



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA E
INDUSTRIAS
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SISTEMA AUTOMÁTICO
DE MOVILIZACIÓN DENTRO DEL HOGAR**

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

RONAL ESTALIN PONCE ALUISA

DIRECTOR: ING. GUILLERMO MOSQUERA. MSC

Quito, octubre 2017

© Universidad Tecnológica Equinoccial 2017.
Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	172308265-5
APELLIDO Y NOMBRES:	Ponce Aluisa Ronal Estalin
DIRECCIÓN:	Av. OE-5H (s16-46) y Ajaví
EMAIL:	rony16_1989@hotmail.com
TELÉFONO FIJO:	(02) 2-962817
TELÉFONO MOVIL:	0984109861

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Diseño y construcción de un sistema automático de movilización dentro del hogar
AUTOR O AUTORES:	Ronal Ponce
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	02/10/2017
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	Ing. Guillermo Mosquera. MSC
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero en Mecatrónica
RESUMEN: Mínimo 250 palabras	<p>El presente proyecto tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema mecatrónico que permita la navegación automática en entornos interiores, con tan solo seleccionar el destino.</p> <p>El desarrollo del proyecto sobre un sistema operativo robótico de software libre (ROS), permitió un control al más bajo nivel de todos los dispositivos y trabajar de manera colaborativa con códigos reutilizables, principalmente debido a la necesidad de implementación de</p>

	<p>un complejo algoritmo de navegación llamado EFK SLAM.</p> <p>Como resultado se obtuvo una correcta sinergia entre todos los subsistemas diseñados: mecánico, electrónico y de control; que trabajando en conjunto guían de manera autónoma a una silla de ruedas hacia el destino seleccionado, portando un usuario de hasta 90 kg, con un tiempo de 61 minutos de autonomía energética.</p>
<p>PALABRAS CLAVES:</p>	<p>SLAM, navegación automática, planificación de rutas.</p>
<p>ABSTRACT:</p>	<p>This project's aim is the design and implementation of a mechatronic system that allows the automatic navigation in indoor environments, with only select the destination.</p> <p>The development of the project on a robotic operating system of free software (ROS), allowed for a control to the lowest level of all devices and work collaboratively with reusable codes, mainly due to the need to implement a complex navigation algorithm called EFK SLAM.</p> <p>The result was a correct synergy between all subsystems designed: mechanical, electronic and control;</p>

	that working together guide autonomously to a wheel chair to the selected destination, carrying a user of up to 90 kg, with a time of 61 minutes of energy autonomy.
KEYWORDS	SLAM, automatic navigation, planning routes.

Se autoriza la publicación de este Proyecto de Titulación en el Repositorio Digital de la Institución.

f:  _____

PONCE ALUISA RONAL ESTALIN

C.I 172308265-5

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **PONCE ALUISA RONAL ESTALIN**, CI 172308265-5 autor/a del proyecto titulado: **Diseño y construcción de un sistema automático de movilización dentro del hogar** previo a la obtención del título de **INGENIERO EN MECATRÓNICA** en la Universidad Tecnológica Equinoccial.

1. Declaro tener pleno conocimiento de la obligación que tienen las Instituciones de Educación Superior, de conformidad con el Artículo 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior, de entregar a la SENESCYT en formato digital una copia del referido trabajo de graduación para que sea integrado al Sistema Nacional de información de la Educación Superior del Ecuador para su difusión pública respetando los derechos de autor.
2. Autorizo a la BIBLIOTECA de la Universidad Tecnológica Equinoccial a tener una copia del referido trabajo de graduación con el propósito de generar un Repositorio que democratice la información, respetando las políticas de propiedad intelectual vigentes.

Quito, 2 de Octubre del 2017

f:



PONCE ALUISA RONAL ESTALIN

C.I 172308265-5

DECLARACIÓN

Yo **RONAL ESTALIN PONCE ALUISA**, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Universidad Tecnológica Equinoccial puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.



PONCE ALUISA RONAL ESTALIN

C.I 172308265-5

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título "**Diseño y construcción de un sistema de movilización dentro del hogar**", que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica** fue desarrollado por **Ronal Estalin Ponce Aluisa**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19,27 y 28.



Ing. Guillermo Mosquera. Msc

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I 080261305-9

DEDICATORIA

Primero a Dios por su amor infinito.

A mamá marianita que culminando este proyecto se nos adelantó y ahora nos cuida y bendice desde arriba; a mi madre por su paciencia, amor y esa muestra ineludible de lucha por nuestros sueños.

A mi padre, mis hermanos, que siempre han estado apoyándome de una u otra forma, son el pilar de mi vida y sustento de este logro.

Gracias a mis primos, tíos, amigos, jhos y a la chocolate.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. ROBOTS DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA.....	3
1.1.1. SILLA DE RUEDAS PARA DAR INDEPENDENCIA AL USUARIO.....	3
1.1.2. SILLA DE RUEDAS INTELIGENTE CONTROLADA POR VOZ... 4	4
1.1.3. SILLA ROBÓTICA CON NAVEGACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE RUTAS EN TIEMPO REAL.....	4
1.2. ANALISIS FINAL Y APORTE DEL PRESENTE PROYECTO.....	5
2. METODOLOGÍA Y DISEÑO	6
2.1. REQUERIMIENTOS.....	7
2.1.1. CAPACIDAD DE CARGA Y DESPLAZAMIENTO.....	7
2.1.2. AUTONOMÍA ENERGÉTICA	8
2.1.3. VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO.....	8
2.1.4. NAVEGACIÓN AUTÓNOMA	8
2.1.5. INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)	8
2.1.6. SOFTWARE LIBRE	8
2.2. DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA.....	8
2.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES GENERALES DEL SISTEMA.....	9
2.2.2. DIAGRAMA DE CASOS DE USO.....	10
2.3. DISEÑO ESPECÍFICO	10
2.3.1. DISEÑO DEL SUBSISTEMA MECÁNICO	10
2.3.1.1. Diseño general del módulo mecánico.....	11
2.3.1.2. Diseño del soporte superior	14
2.3.1.3. Diseño del soporte móvil inferior.....	17

2.3.1.4.	Selección del perno de tensión	20
2.3.1.5.	Dimensionamiento y selección de motores.....	21
2.3.1.6.	Diseño de la caja	26
2.3.1.7.	Ensamblaje del subsistema mecánico	27
2.3.2.	DISEÑO DEL SUBSISTEMA ELECTRÓNICO	28
2.3.2.1.	Selección de la unidad de procesamiento	28
2.3.2.2.	Selección del escáner láser	29
2.3.2.3.	Selección de HMI.....	30
2.3.2.4.	Selección del controlador de motores.....	31
2.3.2.5.	Dimensionamiento y selección de la fuente de poder.....	32
2.3.2.6.	Diseño general del sistema electrónico	35
2.3.3.	DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE CONTROL Y NAVEGACIÓN	35
2.3.3.1.	Técnica de localización y mapeo	36
2.3.3.2.	Tipo de odometría.....	36
2.3.3.3.	Selección del paquete de control para realizar SLAM	37
2.3.3.4.	Diseño de la HMI	37
2.3.3.5.	Diseño general del proceso de navegación autónoma	38
2.3.3.6.	Diagrama de flujo del sistema.....	38
2.4.	INTEGRACIÓN DEL SISTEMA.....	40
3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
3.1.	VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN.....	44
3.1.1.	RESISTENCIA ESTRUCTURAL.....	44
3.1.2.	CAPACIDAD DE CARGA Y VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO.....	45
3.1.3.	AUTONOMÍA ENERGÉTICA	45
3.1.4.	NAVEGACIÓN AUTÓNOMA	46
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	48

CONCLUSIONES	48
RECOMENDACIONES.....	49
BIBLIOGRAFÍA.....	50
ANEXOS.....	53

ÍNDICE DE TABLAS

PÁGINA

Tabla 1. Características de una silla de ruedas estándar plegable.	11
Tabla 2. Reacciones y momento flector del soporte superior.	15
Tabla 3. Reacciones y momento flector del soporte móvil inferior.	19
Tabla 4. Especificaciones de motor de limpiaparabrisas.	24
Tabla 5. Especificaciones de la rueda.	25
Tabla 6. Tabla comparativa de SBC.	29
Tabla 7. Tabla comparativa de escáneres láser.	30
Tabla 8. Tabla comparativa de pantallas táctiles.	31
Tabla 9. Especificaciones de controlador RioRand DC.	32
Tabla 10. Consumo de corriente en elementos de 12 V.	33
Tabla 11. Consumo de corriente en elementos de 5 V.	34
Tabla 12. Especificaciones de la batería portable.	34
Tabla 13. Velocidades y capacidades de desplazamiento del sistema.	45
Tabla 14. Autonomía energética del sistema.	45

ÍNDICE DE FIGURAS

PÁGINA

Figura 1. Silla robótica SENA.....	3
Figura 2. Silla robótica controlada por voz.....	4
Figura 3. Silla de ruedas robótica.....	5
Figura 4. Modelo en V para el diseño de sistemas mecatrónicos.....	6
Figura 5. Esquema general del sistema.....	9
Figura 6. Diagrama de casos de uso del sistema.....	10
Figura 7. Silla de ruedas estándar.	11
Figura 8. Boceto del módulo mecánico adaptado a una silla de ruedas.....	12
Figura 9. Boceto del módulo mecánico.	13
Figura 10. Boceto del módulo mecánico.....	13
Figura 11. Boceto del soporte superior.....	14
Figura 12. Diagramas de corte y momento flector del soporte superior.....	15
Figura 13. Conjunto del soporte superior.....	17
Figura 14. Boceto del soporte móvil inferior.....	17
Figura 15. Diagramas de corte y momento flector del soporte móvil superior.....	18
Figura 16. Conjunto del soporte móvil inferior.....	19
Figura 17. Perno M12 x 1.75 X 90.....	20
Figura 18. Interacción entre el perno y la tuerca.....	21
Figura 19. Fuerzas de gravedad presentes en una rueda en reposo.....	21
Figura 20. Motor de limpiaparabrisas.....	24
Figura 21. Rueda neumática de goma.....	25
Figura 22. Bocín.....	25
Figura 23. Ensamblaje rueda-bocín-motor.....	26
Figura 24. Medidas de la caja (mm).....	26
Figura 25. Módulo mecánico del sistema.....	27
Figura 26. Módulo mecánico del sistema.....	27
Figura 27. Módulo mecánico adaptado a una silla de ruedas estándar.....	28
Figura 28. RioRand DC smart car PWM dual motor driver controller.....	32

Figura 29. Diagrama del ensamblaje electrónico del sistema.....	35
Figura 30. Actualización de posición mediante vectores que relacionan puntos significativos.....	36
Figura 31. Selección de destinos manualmente.....	37
Figura 32. Selección de destinos pre-guardados.....	37
Figura 33. Arquitectura de nodos del sistema en ROS.....	38
Figura 34. Diagrama de flujo del sistema.....	39
Figura 35. Ensamblaje virtual de caja y componentes.....	40
Figura 36. Ensamblaje virtual total del sistema desarrollado.....	40
Figura 37. Ensamblaje virtual total del sistema desarrollado.....	41
Figura 38. Ensamblaje del módulo mecánico acoplado al sistema base.....	41
Figura 39. Ensamblaje de Raspberry Pi 3, pantalla táctil y pulsadores.....	42
Figura 40. Ensamblaje del escáner láser.....	42
Figura 41. Ensamblaje del subsistema electrónico.....	42
Figura 42. Ensamblaje físico total del sistema desarrollado.....	43
Figura 43. Ensamblaje físico total del sistema desarrollado.....	43
Figura 44. Análisis estático del soporte superior.....	44
Figura 45. Análisis estático del soporte móvil inferior.....	44
Figura 46. Mapa obtenido.....	46
Figura 47. Navegación autónoma por parte del sistema.....	47
Figura 48. Navegación autónoma por parte del sistema.....	47

ÍNDICE DE ANEXOS

	PÁGINA
Anexo 1. Planos mecánicos.....	53
Anexo 2. Precisión de mapeo.....	54

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo el diseño e implementación de un sistema mecatrónico que permita la navegación automática en entornos interiores, con tan solo seleccionar el destino. El desarrollo del proyecto sobre un sistema operativo robótico de software libre (ROS), permitió un control al más bajo nivel de todos los dispositivos y trabajar de manera colaborativa con códigos reutilizables, principalmente debido a la necesidad de implementación de un complejo algoritmo de navegación llamado EFK SLAM. Como resultado se obtuvo una correcta sinergia entre todos los subsistemas diseñados: mecánico, electrónico y de control; que trabajando en conjunto guían de manera autónoma a una silla de ruedas hacia el destino previamente seleccionado, portando un usuario de hasta 90 Kg, con un tiempo de 61 minutos de autonomía energética.

ABSTRACT

This project's aim is the design and implementation of a mechatronic system that allows the automatic navigation in indoor environments, with only select the destination. The development of the project on a robotic operating system of free software (ROS), allowed for a control to the lowest level of all devices and work collaboratively with reusable codes, mainly due to the need to implement a complex navigation algorithm called EFK SLAM. The result was a correct synergy between all subsystems designed: mechanical, electronic and control; that working together guide autonomously to a wheel chair to the selected destination, carrying a user of up to 90 kg, with a time of 61 minutes of energy autonomy.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad existen equipos auxiliares de movilización para interiores, como la silla ruedas, caminadores; que permiten a los adultos mayores o personas con discapacidad moverse, sin embargo este desplazamiento se lo hace de una forma manual, es decir sea el equipo mecánico o eléctrico siempre se necesita de una persona para controlar su movimiento.

En el mercado nacional se puede encontrar equipos de movilización eléctricos, que usando distintas formas de control (con la mano, movimiento de los ojos, mandos verbales, etc.), son guiados paso a paso hacia el destino, complicando así el desplazamiento de los usuarios, que en la mayoría de los casos no tienen las destrezas necesarias o simplemente sienten temor de manipularlos.

El objetivo general de este proyecto es diseñar y construir un sistema de movilización para interiores enfocado hacia personas ancianas o con discapacidades motrices, que les permita desplazarse de forma automática, únicamente seleccionando el destino.

Los objetivos específicos son:

- 1) Diseñar un módulo mecánico compacto, adaptable y desacoplable.
- 2) Diseñar un sistema de control de navegación que permita crear un mapa, ubicarse y navegar dentro del mismo.
- 3) Implementar una interfaz que permita al usuario elegir el destino.
- 4) Implementar y validar el sistema mecatrónico desarrollado.

Se trabajará sobre un *framework* llamado ROS (Robot Operating System), que provee una serie de librerías, controladores de dispositivos, herramientas de visualización; enfocadas a simplificar considerablemente el desarrollo de aplicaciones robóticas complejas (Open Source Robotics Foundation, 2007), apoyándose en el intercambio de software entre todos los aficionados, profesionales, investigadores, que han construido una gran comunidad alrededor del mundo. (García, 2013).

ROS, bajo licencia BSD (Berkeley Software Distribution), orientado hacia sistemas tipo UNIX y desarrollado inicialmente por el laboratorio de inteligencia de Stanford, es el sistema operativo robótico que proporciona un conjunto de herramientas colaborativas que pretenden hacerlo universal, debido a su flexibilidad, variadas plataformas, compiladores y lenguajes de programación como Python, Ruby, C++, LISP, Java. El objetivo final de este sistema operativo es reducir al máximo la tarea de crear cualquier robot que se pueda imaginar, al mismo tiempo de hacerlo robusto y flexible,

apalancándose de manera principal en el código reutilizable (Nuñez, León, & Cardenas, 2012).

Se buscará también la implementación de LIDAR (Light Detection and Ranging) que es una técnica de teledetección que utiliza la emisión de pulsos láser y su reflejo, para medir la distancia entre el emisor y un objeto de destino, creando una nube de puntos precisos e instantáneos en 2 (x, y) o 3 dimensiones (x, y, z), lo que le da el término de escaneo láser y está siendo utilizado en el ámbito: topográfico, robótico, militar, debido a que es mucho más sencillo y de rápida extracción de características de la mencionada nube de puntos, que el de analizar imágenes compuestas por millones de píxeles (Fernández, 2012).

En definitiva la tecnología LIDAR es utilizada en aplicaciones que requieran una gran precisión, donde el costo del procesamiento de datos sea bajo y sencillo; actualmente usado en sistemas móviles terrestres, aéreos, y submarinos, para crear mapas de entornos altamente detallados.

Además de lo descrito anteriormente, es necesario conocer en temas de robótica móvil y más específicamente en la navegación, el término odometría, que es conocida como el proceso para estimar la posición y orientación de un robot respecto a su posición inicial, esto mediante la información que se obtiene de los actuadores, es decir, midiendo su cambio o desplazamiento a través del tiempo, por ejemplo, mediante encoders situados en las ruedas se puede calcular el desplazamiento lineal que realiza un robot. Para obtener valores correctos de posición y orientación, se debe tomar en cuenta factores como: deslizamiento de ruedas sobre la superficie, sobreaceleraciones, mediciones erróneas de encoders; dado que este sistema es incremental y los errores podrían irse acumulando (Gamboa, 2014).

Finalmente y conforme ha evolucionado el mundo de la robótica, también han ido apareciendo nuevos retos, como el de proporcionar a los robots de una mayor autonomía tanto en su desplazamiento como en su localización, debido a esto en el año de 1986 surgió por primera vez el término SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) (Narváez & Yandún, 2013), que comprende un proceso, mediante el cual un robot móvil construye un mapa de su entorno, hasta ese momento desconocido, al mismo tiempo que genera una posición y orientación estimada, apoyándose en sensores de distancia y en odometría, permitiéndole así en lo posterior navegar de forma autónoma (Durrant-Whyte & Bailey, 2006).

Utilizando técnicas estocásticas de estimación como el Filtro Extendido de Kalman, que es el corazón del proceso, se obtiene resultados aceptables

reduciendo al mínimo el error cuadrático medio, generado por la cantidad de ruido que se obtiene del escaneo en el momento de crear el mapa (Zhan, Shoudong, & Dissanayake, 2011).

1.1. ROBOTS DE NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

Robots móviles capaces de crear un mapa, ubicarse dentro del mismo y planificar su ruta de navegación esquivando obstáculos.

