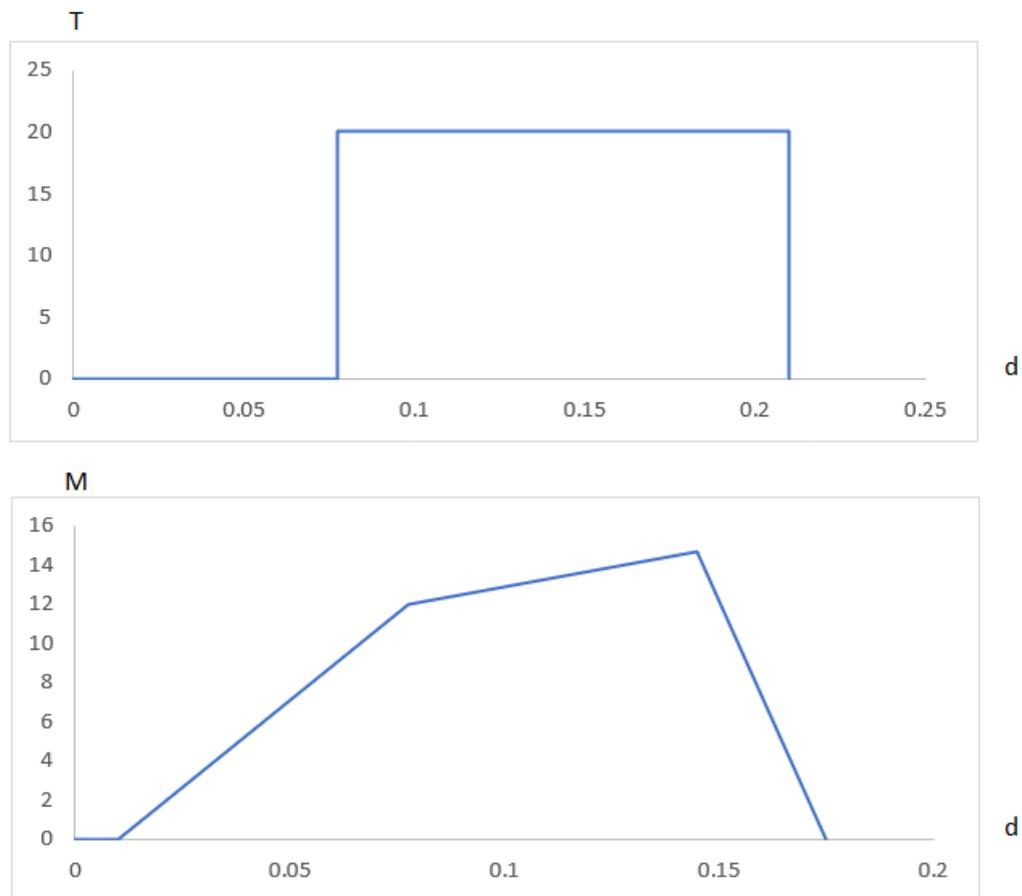


Figura 41. Diagramas de Torque y Momentos Totales del Eje de Transmisión

Diseño de Secciones del eje de transmisión

En base a la Figura 41, se obtienen los torques y momentos medios y alternantes de cada sección que se requieren para emplear en (25) y (26), los cuales están expresados en la Tabla 24.

Tabla 24. Torques y Momentos según las secciones del eje de transmisión

SECCIÓN	Tm	Ma	Ta	Mm	
1	0	2.223	0	0	Nm
	0	19.675	0	0	lbf in
2	15	12.004	0	0	Nm
	132.761	106.245	0	0	lbf in
3	15	14.715	0	0	Nm
	132.761	130.239	0	0	lbf in
4	15	14.199	0	0	Nm
	132.761	125.669	0	0	lbf in
5	15	0	0	0	Nm
	132.761	0	0	0	lbf in

De manera similar al eje anteriormente diseñado, se realiza el mismo proceso de diseño

para encontrar los diámetros de cada una de las secciones por lo que se hace uso de las mismas ecuaciones, tablas y figuras. El material a utilizar es el mismo que el eje diseñado anteriormente. Adicionalmente, en la Tabla 25 se resumen los resultados obtenidos correspondientes a los cálculos, además de la verificación de que el factor de seguridad sea mayor a 2.

Tabla 25. Resultados de diseño de eje de transmisión

Variables	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 5
d	0.3324 in	0.6754 in	0.7066 in	0.7066 in	0.4788 in
d seleccionado	0.7087 in	0.7874 in	0.875 in	0.7087 in	0.6299 in
r/d	0.0282	0.0254		0.0282	0.0318
D/d	1.1111	1.1113		1.2347	1.1250
K_t	2.2	2.23	2.14	2.2	2.1
K_{ts}	1.48	1.48	3	1.88	1.4
K_f	1.66	1.6765	1	1.66	1.605
K_{fs}	1.2928	1.2928	1	1.5368	1.244
K_b	0.912	0.9018	0.8916	0.912	0.9236
Se	23.3055	21.0667	20.8302	21.3055	21.5757
n	22.7922	4.447	8.1713	2.7068	10.9804

Finalmente, los diámetros utilizados para el eje de transmisión en cada sección se encuentran en la Tabla 26 y se toma en cuenta que la sección 6, al ser para una tuerca que ajuste la rueda a utilizar, se coloca con el mismo diámetro que el eje de la rueda pero con rosca.

Tabla 26. Secciones del eje de transmisión con diámetros seleccionados

SECCIÓN	DIÁMETRO [mm]
1	18
2	20
3	22
4	18
5	16
6	16

Selección de Rodamientos

Se realiza el mismo proceso de la sección anterior para seleccionar rodamientos, por lo que se usa las mismas ecuaciones, tablas y figuras para obtener el coeficiente de carga. Cabe recalcar que en el eje se tienen 2 cargas distintas para los 2 rodamientos F1 y F3, además de que están en distintos planos por lo que se obtiene una carga resultante. Se trabaja

con la mayor de ellas para obtener el coeficiente de carga que se indica a continuación.

$$F_{1R} = 177,8387 \text{ N}$$

$$F_{3R} = 810,5859 \text{ N}$$

$$C_{10} = 5,4106 \text{ kN}$$

Con la ayuda de la Figura 31 y el diámetro de la sección encontrada en la Tabla 26 se verifica que el rodamiento de 18 mm de la Figura 42 cumple exitosamente para la aplicación requerida.



Figura 42. Chumacera de piso de 18 mm

Diseño de chaveta

De igual manera que en el diseño de la chaveta anterior se encuentra la longitud y se toma los demás valores de la Figura 33. Además se trabaja con el mismo material por lo que se obtiene una chaveta de 10x5x5 mm.

Diseño de columnas

En la estructura de la base se tiene 4 columnas que sostienen la estructura de los portaherramientas como se ve en la Figura 43. Por lo que se puede asumir que la carga soportada va a dividirse para cada una de ellas.

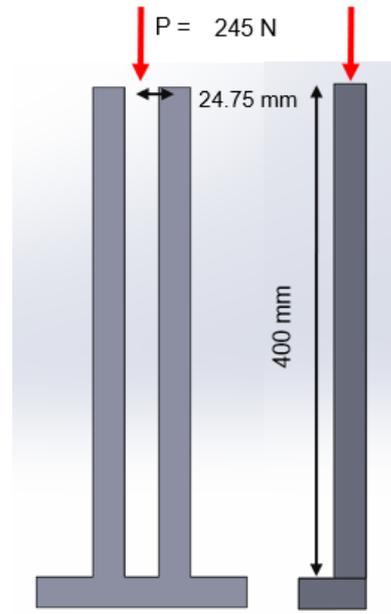


Figura 43. Columnas de la estructura de la base

Al tener una carga excéntrica se trabaja con las siguientes ecuaciones donde se calcula cargas y esfuerzos con el fin de que la inecuación (37) se cumpla para la estructura seleccionada.

$$\frac{P}{A} + \frac{M \cdot c}{I} \leq \sigma_{perm} \quad (37)$$

$$P = m \cdot g \quad (38)$$

$$L_e = 2 \cdot L \quad (39)$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_e^2} \quad (40)$$

$$P_{perm} = \frac{P_{cr}}{n} \quad (41)$$

$$\sigma_{perm} = \frac{P}{A} \left[1 + \frac{e \cdot c}{r^2} \sec \left(\frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{P}{P_{cr}}} \right) \right] \quad (42)$$

Se trabaja con tubos cuadrados de acero de 25 mm con espesor de 1.2 mm para las columnas obteniendo los valores de la Tabla 27. Finalmente, se comprueba el cumplimiento de la inecuación y por ende las columnas diseñadas cumplen satisfactoriamente.

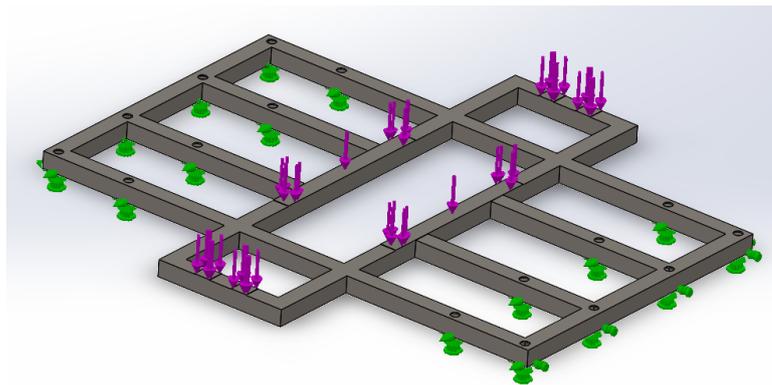
Tabla 27. Valores y resultados para diseño de columna

Variable	Valor
n	2
h	15.748 in
c	0.4921 in
A	0.1767 in ²
I	0.0259 in ⁴
E	29000000 psi
r	0.8898 in
P	55.0809 lbf
e	0.9744 in
L_e	31.496 in
P_{cr}	7495.0383 lbf
P_{perm}	3747.5191 lbf
σ_{perm}	34059.057 psi
$P/A + Mc/I$	1328.5268 psi

$$1328,5268 < 34059,057$$

Diseño de chasis

Para la parte de la estructura de la base, al ser una figura compleja, se verifica por medio de una simulación en SolidWorks, donde se colocan las cargas, soportes y material a utilizar, que es un tubo cuadrado de 20 x 20 x 1.5 mm de acero A36, en la Figura 44.

**Figura 44.** Estructura de la base con parámetros iniciales

A continuación se presentan los resultados donde se comprueba que la pieza no va fallar en la Figura 45 y su desplazamiento máximo es de 0.9 mm en la Figura 46, el cual no es un valor crítico.

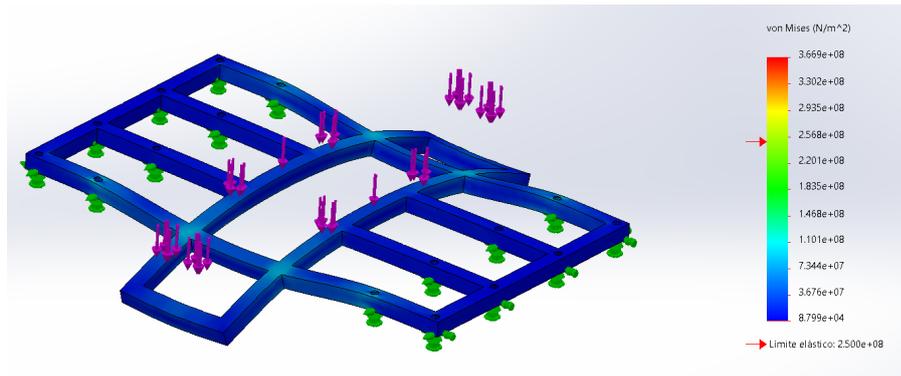


Figura 45. Tensiones de Von Mises de Simulación de la Estructura Base

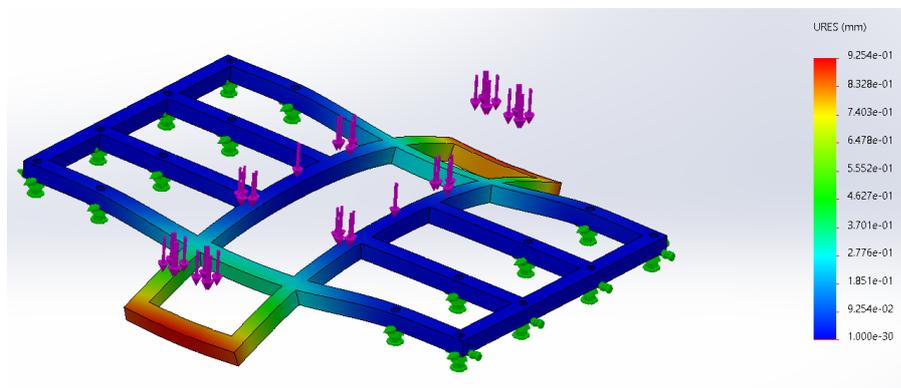


Figura 46. Desplazamientos de Simulación de la Estructura Base

Diseño y selección de motor

El motor a diseñar es el que va a movilizar todo el asistente autónomo, por lo que se debe tomar en cuenta el peso de todos los componentes que intervienen, llegando así a una masa de 200 kg. En este valor se han sumado todos los materiales además de otro valor adicional asumido para tener un diseño robusto y garantizar que el motor pueda mover la toda la plataforma satisfactoriamente. Además, gracias al estudio teórico se tiene que la velocidad en la que se desplaza el asistente autónomo es de 83.3 cm/s con ruedas de 12 cm de diámetro.

