



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL  
TÍTULO DE INGENIERA EN MECATRÓNICA

TEMA: “ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO  
OMNIDIRECCIONAL PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE  
UNA SILLA DE RUEDAS CON CONTROL AUTÓNOMO,  
OPTIMIZANDO SU DESPLAZAMIENTO EN AMBIENTES CON  
MOVILIDAD REDUCIDA”

AUTORAS: CÁRDENAS ZUMBA, SCARLET GISSELL  
ORTIZ ALVARADO, PAMELA YAJAIRA

DIRECTOR: ING. ARTEAGA LÓPEZ, OSCAR BLADIMIR  
LATACUNGA



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO OMNIDIRECCIONAL PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS CON CONTROL AUTÓNOMO, OPTIMIZANDO SU DESPLAZAMIENTO EN AMBIENTES CON MOVILIDAD REDUCIDA”, realizado por las señoritas **Scarlet Gissell Cárdenas Zumba** y **Pamela Yajaira Ortiz Alvarado**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a las señoritas **Scarlet Gissell Cárdenas Zumba** y **Pamela Yajaira Ortiz Alvarado** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, mayo del 2019

Atentamente

Ing. Oscar Arteaga  
DIRECTOR



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Nosotras, **Cárdenas Zumba, Scarlet Gissell** con cédula de ciudadanía N° **1600669962** y **Ortiz Alvarado, Pamela Yajaira** con cédula de ciudadanía N° **0504267451** declaramos que este trabajo de titulación “**ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO OMNIDIRECCIONAL PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS CON CONTROL AUTÓNOMO, OPTIMIZANDO SU DESPLAZAMIENTO EN AMBIENTES CON MOVILIDAD REDUCIDA**”, ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaramos que este trabajo es de nuestra autoría, en virtud de ello nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, mayo del 2019

Cárdenas Zumba, Scarlet Gissell  
C.C.: 1600669962

Ortiz Alvarado, Pamela Yajaira  
C.C.: 0504267451



# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

## AUTORIZACIÓN

Nosotras, **Cárdenas Zumba, Scarlet Gissell** y **Ortiz Alvarado, Pamela Yajaira** autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la institución el presente trabajo de titulación **“ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DEL MOVIMIENTO OMNIDIRECCIONAL PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA SILLA DE RUEDAS CON CONTROL AUTÓNOMO, OPTIMIZANDO SU DESPLAZAMIENTO EN AMBIENTES CON MOVILIDAD REDUCIDA”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, mayo del 2019

Cárdenas Zumba, Scarlet Gissell  
C.C.: 1600669962

Ortiz Alvarado, Pamela Yajaira  
C.C.: 0504267451

## DEDICATORIA

*Dedico este logro primero a Dios, por darme el valor para sobrellevar cada dificultad presentada durante mi carrera universitaria y por permitirme cumplir este sueño.*

*A mi madre, confidente y mejor amiga Marianela; por estar siempre presente en mi vida, por su amor incondicional, esfuerzo, entrega y lucha que hicieron posible la obtención de cada una de mis metas y anhelos.*

*A mi pequeña princesa Frida, que me enseñó lo puro que puede ser el amor de una hermana, alegrando mis días y dándome la fortaleza para convertirme en mejor persona para ella.*

*A mi abuelito por ser como otro padre y estar siempre pendiente de mí; a mi familia que con sus palabras de aliento y su carisma nunca permitieron que me sienta sola.*

*A mis compañeros, amigos y mijines, que siempre estuvieron para mí y me demostraron el significado de la palabra amistad.*

*A mi mejor amiga y compañera de tesis Pame, por siempre estar presente durante toda la carrera, gracias de todo corazón, sin ti no lo hubiera logrado.*

*A mis ángeles Milton, Bismar y Evaristo, que desde el cielo me supieron apoyar, cuidar y dar fuerzas para que todo esto sea posible.*

*Y finalmente a mi novio Erik, por el apoyo incondicional y por todo el amor entregado durante todos estos años, por ser ese pilar fundamental que tanto necesité, y por incentivarme a dar siempre la mejor versión de mí.*

**Scarlet Cárdenas**

## DEDICATORIA

*Dedico este proyecto principalmente a Dios, por regalarme sabiduría en cada momento e inspirarme para culminar con éxito esta etapa de mi vida profesional.*