1.1.1. SILLA DE RUEDAS PARA DAR INDEPENDENCIA AL USUARIO

Es una silla robótica de asistencia, mostrada en la Figura 1, equipada con un escáner laser de lectura en 180° y una video cámara, controlados por medio de un ordenador portátil que le permite evitar obstáculos y navegar de manera semi-automática en interiores.

Por su diseño robusto, fiable y de alta interacción con el usuario; este vehículo permite mejorar significativamente la movilidad de personas ancianas y con discapacidades motrices (González, y otros, 2009).



Figura 1. Silla robótica SENA.
(González, y otros, 2009)

1.1.2. SILLA DE RUEDAS INTELIGENTE CONTROLADA POR VOZ

Desarrollado por la Universidad de Zaragoza, se muestra en la Figura 2, es una silla de ruedas eléctrica operada por una interfaz que le permite al usuario dar comandos de voz. La silla ejecuta las órdenes utilizando un escáner laser de 270° y un computador a bordo para planificar la ruta, teniendo como objetivo el destino hacia el que se desea desplazarse o simplemente para hacer movimientos básicos como girar o ir hacia adelante y atrás (Alcubierre, y otros, 2005).



Figura 2. Silla robótica controlada por voz.
(Alcubierre, y otros, 2005)

1.1.3. SILLA ROBÓTICA CON NAVEGACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE RUTAS EN TIEMPO REAL

Silla de ruedas robótica, indicada en la Figura 3, diseñada para evitar colisiones y navegar de forma autónoma y reactiva hacia la luz. Dotada de fotoceldas permite localizar el origen de la luz y planificar una ruta hacia ella, al mismo tiempo que utiliza sus sensores infrarrojos para encontrar la mejor opción de movimiento dentro de sus 32 distintas condiciones, evitando así cualquier obstáculo. Tiene la capacidad de guardar la ruta en la que se desplazó utilizando sensores efecto-Hall (Pin-Chun & Won-jong, 2010).



Figura 3. Silla de ruedas robótica.
(Pin-Chun & Won-jong, 2010)

1.2. ANALISIS FINAL Y APOORTE DEL PRESENTE PROYECTO

De acuerdo a los proyectos antes mencionados se puede establecer las siguientes desventajas frente al proyecto a desarrollar: no se ha logrado una completa navegación autónoma, existe toma de datos únicamente en 180° y 270°; poseen dispositivos como sensores y controladores de gran tamaño.

En el presente proyecto se plantea desarrollar un sistema que permita: una completa navegación autónoma para interiores, usando un software especializado y estandarizado en el área de la robótica; lectura de datos en 360°; el uso de sensores y controladores de tamaño reducido.

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO

Los sistemas mecatrónicos son desarrollados basándose en la sinergia de distintos campos de la ingeniería como son: ingeniería mecánica, ingeniería eléctrica y tecnologías de la información; distinguiéndose por la funcionalidad de integrar sensores, actuadores, procesamiento de información y un sistema base (Verein Deutscher Ingenieure, 2004).

Para el correcto diseño de un sistema o producto mecatrónico, se necesita un modelo que describa el proceso de integración de todos sus componentes, de una forma secuencial y lógica, pero a la vez flexible, permitiendo de esta manera minimizar riesgos y errores en el producto final. El modelo en V como se muestra en la Figura 4, es un modelo adaptado y acorde a los requerimientos de diseño en ingeniería mecatrónica.

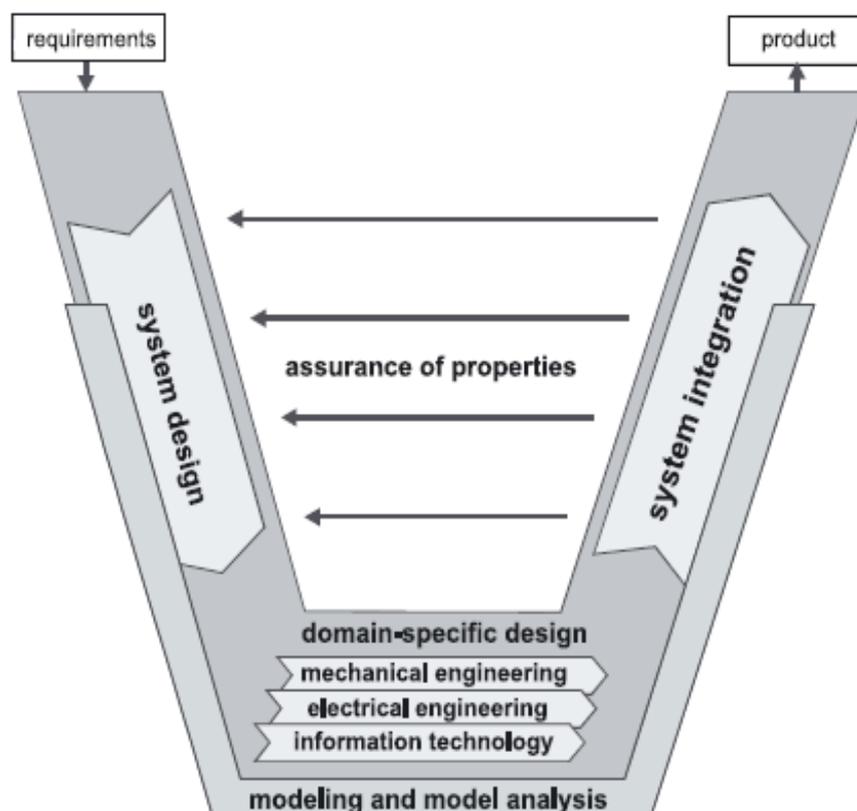


Figura 4. Modelo en V para el diseño de sistemas mecatrónicos.
(Verein Deutscher Ingenieure, 2004)

El diseño se inicia con la etapa de requerimientos, en la cual se establecen los requisitos que debe cumplir el sistema, como son: velocidad, capacidad de carga, autonomía energética y de navegación, interfaz hombre máquina, y su programación sobre software libre.

Concluidos los requerimientos se procede a establecer un diagrama general del funcionamiento del sistema, en donde se especifique sus partes, como son: sistema base, sensores, unidad de procesamiento, actuadores; así como

la forma en que interactúan entre sí y con el usuario, además se establecerá un diagrama de casos de uso.

Enfocándose en el diseño específico, se inicia con el subsistema mecánico, en donde se realiza un bosquejo del modelo mecánico, tomándolo como referencia para diseñar, dimensionar y seleccionar todos sus componentes estructurales, así como los motores y ruedas, finalmente se realiza el ensamblaje.

El diseño de la parte electrónica está compuesto por la selección de: la unidad de procesamiento, escáner láser, HMI (Human Machine Interface), controlador de motores; dimensionamiento de la fuente de poder y ensamblaje.

Para el diseño del sistema de navegación se elige y adapta el entorno de desarrollo, técnicas y algoritmos de control; se programa las funciones de la HMI y se establece el diagrama de flujo de funcionamiento del sistema.

Una vez finalizado el diseño específico se integra todos los subsistemas (mecánico, electrónico y de navegación), de forma virtual y física; permitiendo encontrar posibles incompatibilidades y corregirlas.

Para la validación y verificación del sistema ensamblado, se procede a validarlo mediante las siguientes pruebas que están en función de los requerimientos:

- Verificación de su resistencia estructural mediante simulaciones.
- Comprobación de su capacidad de carga, utilizando a personas de distintas masas y verificando que se desplace sin ninguna dificultad.
- Medición de tiempo y desplazamiento, para analizar la velocidad máxima alcanzada.
- Medición de tiempo de autonomía energética.
- Navegación interior con obstáculos.

2.1. REQUERIMIENTOS

2.1.1. CAPACIDAD DE CARGA Y DESPLAZAMIENTO

El sistema a desarrollar debe ser capaz de soportar y movilizar a una persona de 80 Kg, promedio establecido según la encuesta nacional de salud y nutrición (Freire, Ramírez-Luzuriaga, Belmont, Mendieta, & Silva Jaramillo, 2014) e incluyendo su propia masa como máximo desplazará 120 Kg.

2.1.2. AUTONOMÍA ENERGÉTICA

Se debe dotar al sistema de suficiente capacidad energética, con el fin de que pueda trabajar al menos una hora de forma continua.

2.1.3. VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO

El desplazamiento se debe realizar con una velocidad no mayor 0.5 m/s; tomando en cuenta el valor establecido por la norma (ISO 7176-6, 2001) y que este se realizará en espacios interiores.

2.1.4. NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

El desplazamiento se debe realizar de forma autónoma por parte del sistema, es decir; no se necesitará que el usuario guíe de alguna manera el equipo, bastará con que elija el destino, para que el sistema planifique la trayectoria y evite los obstáculos que se le presenten.

2.1.5. INTERFAZ HOMBRE-MÁQUINA (HMI)

Para ayudar al usuario en su interacción con el sistema, este debe incorporar una interfaz que se pueda operar intuitivamente; que muestre y permita elegir al menos cinco destinos.

2.1.6. SOFTWARE LIBRE

Para evitar el pago de licencias en caso de su comercialización, este deber ser desarrollado sobre un sistema operativo de software libre, que además de abaratar costos, facilita una gran red de soporte técnico.

2.2. DISEÑO GENERAL DEL SISTEMA

Con relación al esquema general de un sistema mecatrónico definido en (Verein Deutscher Ingenieure, 2004), se puede resumir que éste consta de bloques principales como: sistema base, sensores, actuadores, procesamiento de la información, conectados y retroalimentados entre sí mediante el flujo de información y energía, como se indica en la Figura 5.

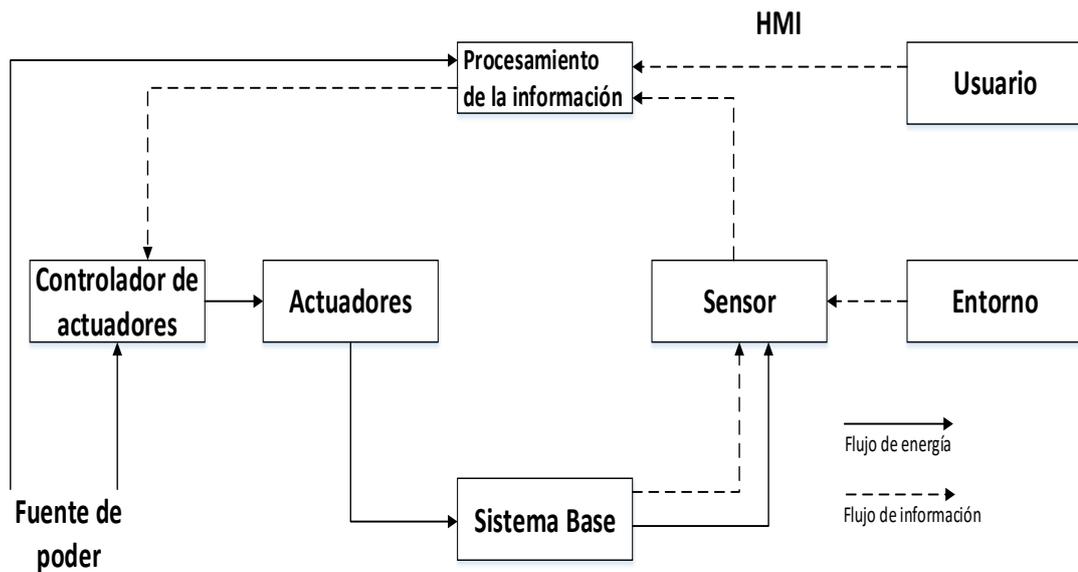


Figura 5. Esquema general del sistema.

2.2.1. DESCRIPCIÓN DE LAS PARTES GENERALES DEL SISTEMA

Los bloques mostrados en la Figura 5, se detallan a continuación:

- Sistema base: Se trabajará sobre un equipo auxiliar (dispositivo destinado a facilitar el desplazamiento de una persona con discapacidad), al cual se le implementará un módulo mecatrónico dotado de sensores, actuadores y controladores que le permitan navegar a todo el sistema de forma autónoma.
- Sensor: Para realizar la navegación autónoma es necesario extraer información del entorno, distancias, para lo cual se suele utilizar sonares, cámaras de video y escáneres láser, siendo este último el más óptimo debido a su alta frecuencia de muestreo y amplio barrido.
- Entorno: Son los espacios interiores planos de un domicilio que serán objeto del mapeo.
- Usuario: La persona beneficiada que manipula el sistema.
- Interfaz hombre-máquina: El sistema contará con una pantalla táctil que le permita interactuar con el usuario.
- Procesamiento de la información: Se refiere al subsistema de control y navegación, encargado de analizar y discretizar los datos del entorno; así como también de ejecutar los algoritmos implementados.
- Actuadores: Motores con suficiente potencia para mover todo el sistema incluyendo al usuario.

- Fuente de poder: Sistema de alimentación que garantice el funcionamiento de todo el sistema.

2.2.2. DIAGRAMA DE CASOS DE USO

La Figura 6 representa los requerimientos funcionales del sistema y la manera en que el usuario opera con el mismo.

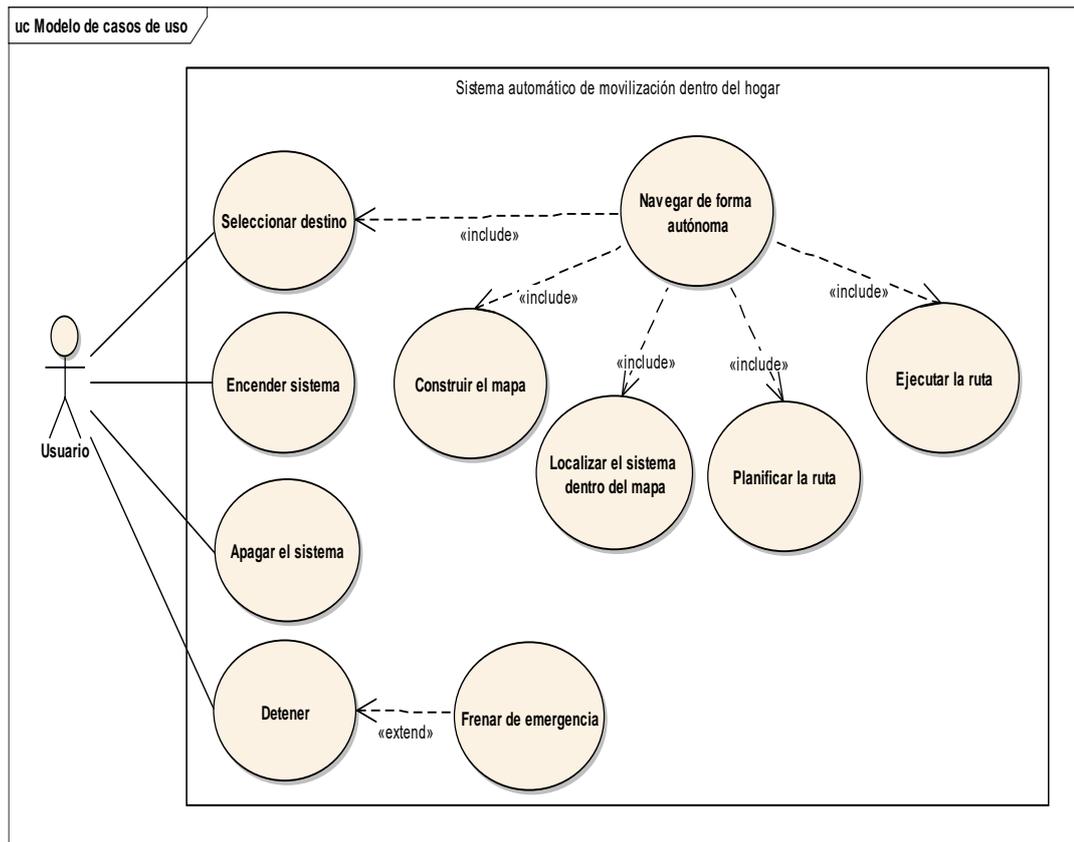


Figura 6. Diagrama de casos de uso del sistema.

2.3. DISEÑO ESPECÍFICO

2.3.1. DISEÑO DEL SUBSISTEMA MECÁNICO

Debido a la comodidad, ergonomía y facilidad que brinda en el desplazamiento, se escogió como sistema base a la silla de ruedas, mostrada en la Figura 7.



Figura 7. Silla de ruedas estándar.
(Global Healthcare, 2017)

Las medidas estándar de una silla de ruedas plegable son especificadas en la Tabla 1.

Tabla 1. Características de una silla de ruedas estándar plegable.

Modelo	Ancho asiento	Altura total	Ancho total	Fondo total	Altura asiento suelo	Fondo asiento	Alto respaldo	Masa de silla	Masa máxima soportada
PL31	40 cm	91 cm	60 cm	104 cm	50 cm	40 cm	40 cm	17 kg	100 kg
	42 cm	91 cm	62 cm	104 cm	50 cm	40 cm	40 cm	17 kg	100 kg
	44 cm	91 cm	66 cm	104 cm	50 cm	40 cm	40 cm	18 kg	100 kg

2.3.1.1. Diseño general del módulo mecánico

Tomando en cuenta que la silla de ruedas es un equipo propulsado por el trabajo que realiza el usuario, y que para fines de este proyecto dicho movimiento debe ser automático; se realizó el boceto de un módulo mecánico, mostrado en la Figura 8, con base en las medidas de ancho de asiento y altura total asiento-suelo de la Tabla 1.