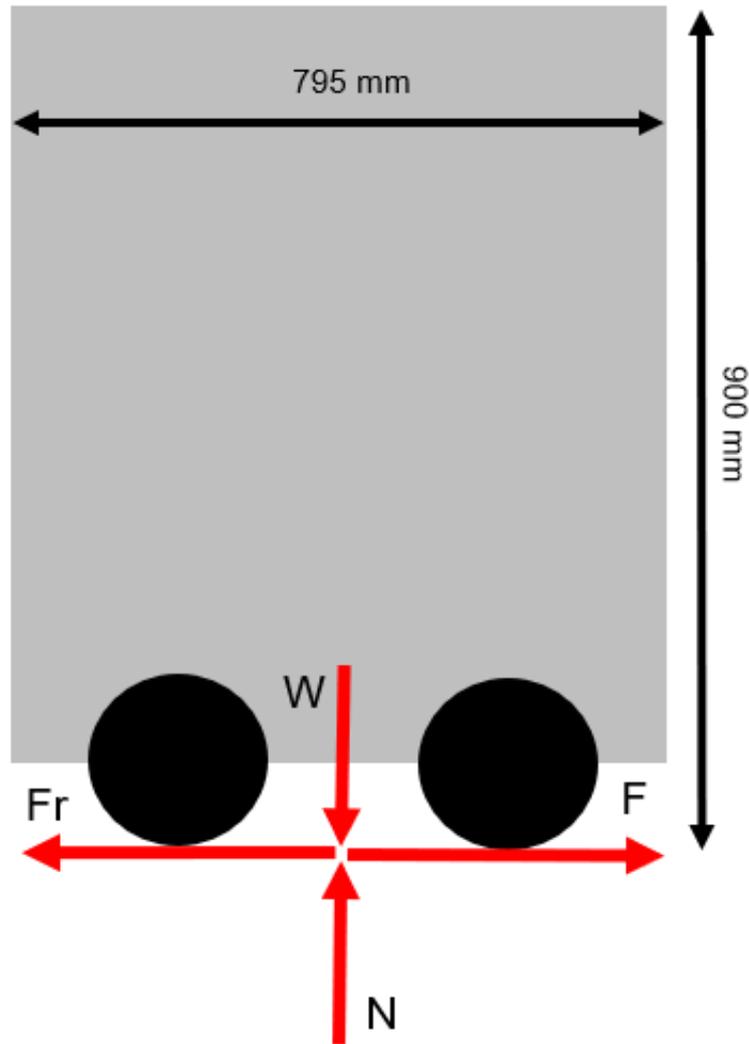


Figura 47. Diagrama de cuerpo libre de plataforma

Para empezar, se realiza un diagrama de cuerpo libre del asistente autónomo en la Figura 47 y se toma en cuenta que el motor debe sobrepasar la resistencia a la rodadura por lo que se necesita agregar al diseño el coeficiente tomado de la Tabla 28, que en este caso es para asfalto. Además, se toma en cuenta que trabaja en superficies con una inclinación máxima de 10° .

Tabla 28. Coeficiente de resistencia a la rodadura [18]

SUPERFICIE DE CONTACTO	COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (r)
Hormigón sinuoso	0.02
Hormigón Plano	0.015
Asfalto Sinuoso	0.022
Asfalto Plano	0.017
Superficie lisa	0.025
Superficie arenosa	0.04
Barro	0.187

$$F_t = 1,1 \cdot (F_r + F_p) \quad (43)$$

$$F_r = W \cdot r \quad (44)$$

$$F_p = W \cdot (\sin \alpha + r \cdot \cos \alpha) \quad (45)$$

Utilizando (34) y (35) se obtiene un torque de 28.14 Nm y potencia de 390.84 Watts. Primero, se encuentra la fuerza con (43), (44) y (45), donde W es el peso de todo el asistente, se encuentra la fuerza con resistencia a la rodadura y la fuerza a la pendiente [18]. Además, los valores obtenidos deben ser divididos para dos ya que se tiene 2 motores para movilizar el asistente autónomo, por lo que el motor debe cumplir con las siguientes características.

- Potencia: 0.26 HP
- Torque: 14.07 Nm
- Velocidad: 132.63 rpm

Con base en los datos anteriores se selecciona el mismo motor de la sección anterior.

Diseño de cadena y catarina

Para el diseño de la cadena y se asume algunos aspectos principalmente de la catelina, como son los siguientes.

- Hilera Única
- 20 dientes
- Factor de diseño de 1.5

Con base en estos parámetros y datos de la potencia del motor que se va a transmitir se utiliza (46) para encontrar la potencia tabulada que ayuda a encontrar el número de cadena y que satisface para la transmisión de la potencia requerida (Figura 48).

$$H_{tab} = \frac{n_d \cdot K_s \cdot H_{nom}}{K_1 \cdot K_2} \quad (46)$$

Velocidad de la catarina, rpm	Número ANSI de cadena					
	25	35	40	41	50	60
50	0.05	0.16	0.37	0.20	0.72	1.24
100	0.09	0.29	0.69	0.38	1.34	2.31
150	0.13*	0.41*	0.99*	0.55*	1.92*	3.32
200	0.16*	0.54*	1.29	0.71	2.50	4.30
300	0.23	0.78	1.85	1.02	3.61	6.20
400	0.30*	1.01*	2.40	1.32	4.67	8.03
500	0.37	1.24	2.93	1.61	5.71	9.81
600	0.44*	1.46*	3.45*	1.90*	6.72*	11.6
700	0.50	1.68	3.97	2.18	7.73	13.3
800	0.56*	1.89*	4.48*	2.46*	8.71*	15.0
900	0.62	2.10	4.98	2.74	9.69	16.7
1 000	0.68*	2.31*	5.48	3.01	10.7	18.3
1 200	0.81	2.73	6.45	3.29	12.6	21.6
1 400	0.93*	3.13*	7.41	2.61	14.4	18.1
1 600	1.05*	3.53*	8.36	2.14	12.8	14.8
1 800	1.16	3.93	8.96	1.79	10.7	12.4
2 000	1.27*	4.32*	7.72*	1.52*	9.23*	10.6
2 500	1.56	5.28	5.51*	1.10*	6.58*	7.57
3 000	1.84	5.64	4.17	0.83	4.98	5.76

Tipo A
Tipo B
Tipo C

Figura 48. Velocidad vs Potencia para cadenas de rodillos [11]

Se puede observar que en (46) existen varias constantes como K_s , K_1 y K_2 que se las puede encontrar por medio de las Figuras 49, 50 y 51 respectivamente.

Tipo de carga	Tipo de impulsor		
	Impulsor hidráulico	Motor eléctrico o turbina	Motor de combustión interna con transmisión mecánica
Uniforme (agitadores, ventiladores, transportadores con carga ligera y uniforme)	1.0	1.0	1.2
Choque moderado (máquinas herramienta, grúas, transportadores pesados, mezcladoras de alimento y molinos)	1.2	1.3	1.4
Choque pesado (prensas de troquelado, molinos de martillos, transportadores alternos, accionamientos de molino de rodillos)	1.4	1.5	1.7

Figura 49. Factor de servicio para cadenas de rodillos [13]

Número de dientes en catarina impulsora	Potencia preextremo, K_1	Potencia posextremo, K_1
11	0.62	0.52
12	0.69	0.59
13	0.75	0.67
14	0.81	0.75
15	0.87	0.83
16	0.94	0.91
17	1.00	1.00
18	1.06	1.09
19	1.13	1.18
20	1.19	1.28
N	$(N_i/17)^{1.08}$	$(N_i/17)^{1.5}$

Figura 50. Factores de corrección de dientes [11]

Número de torones	K_2
1	1.0
2	1.7
3	2.5
4	3.3
5	3.9
6	4.6
8	6.0

Figura 51. Factor de torones múltiples [11]

Finalmente, con la potencia calculada $H_{tab} = 0.369$ HP y conociendo la velocidad a la cual se mueve la plataforma, se concluye que con una cadena y AISI 35 se satisface la transmisión de movimiento.

11.3. Selección de carrocería

En base a la investigación realizada inicialmente se toma en cuenta los carros de herramientas comerciales, por lo que para la carrocería se busca obtener un acabado estético similar. Es así que se toma en cuenta que para las superficies laterales y superior del asistente autónomo el material a utilizar son planchas de acero de 2 mm de espesor, esto es debido a la disponibilidad del mercado, costos y un buen acabado estético, como en la selección de los demás componentes. Por otro lado, las piezas de unión de las superficies indicadas anteriormente son fabricadas de acrílico color negro de 10 mm de espesor. En esta parte se debe mencionar que, al inferior del asistente, la pieza de acrílico cuenta con agujeros para los sensores a utilizar y también para el interruptor de encendido junto al conector de carga de las baterías. Finalmente, se agregan dos agarraderas en la parte frontal

y posterior del asistente con el objetivo de brindar una mayor funcionalidad ya que sirve como apoyo para el asistente o si se desea colocar herramientas adicionales como franelas. Cabe mencionar que estas piezas se las puede observar de mejor manera en la Figura 52, donde las de color negro son de acrílico, mientras que las de color gris son de acero y se visualizan las agarraderas antes mencionadas. Al ser una parte netamente estética no soporta cargas críticas por lo que se utilizan materiales que no aporten con un mayor peso al asistente y que brinden una buena apariencia.



Figura 52. Carrocería del Asistente Autónomo

11.4. Diseño CAD

Finalmente, se toman en cuenta todas las dimensiones del diseño para cada uno de los componentes y la selección de materiales para así obtener el diseño CAD en SolidWorks, que se puede observar en la Figura 53. Para una mejor visualización se hace transparente dos lados de la carrocería del asistente autónomo gracias al software utilizado, además se indica las dimensiones finales del asistente autónomo.

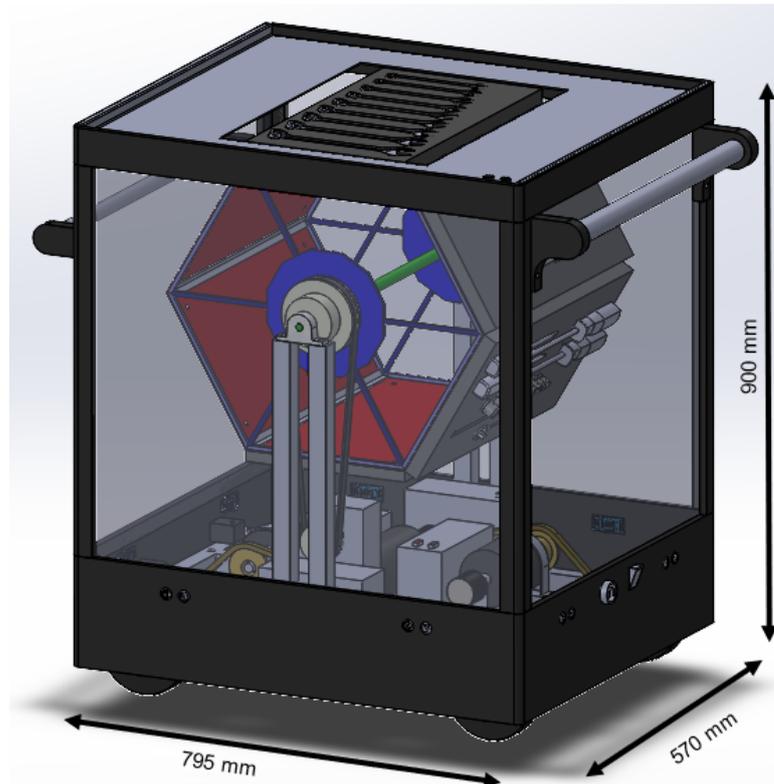


Figura 53. Diseño final del asistente autónomo

12. Diseño Electrónico y de Control

En el diseño electrónico y de control se realiza la selección de componentes necesarios para cumplir con las funciones que debe realizar el asistente autónomo como son sensores, actuadores y dispositivos de comunicación. A su vez estos deben ser controlados, en el caso de los motores se realiza un control de velocidad y de posición para el desplazamiento del asistente y la rotación de las herramientas. Adicionalmente se dimensiona el banco de baterías para cumplir con la autonomía de un horario laboral del taller que es de 10 horas al día.