*A mi madre Marlene, quien con amor me ha brindado un apoyo incondicional día tras día a pesar de nuestra distancia física, valoro mucho el esfuerzo que realiza para ayudarnos a mis hermanos y a mí.*

*A mi abuelita Inés, a mis tías Martha y Jaqueline que son como mi madre, supieron aconsejarme en todos los aspectos de mi vida y con su experiencia han logrado transmitirme sus conocimientos y guiarme por un buen camino.*

*A mis hermanos Paúl y Carolina, gracias por estar presentes y por el apoyo moral, los quiero y espero ser un buen ejemplo para que continúen con sus metas.*

*A mi familia quienes con su apoyo y palabras de aliento me ayudan a ser una mejor persona, y de alguna u otra manera están presentes conmigo en cada proyecto de mi vida.*

*A mis amigos quienes me apoyaron en los momentos más difíciles, en especial a Scarlet, Francisco y Bismar, han sido de gran apoyo emocional y los mejores amigos que he tenido y a las personas especiales que forman mi pasado y presente por aportar con un granito de arena para que esto sea posible.*

*Finalmente conseguimos cumplir esta meta, gracias al gran esfuerzo que hemos puesto en conjunto con mi compañera de tesis y continuando con el afán de alcanzar los objetivos propuestos a futuro.*

**Pamela Ortiz**

## **AGRADECIMIENTOS**

Queremos expresar un sincero agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto.

Agradecemos a los docentes quienes con paciencia impartieron sus conocimientos aportando con nuestra formación profesional y personal.

A todos nuestros amigos y futuros colegas quienes nos ayudaron desinteresadamente, gracias infinitas por su buena voluntad mostrada a lo largo de toda la carrera.

A nuestro director de tesis el Ing. Oscar Arteaga, quien fue un eje primordial para el desarrollo de este proyecto, gracias por compartir su conocimiento y por la guía impartida durante estos meses.

A nuestros colaboradores que nos ofrecieron una mano amiga y supieron asesorarnos durante el trascurso de nuestra tesis haciendo más llevadero este reto.

Y finalmente a nuestra carrera y a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L por habernos formado como Ingenieras en Mecatrónica cada día, con cada esfuerzo, cada sonrisa y cada llanto dejado en las aulas; y ahora nos dejan con la mayor satisfacción de haber formado parte de tan prestigiosa familia.

**Scarlet y Pamela**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

### CARÁTULA

CERTIFICACIÓN .....	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD .....	iii
AUTORIZACIÓN .....	iv
DEDICATORIA .....	v
AGRADECIMIENTOS .....	vii
ÍNDICE DE CONTENIDOS .....	viii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xv
RESUMEN .....	xix
ABSTRACT .....	xx

## CAPÍTULO I

### EL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del Problema.....	1
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación e Importancia .....	3
1.4. Objetivos.....	5
1.4.1. Objetivo General.....	5
1.4.2. Objetivos Específicos .....	5

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1. Robots Omnidireccionales.....	6
------------------------------------	---



2.2.	Tipos de ruedas .....	6
2.3.	Sistemas de locomoción de robots móviles .....	8
2.3.1.	Locomoción por ruedas .....	8
2.3.2.	Otros tipos de locomoción .....	15
2.4.	Antropometría .....	15
2.5.	Especificaciones para la construcción de silla de ruedas .....	17
2.6.	Investigación de la maniobrabilidad omnidireccional de una plataforma robótica.....	19
2.7.	Cinemática de movimiento .....	20
2.8.	Estructuras de sillas de ruedas.....	24
2.8.1.	Silla de rueda tradicional .....	24
2.8.2.	Silla de ruedas eléctrica.....	26
2.8.3.	Sillas de bipedestación .....	27
2.8.4.	HandBike (triciclo de mano).....	28
2.9.	Tipos de mando de control .....	28
2.9.1.	Convencionales .....	29
2.9.2.	Autónomo .....	29
2.10.	Sistema de control Autónomo.....	30
2.11.	Dispositivos Electrónicos .....	31
2.11.1.	Sensores .....	31
2.11.2.	Batería Lipo .....	33
2.11.3.	Tecnologías de Comunicación Inalámbrica .....	34