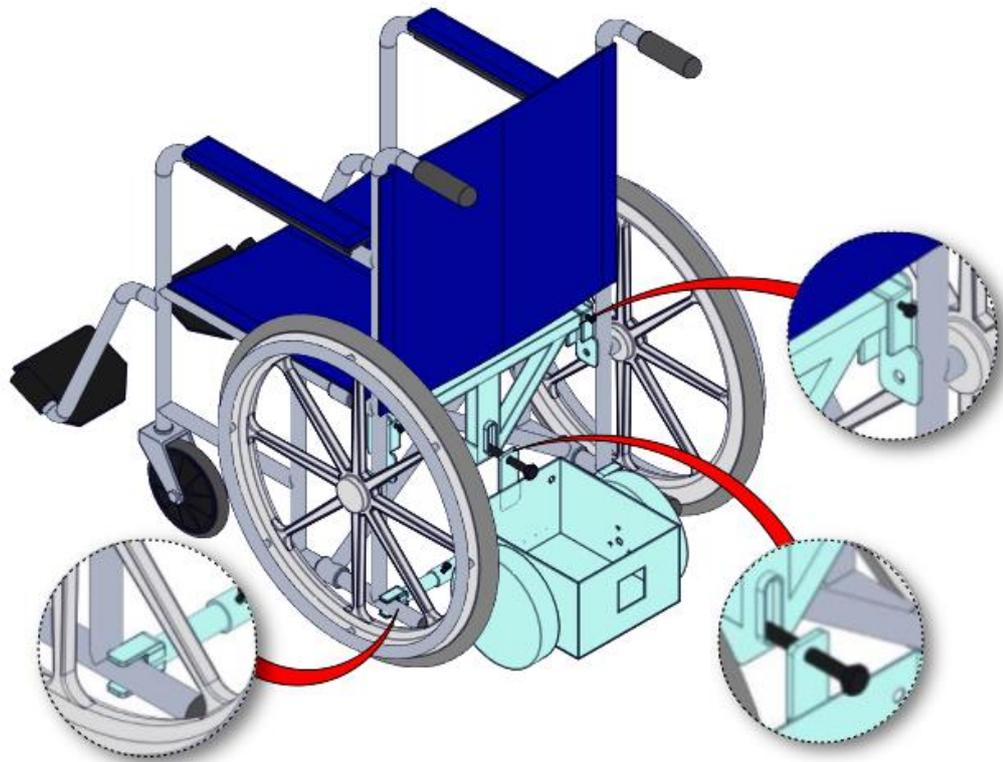


Figura 8. Boceto del módulo mecánico adaptado a una silla de ruedas.

El funcionamiento de las partes del módulo, mostrados en las Figuras 9 y 10, se detallan a continuación:

- Placas de sujeción: Empernadas a la silla de ruedas, son las encargadas de mantener fijo al soporte superior, y permitir la adaptabilidad para anchos de asiento de 40 a 44 cm.
- Soporte superior: Pieza desmontable, transmite el peso de la silla de ruedas y de la persona.
- Perno de tensión: Aleja o acerca de acuerdo al sentido de giro, al soporte superior, de la caja, con el fin de regular la transmisión de peso hacia los motores.
- Caja: Almacena los motores, controlador y batería, además de poseer una pestaña roscada para el perno de tensión.
- Rueda: Encargada de transmitir la potencia del motor.
- Soporte móvil inferior: Adaptable a distintos anchos de asientos, permite mantener fija, la caja a la silla de ruedas.

- Bisagras: Le permite a la caja inclinarse hacia atrás o hacia adelante, de acuerdo a la distancia que marque el perno de tensión.

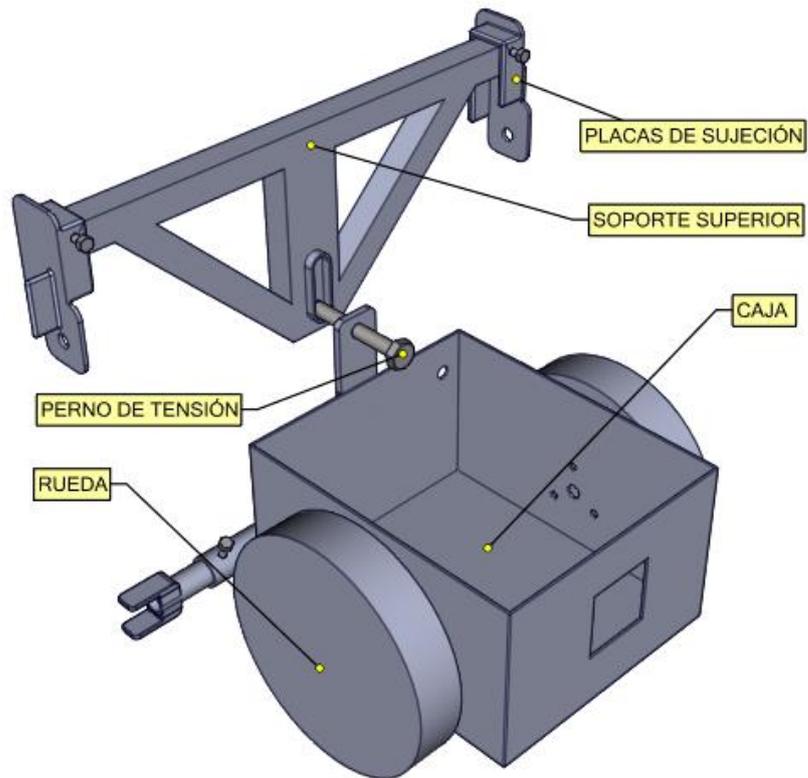


Figura 9. Boceto del módulo mecánico.

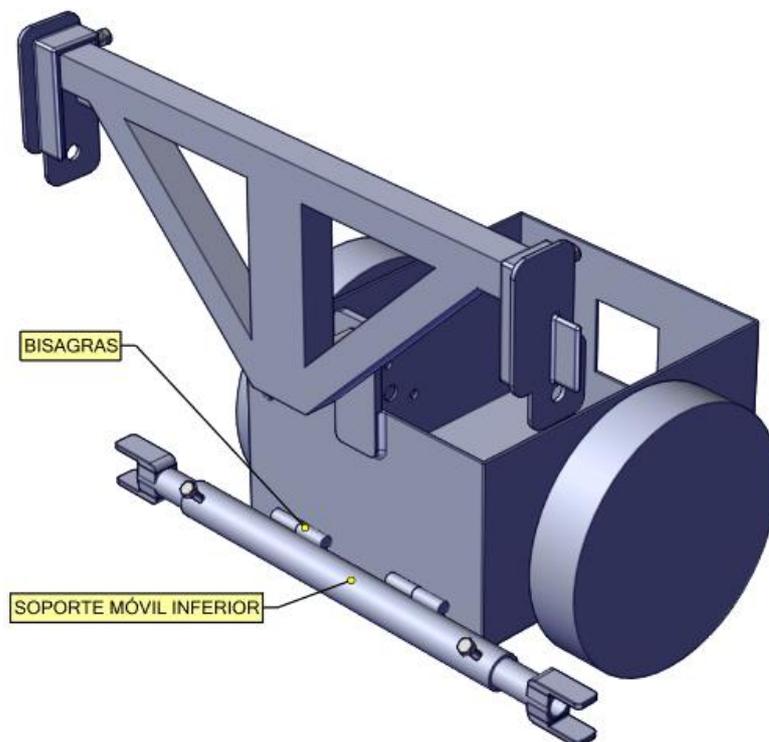


Figura 10. Boceto del módulo mecánico.

2.3.1.2. Diseño del soporte superior

Para el diseño del soporte superior se utilizó como boceto un tubo cuadrado y las medidas de la Tabla 1; se trasladó la reacción de la fuerza aplicada del punto A al punto B como se muestra en la Figura 11, esto con el fin de analizarlo como una viga empotrada en sus dos extremos.

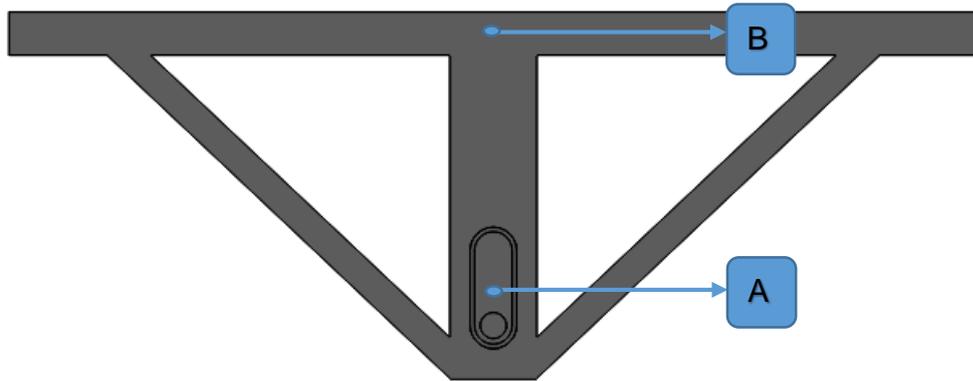


Figura 11. Boceto del soporte superior.

La fuerza que debe resistir el soporte superior, producto de la reacción entre el perno de tensión y el punto A (ahora punto B) es:

$$F_t = (m_u + m_s)g \quad [1]$$

En donde:

- F_t [N]: Fuerza total ejercida.
- m_u [kg]: Masa del usuario.
- m_s [kg]: Masa de la silla de ruedas.
- g [m/s^2]: Aceleración de la gravedad.

Reemplazando valores en la ecuación 1 se obtiene:

$$F_t = (80 + 20)9.8$$
$$F_t = 980 \text{ N} \quad [2]$$

Mediante software de análisis estructural y con el valor obtenido de la ecuación 2, se procede a la obtención de reacciones y momento flector máximo, como se indica en la Figura 12.

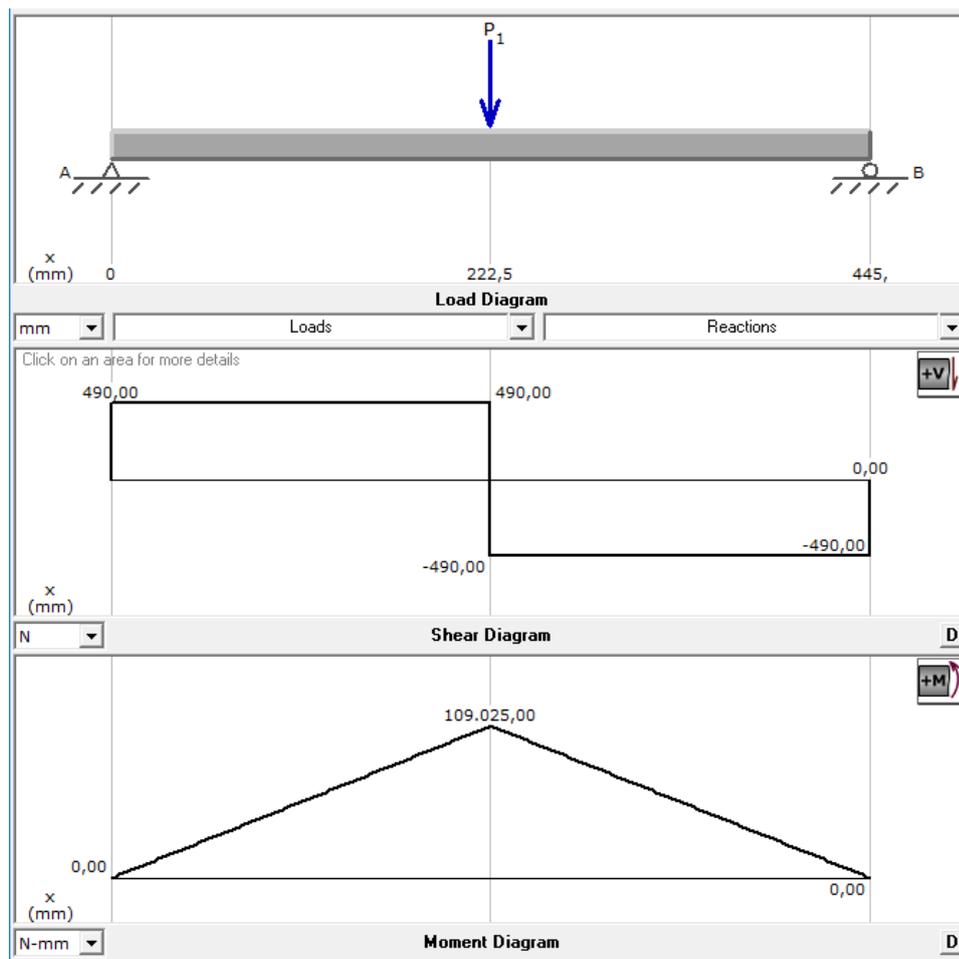


Figura 12. Diagramas de corte y momento flector del soporte superior.

Los valores resultantes del cálculo estructural por software se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Reacciones y momento flector del soporte superior.

Parámetros	Magnitud	Unidad
Reacción R_{AY}	490	N
Reacción R_{BY}	490	N
Momento flector máximo M_F	109025	N.mm

Para evitar la deformación de la viga y garantizar que permanezca dentro de su rango elástico, se obtiene el esfuerzo máximo permisible de la siguiente manera:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{\sigma_y}{n_1} \quad [3]$$

En donde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$ [N/mm^2]: Esfuerzo máximo permisible.
- σ_y [N/mm^2]: Esfuerzo de fluencia para acero ASTM A 500.
- n_1 : Factor de seguridad según norma AISC-ASD para estructuras del tipo móvil.

Reemplazando valores en la ecuación 3 se obtiene:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{320 \text{ N/mm}^2}{1.65}$$
$$\sigma_{m\acute{a}x} = 193.94 \text{ N/mm}^2 \quad [4]$$

El esfuerzo máximo establecido en la ecuación 4 se produce en la sección del momento flector máximo, relacionándolo con el módulo de resistencia, se establece la siguiente ecuación:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{M_F}{W} \quad [5]$$

En donde:

- $\sigma_{m\acute{a}x}$ [N/mm^2]: Esfuerzo máximo permisible.
- M_f [$N \cdot mm$]: Momento flector máximo.
- W [mm^3]: Módulo de resistencia de la sección.

Reemplazando valores en la ecuación 5 y despejando W se obtiene:

$$W = \frac{109025 \text{ N} \cdot \text{mm}}{193.94 \text{ N/mm}^2}$$
$$W = 562.16 \text{ mm}^3$$
$$W = 0.562 \text{ cm}^3 \quad [6]$$

El valor del módulo de resistencia indicado en la ecuación 6 permitió elegir como viga al tubo cuadrado estructural negro de 20 x 20 x 1.5 mm, con un módulo de resistencia $W = 0.58 \text{ cm}^3$ (IPAC S.A, 2014).

En la Figura 13 se muestra la viga seleccionada que trabaja en conjunto con una sección de tubo rectangular de 20 x 40 x 1.5 mm, una pestaña realizada en tubo ovalado y las respectivas placas de sujeción.

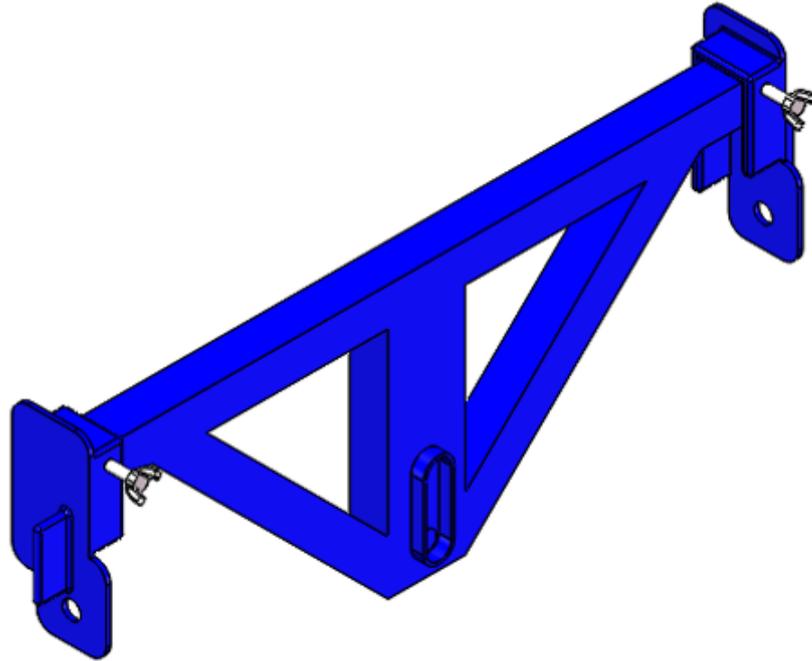


Figura 13. Conjunto del soporte superior.

2.3.1.3. Diseño del soporte móvil inferior

Para el diseño del soporte móvil inferior se utilizó como boceto un tubo redondo y las medidas de la Tabla 1, estableciendo los puntos sobre los cuales se aplicarán las cargas puntuales, la Figura 14 muestra los puntos de contacto.

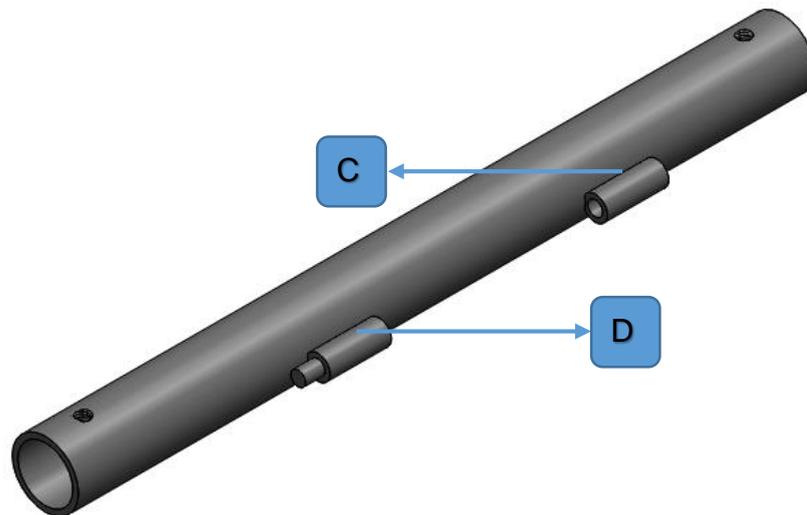


Figura 14. Boceto del soporte móvil inferior.

La fuerza que debe resistir el soporte móvil inferior es:

$$F_t = (m_T)g \quad [7]$$

En donde:

- F_t [N]: Fuerza total ejercida.
- m_T [kg]: Masa total del sistema incluyendo al usuario.
- g [m/s²]: Aceleración de la gravedad.

Reemplazando valores en la ecuación 7 se obtiene:

$$F_t = (120)9.8$$

$$F_t = 1176 \text{ N} \quad [8]$$

Con el valor obtenido de la ecuación 8, se procede a la obtención de reacciones y momento flector máximo, como se indica en la Figura 15.