Dentro de esta sección se realiza la comunicación entre el usuario y el asistente por medio de la aplicación móvil para Android, lo que conlleva la programación de cada uno de estos componentes y controladores.

12.1. Esquema del circuito de control del asistente autónomo

Para empezar con la selección de los componentes electrónicos se realiza un diagrama de bloques (Figura 54), que resume los materiales necesarios para el funcionamiento del

asistente autónomo.

El sistema consiste de manera principal en un control de velocidad para los motores que desplazan al asistente autónomo por lo que se necesita de un lazo cerrado con una realimentación por medio de un sensor de velocidad para cada motor de la base. Luego se tiene otro control para el motor de la estructura rotacional ya que se requiere mover a posiciones específicas y de manera similar al control anterior se realiza una realimentación cerrando el lazo en este sistema. Posteriormente se tiene otro actuador para detener la estructura rotatoria ya que, al utilizar este dispositivo como un tope, el motor que acciona la estructura no mantiene la posición y no consume corriente.

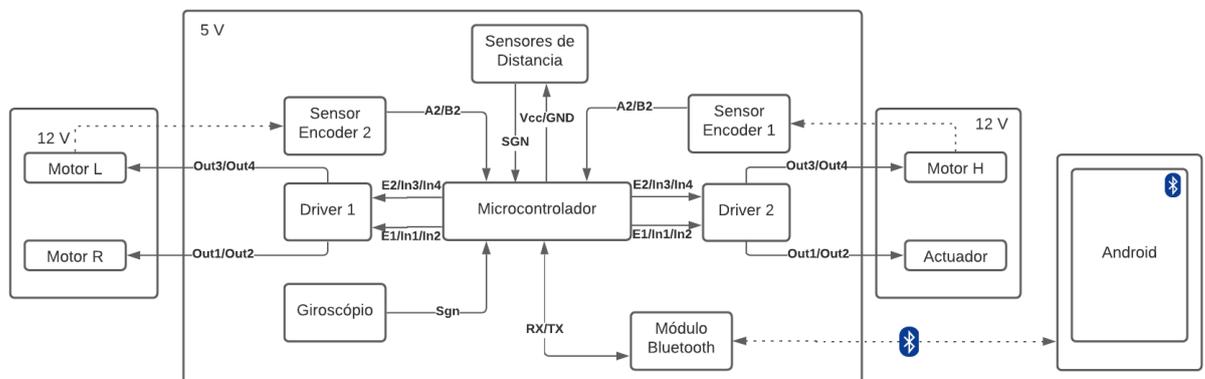


Figura 54. Diagrama de bloques de funcionamiento del asistente autónomo

Otra parte importante del esquema de la Figura 54 es el uso de sensores de distancia para la detección de obstáculos cuando se desplaza el asistente autónomo y la comunicación entre el usuario y la maquina por medio de comunicación bluetooth. Finalmente, se tiene la aplicación móvil que sirve para que el usuario se pueda comunicar con el asistente autónomo y pedir las herramientas que necesite.

12.2. Selección de componentes

Teniendo una idea de los materiales que se requieren, mencionados en el esquema anterior, se establece el uso de los siguientes componentes.

- Módulo Bluetooth HC-05

El módulo HC-05 es un componente electrónico que sirve para la comunicación via bluetooth con otros dispositivos con un alcance de 10 m a su alrededor.

- Sensor Ultrasónico HC-SR04

El sensor ultrasónico HC-SR04 es un sensor de distancia que detecta objetos en un rango de 2 a 450 cm, con un bajo consumo energético y precisión de ± 3 mm.

- Solenoide HCNE – 1039

El solenoide HCNE – 1039 es un actuador electromagnético en el que su funcionamiento es similar a un pistón. Este dispositivo produce un campo magnético según el voltaje aplicado y al tener un núcleo móvil metálico este se desplaza según la intensidad del campo generado, lo cual es útil como freno o tope.

- Encoder KY – 040

El encoder KY – 040 es un sensor electromecánico que mide cuánto gira un eje con respecto a un disco interior con 30 perforaciones de tal forma que al rotar el sensor identifica estas perforaciones en el disco y envía un pulso por cada perforación detectada, obteniendo así el giro del eje y a su vez se puede conocer la posición, velocidad angular y también velocidad lineal agregando una rueda al eje.

- Driver Monster Motor Shield

Al tener seleccionado los motores se debe utilizar un driver o controlador para tener una alimentación independiente en cada uno de ellos y que a su vez funcionen por medio de una señal de control. El nombre más utilizado para estos dispositivos es puente H, donde el factor importante a considerar es que suministre el voltaje y corriente requerido para cada motor y a su vez soporte dicha fuente de alimentación por lo que se selecciona el driver Monster Motor. Este dispositivo soporta un voltaje máximo de 16 V y una corriente de hasta 30 A, suficiente para la aplicación requerida. Adicionalmente cuenta con un apagado automático térmico, a sobrevoltajes y bajos voltajes que contribuyen a un circuito más robusto.

- Módulo AMS 1117

El Módulo AMS 1117 es un regulador de voltaje de 5 V y 800mA con una entrada de 4.8 V a 12 V. Este módulo trabaja con componentes smd o de montaje superficial, lo cual permite que la placa sea de dimensiones de 25.9x11.5x2.8 mm y a su vez de bajo precio.

- MPU 6050

El sensor MPU 6050 contiene un giroscopio de 3 ejes y un acelerómetro de 3 ejes, por lo que tiene la capacidad de medir 6 grados de libertad. Para la comunicación cuenta con el protocolo I2C y por medio de programación se puede obtener los ángulos de roll, pitch y yaw, que ayudan al control de la orientación del asistente autónomo.

Teniendo claro cada uno de los componentes se realiza un esquema de cómo es el circuito del asistente autónomo en la Figura 55.

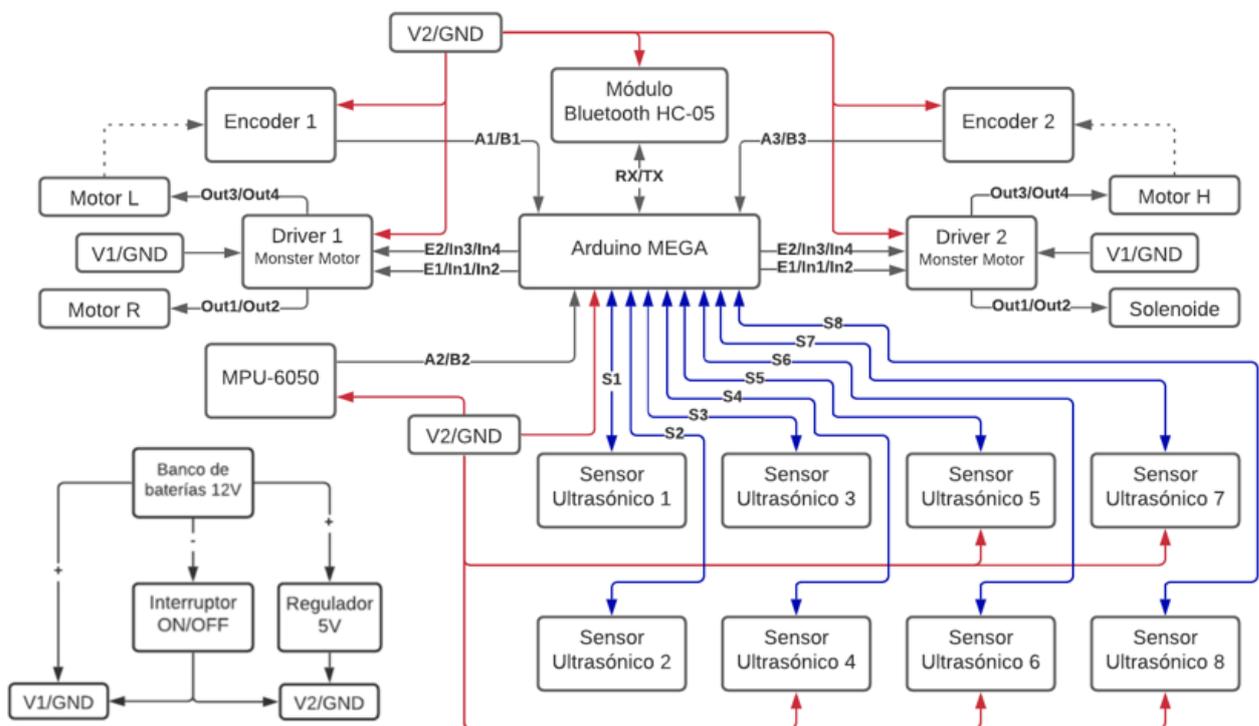


Figura 55. Esquema del circuito electrónico del asistente autónomo

Adicionalmente, se toma en cuenta la protección electrónica necesaria para el circuito, lo cual para este caso se utiliza un diodo para evitar polarización inversa que funciona de manera general para todo el circuito y después se lo divide en dos partes importantes, la alimentación de los motores que está a cargo de los drivers y cuentan con protecciones suficientes como se detalló anteriormente. Por otro lado, el regulador de voltaje es un módulo externo a la placa, al tener sobrevoltajes funciona como un elemento fusible que falla primero antes de dañar todo el circuito brindando una buena protección al sistema electrónico.

12.3. Selección de placa y plataforma de desarrollo

La plataforma de desarrollo y el microcontrolador que se va a utilizar es Arduino, por lo que se selecciona la placa por medio del número de pines que se necesitan, esto se lo puede observar en la Tabla 29.

Tabla 29. Componentes con los números de pines necesarios

Componente	Cant	Analog/PWM		Digitales		UART	N.pines	Subtotal
		In	Out	In	Out			
Sensor HC-SR04	8	-	-	1	1	-	2	16
Encoder FC-03	3	-	-	2	-	-	2	6
Módulo HC-05	1	-	-	-	-	2	2	2
Driver Monster	2	-	2	-	4	-	6	12
MPU 6050	1	-	-	-	-	2	2	2
							Total	38

Sabiendo el número de pines que se necesitan se compara entre la placa Arduino Nano, Uno y Mega con ayuda de la Tabla 30 y se concluye que la más adecuada es la placa Arduino Mega.

Tabla 30. Características de placas Arduino [19]

Placa	PWM Out	Analog In	Digital Out	Digital In	UART	Corriente [mA]
Nano	22	6	8	22	1	19
Uno	14	6	6	20	1	46
Mega	54	15	16	70	4	93

12.4. Dimensionamiento del banco de baterías

Un componente fundamental para el diseño electrónico es la fuente de alimentación. En este aspecto es importante el voltaje y la corriente. La mayoría de los componentes trabajan con 12 V sin considerar materiales adicionales, además se obtiene el consumo total de corriente del asistente autónomo detallado en la Tabla 31.

Tabla 31. Consumo de corriente de cada componente [20]

Componente	Corriente [A]	Cant	Subtotal
Sensor HC-SR04	0.015	8	0.12
Arduino Mega	0.093	1	0.093
Encoder FC-03	0.015	2	0.03
MPU-6050	0.0058	1	0.0058
Módulo HC-05	0.05	1	0.05
Solenoido HCNE-1039	0.5	1	0.5
Motor E. Rotacional	5	1	5
Motor R. Móvil	2	2	4
Driver Monster	0.02	2	0.04
AMS1117	0.01	1	0.03
		Total [A]	9.8688

$$Tiempo\ de\ funcionamiento\ [h] = \frac{Capacidad\ [Ah]}{Corriente\ [A]} \quad (47)$$

Utilizando (47) se obtiene que el consumo del asistente autónomo para que tenga que cumpla con autonomía establecida es de 100 Ah. En base a este valor decide trabajar con baterías VRLA de 12V y 12 Ah, las cuales son recargables. Finalmente, el banco de baterías está conformado por 4 de las baterías de la Figura 56 conectado en paralelo para obtener la corriente requerida, pero cabe mencionar que este valor es asumiendo el caso más crítico en el que todos los componentes funcionen al mismo tiempo lo cual no va a suceder. Adicionalmente para la recarga de estas baterías se utiliza un cargador comercial en el que se adapta un conector para una mayor funcionalidad del asistente.

**Figura 56.** Batería VRLA de 12 V 12 Ah

12.5. Leds Indicadores

Con el objetivo de una mejor interacción con el usuario y el asistente se agregan 2 leds indicadores que cumplen con las siguientes funciones.