## **CAPÍTULO III**

### **DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN DE LA SILLA DE RUEDAS OMNIDIRRECCIONAL**

3.1.	Parámetros de diseño.....	38
3.2.	Diseño Cinemático del movimiento Omnidireccional de la silla de ruedas.....	39
3.3.	Diseño Cinético de la silla de ruedas omnidireccional .....	42
3.3.1.	Determinación de Cargas .....	43
3.3.2.	Análisis Estático.....	46
3.4.	Análisis de Esfuerzos .....	53
3.4.1.	Columna .....	53
3.4.2.	Estructura .....	58
3.4.3.	Diseño del eje rueda-motor .....	62
3.5.	Selección de Componentes.....	70
3.5.1.	Ruedas Mecanum.....	70
3.5.2.	Motor .....	72
3.6.	Construcción de los componentes mecánicos de la silla de ruedas.....	74
3.6.1.	Construcción del Asiento .....	75
3.6.2.	Construcción de la Estructura.....	75

## **CAPÍTULO IV**

### **DISEÑO ELECTRÓNICO DE LA SILLA DE RUEDAS OMNIDIRRECCIONAL**

4.1.	Hardware .....	79
4.1.1.	Driver para Motores .....	80

4.1.2.	Sensores .....	83
4.1.3.	Fuente de Alimentación .....	85
4.1.4.	Accionadores.....	87
4.1.5.	Tarjeta de Control .....	89
4.2.	Software .....	91
4.2.1.	Joystick Virtual.....	91
4.2.2.	Rutinas de Programación .....	93
4.3.	Microcontrolador STM 32 .....	95
4.3.1.	Métodos de programación del microcontrolador STM 32 .....	97
4.4.	Comunicación del sistema.....	99
4.5.	Implementación del sistema de control.....	102

## **CAPÍTULO V**

### **PRUEBAS Y RESULTADOS**

5.1.	Movimiento Omnidireccional de la silla de ruedas.....	103
5.1.1.	Cálculo de velocidades de funcionamiento de la silla de ruedas.....	103
5.1.2.	Análisis entre velocidad calculada y velocidad real de la silla de ruedas omnidireccional.....	106
5.1.3.	Pruebas de trayectorias libres con control manual.....	106
5.1.4.	Pruebas de maniobrabilidad en mando manual .....	114
5.1.5.	Pruebas de trayectorias predefinidas con control autónomo .....	117
5.2.	Validación de la hipótesis .....	119
5.2.1.	Planteamiento de la Hipótesis .....	119
5.2.2.	Cumplimiento de la hipótesis.....	119

5.2.3. Análisis de cumplimiento de la Hipótesis.....	123
5.3. Análisis económico del proyecto.....	123

## **CAPÍTULO VI**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

6.1. Conclusiones .....	125
6.2. Recomendaciones.....	127

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>128</b>
--	------------

<b>ANEXOS .....</b>	<b>132</b>
---------------------	------------

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	<i>Combinación de velocidades para obtener los movimientos omnidireccionales.....</i>	12
<b>Tabla 2</b>	<i>Recomendaciones generales de dimensiones de la silla de ruedas.....</i>	18
<b>Tabla 3</b>	<i>Características de sillas de ruedas tradicionales .....</i>	25
<b>Tabla 4</b>	<i>Características de sillas de ruedas eléctricas .....</i>	27
<b>Tabla 5</b>	<i>Tipos Sensores de distancia y características .....</i>	32
<b>Tabla 6</b>	<i>Parámetros de diseño.....</i>	38
<b>Tabla 7</b>	<i>Características del tubo de Acero para la columna.....</i>	53
<b>Tabla 8</b>	<i>Características del tubo de Acero seleccionado .....</i>	58
<b>Tabla 9</b>	<i>Tensiones de Von Mises en la estructura .....</i>	67
<b>Tabla 10</b>	<i>Desplazamientos resultantes de la estructura. ....</i>	68
<b>Tabla 11</b>	<i>Factor de seguridad de la estructura.....</i>	69
<b>Tabla 12</b>	<i>Características de Llantas Mecanum RB-Next-74 .....</i>	72
<b>Tabla 13</b>	<i>Características del Motor NPC-2212.....</i>	74
<b>Tabla 14</b>	<i>Características sensor ultrasónico HC-SR04.....</i>	84
<b>Tabla 15</b>	<i>Características de batería LIPO 6SP1 .....</i>	87
<b>Tabla 16</b>	<i>Características de Breaker 32 A .....</i>	88
<b>Tabla 17</b>	<i>Tipos de recursos de programación del microcontrolador STM 32.....</i>	97
<b>Tabla 18</b>	<i>Características de Módulo Bluetooth HC-06.....</i>	100
<b>Tabla 19</b>	<i>Cálculo de la velocidad de funcionamiento en modo Manual .....</i>	104
<b>Tabla 20</b>	<i>Cálculo de la velocidad de funcionamiento en mando manual con mayor velocidad.....</i>	105