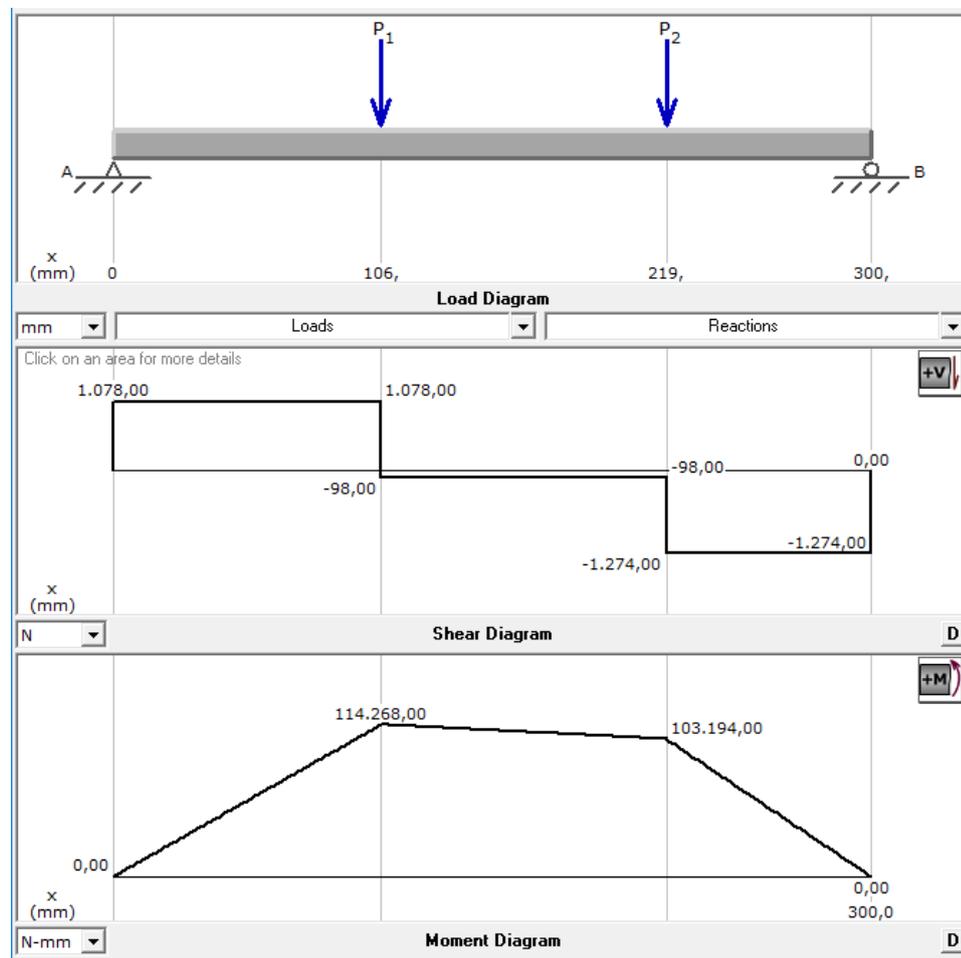


Figura 15. Diagramas de corte y momento flector del soporte móvil superior.

Los valores resultantes del cálculo estructural por software se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Reacciones y momento flector del soporte móvil inferior.

Parámetros	Magnitud	Unidad
Reacción R_{AY}	1078	N
Reacción R_{BY}	1274	N
Momento flector máximo M_F	114268	N.mm

Utilizando la ecuación 3 para encontrar el máximo esfuerzo permisible en acero ASTM A 569, se obtiene el siguiente valor:

$$\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{250 \text{ N/mm}^2}{1.65}$$

$$\sigma_{m\acute{a}x} = 151.51 \text{ N/mm}^2 \quad [9]$$

Utilizando la ecuación 5 para encontrar el módulo de resistencia, se obtiene:

$$W = \frac{114268 \text{ N.mm}}{151.51 \text{ N/mm}^2}$$

$$W = 0.75 \text{ cm}^3 \quad [10]$$

El valor del módulo de resistencia indicado en la ecuación 10 permitió elegir al tubo redondo negro de cañería ISO I de 3/4", el cual tiene un módulo de resistencia $W = 0.99 \text{ cm}^3$ (IPAC S.A, 2014) y tal como se muestra en la Figura 16, trabaja en conjunto con dos secciones de tubos de menor diámetro para poder ser adaptable a distintos anchos de sillas de ruedas.

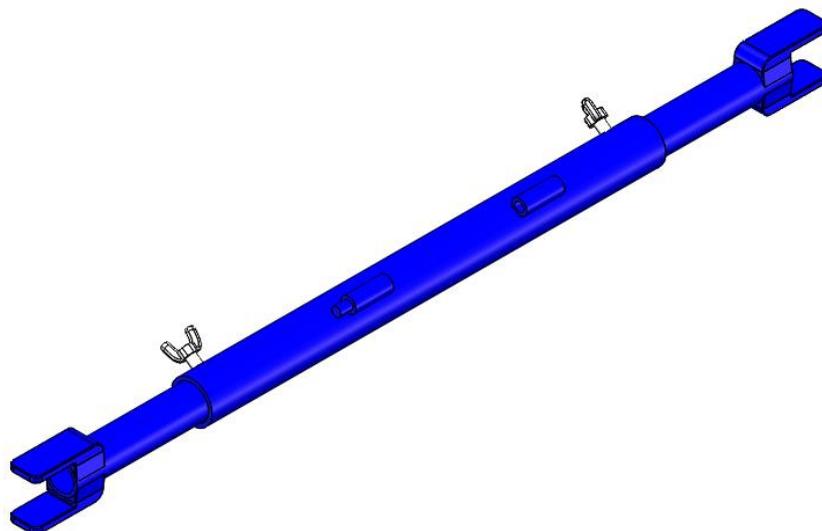


Figura 16. Conjunto del soporte móvil inferior.

2.3.1.4. Selección del perno de tensión

Se escogió trabajar con un perno de acero de rosca métrica y paso fino, utilizado en la industria del automóvil debido a las siguientes ventajas:

- Mayor resistencia a la tracción.
- Tendencia mínima de aflojarse a causa de vibraciones.
- Reglajes más precisos.

Tomando en cuenta que el diseño de los pernos se basa en la resistencia a la tracción, y el presente perno no presenta dicho esfuerzo se lo seleccionó con base en las posibles medidas del módulo mecánico, escogiendo así el perno mostrado en la Figura 17, de diámetro 12, paso 1.75, longitud 90 mm, y adaptándole una mariposa metálica para facilitar su manipulación.

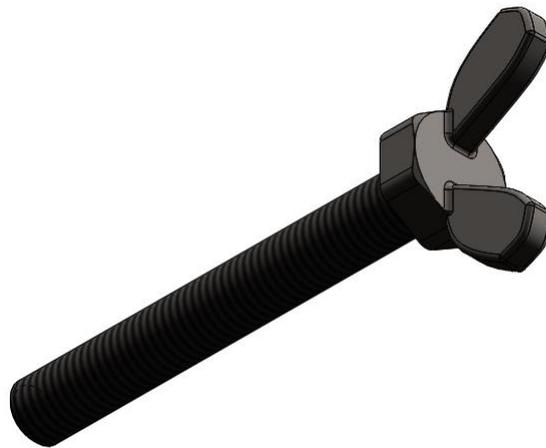


Figura 17. Perno M12 x 1.75 X 90.

Una vez seleccionado el perno se procedió al análisis de los filetes de la tuerca o perforación roscada que serán los que soporten el peso de la silla y el usuario, como se muestra en la Figura 18. Debido a la inexactitud de estos pueden provocar un fallo de barrido, por lo que (Norton, 1999) recomienda para roscas UNS o ISO con un diámetro ≤ 25.4 mm, la condición de:

$$L_T \geq 0.5 d \quad [11]$$

En donde:

- d [mm]: Diámetro máximo del perno.
- L_T [mm]: Longitud de la tuerca o perforación roscada.

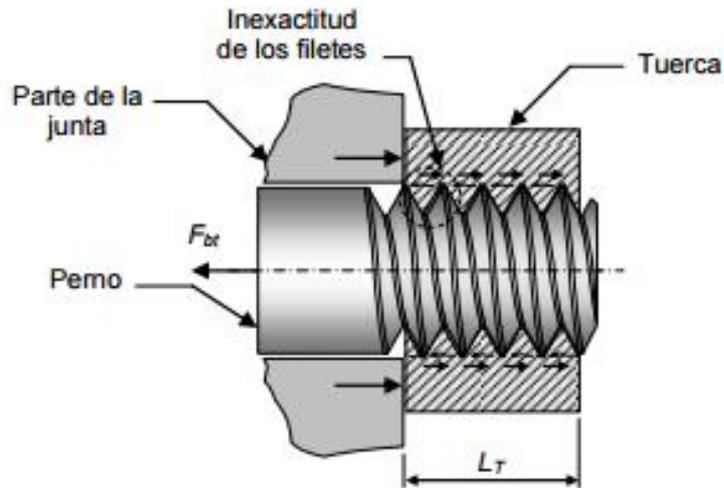


Figura 18. Interacción entre el perno y la tuerca.
(Norton, 1999)

Utilizando la ecuación 11, se obtiene:

$$L_T \geq 0.5 \quad (12)$$

$$L_T \geq 6 \text{ mm} \quad [12]$$

2.3.1.5. Dimensionamiento y selección de motores

Los motores son los encargados de proporcionar energía traslacional a todo el sistema. Se debe tomar en cuenta que el torque que estos proporcionen, debe ser el suficiente para superar rugosidades del terreno, así como algún grado de inclinación que se pueda presentar.

Para empezar, se estableció todas las variables con el sistema en reposo, en un plano inclinado y con un ángulo de elevación θ como se muestra en la Figura 19.

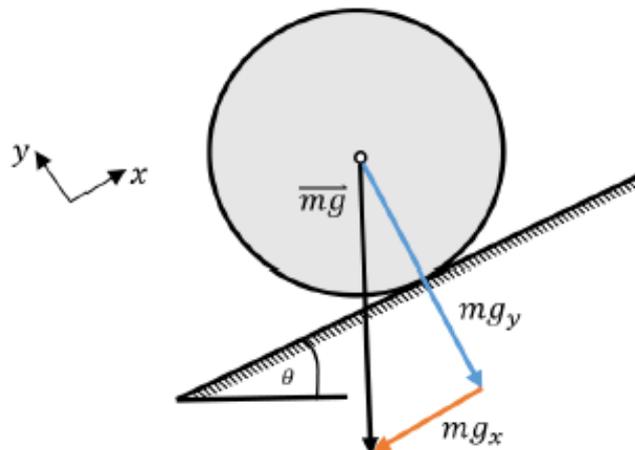


Figura 19. Fuerzas de gravedad presentes en una rueda en reposo.
(Gallardo & Gaona, 2015)

Descomponiendo el peso de todo el sistema en los ejes X y Y, se obtuvo las siguientes ecuaciones:

$$m \cdot g_x = m \cdot g \cdot \sin \theta \quad [13]$$

$$m \cdot g_y = m \cdot g \cdot \cos \theta \quad [14]$$

En donde:

- $g [m/s^2]$: Aceleración de la gravedad.
- $g_x [m/s^2]$: Componente de la aceleración de la gravedad en el eje X.
- $g_y [m/s^2]$: Componente de la aceleración de la gravedad en el eje Y.
- $m [Kg]$: Masa de todo el sistema.
- $\theta [deg]$: Máximo ángulo de inclinación que superará el sistema.

Al existir dos superficies en contacto, como son la rueda y el terreno por el cual se va a desplazar, aparece una fuerza de rozamiento contraria a la dirección del movimiento y es representada por la siguiente ecuación:

$$f = \mu \cdot N \quad [15]$$

En donde:

- $f [N]$: Fuerza de rozamiento.
- μ : Coeficiente de rozamiento.
- $N [N]$: Fuerza normal.

El torque necesario (T) para desplazar todo el sistema desarrollado debe vencer a la fuerza de rozamiento (f) para movilizar al sistema.

La sumatoria de momentos con relación al centro de la rueda dio como resultado la siguiente ecuación:

$$T = f \cdot R \quad [16]$$

En donde:

- $T [Nm]$: Torque del motor.
- $f [N]$: Fuerza de rozamiento.
- $R [m]$: Radio de la rueda.

De aquí en adelante y como parte de un correcto y robusto diseño se toma en cuenta que el sistema pasa de un estado estacionario hacia un estado en movimiento, es decir parte del reposo, y que esto implica considerar la

presencia de aceleración (a). Conociendo este cambio de estado, se procedió a realizar la sumatoria de fuerzas en el eje X como se detalla a continuación:

$$\sum F_x = m \cdot a \quad [17]$$

$$m \cdot a = m \cdot g_x + f \quad [18]$$

Ahora reemplazando la ecuación 13 en la 18, se obtiene:

$$m \cdot a = m \cdot g \cdot \sin \theta + f \quad [19]$$

Reemplazando la ecuación 16 en la 19, se obtiene:

$$m \cdot a = m \cdot g \cdot \sin \theta + \frac{T}{R} \quad [20]$$

Despejando la ecuación 20, se obtiene:

$$T = m \cdot R (a + g \cdot \sin \theta) \quad [21]$$

La ecuación 21 expresa el torque requerido, si bien se podría pensar que esta debería ser dividida entre 2, puesto que esa es la cantidad de motores con que fue diseñado el sistema, como lo indica la Figura 9 y 10; es recomendable que cada actuador tenga la potencia necesaria para mover todo el conjunto, debido a que cuando se realicen maniobras de giro, todo el peso recaerá sobre la rueda y motor que actúen.

Para dejar definida la ecuación 21, se le añadió variables de eficiencia (e) y factor de seguridad (fs), que aseguraran un correcto dimensionamiento de los motores.

$$T = (fs) \left(\frac{100}{e} \right) (m \cdot R (a + g \cdot \sin \theta)) \quad [22]$$

Detalle de datos reales que se utilizaron:

- $fs = 1.65$: Factor de seguridad según norma AIS-ASD.
- $e = 80 \%$: Porcentaje promedio de eficiencia en motores DC.
- $R = 0.10 \text{ m}$: Radio de la rueda según la Tabla 5.
- $m = 120 \text{ kg}$: Masa total del sistema según los requerimientos.
- $a = 0.5 \text{ m/s}^2$
- $g = 9.8 \text{ m/s}^2$
- $\theta = 6.84^\circ$: Angulo de inclinación máximo establecido en el RTE (INEN, 2000)

Finalmente se reemplazó todos los datos en la ecuación 22, obteniendo el siguiente valor:

$$T = (1.65) \left(\frac{100}{80} \right) ((120) (0.1) [0.5 + 9.8(\sin 6.84^\circ)])$$

$$T = 41.26 \text{ Nm}$$

El valor de 41.26 Nm, representa el torque máximo que necesitará cada motor para desplazar a todo el sistema, partiendo del reposo y en un plano inclinado de $\theta = 6.84^\circ$.

Con el valor de torque necesario para cada motor, se procedió a su selección, encontrando que en el mercado nacional no existen motores DC con ese valor de torque para aplicaciones robóticas, en respuesta a este inconveniente se debió buscar en otros sectores de la industria, es así que se encontró los motorreductores de limpiaparabrisas, usados en automóviles y camiones, que funcionan a 12 V en corriente continua. Se escogió trabajar con el motorreductor marca LEILI y modelo ZD1637, como se muestra en la Figura 20, sus especificaciones se detallan a continuación en la Tabla 4.



Figura 20. Motor de limpiaparabrisas.
(Zhejiang leili auto parts Co., Ltd., 2017)

Tabla 4. Especificaciones de motor de limpiaparabrisas.

	Magnitud	Unidad
Torque máximo	45	Nm
Voltaje de operación	12	V
Corriente máxima	6.5	A
Potencia nominal	80	W
Velocidad máxima	50 ± 5	RPM

Para transmitir la potencia del motor y tomando en cuenta los componentes del módulo mecánico antes diseñados, así como la carga total del sistema, se escogió trabajar con la rueda presentada en la Figura 21, sus especificaciones se detallan en la Tabla 5.



Figura 21. Rueda neumática de goma.
(Qingdao Kinghood Tools Co., Ltd., 2012)

Tabla 5. Especificaciones de la rueda.

	Magnitud	Unidad
Diámetro total (D)	200	mm
Diámetro de eje (d)	34	mm
Ancho	60	mm
Capacidad de carga	150	Kg
Presión de aire	30	PSI

Finalmente para realizar el acople entre la rueda y el motor seleccionado, se diseñó un bocín, mostrado en la Figura 22, en acero AISI-SAE 1018.

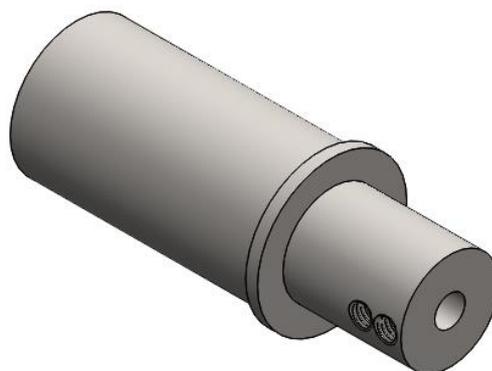


Figura 22. Bocín.

El ensamblaje de la rueda y bocín es mediante presión, mientras que el eje del motor y el bocín se acoplan con la ayuda de prisioneros realizando un rasgo de chaveta en el eje del motor como se muestra en la Figura 23.

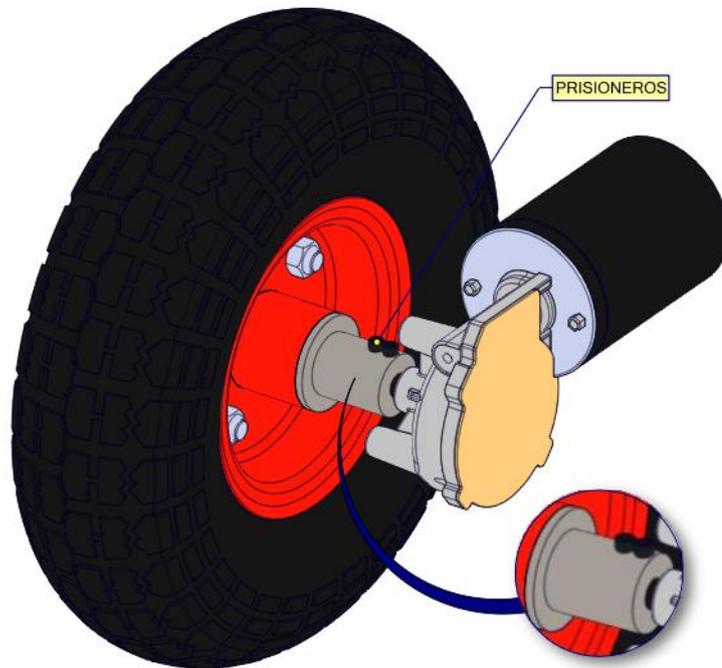


Figura 23. Ensamblaje rueda-bocín-motor.