- **Led Verde:** Indica si el asistente autónomo se encuentra encendido o apagado.
- **Led Rojo:** Indica si el asistente autónomo estableció conexión bluetooth con algún dispositivo móvil.

12.6. Comunicación y Aplicación Móvil para Android

Primero es importante determinar cómo va a ser el mando del asistente, en este aspecto se tiene lo siguiente:

- **Control remoto manual:** Consiste en manipular las acciones de la plataforma por medio de un mando que envía las señales de forma inalámbrica
- **Por AGV:** Es un sistema de navegación en el que la plataforma tiene una guía visual a la cual debe seguir, por ejemplo, una línea en el piso trazada desde un punto A a un punto B. El sistema es un poco limitado puesto que no se analiza nada alrededor y la plataforma es incapaz de desviarse en caso de algún inconveniente con la guía.
- **De manera autónoma:** Como lo indica su nombre, la plataforma es capaz de desplazarse de un punto A a un punto B sin supervisión. Esto debido a que tiene varios sensores para percibir lo que ocurre a su alrededor y basado en esa información toma acciones para llegar a su objetivo. Aquí es donde ingresa la parte de inteligencia artificial puesto que va a procesar la información obtenida de manera especial para encontrar el mejor camino que le lleve a su objetivo en un menor tiempo que los otros métodos.

Sabiendo esto se determina que el asistente autónomo se va a desplazar por su propia cuenta ya que está equipado de los sensores suficientes, establecidos anteriormente, por lo que llega de un punto A a un punto B.

Para empezar con su trabajo el asistente necesita de parámetros iniciales como la ubicación del usuario y las herramientas que necesita, es así que se utiliza una aplicación móvil para

dispositivos Android. Esta aplicación sirve como una interfaz al usuario para comunicarse con el asistente, donde puede visualizar cada una de las bandejas de herramientas y conocer las herramientas que se encuentran ahí, para posteriormente seleccionar cada una de las bandejas que necesita. Además, el usuario indica su ubicación dentro del taller o el punto donde quiere que lleve las herramientas para que posteriormente el asistente pueda empezar a trabajar. La comunicación entre la aplicación y el asistente es por vía bluetooth, por medio del módulo HC-05 integrado en el asistente con un alcance de 10 m aproximadamente, lo cual es suficiente para el entorno de trabajo en el que se desenvuelve. El desarrollo de la aplicación móvil se la realiza por medio de bloques en APP Inventor, esta consta de varias ventanas o pantallas para una mejor interacción con el usuario (Figura 57).

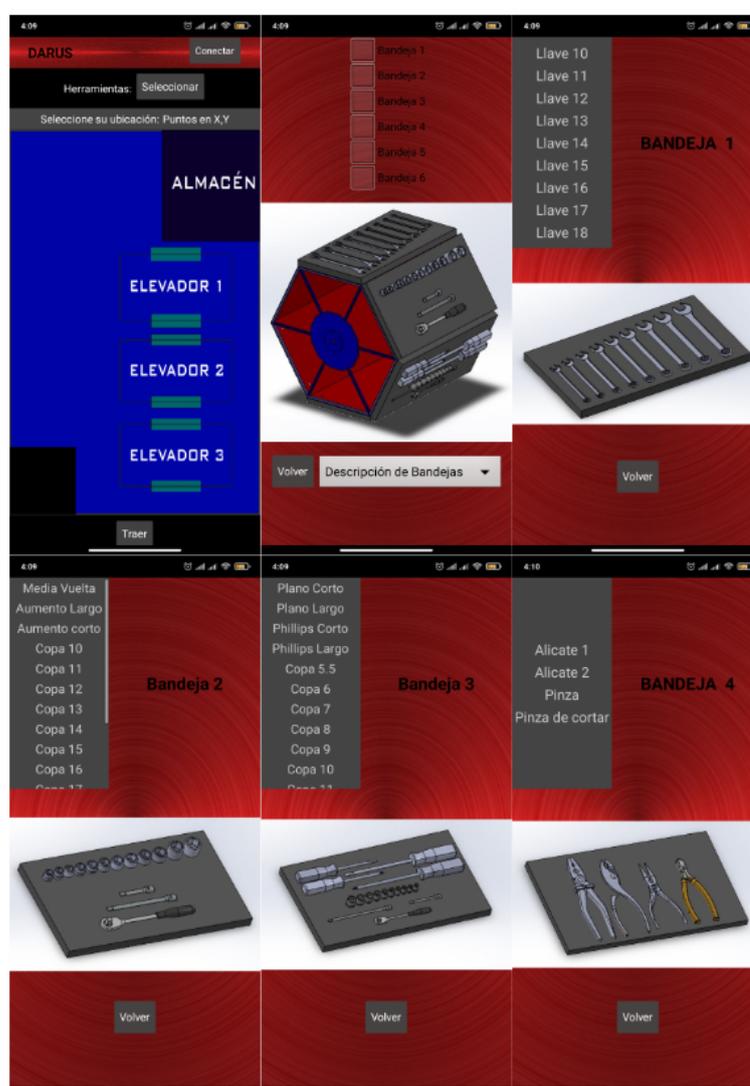


Figura 57. Interfaz de Aplicación Móvil

En la Figura 58 se representa el diagrama de flujo de la aplicación móvil, en la cual

se tiene una comunicación bidireccional con el usuario de manera constante mientras esté trabajando con el asistente. Para entenderlo mejor el asistente envía mensajes de alerta al usuario por medio de la aplicación para informarle que llegó a la ubicación, en qué bandeja se encuentra, si tomó las herramientas o espera más tiempo y cuando la entrega de todas las herramientas haya concluido. Finalmente, cuando el asistente cumple su tarea regresa a su ubicación inicial a esperar que su servicio sea requerido nuevamente.

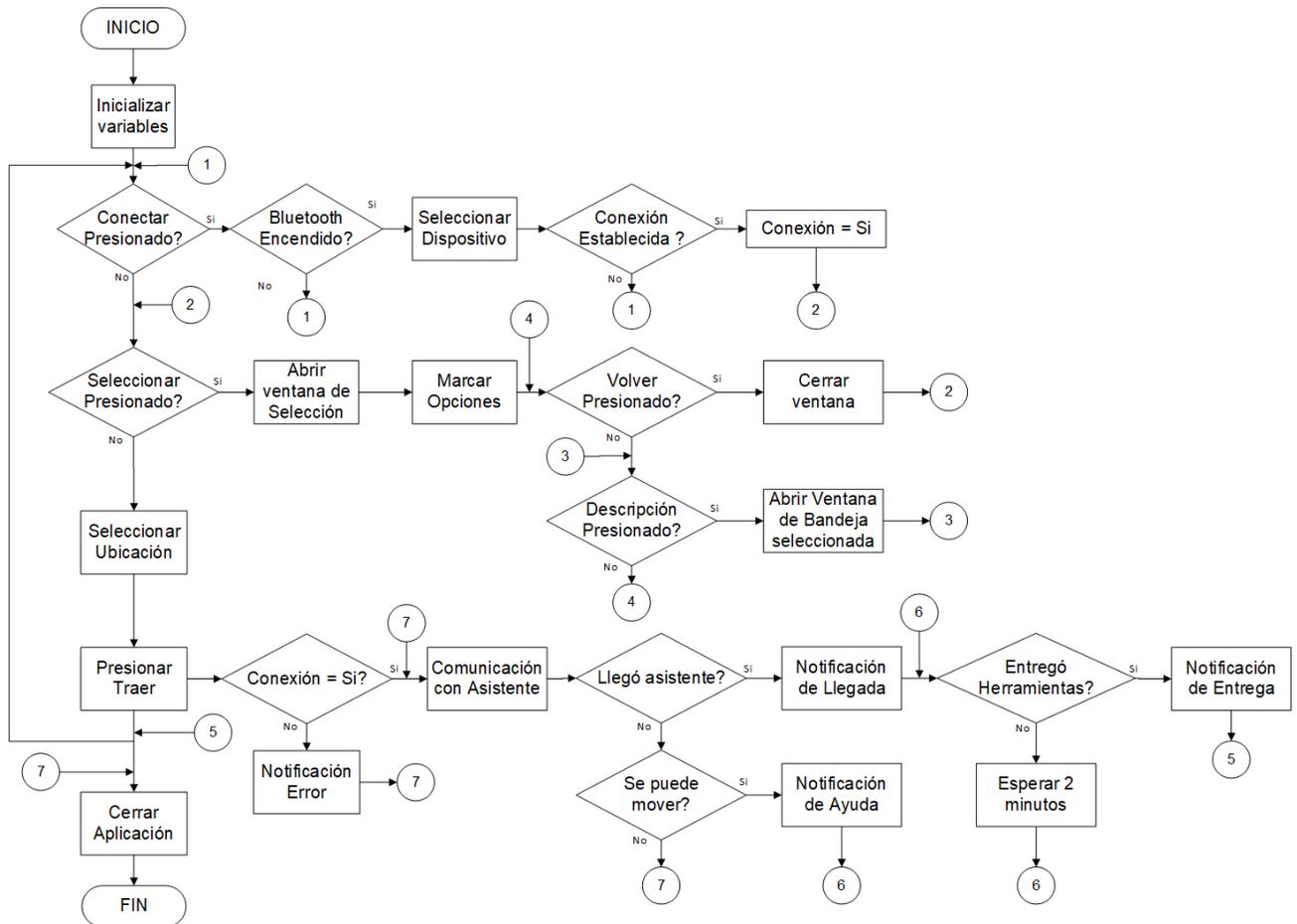


Figura 58. Diagrama de Flujo de App Móvil

12.7. Sistema de control para el asistente autónomo

Una de las partes más importantes en los robots móviles es el control, en el que intervienen la combinación de componentes electrónicos e informáticos para hacer que la máquina pueda realizar una acción programada, para esto se tiene 2 tipos de sistemas.

Sistemas en lazo abierto

En la Figura 59 se puede observar cómo funciona un sistema en lazo abierto en el que no existe una comprobación de la señal de salida, el funcionamiento es en una sola dirección, es decir, recibe una señal, la procesa y realiza una acción.

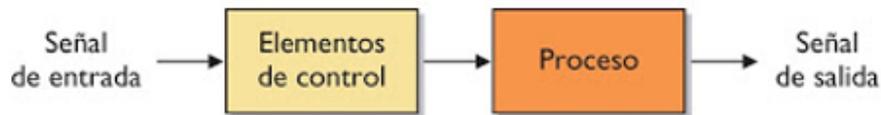


Figura 59. Esquema de sistema en lazo abierto

Sistemas en lazo cerrado

Para un sistema en lazo cerrado se requiere un sensor (Figura 60), puesto que existe una realimentación de la señal de salida; es decir, se mantiene constantemente supervisado, lo cual representa un sistema más eficaz y confiable.

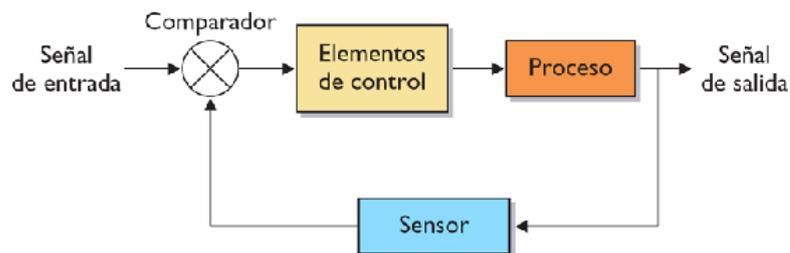


Figura 60. Esquema de sistema en lazo cerrado

Control de posición para estructura hexagonal rotatoria

Para el control de posición se tiene dos alternativas de sensores. El primero es un encoder en el que se analiza la señal para conocer la posición además de que se puede conocer el sentido de giro sea horario o antihorario. Por otro lado, se tiene un final de carrera, como el de la Figura 61. Al cambiar de posición presiona el sensor que funciona como contador de 1 a 6, siendo las posiciones que puede tomar la estructura hexagonal. Finalmente, el control utilizado se lo realiza con el final de carrera ya que en la programación se trabaja con interrupciones externas que brindan una respuesta más rápida al cambiar de posición.



Figura 61. Final de Carrera

Finalmente, para un mejor control de posición se necesita que la rotación de las bandejas sea un movimiento suave por lo que en la programación se establece una velocidad de 10 rpm para el giro de la estructura hexagonal.