2.3.1.6. Diseño de la caja

Tomando en cuenta motores, ruedas seleccionadas, soporte superior e inferior y datos de la Tabla 1, se definió sus medidas, detalladas en la Figura 24, se utilizó planchas de acero ASTM A36 de 2 mm de espesor, platina de 6 mm para la perforación machuelada y bisagras de $\frac{1}{2}$ " por 2 acciones.

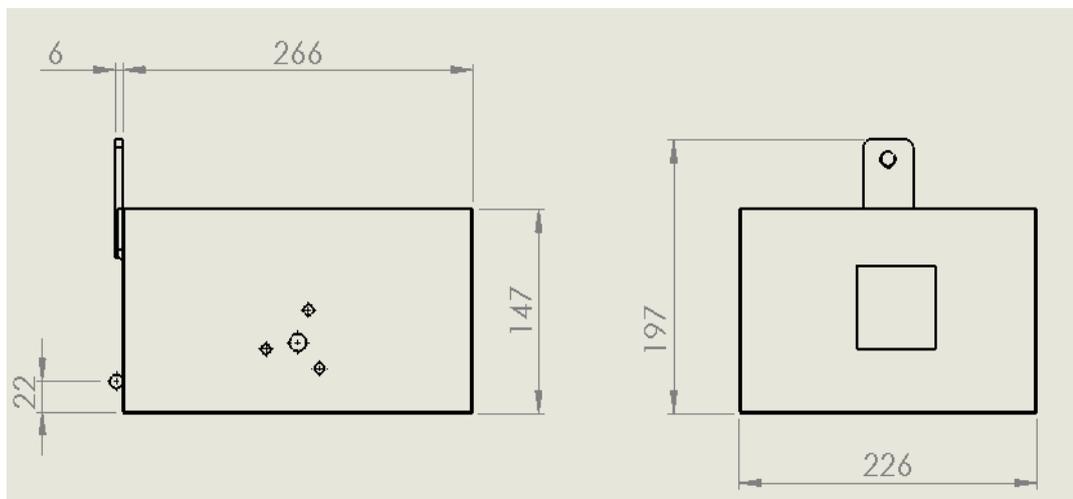


Figura 24. Medidas de la caja (mm).

2.3.1.7. Ensamblaje del subsistema mecánico

Con todos los elementos diseñados y seleccionados se establece el módulo mecánico, indicado en la Figura 25 y 26, el cual se puede acoplar y desacoplar de una silla de ruedas.

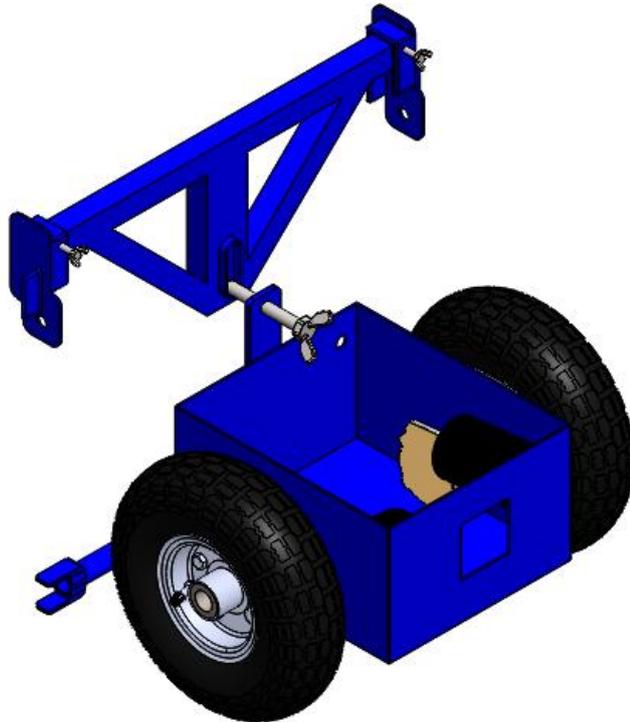


Figura 25. Módulo mecánico del sistema.

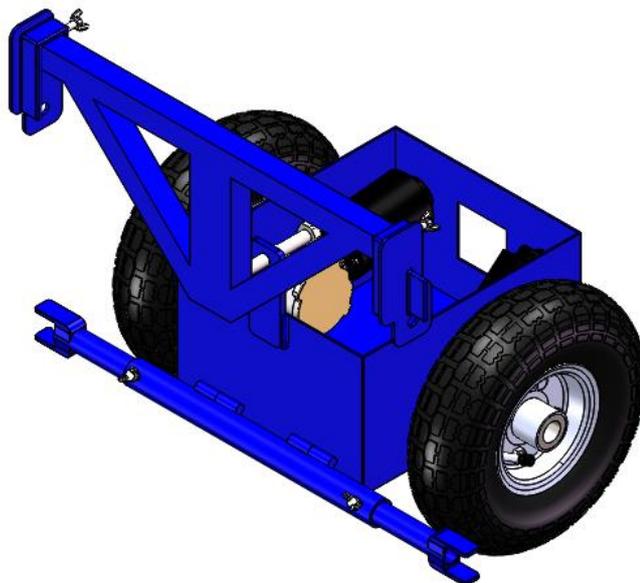


Figura 26. Módulo mecánico del sistema.

El ensamblaje del módulo mecánico y la silla de ruedas se detallan en la Figura 27.

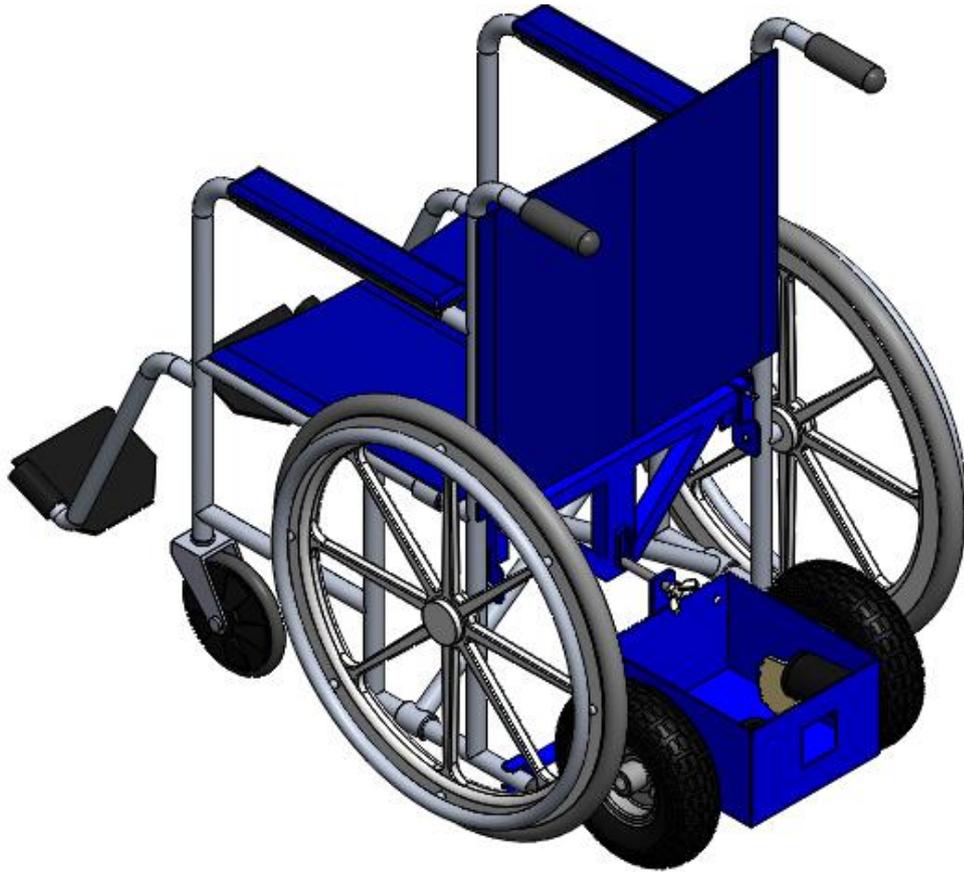


Figura 27. Módulo mecánico adaptado a una silla de ruedas estándar.

2.3.2. DISEÑO DEL SUBSISTEMA ELECTRÓNICO

2.3.2.1. Selección de la unidad de procesamiento

Se optó por la utilización de un computador de placa simple, debido a su reducido tamaño y altas prestaciones, evitando así el uso de un computador portátil que comúnmente era destinado a este tipo de proyectos. Para la selección se tomó en cuenta los siguientes parámetros:

- Costo.
- Salidas PWM.
- Puertos USB.
- Conector DSI.
- Velocidad de procesamiento de información y RAM.
- Capacidad de soportar un sistema operativo de software libre.
- Soporte técnico, basado en la comunidad de desarrolladores.

Tomando en cuenta las necesidades del presente proyecto, se realizó la comparación entre las unidades disponibles, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6. Tabla comparativa de SBC.

	Orange Pi	Raspberry Pi 3	BeagleBone Black	PCduino 3
Costo	\$ 50	\$ 80	\$ 120	\$ 100
Salidas PWM	26	26	8	2
Puertos USB	2	4	1	2
Conector DSI	0	1	0	0
Velocidad procesamiento	600 MHz	1.2 GHz	1 GHz	1 GHz
Memoria RAM	1 GB	1 GB	512 MB	512 MB
Soporta S.O	GNU/Linux	GNU/Linux	GNU/Linux	GNU/Linux
Soporte técnico	-	www.raspberrypi.org	-	-

Se escogió el trabajar con la Raspberry Pi 3, debido a sus ventajas de hardware; ofrece la mayor velocidad de procesamiento, una amplia RAM necesaria para procesar en tiempo real toda la información, suficientes puertos USB para conexión de periféricos y sensores, además de brindar una gran cantidad de información sobre su funcionamiento.

2.3.2.2. Selección del escáner láser

El escáner láser es el encargado de recolectar información del entorno en forma de una nube de puntos y se lo seleccionó conforme a los siguientes parámetros:

- Costo.
- Alcance lineal.
- Alcance rotacional.
- Precisión.
- Frecuencia de muestreo.
- Frecuencia de escaneo.
- Voltaje de operación.
- Entorno de operación.

Tomando en cuenta las necesidades del presente proyecto, se procedió a realizar la comparación entre los sensores disponibles, como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Tabla comparativa de escáneres láser.

	RPLIDAR A1	SICK TIM 310	HOKUYO UTM-30LX	LIDAR-Lite v3
Costo	\$ 449	\$ 1 800	\$ 4 800	\$ 149
Alcance lineal	6 m	4 m	30 m	40 m
Alcance rotacional	360°	270°	270°	0°
Precisión	± 5 mm	± 4 mm	± 5 mm	± 25 mm
Frecuencia de muestreo	2 000 Hz	-	1 440 Hz	500 Hz
Frecuencia de escaneo	5 - 10 Hz	15 Hz	40 Hz	0 Hz
Voltaje de operación	5 V	9 V	12 V	5 V
Entorno de operación	Interior	Interior	Exterior	Interior

Sobre la base de la satisfacción de parámetros obtenidos de la Tabla 7, se procedió a trabajar con el escáner láser RPLidar A1, principalmente debido a que permite un alcance rotacional de 360° (Slamtec Co., Ltd., 2013), indispensable para un correcto mapeo, un alcance lineal de 6 m, ideal para espacios interiores, además de la más alta frecuencia de muestro, lo que dará una construcción más detallada del entorno.

2.3.2.3. Selección de HMI

Para alcanzar una interacción lo más simplificada posible, entre el usuario y el sistema, es preciso evitar mandos y mecanismos difíciles de maniobrar; por esta razón se decidió la implementación de una pantalla táctil, tomando en cuenta los siguientes parámetros:

- Costo.
- Masa.
- Interfaz de conexión.
- Tipo de tecnología táctil.
- Dimensiones.
- Voltaje de operación.

Tomando en cuenta las necesidades del presente proyecto, se procedió a realizar la comparación entre las pantallas táctiles disponibles, como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8. Tabla comparativa de pantallas táctiles.

	Raspberry Pi 7" Touchscreen LCD	SunFounder 10.1" HDMI IPS LCD Monitor	SunFounder 7" HDMI IPS LCD Monitor	Elecrow 11.6" HDMI LED Monitor
Costo	\$ 86	\$ 135	\$ 95	\$ 145
Masa	0.84 lb	1.43 lb	1.09 lb	1.73 lb
Interfaz de conexión	DSI	HDMI / VGA	HDMI / VGA	HDMI
Tecnología	Capacitiva	Capacitiva	Capacitiva	Capacitiva
Dimensiones	194 x 110 x 20 mm	249 x 184 x 76 mm	189 x 135 x 65 mm	284 x 178 x 20.32 mm
Voltaje de operación	5 V	12 V	12 V	12 V

Sobre la base de la información obtenida, se optó por la *Raspberry Pi 7" Touchscreen*, debido a su interfaz de conexión mediante DSI (Display Serial Interface) a la raspberry Pi, su masa y tamaño reducido, con un ancho de pantalla ideal para la visualización; y por ultimo a su voltaje de operación igual al de los demás dispositivos (5 V).

2.3.2.4. Selección del controlador de motores

Una vez obtenidas las características del motor, se procedió a la selección de un controlador, que debe trabajar simultáneamente con dos motores DC, soportar al menos una corriente de 13 A, debido a que cada uno alcanza un máximo de 6.5 A, disponer de módulos PWM, para regular que la velocidad no sea mayor 0.50 m/s, y también tener módulos de puente H, que permitan la inversión de giro, debido a que en las maniobras de curva se realizarán movimientos diferenciales. Es así que se eligió trabajar con el controlador mostrado en la Figura 28, sus especificaciones se detallan en la Tabla 9.

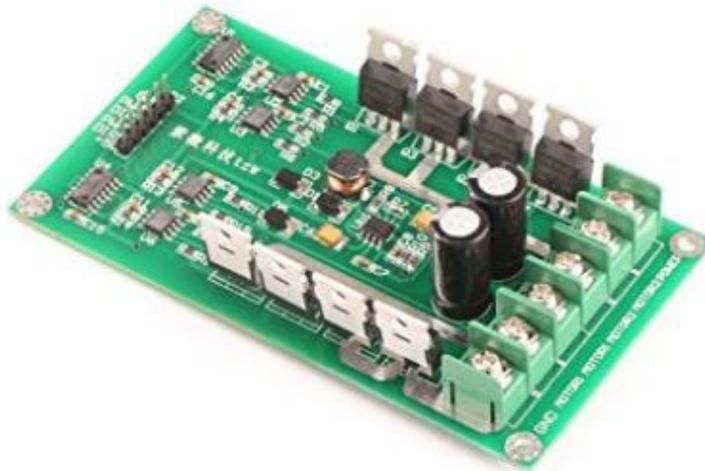


Figura 28. RioRand DC smart car PWM dual motor driver controller. (RioRand, 2017)

Tabla 9. Especificaciones de controlador RioRand DC.

	Magnitud	Unidad
Voltaje de operación del circuito de control	5	V
Voltaje de operación para motores	3-36	V
Corriente normal de trabajo	15	A
Corriente pico soportada	30	A
Módulos PWM	2	-
Módulos de puente H	2	-
Dimensiones	110 x 58	mm

Adicionalmente con el fin de evitar el sobrecalentamiento de los mosfet IRF3205 que posee el mencionado controlador, se escogió instalar un ventilador de 12 V, 0.15 A y de medidas 60 x 60 x 20 mm.

2.3.2.5. Dimensionamiento y selección de la fuente de poder

Con el objetivo de darle autonomía energética al sistema, y tomando en cuenta que tanto motores como demás dispositivos electrónicos funcionan con DC, se escogió trabajar con dos baterías, una de plomo-ácido recargable sellada de libre de mantenimiento de 12 V para los motores y el ventilador; y una de Li-Ion recargable para los demás dispositivos que trabajan a 5 V.

En la Tabla 10 se muestra el consumo de corriente de los dos motores y ventilador, que servirá para dimensionar la batería recargable de plomo-ácido.

Tabla 10. Consumo de corriente en elementos de 12 V.

Elemento	Magnitud	Unidad
2 Motores	13	A
Ventilador	0.15	A

El consumo total es de 13.15 A, la capacidad de la batería está determinada por la ecuación 11.

$$C = I \cdot t \quad [23]$$

En donde:

- $C [Ah]$: Capacidad de la batería.
- $I [A]$: Consumo de corriente total.
- $t [h]$: Tiempo de autonomía energética.

Tomando en cuenta el consumo de corriente y el tiempo de autonomía energética, establecido en 1 hora (detallado en los requerimientos), se obtuvieron los siguientes resultados:

$$C = I \cdot t = (13.15) (1)$$

$$C = 13.15 Ah \quad [24]$$

Un vez obtenido el valor de la ecuación 24, según menciona (Veiga, Zymler, Shayani, Viana, & Orrico, 2012) se le debe multiplicar por 1.2, para evitar que las caídas de tensiones provocadas por la descarga de la batería, afecten el funcionamiento del sistema.

$$C_{final} = C (1.2) \quad [25]$$

$$C_{final} = (13.15) (1.2)$$

$$C_{final} = 15.78 Ah \quad [26]$$

Así, el valor de la ecuación 26 presenta la capacidad de corriente que debe tener la batería para que los motores (trabajando al máximo) puedan funcionar ininterrumpidamente durante 1 hora, finalmente se escogió la batería de marca EVL 12 V, C 20 y 18 Ah.

En la Tabla 11 se detalla el consumo de corriente en los dispositivos que trabajan con 5 V, esto servirá para dimensionar la batería recargable de Litio.

Tabla 11. Consumo de corriente en elementos de 5 V.

Elemento	Magnitud	Unidad
Raspberry Pi 3	0.8	A
Raspberry Pi 7" Touchscreen Display	0.6	A
Controlador de motores RioRand DC	0.3	A
Escáner láser RPLidar	0.7	A

El consumo total es de 2.4 A, tomando en cuenta el requerimiento de 1 hora de funcionamiento y utilizando las ecuaciones 23 y 25, se obtuvieron los siguientes valores:

$$C = I \cdot t = (2.4) (1)$$

$$C = 2.4 \text{ Ah}$$

$$C_{final} = C (1.2) = (2.4) (1.2)$$

$$C_{final} = 2.88 \text{ Ah} \quad [27]$$

Con el valor obtenido en la ecuación 27, se procedió a seleccionar la batería portable de marca *Lumsing*, sus especificaciones se detallan en la Tabla 12.

Tabla 12. Especificaciones de la batería portable.

	Magnitud	Unidad
Capacidad	10 400	mAh
Salida de voltaje	5	V
Salida de corriente máxima	3	A
Dimensiones	96 x 79 x 21	mm

En este caso se seleccionó de acuerdo a la corriente de salida, dado que esta será la que demande el sistema continuamente; en donde el valor de 10400mAh sirve para establecer el tiempo que durará cargada la batería entregando 2.88 Ah, como se muestra a continuación:

$$C = I \cdot t$$

$$10.4 = (2.88)t$$

$$t = 3.61 \text{ h}$$

2.3.2.6. Diseño general del sistema electrónico

La Figura 29 muestra la conexión de todos los dispositivos electrónicos seleccionados junto con los motores DC, además de un pulsador que actúa como freno de emergencia, y un interruptor para encender y apagar el sistema.

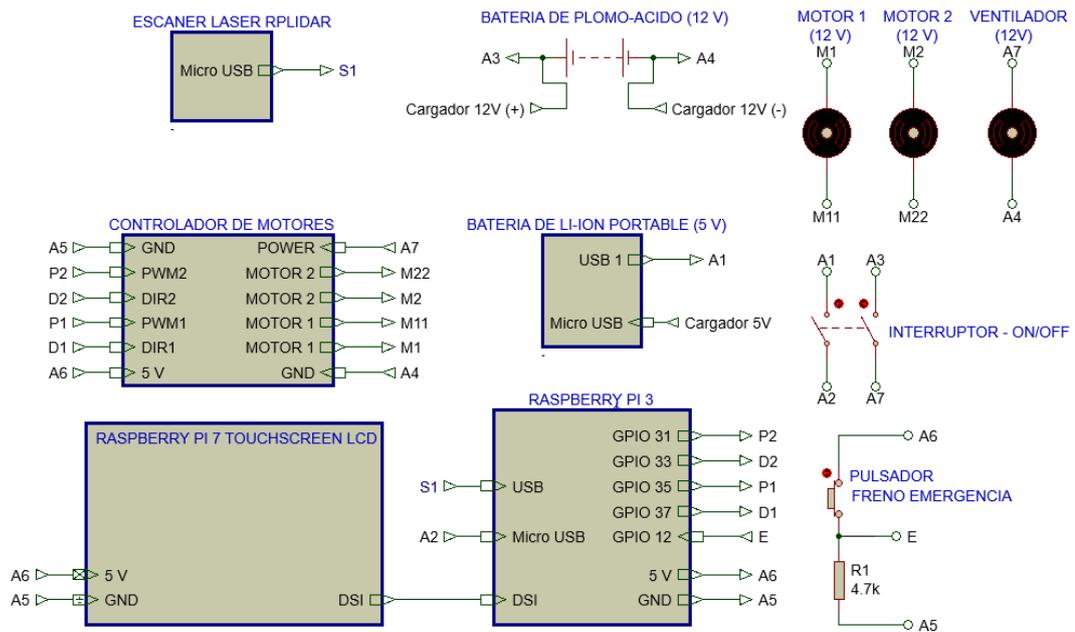


Figura 29. Diagrama del ensamblaje electrónico del sistema.

2.3.3. DISEÑO DEL SUBSISTEMA DE CONTROL Y NAVEGACIÓN

Para el desarrollo del presente proyecto se eligió trabajar sobre un sistema operativo para robótica, que permite abstracción de hardware, control de dispositivos (sensores, actuadores) a bajo nivel, paso de mensajes entre procesos, manejo de paquetes, similar a un sistema operativo para computadoras de software libre; permite crear y usar algoritmos de control, junto con poderosas herramientas de desarrollo, en fin todo lo necesario para innovar en el mundo de la robótica.

A pesar de existir otros sistemas operativos, se escogió trabajar con ROS versión *kinetic*, debido a que posee una colección de herramientas, librerías, y complejos algoritmos desarrollados mediante convenios (Google, MathWorks, Nasa, Nissan, Qualcomm, Sick, DARPA), que permitió al presente proyecto, a pesar de ser complejo, crearlo de una manera robusta y simplificada.

2.3.3.1. Técnica de localización y mapeo

Para el desarrollo del presente proyecto se escogió trabajar con un proceso estocástico de localización y mapeo, más específicamente con la técnica EKF SLAM, la más utilizada en la robótica móvil, debido a su alto grado de confiabilidad al realizar mapeos y localización simultáneamente, basándose en una formulación probabilística que proporciona una estimación recursiva del estado de un sistema dinámico.

2.3.3.2. Tipo de odometría

En la mayoría de aplicaciones de robótica móvil, es común el uso de odometría a través de encoders, que son los encargados de actualizar la posición, sin embargo estos acumulan errores y conforme avanza el tiempo y la distancia, se tornan valores cuantificables que pueden afectar de manera significativa la correcta posición del sistema. Debido a los inconvenientes antes mencionados se planteó el desarrollo de SLAM sin odometría basada en sensores extra, y más bien realizar una odometría laser, que actualiza la posición del robot mediante la extracción de características (*landmarks*) del entorno y la inmediata re-observación de las mismas a medida que se va desplazando, todos estos datos y medidas son proporcionados únicamente por el escáner láser, que con a su alta frecuencia de muestreo y la correcta implementación de un algoritmo, proporciona una odometría precisa. En la figura 30 se puede observar la actualización de posición usando odometría laser.

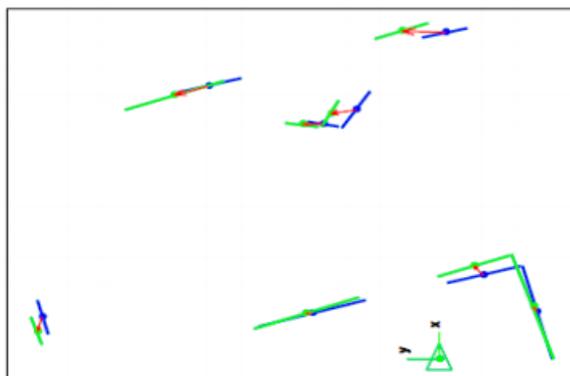


Figura 30. Actualización de posición mediante vectores que relacionan puntos significativos. (Neira, 2007)

2.3.3.3. Selección del paquete de control para realizar SLAM

Tomando en cuenta lo antes mencionado se eligió trabajar con el paquete *hector_slam*, el cual posee distintos nodos, entre los cuales se encuentra *hector_mapping*, un algoritmo robusto de extracción de *landmarks* que trabaja directamente con el escáner láser, trazando vectores entre puntos actuales y anteriores para mediante el Filtro Extendido de Kalman obtener la orientación y posición finales dentro del mapa creado por el mismo nodo. Otros nodos relevantes que posee este paquete son: planificación de ruta, almacenamiento de mapas, que serán implementados en el presente proyecto.

2.3.3.4. Diseño de la HMI

Para diseñar la interfaz se utilizó el paquete *rqt*, utilizado comúnmente en ROS para el desarrollo de GUI; se debió tomar en cuenta la cantidad de destinos a seleccionar y la posibilidad de escogerlos manualmente en el mapa guardado, en la Figura 31 y 32 se muestra su diseño.

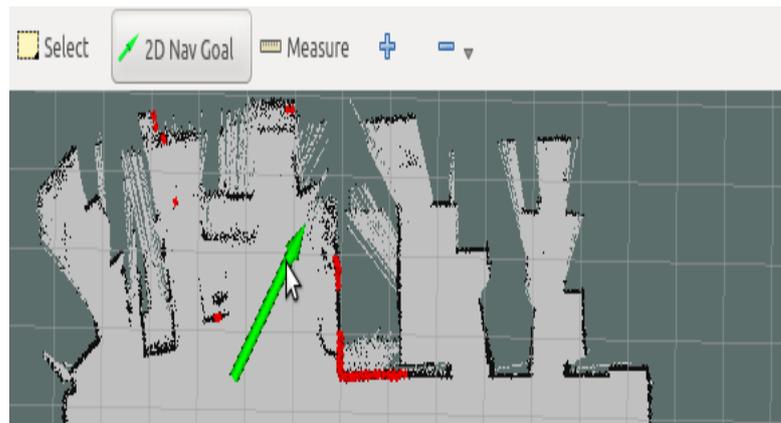


Figura 31. Selección de destinos manualmente.

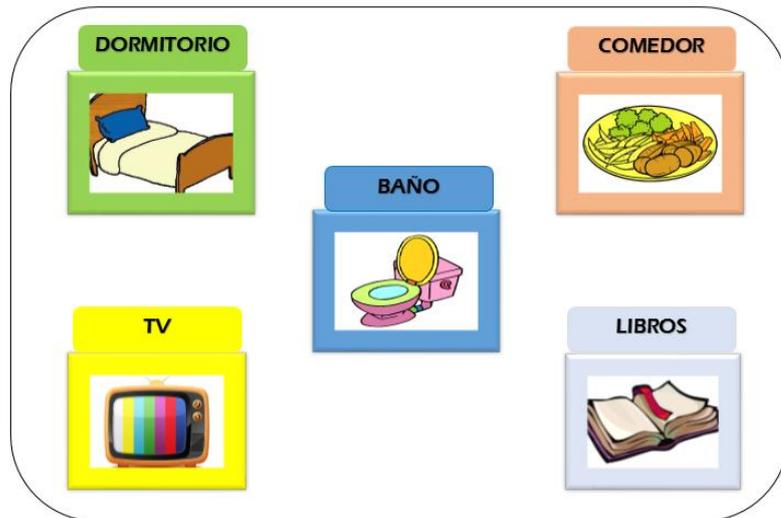


Figura 32. Selección de destinos pre-guardados.

2.3.3.5. Diseño general del proceso de navegación autónoma

Dentro de ROS los procesos son ejecutados por nodos, que al compartir información entre ellos (tópicos), logran construir un proceso complejo y repetitivo, en este caso SLAM y navegación autónoma; para el desarrollo de este proyecto se creó nodos y también se trabajó con los ya existentes, estos son los encargados de construir el mapa y la localización, planificar la ruta de navegación, controlar el movimiento de los motores, procesar la información del RPLidar, visualización; el orden y estructura acerca de este proceso se indica en la Figura 33.

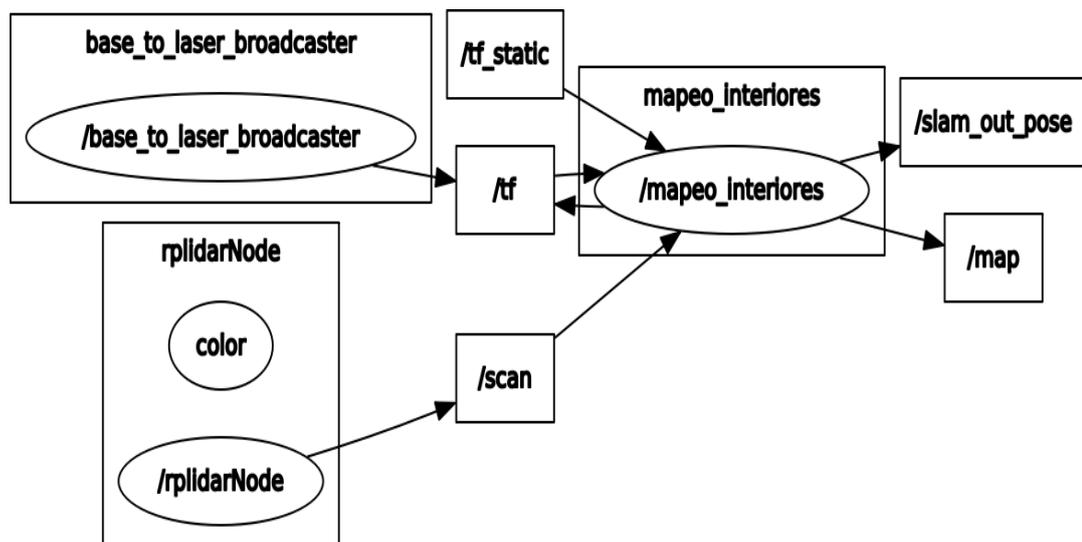


Figura 33. Arquitectura de nodos del sistema en ROS.

2.3.3.6. Diagrama de flujo del sistema

En la Figura 34 se puede observar las diferentes etapas del subsistema de control, realizadas por parte del usuario y del sistema, para obtener una completa navegación autónoma.

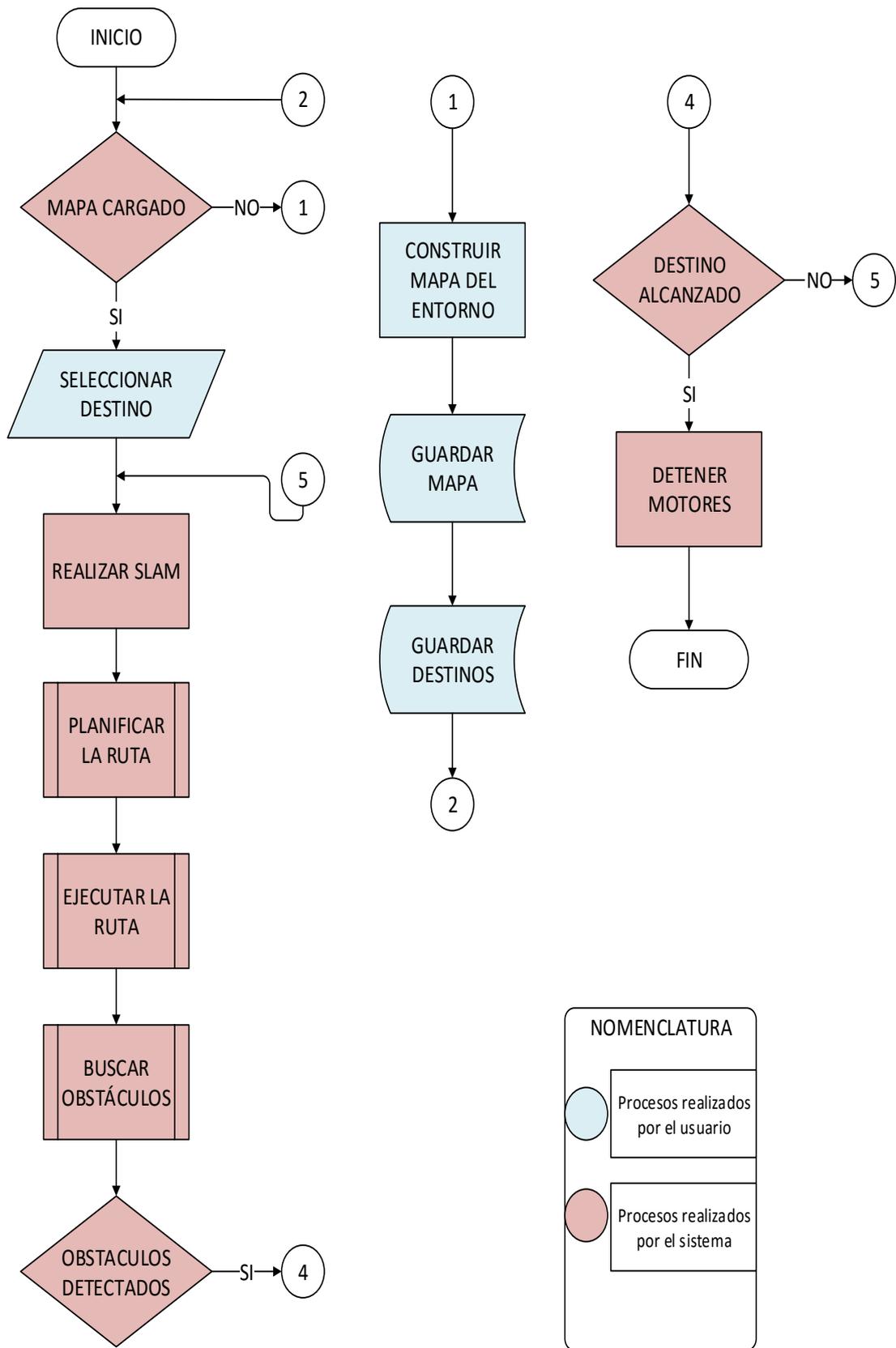


Figura 34. Diagrama de flujo del sistema.

2.4. INTEGRACIÓN DEL SISTEMA

En esta etapa se realiza la integración de los subsistemas mecánico y electrónico, virtualmente, comprobando que los elementos seleccionados y diseñados se acoplen entre sí y al sistema base.

Al realizar el ensamblaje mostrado en la Figura 35, se pudo constatar que en la caja metálica es necesario realizar perforaciones con el fin de facilitar la conexión de los cargadores de baterías, además de una tapa que proteja los componentes.

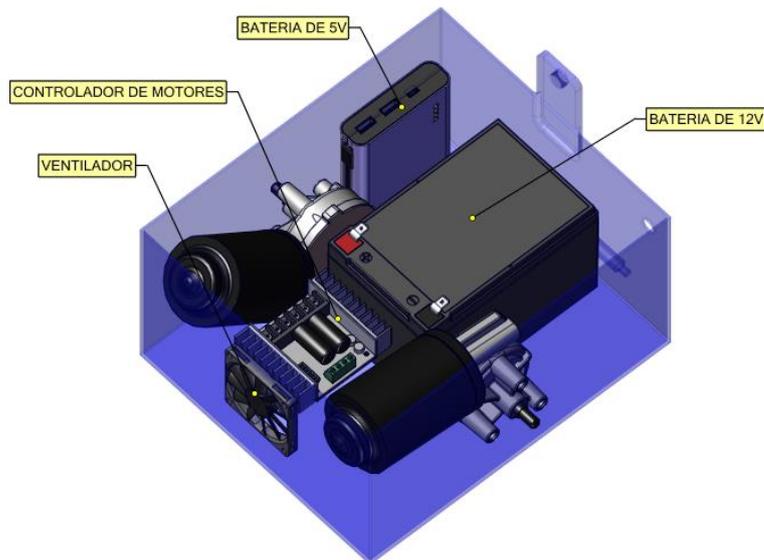


Figura 35. Ensamblaje virtual de caja y componentes.