Control de velocidad y giro para el robot móvil

Con el objetivo de que el robot móvil mantenga una trayectoria compuesta de líneas rectas se tiene un lazo cerrado con un giroscopio el cual se encarga de mantener al asistente en una misma orientación y al detectar una desviación para la derecha o izquierda va a disminuir la velocidad del motor correspondiente hasta regresar a la orientación inicial. Por ejemplo, si el asistente autónomo se desvía hacia la izquierda se disminuye la velocidad del motor encargado del lado izquierdo. Con esto se busca tener siempre una misma velocidad para los dos motores que es de 33 cm/s y se cumple con la trayectoria. Además, con el uso del sensor es más sencillo realizar los giros ya que se puede conocer el ángulo de giro y tener un mejor control.

Detección de obstáculos

Se tienen 2 sensores ultrasónicos por cada lado del asistente autónomo con el fin de monitorear alrededor de la máquina mientras se desplaza. Su funcionamiento consiste en que cada par de sensores solo se utilizan cuando sea necesario, es decir, no están activos todo el tiempo. Para una mejor explicación del algoritmo a utilizar se realiza el siguiente diagra-

ma de bloques de la Figura 62. Cabe recalcar que la distancia que se desplaza el asistente autónomo para evitar los obstáculos es determinada por medio de pruebas realizadas.



Figura 62. Algoritmo de evasión de obstáculos

Sistema Resultante

Finalmente se realiza el programa para el control del asistente autónomo en el que se integra el control de posición, control de velocidad, detección de obstáculos y comunicación con la aplicación móvil, por lo que se realiza el diagrama de flujo de la Figura 63, donde se tiene de manera resumida el funcionamiento en general del asistente autónomo.

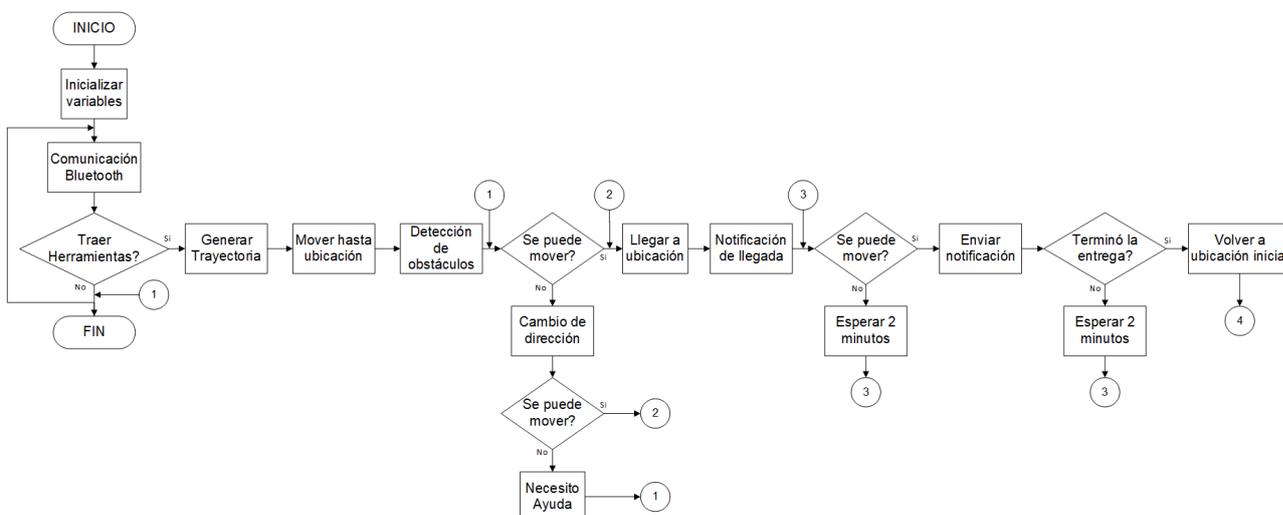


Figura 63. Diagrama de Flujo de Asistente Autónomo

13. Construcción del asistente autónomo

La construcción del asistente autónomo consiste en la adquisición de los materiales, la fabricación y el ensamblaje de todas las piezas diseñadas y seleccionadas para obtener el asistente autónomo. Para esto se lo divide en 4 partes importantes:

- Construcción de estructura hexagonal rotatoria

- Construcción del robot móvil
- Implementación del sistema electrónico y de control
- Ensamblaje del asistente autónomo

De igual manera que la etapa de diseño, cada una de estas secciones tiene sus respectivos elementos de los cuales se explica su proceso de construcción para concluir con el ensamblaje del asistente autónomo. Cabe recalcar que se realizan ciertas modificaciones al diseño debido a la dificultad para adquirir los mismos materiales en el mercado nacional y otras adaptaciones por facilidad de construcción.

13.1. Construcción de la estructura hexagonal rotatoria

En la Figura 64 se tiene un diagrama para indicar el orden en el que se realiza la construcción y se tiene cada uno de los elementos necesarios para la estructura, que son detallados a continuación.

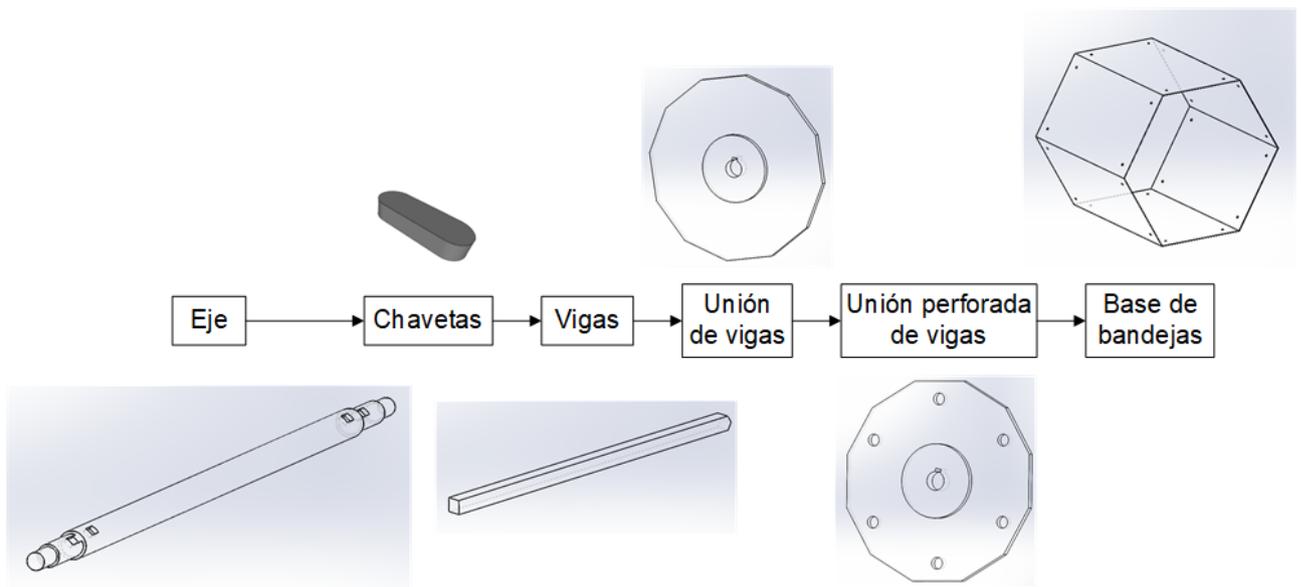


Figura 64. Diagrama de Bloques para Construcción de Estructura Hexagonal Rotatoria

Eje de estructura hexagonal rotatoria y chavetas

Con las dimensiones y material obtenido en el diseño realizado anteriormente se lo fabrica con el proceso de torneado y fresado. En el proceso de torneado se obtiene cada una de las secciones del eje, donde se debe disminuir el diámetro hasta llegar a las

dimensiones según los planos mecánicos. Cabe recalcar que solamente se trabaja en 4 secciones ya que el eje adquirido es de la dimensión más grande para no maquinar todo el eje sino las secciones necesarias.

En el diseño de las chavetas se toma en cuenta las dimensiones comerciales por lo que solamente se trabaja en el chavetero y se adquiere las chavetas. Luego, con el proceso de fresado, se realizan los chaveteros ubicados en el eje. El eje terminado se lo tiene en la Figura 65.



Figura 65. Eje de Estructura Hexagonal Rotatoria

Estructura Hexagonal

Para la construcción de la estructura hexagonal se trabaja primero por separado en las vigas, la pieza de unión de las vigas y la base de las bandejas.

En la parte de las vigas se obtienen las varillas del material seleccionado y se cortan de las medidas necesarias, luego se trabaja en la pieza que une las vigas en la que se modifica su forma ya que inicialmente tenía una geometría de un dodecaedro pero, por facilidad de construcción, se la realiza totalmente circular. Luego se realiza la base de las bandejas con una plancha de acero que es doblada para obtener la forma hexagonal. Finalmente, para unir estos elementos se utiliza soldadura SMAW con electrodos E6011 y se obtiene la estructura hexagonal de la Figura 66.



Figura 66. Estructura Hexagonal Rotatoria

Adaptaciones del motor

Tras una investigación de los motores disponibles en el mercado se encontraron los motores que se utilizan en los asientos eléctricos de los vehículos, los cuales no van a velocidades muy altas ya que trabajan con torques elevados, esto es porque el motor cuenta con una caja reductora del tipo tornillo sin fin y corona, como se puede ver en la Figura 67.

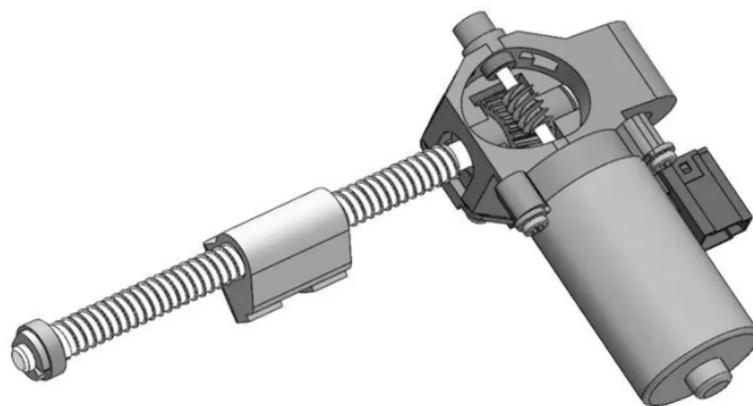


Figura 67. Motor eléctrico con caja reductora [14]

Aunque no se tiene mucha información con respecto al fabricante, se encuentra y se trabaja con los motores de un asiento Cherokee con las siguientes características, que cumplen con los requerimientos de diseño anteriores [25].

- Potencia: 15 Watts
- Torque: 23 Nm
- Velocidad: 50 rpm

Para utilizar el motor adquirido se deben realizar algunas modificaciones a la estructura base que se las detalla de mejor manera en una sección más adelante, a través de acoples entre el motor y el chasis. Además, los elementos para la transmisión de movimiento, como la banda y poleas, fueron adquiridos comercialmente.

13.2. Construcción del robot móvil

Para entenderlo de mejor manera se tiene el diagrama de la Figura 68, que indica los elementos necesarios para la fabricación y el orden en el que es realizado para obtener toda la plataforma móvil.

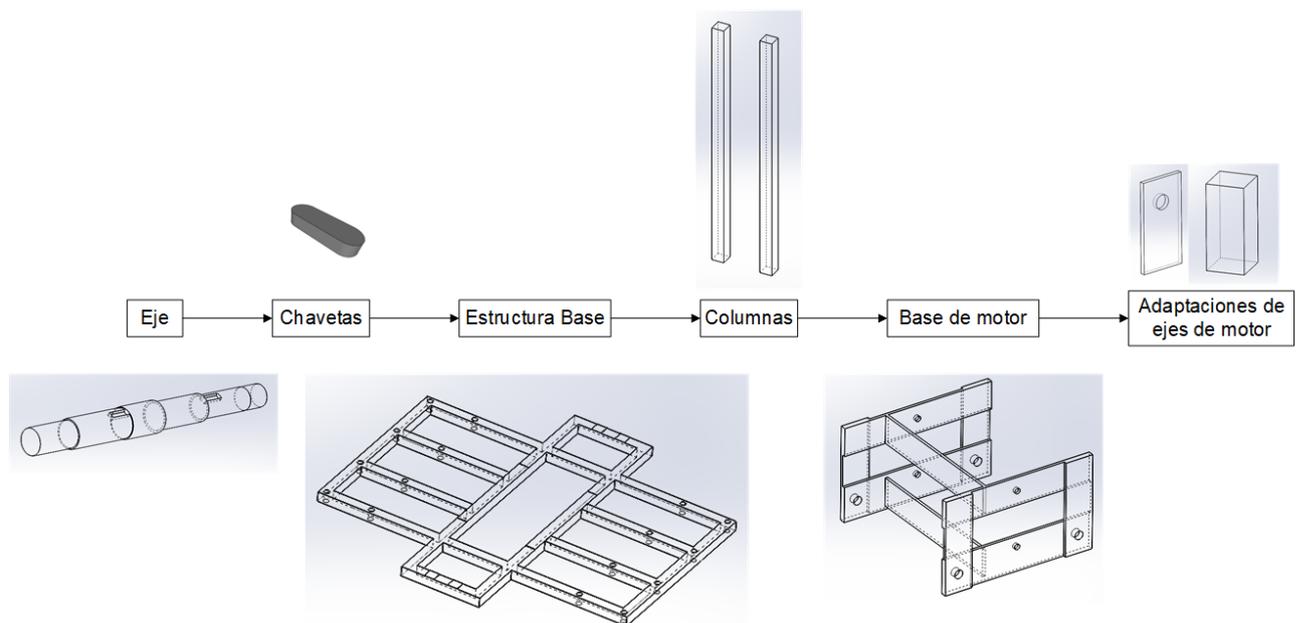


Figura 68. Diagrama de Bloques para Construcción de Robot Móvil

Eje de transmisión y chavetas

De manera similar a la fabricación del eje de la estructura hexagonal, se requiere de un proceso de torneado y fresado, a diferencia de que se lo repite 4 veces ya que se requiere un eje por cada llanta. De igual manera se adquiere la chaveta comercial y el piñón que va en el eje como se puede ver en la Figura 69.