El ensamblaje total del subsistema mecánico y electrónico se indica en la Figura 36.

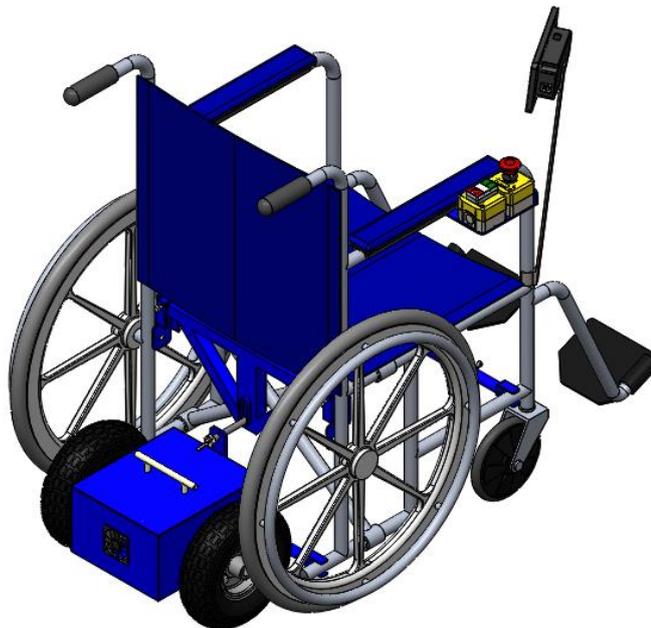


Figura 36. Ensamblaje virtual de caja y componentes.

En la Figura 37 se puede apreciar la adición de soportes para el escáner láser, pulsadores y pantalla táctil.

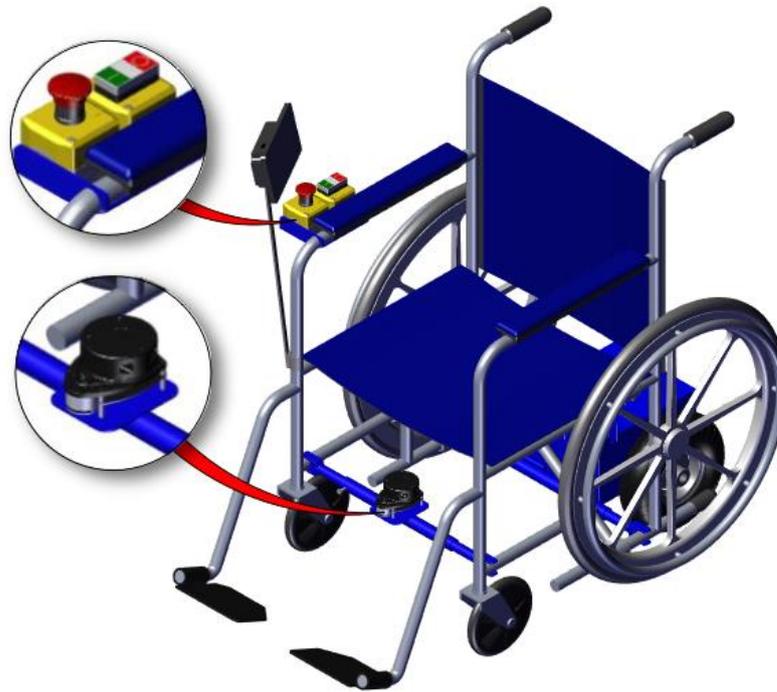


Figura 37. Ensamblaje virtual total del sistema desarrollado.

Una vez encontradas y solucionadas las posibles incompatibilidades en el ensamblaje virtual, se procedió a realizar el ensamblaje físico. En las Figura 38 se puede observar el acople de: motores y ruedas, caja metálica y soportes, adaptados al sistema base.



Figura 38. Ensamblaje del módulo mecánico acoplado al sistema base.

En las Figuras 39, 40 y 41, se puede observar el ensamblaje y conexiones de todos los elementos electrónicos; con el único cambio dado en las conexiones de la batería de 5V, en donde se optó por usar un puerto para cada carga (raspberry, pantalla, controlador de motores).



Figura 39. Ensamblaje de Raspberry Pi 3, pantalla táctil y pulsadores.



Figura 40. Ensamblaje del escáner láser.



Figura 41. Ensamblaje del subsistema electrónico

En las Figuras 42 y 43, se puede observar el ensamblaje total de los subsistemas diseñados.



Figura 42. Ensamblaje físico total del sistema desarrollado.



Figura 43. Ensamblaje físico total del sistema desarrollado.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

De acuerdo a los requerimientos establecidos, se procedió a validar el sistema de la siguiente manera:

3.1.1. RESISTENCIA ESTRUCTURAL

Con el fin de validar los elementos estructurales diseñados y mostrados anteriormente en las Figuras 13 y 16, se procedió a realizar simulaciones de su comportamiento utilizando una herramienta CAD.

En la Figura 44 se puede observar el factor de seguridad mínimo del soporte superior, simulado con una fuerza de 980 N.

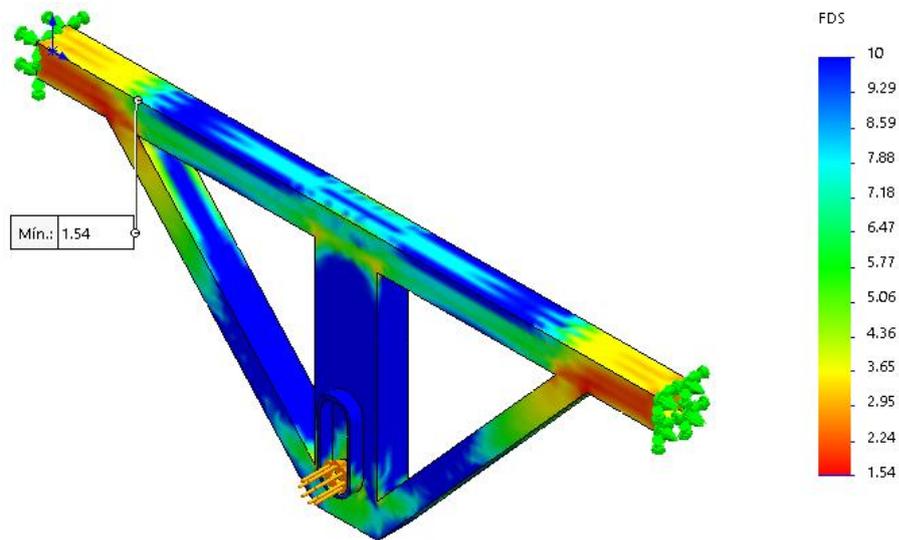


Figura 44. Análisis estático del soporte superior.

En la Figura 45 se puede observar el factor de seguridad mínimo del soporte móvil inferior, simulado con una fuerza de 1176 N.

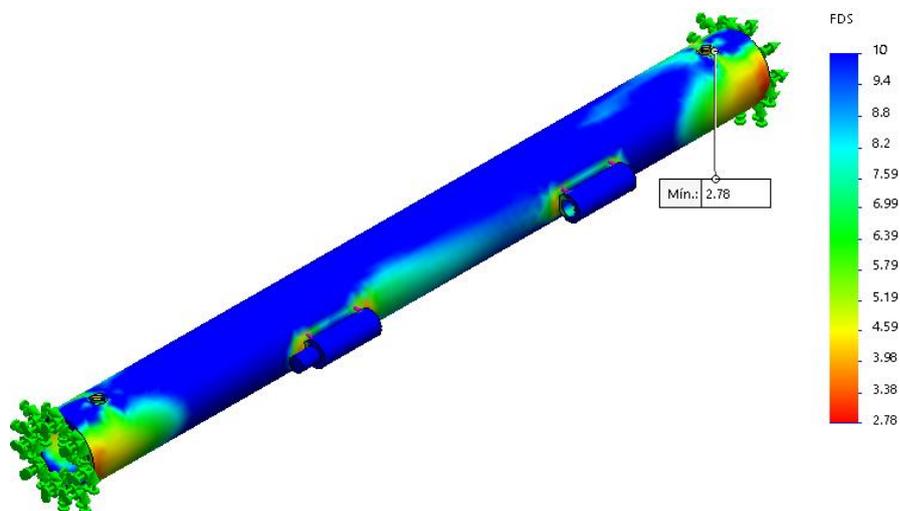


Figura 45. Análisis estático del soporte móvil inferior.

3.1.2. CAPACIDAD DE CARGA Y VELOCIDAD DE DESPLAZAMIENTO

Para verificar la capacidad del sistema se probó su funcionamiento con personas de distintas masas, realizando varias mediciones en cada caso se obtuvo valores promedios señalados en la Tabla 13; la medición se realizó en la parte más larga de un corredor interior, por ese motivo se determinó la distancia de 5 m.

Tabla 13. Velocidades y capacidades de desplazamiento del sistema.

	Masa del usuario	Distancia recorrida	Tiempo de recorrido	Velocidad
Usuario 1	55 kg	5 m	12.36 s	0.40 m/s
Usuario 2	62 kg	5 m	13.93 s	0.36 m/s
Usuario 3	68 kg	5 m	14.91 s	0.34 m/s
Usuario 4	74 kg	5 m	16.16 s	0.31 m/s
Usuario 5	90 kg	5 m	20.29 s	0.25 m/s

Además se obtuvo la masa del sistema sin el usuario, la cual es de 45 Kg, con lo que la masa total desplazada es de 135 Kg.

3.1.3. AUTONOMÍA ENERGÉTICA

Para verificar el tiempo de autonomía del sistema se realizó una serie de iguales recorridos pero con personas de distintas masas, obteniendo los valores mostrados en la Tabla 14.

Tabla 14. Autonomía energética del sistema.

	Masa del usuario	Tiempo de autonomía energética
Usuario 1	55 Kg	95 min
Usuario 2	62 Kg	89 min
Usuario 3	68 Kg	83 min
Usuario 4	74 Kg	76 min
Usuario 5	90 Kg	61 min

3.1.4. NAVEGACIÓN AUTÓNOMA

El mapa resultante en la Figura 46, es realizado conjuntamente entre el usuario y el sistema; este sirve de base para la posterior navegación y queda almacenado de forma permanente.



Figura 46. Mapa obtenido.

La navegación se la realiza sobre el mapa pre-cargado; el sistema planifica y re-planifica la ruta, actualiza espacios y obstáculos como se muestra en la Figura 47, todo esto de forma autónoma mientras el sistema alcanza el destino seleccionado.

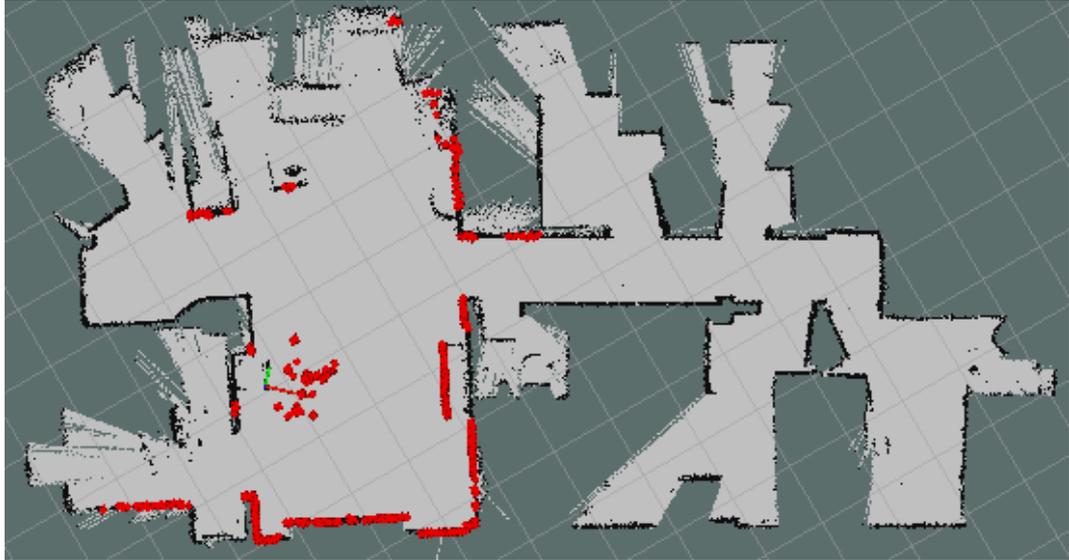


Figura 47. Navegación autónoma por parte del sistema.

Se estableció un margen de distancia para evitar colisiones y salvaguardar la integridad del usuario, esta distancia está dada por el grosor de las líneas de color rojo como se indica en la Figura 48.

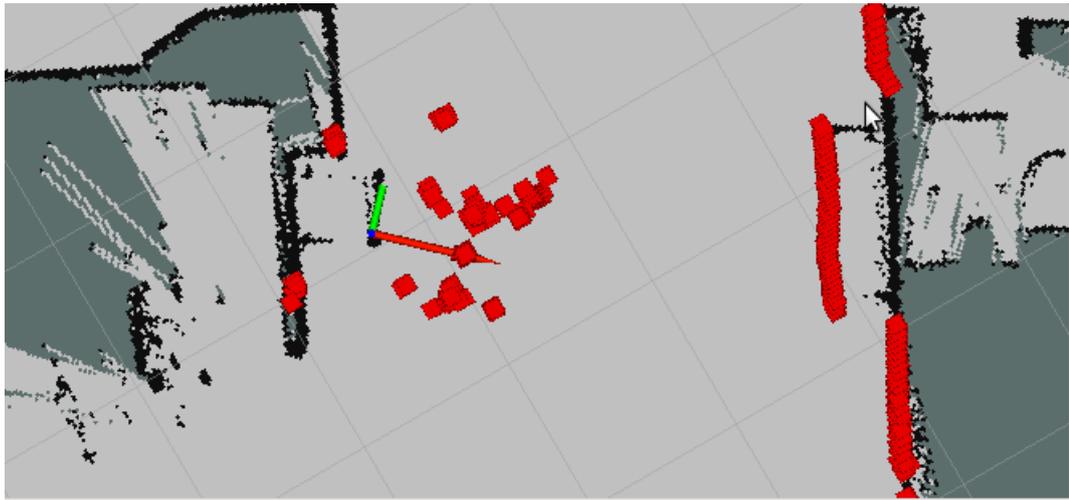


Figura 48. Navegación autónoma por parte del sistema.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- El módulo mecánico diseñado es capaz de adaptarse a una silla de ruedas estándar plegable, desplazando una masa total de 135 Kg; su montaje y desmontaje lo puede realizar una sola persona.
- El sistema mecatrónico diseñado permite navegar de forma autónoma a una silla de ruedas con tan solo seleccionar el destino, ya sea de una interfaz con posiciones guardadas o manualmente del mapa cargado; planifica la ruta mientras actualiza el mapa en busca de obstáculos y nuevos entornos, replanificando la misma de ser necesario a cada instante, además posee un freno de emergencia en caso de producirse un error por parte del sistema o en la selección del destino.
- La construcción del mapa no se la puede hacer en entornos que posean vidrio esto debido a la incapacidad de rebote de la señal emitida por el escáner láser; pudiendo corregir este problema únicamente con la implementación de láminas en dichos vidrios.
- Para realizar la construcción del mapa, la odometría láser extrae *landmarks* del entorno, por lo que la velocidad de desplazamiento de la silla no debe ser mayor a 1 m/s para que dichas características sean bien definidas y el sistema se ubique correctamente dentro del mapa, evitando así crear mapas sobrepuestos.
- Los destinos seleccionados o guardados deben tener al menos 1.5 veces la longitud total de la silla, para que esta pueda girar sin problemas de acuerdo a la orientación que se le haya indicado.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar un visualizador del nivel de la batería de 12V.
- La construcción del mapa inicial se podría hacer de una manera autónoma, por lo que se recomienda la implementación de controles, que permitan mover al sistema mientras se construye el mapa.
- La navegación usando un mapa en 3D sería lo ideal, por lo que para futuras modificaciones se recomienda agregar un motor al escáner laser, que le permita tomar datos en X, Y, Z..
- Debido a las diferentes masas de los usuarios la velocidad del sistema varía, por lo que se recomienda implementar un sistema de retroalimentación de velocidad que permita corregir el valor del PWM.
- Debido a la masa final del módulo mecatrónico, se recomienda usar materiales alternativos que disminuyan este valor.

BIBLIOGRAFÍA

- Alcubierre, J., Minguez, J., Montesano, L., Montano, L., Saz, O., & Lleida, E. (2005). Silla de Ruedas Inteligente Controlada por Voz. Zaragoza: Fundación ONCE.
- Durrant-Whyte, H., & Bailey, T. (2006). Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Sidney: University of Sidney.
- Fernández, C. (2012). Técnicas de navegación para un robot móvil utilizando sistemas de razonamiento espacial. Salamanca: Universidad de Salamanca.
- Freire, W., Ramírez-Luzuriaga, M., Belmont, P., Mendieta, M., & Silva Jaramillo, M. (2014). Tomo I: Encuesta nacional de salud y nutrición de la población ecuatoriana de cero a 59 años. Quito: Ministerio de Salud Pública/Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Gallardo, J., & Gaona, A. (2015). Diseño y construcción de una plataforma robótica móvil para interiores capaz de realizar SLAM. Sangolquí: ESPE.
- Gamboa, J. (2014). Corrección de odometría empleando Visual Servoing en ROS. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid.
- García, A. (2013). Robot Operating System. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena.
- Global Healthcare. (03 de Marzo de 2017). Global Healthcare. Obtenido de <http://globalhealthcare.net/catalogos/catalogo-2/files/assets/downloads/publication.pdf>
- González, J., Galindo, C., Fernández, J., Blanco, J., Muñoz, A., & Arévalo, V. (2009). Silla de ruedas robótica para dar más independencia al usuario. Málaga: Universidad de Málaga.
- INEN. (2000). NTE INEN 2 245:2000. Quito: Instituto Ecuatoriano de Normalización.
- IPAC S.A. (2014). IPAC-ACERO.
- ISO 7176-6. (2001).
- Mora, P., & Salazar, D. (2014). Diseño e implementación de sistema de propulsion y control para silla de ruedas. Pereria: Universidad Tecnológica de Pereira.

- Narváez, V., & Yandún, F. (2013). Diseño e implementación de un sistema de localización y mapeo simultáneo (SLAM) para la plataforma robótica Robotino. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Neira. (2007). The state of the art in the EFK solution to SLAM. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Norton, R. L. (1999). Diseño de máquinas. México: Prentice-Hall (Pearson).
- Nuñez, M., León, F., & Cardenas, P. (2012). ROS sistema operativo para robótica, nociones y aplicaciones. Bogota: Universidad Nacional de Colombia.
- Open Source Robotics Foundation. (2007). ROS.org. Obtenido de ROS.org: <http://www.ros.org>
- Pin-Chun, H., & Won-jong, K. (2010). Autonomous robotic wheelchair with collision-avoidance navigation and real-time path planning. IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics.
- Qingdao Kinghood Tools Co., Ltd. (2012). Kinghood. Obtenido de <http://www.qd-kinghood.com/products/pneumatic-wheel/20100826-33.html>
- Quigley, M., Gerkey, B., & Smart, W. (2016). Programming Robots with ROS. Sebastopol: O'Reilly Media.
- Raspberry Pi Foundation. (2012). Raspberry Pi. Obtenido de <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>
- RioRand. (2017). RioRand. Obtenido de <http://www.riorand.com/riorandr-dc-smart-car-pwm-dual-motor-driver-controller-module-circuit-board-h-bridge-mosfet-irf3205-3-36v-15a-peak-30a-for-arduino.html>
- Slamtec Co., Ltd. (2013). Slamtec. Obtenido de <http://www.slamtec.com/en/Lidar>
- Vegard Stjerna, L. (2016). Robotic Maintenance and ROS. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.
- Veiga, I., Zymler, R., Shayani, R., Viana, D., & Orrico, M. (2012). Sizing of motor and battery pack for an automotive electric vehicle given a specific route. IEE, 1-8.

- Verein Deutscher Ingenieure. (2004). Design methodology for mechatronic systems.
- Zhan, W., Shoudong, H., & Dissanayake, G. (2011). Simultaneous Localization and Mapping. Singapur: World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.
- Zhejiang leili auto parts Co., Ltd. (15 de Marzo de 2017). Leili enterprise. Obtenido de <http://www.leili-china.com/>

ANEXOS

Anexo 1
Planos mecánicos

1

2

3

4

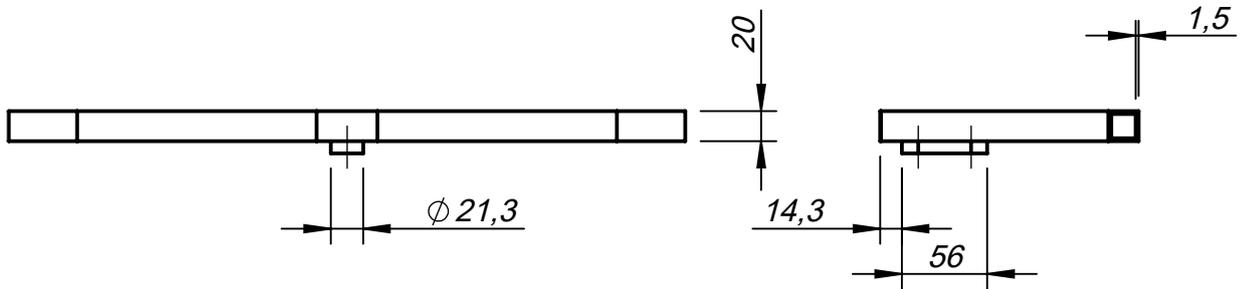
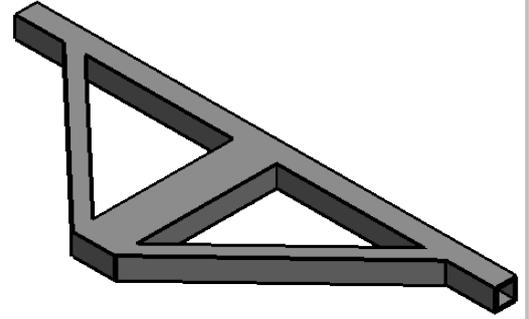
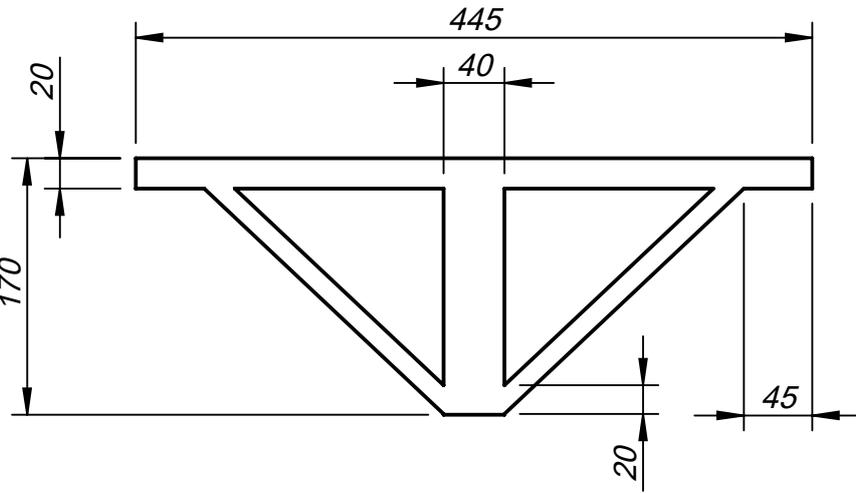
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.5		ASTM A 500	
				Fecha	Nombre	Soporte superior	
				Dibujado 30/8/2017	Ponce Ronal		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	ESCALA:
				UTE		1	1:5
Edición	Modificación	Fecha	Nombre			HOJA:	



1

2

3

4

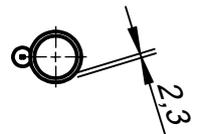
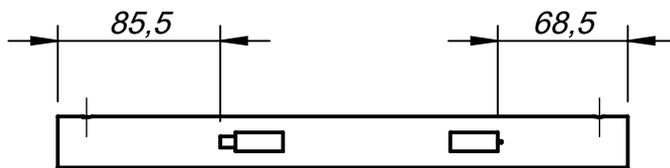
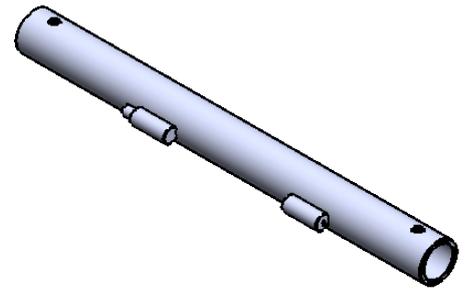
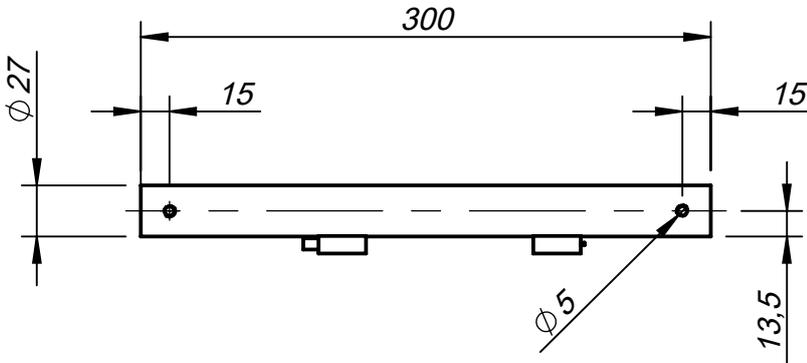
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.5		ASTM A 569	
				Fecha	Nombre	<i>Soporte móvil inferior</i>	
				Dibujado 30/8/2017	Ponce Ronal		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	HOJA:
				UTE		2	A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

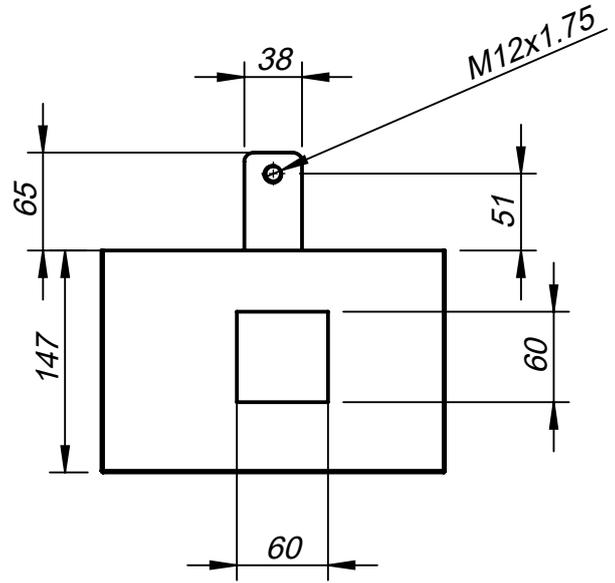
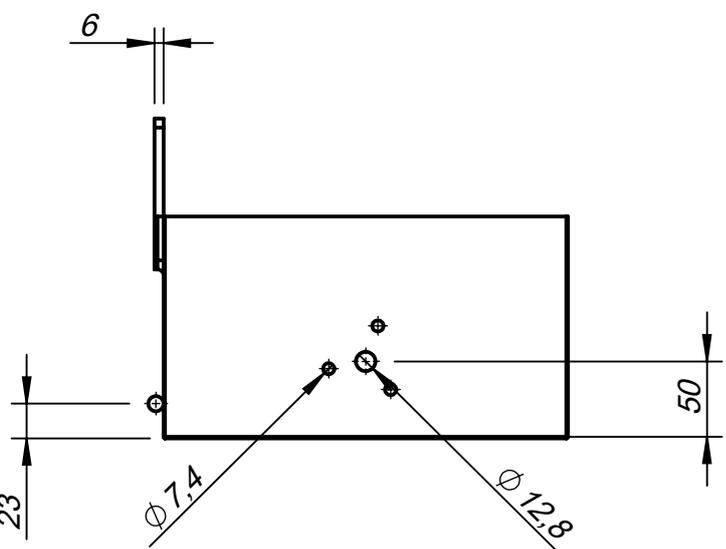
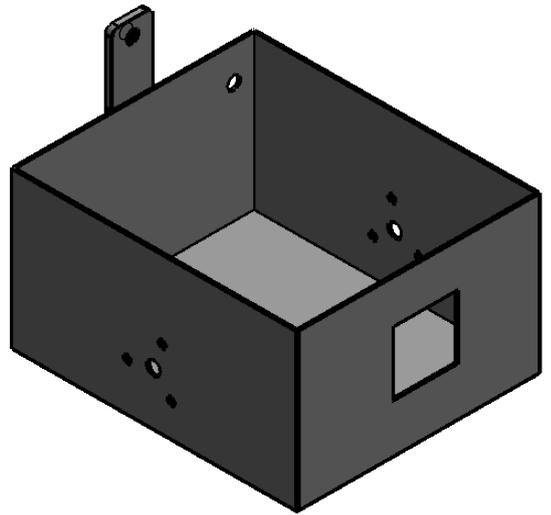
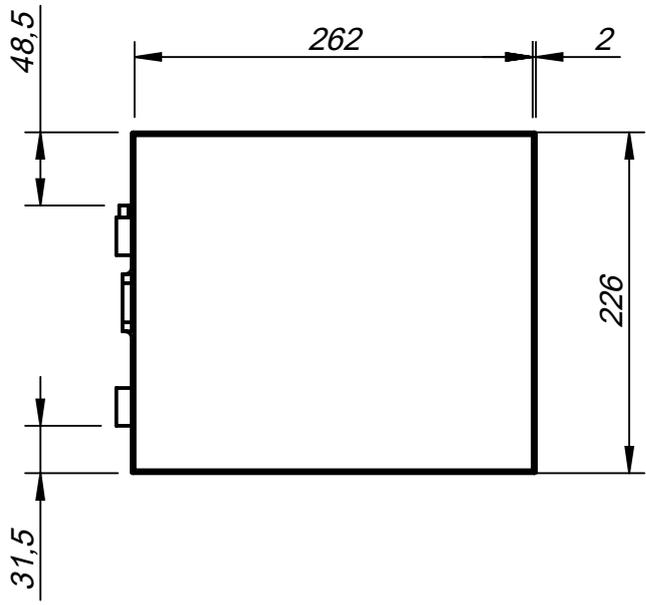
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.5		ASTM A 36	
				Fecha	Nombre	Caja metálica	
				Dibujado 30/8/2017	Ponce Ronal		
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:		DIBUJO Nº:	ESCALA:
				UTE		3	1:5
							HOJA:
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				A4

1

2

3

4

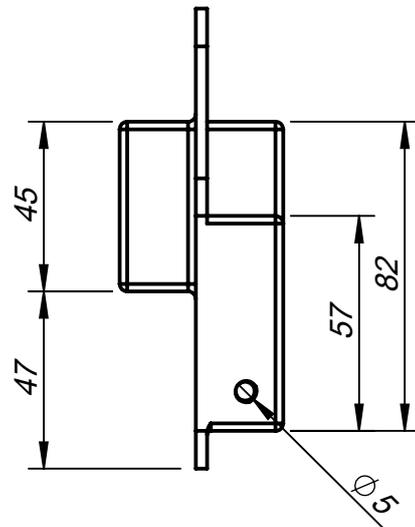
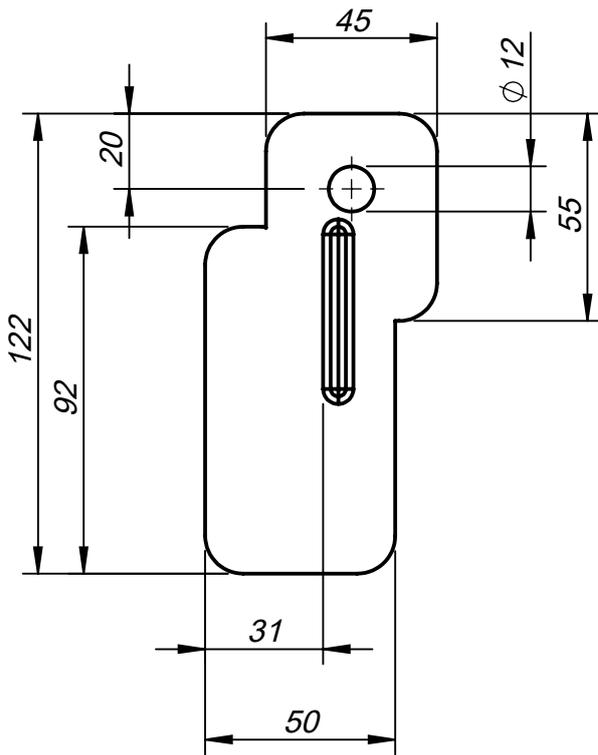
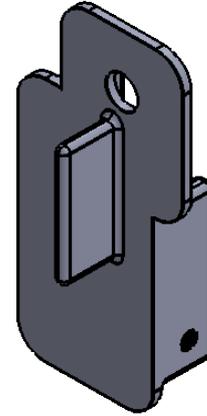
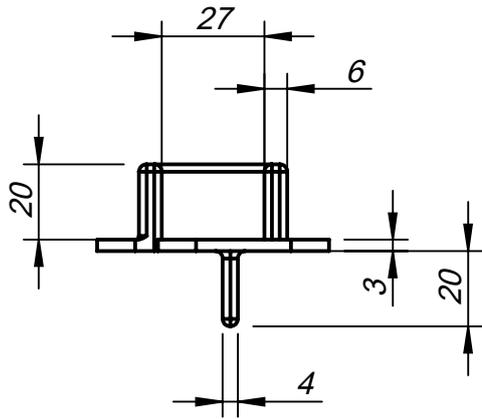
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA:	PESO [Kg]:	MATERIAL:	
				± 0.5		ASTM A 36	
				Fecha	Nombre	Placas laterales	ESCALA:
				Dibujado 30/8/2017	Ponce Ronal		1:2
				Revisado			
				Aprobado			
				FIRMA / EMPRESA:	DIBUJO Nº:		HOJA:
				UTE	4		A4
Edición	Modificación	Fecha	Nombre				

1

2

3

4

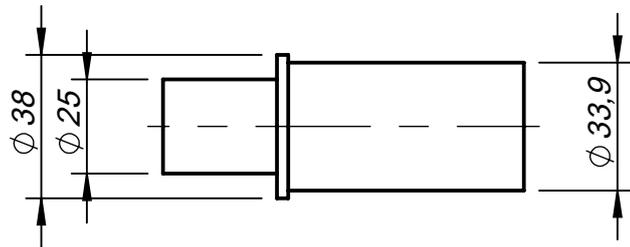
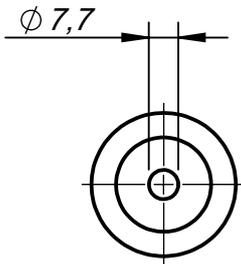
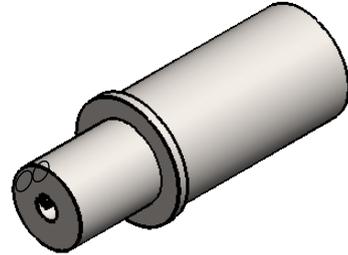
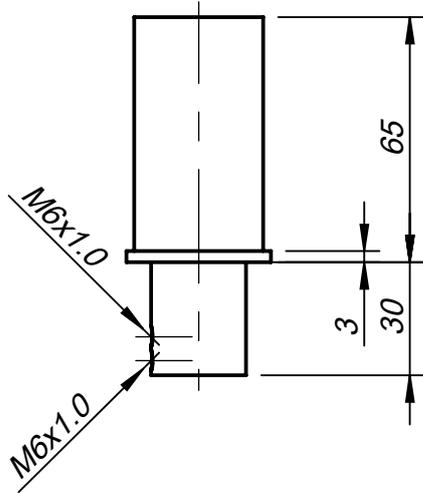
A

B

C

D

E



				TOLERANCIA: ± 0.5	PESO [Kg]:	MATERIAL: AISI-SAE 1018		
						Bocín	ESCALA: 1:2	
				Fecha	Nombre			
				Dibujado	30/8/2017		Ponce Ronal	
				Revisado				
				Aprobado				
				FIRMA / EMPRESA: UTE		DIBUJO Nº: 5	HOJA: A4	
Edición	Modificación	Fecha	Nombre					

Anexo 2

Precisión de mapeo