Figura 69. Eje de Transmisión

Chasis

Se adquiere el material según el diseño realizado, que consiste en un tubo cuadrado que se lo corta según los planos mecánicos. Una vez obtenidas todas las piezas se suelda mediante proceso SMAW con electrodos E6011. En esta parte también se toma en cuenta las columnas diseñadas que son parte del chasis y las adaptaciones realizadas para la sujeción del motor adquirido y los ejes, que se indica en la siguiente sección. Como protección a la corrosión y un mejor acabado estético se utiliza pintura como recubrimiento.

Adaptaciones del motor

Como se explicó anteriormente acerca de la disponibilidad de los motores se trabaja con el motor de la Figura 70 y se puede ver que cuenta con 3 motores en su estructura, lo cual resulta en menor costo, menor peso y un mejor aprovechamiento del espacio dentro del asistente autónomo, aunque no cumple con la velocidad requerida. Por lo tanto, el asistente autónomo se va a desplazar de manera más lenta a lo diseñado, pero esto no afecta en su funcionalidad.

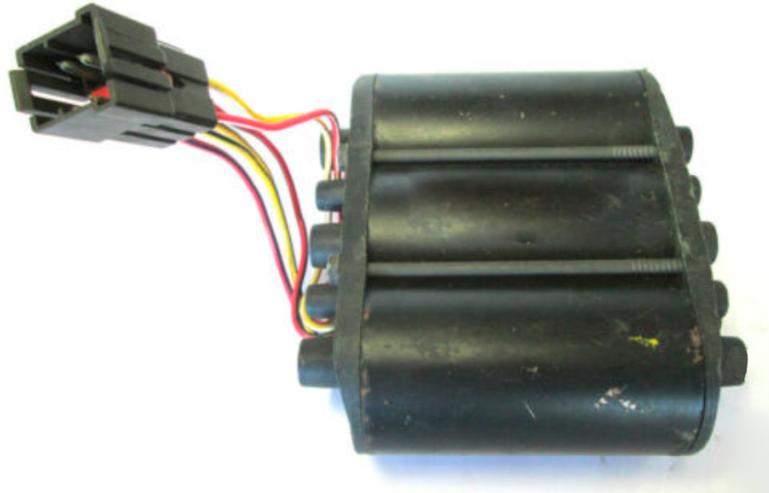


Figura 70. Motor DC de asientos eléctricos

Para utilizar este motor se debe realizar algunas modificaciones en el chasis de la estructura empezando por la base de la Figura 71 que sujeta el motor. Al tener el motor de la figura anterior, se decide utilizar el motor superior para el movimiento de la estructura hexagonal y los dos inferiores para el lado izquierdo y derecho.

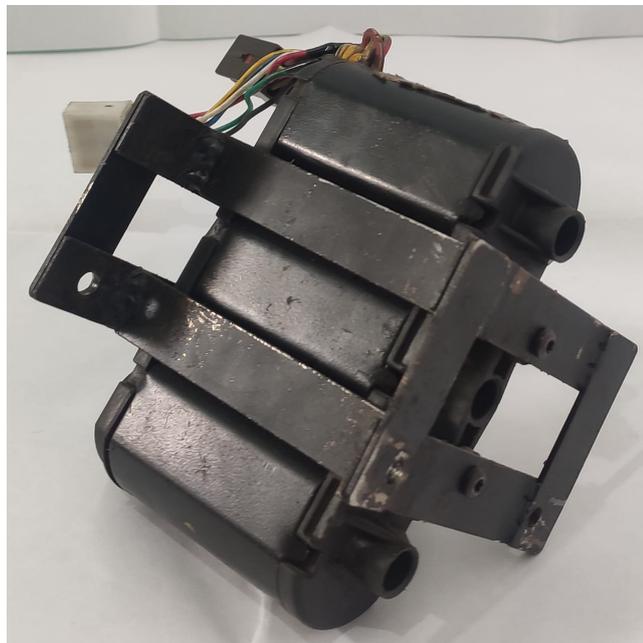


Figura 71. Motor con Base

Como se menciona en una sección anterior, el motor cuenta con cajas reductoras y ejes para acoplar los elementos de transmisión, sean los piñones o poleas. Estos ejes deben ir alineados con el eje transmite el movimiento; por ejemplo, el eje del motor que controla la estructura hexagonal debe estar en paralelo para tener un correcto funcionamiento y es

donde entran las adaptaciones realizadas en el chasis ya que se necesita elementos que garanticen la correcta alineación. Para esto se utilizan rodamientos en los ejes, varillas y pernos para sujetar los ejes y las cajas reductoras. A su vez esto va sujeto al chasis por lo que se realizan perforaciones en la estructura. Es así que se obtiene el chasis de la Figura 72 con las adaptaciones necesarias según el motor adquirido.

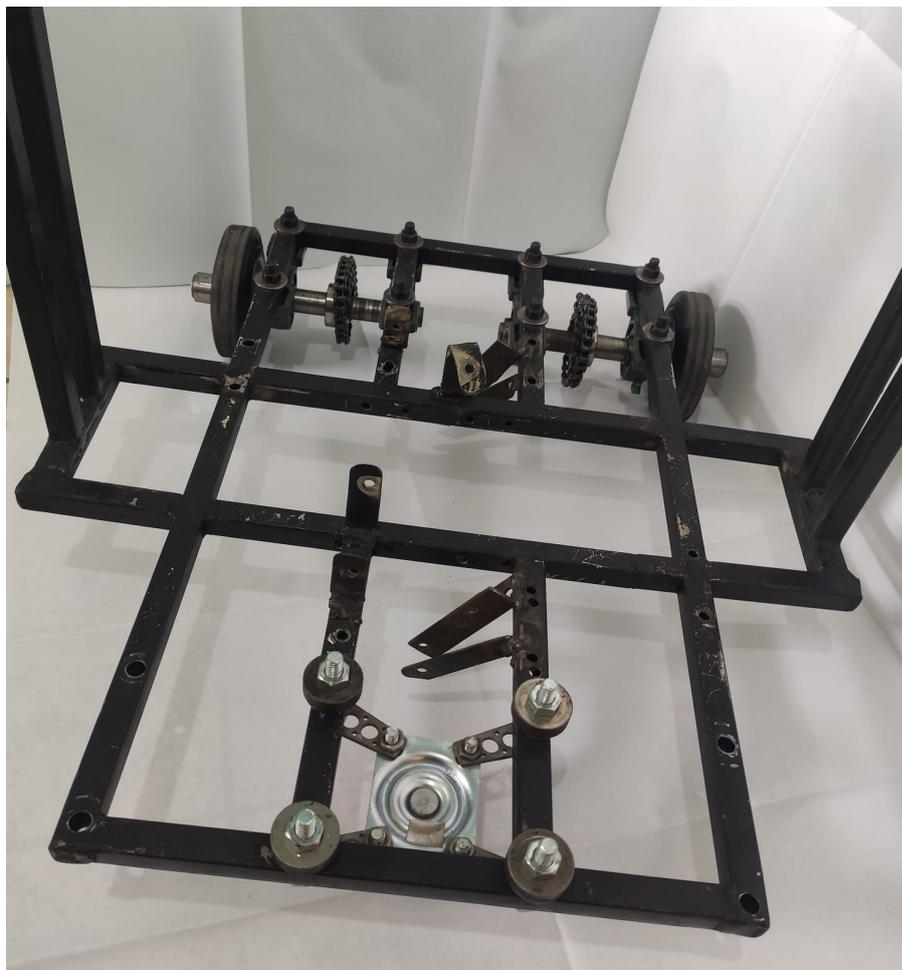


Figura 72. Chasis con Adaptaciones

13.3. Implementación de sistema electrónico

Se realiza una placa para la conexión de los sensores, actuadores, drivers y módulo de comunicación con la placa Arduino, también conocido como shield. Esta placa se coloca sobre el Arduino Mega y así se tiene todas las conexiones necesarias.

Para la implementación, primero se realiza el diseño en un software especializado en PCB como es Proteus en el que se obtiene la placa de la Figura 73. Se toma en cuenta cada uno de los componentes detallados anteriormente y se los ubica de tal forma que la placa tenga

un orden además de las conexiones entre estos componentes y la placa Arduino.

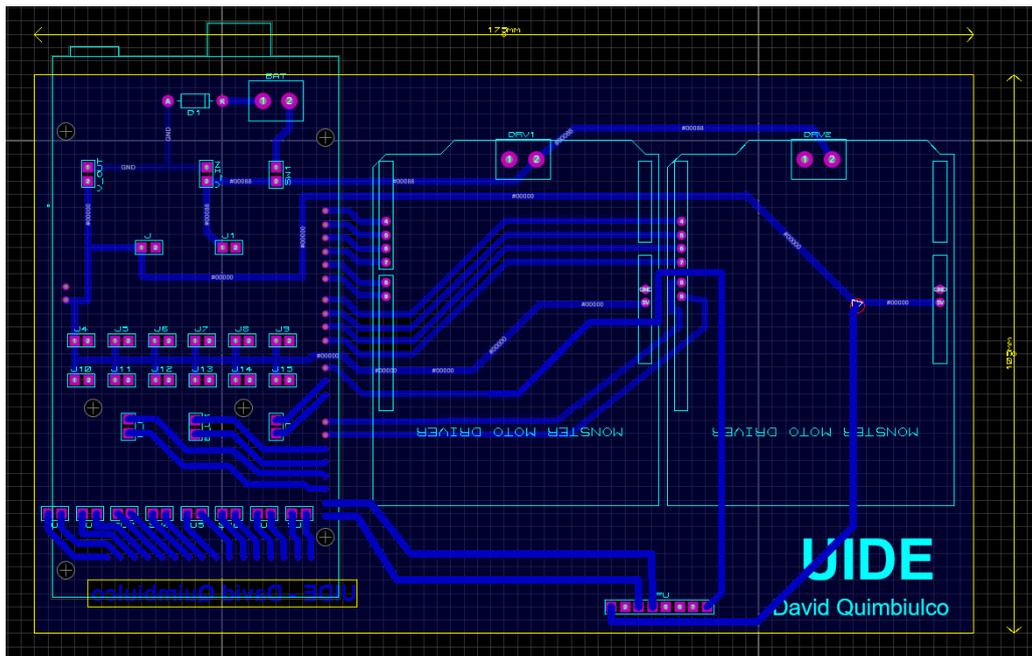


Figura 73. Diseño de PCB en software Proteus

Con el diseño realizado se implementa el circuito y se coloca cada uno de los componentes en el shield de la Figura 74.

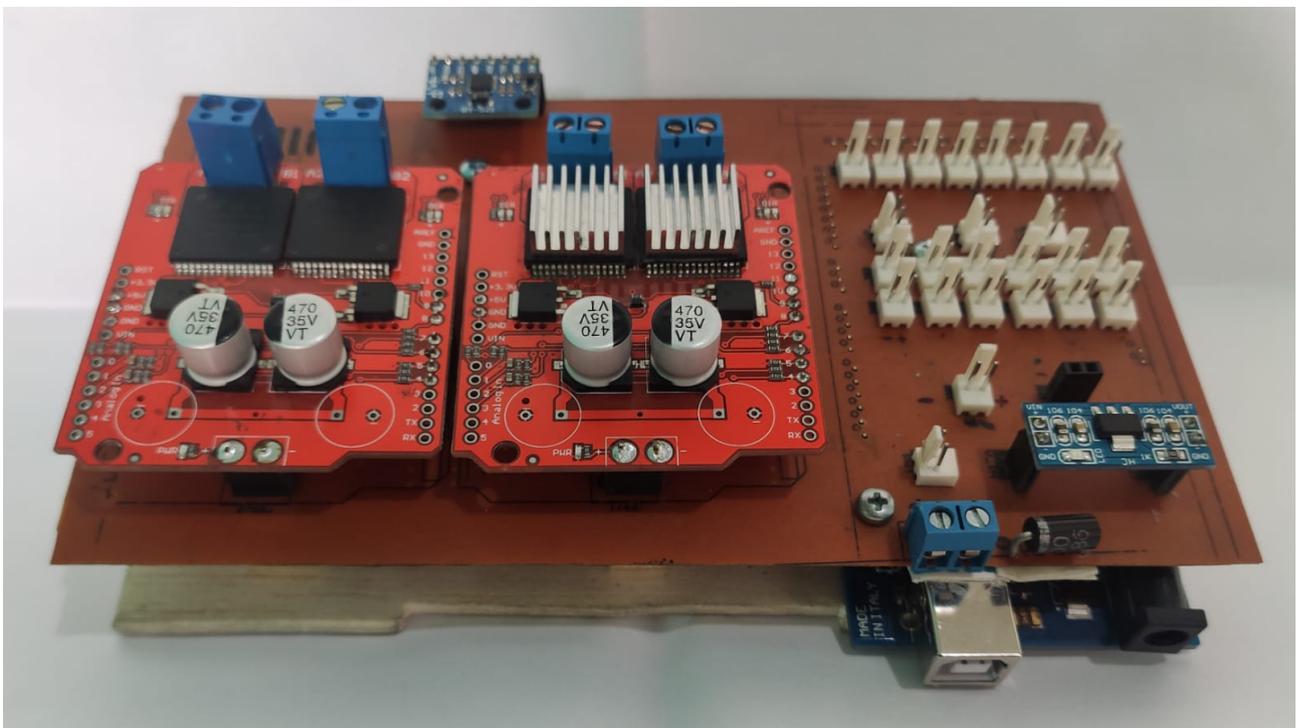


Figura 74. Placa Circuito Electrónico Implementado

13.4. Ensamble del asistente autónomo

Culminado el proceso de construcción se realiza el ensamblaje de cada una de las piezas para obtener el asistente autónomo. De manera inicial se trabaja en la parte de la estructura, la cual es un diseño desmontable en su mayoría. Se tiene el diagrama de la Figura 75 que explica de forma resumida el proceso para ensamblar el asistente autónomo. Como se puede ver, los números indican el orden para unir las piezas mientras que las flechas indican el flujo que debe seguir para culminar el ensamble.

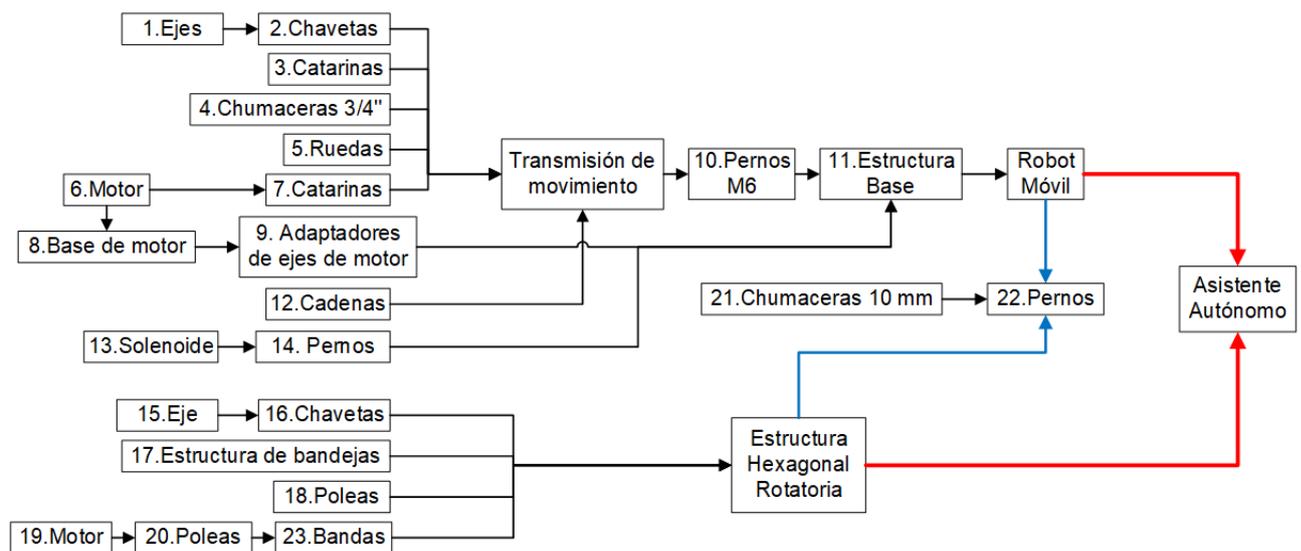


Figura 75. Diagrama de Bloques para Ensamble de Asistente Autónomo

Se debe tomar en cuenta que en este proceso se utilizan herramientas externas como llaves hexagonales para los pernos y tuercas, desarmadores para los tornillos y en algunas piezas es necesario el uso de prensa para que quede perfectamente acoplado, por ejemplo, el eje con el piñón. Luego se tiene la parte electrónica que consiste en colocar la placa y unir los conectores de los sensores, actuadores y fuente de alimentación. En esta parte se verifica la alimentación que funcione correctamente para cada uno de los componentes y se activa uno por uno para comprobar el funcionamiento de cada sensor y actuador. Finalmente, se obtiene el asistente autónomo ensamblado por completo en la Figura 76.



Figura 76. Asistente Autónomo Ensamblado

14. Pruebas de Funcionamiento

Se prueba las capacidades del asistente autónomo tomando en cuenta la comunicación, el movimiento de cada una de las partes de interés como la rotación de la estructura portaherramientas, el desplazamiento del asistente, y la autonomía del sistema completo para verificar su correcto funcionamiento.

14.1. Pruebas de Conectividad y Comunicación

Es esencial la comunicación del asistente autónomo con el usuario ya que es necesario conocer el estado del asistente autónomo en todo momento mientras está en uso, por lo que se comprueba la comunicación bluetooth dentro del entorno de trabajo. La prueba

consiste en ejecutar la aplicación desde diversos puntos del taller, tomando en cuenta que sean los más críticos, como por ejemplo los más lejanos y se comprueba que se establezca la conexión y que llegue la información solicitada, esto se verifica por medio de las acciones del asistente autónomo. Por ejemplo, si el usuario envía que desea herramientas de la bandeja 2 el asistente deberá moverse hasta la posición 2 de la estructura hexagonal rotatoria, caso contrario existen problemas en la comunicación. Adicionalmente se toma en cuenta la línea de vista para las distintas pruebas realizadas.

Resultados

De las pruebas realizadas se obtienen los resultados de la Tabla 32, en la que se obtiene una distancia máxima de 14 a 16 metros para la comunicación y conectividad de la aplicación con el asistente autónomo. Además, se observa que al sobrepasar esta distancia la aplicación y el asistente si se conectan, pero tarda mucho tiempo en realizar la acción enviada o ni si quiera se comunican. Finalmente, al trabajar dentro del taller descrito anteriormente la distancia máxima obtenida satisface al buen funcionamiento del asistente autónomo.

Tabla 32. Resultados de las Pruebas de Conectividad y Comunicación

Prueba No.	Distancia [m]	Línea de Vista	Conectividad	Comunicación
1	1	Si	Si	Si
2	2	Si	Si	Si
3	4	Si	Si	Si
4	6	Si	Si	Si
5	6	No	Si	Si
6	8	Si	Si	Si
7	10	Si	Si	Si
8	10	No	Si	Si
9	14	Si	Si	Si
10	14	No	Si	No
11	16	Si	Si	Si
12	16	No	Si	No
13	18	Si	Si	No
14	18	No	No	No
15	20	Si	No	No

14.2. Pruebas de Movimiento de Estructura Hexagonal Rotatoria

La función principal del asistente autónomo es que tenga la capacidad de entregar las herramientas que el usuario necesite, por lo que se debe comprobar que la estructura hexagonal rotatoria se mueva hasta la posición requerida y que el usuario pueda tomar las herramientas necesarias. Durante la prueba se verifica que el movimiento se realice correctamente en las 6 posiciones establecidas y que se mantenga en esa posición hasta que el usuario pueda tomar las herramientas. Además, se comprueba el funcionamiento de la estructura cuando se necesiten varias herramientas, el asistente autónomo debe ser capaz de mantener la posición o cambiar a la siguiente bandeja según los requerimientos del usuario a través de la app móvil.

Resultados

Inicialmente para el control de posición de la estructura hexagonal rotatoria se utiliza un encoder en el eje del motor, el cual se cambió posteriormente debido a que se demoraba en parar en la posición requerida. Es así que se utiliza un fin de carrera que funciona con interrupciones las cuales son activadas por cada una de las 6 posiciones. Con esta modificación se obtienen los resultados de la Tabla 33, en la que se observa un correcto funcionamiento en el movimiento y posición de la estructura hexagonal rotatoria. Además, se observa que al requerir de todas las posiciones el fin de carrera en ocasiones presenta un problema debido al efecto rebote el cual es corregido en programación.

Tabla 33. Resultados de las Pruebas de Movimiento de Estructura Hexagonal Rotatoria

Prueba No.	Posición	Bandejas Acertadas	Bandejas Erradas
1	0	1	0
2	1	1	0
3	2	1	0
4	3	1	0
5	4	1	0
6	5	1	0
7	0,2,4	3	1
8	1,3,5	3	0
9	Todas	5	1
10	Todas	6	0

14.3. Pruebas de Desplazamiento del Asistente Autónomo

Un aspecto importante a considerar es el desplazamiento del robot móvil ya que al ser un asistente autónomo debe ser capaz de ir a donde es solicitado sin problema. Además, se toma en cuenta el entorno de trabajo ya que no se va a desplazar en un entorno constante, es decir, al trabajar en un taller hay momentos en el que se encuentra un vehículo estacionado y prohíbe el paso del asistente autónomo obligándole a desplazarse por otra trayectoria hasta llegar al lugar solicitado; sin embargo, después de un momento el vehículo ya no se encuentra en esa ubicación y el asistente ya no toma el desvío que realizó anteriormente, sino que sigue la trayectoria inicial. Por lo que en esta prueba se verifica principalmente que llegue a la posición solicitada, con obstáculos en el camino o no.

Resultados

Durante las pruebas se presentan problemas con los motores, ya que inicialmente se creía que eran lo suficientemente fuertes para efectuar los movimientos, pero se observó que durante el giro no logran romper la inercia por falta de torque, debido a esto se realizan nuevas modificaciones para que el motor no soporte tanta carga. La solución implementada consiste en eliminar 2 de las ruedas delanteras para que los motores solamente controlen una rueda cada uno y se utiliza una rueda de apoyo que facilita el giro, logrando así el movimiento requerido.

Luego se obtienen los resultados presentados en la Tabla 34 en la que se verifica el correcto funcionamiento del desplazamiento ya que cumple con llegar a la ubicación indicada, pero en esta parte se logra apreciar un error con respecto a los movimientos realizados. Se identifica que en el movimiento en línea recta tiene un error máximo de 0.3 m, mientras que en el giro los movimientos son de 90° donde se tiene un error máximo de 5°. En general, este error no es crítico ya que el operario con un paso llega a la ubicación del asistente autónomo.

Tabla 34. Resultados de las Pruebas de Desplazamiento del Asistente Autónomo

Prueba No.	Desplazamiento	Tido de Movimiento	Error
1	2 m	Recta	0.10 m
2	3 m	Recta	0.15 m
3	5 m	Recta	0.18 m
4	8 m	Recta	0.20 m
5	10 m	Recta	0.27 m
6	10 m	Recta	0.25 m
7	12 m	Recta	0.26 m
8	14 m	Recta	0.25 m
9	90°	Giro	+2°
10	90°	Giro	-2°
11	90°	Giro	+5°
12	90°	Giro	-5°

Además, en esta prueba se verifica el funcionamiento de los sensores para evitar obstáculos, donde se utiliza solamente un sensor en la parte frontal ya que el movimiento programado será siempre hacia adelante, por lo que no es necesario sensores en la parte posterior. Por otro lado, en la parte izquierda y derecha del asistente autónomo tampoco se utiliza sensores ya que al ser un robot de tracción diferencial el giro se da sobre el mismo eje y al detectar un obstáculo gira a la nueva dirección y avanza de estar libre sin necesidad de más sensores como se había indicado inicialmente.

14.4. Pruebas de Autonomía

El objetivo principal de esta prueba es comprobar el tiempo de funcionamiento que puede trabajar el asistente autónomo con las baterías totalmente cargadas. Para esto se realiza pruebas con el asistente encendido y sin trabajar, cuando tiene trabajo constante y cuando tiene trabajo intermitente, obteniendo la autonomía en distintas condiciones.

Resultados

Con respecto al diseño inicial se realiza una modificación en el banco de baterías, ya que se implementa con una sola batería de uso automotriz, como la que se tiene en la Figura 77, que de igual manera satisface las necesidades del asistente autónomo.



Figura 77. Batería ECO POWER NS-40 [15]

Tras las pruebas de autonomía se obtienen los resultados de la Tabla 35. Cabe recalcar que para cargar la batería se utiliza un cargador de uso automotriz por una hora cuando no fue sometido a trabajo o con trabajo intermitente, mientras que con trabajo continuo se necesita de dos horas para una carga completa. Además, durante las pruebas sin trabajo se observa aspectos interesantes en el asistente autónomo. Primero, se mantiene encendido por los 5 días, pero esto reduce la carga de la batería lo cual al utilizar el asistente autónomo funciona con movimientos más lentos de los motores. Luego de los 6 días el asistente sigue encendido por lo que no se obtiene un valor máximo de autonomía del asistente, pero para no afectar la funcionalidad se establece que la autonomía es de 5 días.

Tabla 35. Resultados de las Pruebas de Autonomía

Tipo de trabajo	Duración [días]
Continuo	1
Intermitente	3
Sin trabajo	5 o más

14.5. Pruebas del Sistema Completo

Finalmente, se comprueba el funcionamiento general del asistente autónomo, es decir, se comprueba el trabajo en conjunto de cada una de las funciones. Se busca que no exista interferencia entre ninguna de ellas obteniendo tiempos de ejecución del trabajo completo

desde que es solicitado hasta cuando entregue la última herramienta solicitada, también se observa la facilidad al usuario, ya que al trabajar en un taller debe ser manipulado por cualquier operario sin dificultad alguna y que cumpla satisfactoriamente con todas las funciones.

Resultados

Se obtiene los resultados de la Tabla 36, en donde su funcionalidad promedio es de 95.5% y se toma un tiempo aproximado de 1 minuto para realizar su tarea completa, pero este tiempo depende del número de bandejas solicitadas y de la distancia que necesita recorrer para llegar a la ubicación indicada. Por esto, se realiza pruebas con distancias recorridas similares para un mejor resultado.

Tabla 36. Resultados de las Pruebas del Sistema Completo

Prueba No.	Recorrido [m]	Bandejas	Duración [s]	Funcionalidad [%]
1	4	1	33.38	100
2	4	2	34.56	100
3	5.5	3	47.76	100
4	5.5	4	46.75	100
5	6.5	5	53.77	100
6	4	2,4	40.26	90
7	5.5	3,5	48.95	90
8	4	1,2,3	63.03	100
9	5.5	3,4,5	69.25	85
10	6.5	1,2,3,4,5	76.65	90

Además, se tomó el tiempo que le toma a un operario hacer el mismo trabajo, es decir, recibir la orden de pasar una o varias herramientas, ir a buscarlas, y entregarlas a donde le han pedido obteniendo un tiempo promedio de 4 a 5 minutos siendo un tiempo mucho mayor que al utilizar el asistente autónomo.

15. Análisis de costos

En el análisis de costos se toma en cuenta tanto el valor de los materiales empleados, como los servicios requeridos para la construcción del asistente autónomo. En la Tabla 37 se encuentra de manera detallada cada uno de estos valores.

Tabla 37. Costos Detallados del Asistente Autónomo

Material/Servicio	Cant.	V. Unitario [USD]	V.Total [USD]	Descripción/Comentarios
Arduino Mega	1	20	20	
Sensor Ultrasónico	8	2	16	HC-SR04
Encoder	2	2.5	5	FC-03
Driver Motores	2	15	30	Monster Motor Shield
IMU (Inertial Measurement Unit)	1	3.5	3.5	MPU 6050
Módulo Bluetooth	1	5	5	HC-06
Motores	3	15	45	12 VDC
Electroimán	1	9	9	Solenoid HCNE-1039
AMS 1117	1	2	2	5 Voltios
Batería	1	60	60	12 Voltios
PCB (Printed Circuit Board) - Global	1	20	20	Baquelita, Molex, Diseño, Implementación, Diodo
Cables y Conectores	1	5	5	Conexiones Eléctricas
Chumacera 3/4"	4	5	20	
Chumacera 10 mm	6	5.25	31.5	
Polea 4"	1	3.28	3.28	Polea en V
Polea 2"	1	2.11	2.11	Polea en V
DAYCO 15600	1	7	7	Banda en V
Llantas	2	4.63	9.26	Radio 6 cm
Rueda de apoyo	1	2	2	Radio 3.5 cm
Catarina	4	5	20	20 Dientes AISI 35
Cadena	1	18	18	3 metros AISI 35
Candado	1	0.5	0.5	
Materiales Mecánicos de Construcción (Global)	1	400	400	Varillas, Tubos Cuadrados, Planchas, Otros
Servicio de Construcción (Global)	1	300	300	Torneado, Fresado, Corte, Doblado, Taladrado, Soldadura, Ensamblaje.
		Total [USD]	1034.15	

Finalmente, para obtener un valor comercial del asistente autónomo se agrega un valor de \$2000 por el trabajo de ingeniería realizado en la parte de diseño mecánico, diseño electrónico y de control, obteniendo un valor total de \$3034.15.

16. Conclusiones

- Se construye un asistente autónomo que transporta herramientas de accionamiento manual para el taller "Electricidad Automotriz Quimbiulco" con las dimensiones 795 x

570 x 900 mm, un peso de 130 kg, siendo de utilidad para el taller ya que ocupa el espacio de un carro de herramientas convencional, puede transportar 48 herramientas y trabaja sin problema durante 1 día a trabajo continuo.

- El asistente autónomo aproximadamente se desplaza con una velocidad constante de 33 cm/s y 10 rpm para la rotación de las bandejas con herramientas, por lo que toma menos de la mitad de tiempo que un operario al hacer este trabajo, y así se optimiza los tiempos dentro del taller.
- El asistente autónomo llega satisfactoriamente a la ubicación enviada por el operario, con un error máximo de 0.3 m.
- Para el control del asistente autónomo se tiene una aplicación Android que comunica al operario y al asistente por vía bluetooth. La comunicación es interactiva al ser de doble vía ya que el asistente informa al operario cada que culmina una tarea por medio de notificaciones y espera su confirmación para continuar, obtenido una mayor facilidad de uso para el operario. Además, esta comunicación tiene un alcance de 15 metros, lo cual garantiza el correcto funcionamiento del asistente porque está dentro del rango del taller.
- El control del asistente cumple con el objetivo de ser autónomo al ser desarrollado en la plataforma Arduino por medio de una placa Arduino Mega con sensores y actuadores compatibles para la programación, además de algoritmos que garantizan dicha autonomía.
- Para garantizar un mejor mantenimiento y uso del asistente autónomo se realiza un diseño desmontable que brinda una mayor facilidad de ensamblaje y reemplazo de piezas en un futuro. Además, permite la modificación de ciertas partes en la estructura para implementar motores con un mayor torque o sensores de precisión.

Finalmente, en base a los objetivos planteados y las pruebas realizadas, se comprueba que el asistente autónomo cumple satisfactoriamente cada una de sus funciones brindando una solución tecnológica para el taller además de ventajas significativas frente a lo que puede hacer un operario, un ejemplo de esto es la reducción de tiempos de trabajo.

17. Recomendaciones

- Al trabajar de manera continua por 1 hora aproximadamente los drivers de los motores comienzan a calentarse debido al alto consumo de corriente y a pesar de que estos componentes cuentan con el enfriamiento necesario es recomendable realizar pausas de 10 a 15 minutos.
- Los motores que permiten el desplazamiento del asistente autónomo pueden ser reemplazados con unos de mayor torque para brindar una mejor eficiencia al funcionamiento del asistente autónomo dentro del taller. Además, para trabajar en pisos de características diferentes se debe modificar las llantas utilizadas ya que el diseño caracterizado para el taller Electricidad Automotriz.
- Para un mejor control del desplazamiento del asistente autónomo se puede implementar controladores y un mayor número de sensores dentro del asistente autónomo como por ejemplo controladores PID o de manera externa al asistente autónomo se puede utilizar visión artificial por medio de cámaras para una mayor precisión en la ubicación del asistente y el operario.
- La batería utilizada puede reemplazarse con una batería o banco de baterías litio que cumplan con las características del diseño realizado anteriormente, lo cual brinda menor peso en el asistente, mejor funcionalidad e incrementa los costos.
- Al tener un diseño desmontable, en la carrocería se puede modificar fácilmente tanto en materiales como en diseño con el fin de obtener los requerimientos necesarios sea en la parte estética, resistencia o en costos.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. M. Sánchez-Martín, P. Jiménez Schlegl, F. Millán Rodríguez, J. Salvador Bayarri, V. Monllau Font, J. Palou Redorta, y H. Villavicencio Mavrigh, "Historia de la robótica: De Arquitas de Tarento al robot da Vinci. (Parte I)," *Actas Urologicas Espanolas*, vol. 31, no. 3, 2007.
- [2] A. Reininger, *Wolfgang von Kempelen: A Biography*. East European Monographs, 2007.
- [3] V. Espantoso Miranda, "Modelado y simulación del robot PASIBOT : estudio de la rigidez y mejora en la prevención del vuelco lateral," Ph.D. dissertation, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [4] NASA. Mars exploration rovers. [En línea]. Disponible: <https://mars.nasa.gov/mer/>
- [5] Honda. Honda robotics asimo. [En línea]. Disponible: <https://www.honda.mx/asimo/>
- [6] A. Robotics. Digit robot. [En línea]. Disponible: <https://www.agilityrobotics.com/>
- [7] HiBot. Thesbot-dual. [En línea]. Disponible: <https://www.hibot.co.jp/>
- [8] FESTO. Bionicfinwave. [En línea]. Disponible: <https://www.festo.com/>
- [9] A. Drone. Action drone ad2. [En línea]. Disponible: <https://actiondroneusa.com/systems/>
- [10] A. C. Andes, "Coordinación y control de robots móviles basado en agentes," Ph.D. dissertation, Universidad Politecnica de Valencia, 2011. [En línea]. Disponible: <http://dspace.cc.upv.es/handle/10251/11167>
- [11] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9th ed. McGraw-Hill Interamericana, 2012.
- [12] Ampflow. [En línea]. Disponible: https://www.ampflow.com/ampflow_gearmotors.htm
- [13] R. Mott, *Diseño de elementos de máquinas*, 4th ed. Pearson, 2009.
- [14] GrabCAD. Power seat motor. [En línea]. Disponible: <https://grabcad.com/library>

- [15] BateríasDACAR. Eco power. [En línea]. Disponible: <http://bateriasdacar.com/categoria-producto/eco-power/>
- [16] I. Asimov, *Yo Robot*. Edhasa, 1979.
- [17] A. Garrell y L. Guilera, *La Industria 4.0 en la sociedad digital*. Marge books, 2019.
- [18] O. Verion, *Tabla de conversión y Formulas*.
- [19] Arduino store. [En línea]. Disponible: <https://www.store.arduino.cc/>
- [20] NaylampMechatronics. Sensores. [En línea]. Disponible: <https://naylampmechatronics.com/16-sensores>
- [21] F. Sánchez-Martín, P. Jiménez Schlegl, F. Millán Rodríguez, J. Salvador-Bayarri, V. Monllau Font, J. Palou Redorta, y H. Villavicencio Mavrigh, “Historia de la robótica: de Arquitas de Tarento al Robot da Vinci (Parte II),” *Actas Urológicas Españolas*, vol. 31, no. 3, 2007.
- [22] J. A. Gómez Cánovas, “Robotica movil. estudio y caracterizacion del robot movil KJUNIOR desarrollo de aplicacion de robot laberinto,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.
- [23] JBM. Carro de herramientas 7 cajones. [En línea]. Disponible: <https://www.jbmcamp.com/es/products/53765-carro-de-herramientas-7-cajones-rojo>
- [24] ADELCA. Barras cuadradas. [En línea]. Disponible: <https://www.adelca.com/>
- [25] PowerMotors. High-end automotive electric seat bldc motor solution. [En línea]. Disponible: <https://power-motor.com/?AutomotivePrecision/SeatBLDCSolution.html>