<b>Tabla 21</b> <i>Pruebas de trayectorias planas en cemento en modo manual .....</i>	107
<b>Tabla 22</b> <i>Pruebas de trayectorias planas en cemento mayor velocidad .....</i>	108
<b>Tabla 23</b> <i>Pruebas de trayectorias planas en mármol con velocidad normal .....</i>	110
<b>Tabla 24</b> <i>Pruebas de trayectorias planas en piso de mármol con mayor velocidad .....</i>	111
<b>Tabla 25</b> <i>Desviación de trayectoria .....</i>	113
<b>Tabla 26</b> <i>Pruebas de maniobrabilidad en modo manual .....</i>	115
<b>Tabla 27</b> <i>Pruebas de maniobrabilidad en modo manual con mayor velocidad ...</i>	116
<b>Tabla 28</b> <i>Pruebas de trayectoria con control autónomo .....</i>	118
<b>Tabla 29</b> <i>Pruebas de funcionamiento .....</i>	120
<b>Tabla 30</b> <i>Cálculo de frecuencias esperadas .....</i>	121
<b>Tabla 31</b> <i>Gastos del proyecto .....</i>	123

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Ruedas de sillas convencionales. a) Ruedas delanteras, b) Ruedas Traseras. ....	7
<b>Figura 2.</b> a) Ruedas Direccionales, b) Ruedas Motrices .....	7
<b>Figura 3.</b> Ruedas especiales. a) Ruedas Simples, b) Ruedas Dobles, c) Ruedas Alternadas, d) Ruedas Mecanum .....	8
<b>Figura 4.</b> Configuración diferencial. a) Robot Pioneer 2DX .....	9
<b>Figura 5.</b> Locomoción Ackerman .....	9
<b>Figura 6.</b> Locomoción Triciclo.....	10
<b>Figura 7.</b> Locomoción Síncrona.....	10
<b>Figura 8.</b> Robot triangular con tres ruedas omnidireccionales.....	14
<b>Figura 9.</b> Robot omnidireccional con ruedas Mecanum.....	14
<b>Figura 10.</b> Dimensiones promedio. a) Laterales, b) Frontales .....	15
<b>Figura 11.</b> Alcance Estándar .....	16
<b>Figura 12.</b> Rotación de la silla de ruedas. a) 360°, b) 180°, c) 90° .....	16
<b>Figura 13.</b> Dimensiones de la silla de ruedas con el usuario.....	17
<b>Figura 14.</b> Longitudes y pendientes de rampas fijas .....	19
<b>Figura 15.</b> Disposición de las ruedas Mecanum y sistemas de coordenadas .....	21
<b>Figura 16.</b> Arquitectura prototipo silla tradicional.....	25
<b>Figura 17.</b> Sillas de ruedas eléctricas. a) Silla de ruedas R400,.....	26
<b>Figura 18.</b> Transición de una silla de bipedestación.....	27
<b>Figura 19.</b> HandBike.....	28
<b>Figura 20.</b> Sensor seguidor de línea.....	33

<b>Figura 21.</b> Batería LIPO.....	34
<b>Figura 22.</b> Esquema y partes de la silla de ruedas omnidireccional .....	37
<b>Figura 23.</b> Configuración de las llantas mecanum.....	39
<b>Figura 24.</b> Diagrama de cargas de la viga A.....	49
<b>Figura 25.</b> Diagrama de fuerzas cortantes .....	49
<b>Figura 26.</b> Diagrama de momentos flexionante .....	50
<b>Figura 27.</b> Análisis de la columna en Solidworks.....	58
<b>Figura 28.</b> Diagrama de cargas en el eje de motor.....	62
<b>Figura 29.</b> Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante .....	63
<b>Figura 30.</b> Tensión de Von Mises en la estructura .....	67
<b>Figura 31.</b> Desplazamientos Resultantes de la estructura .....	68
<b>Figura 32.</b> Factor de seguridad de la estructura .....	69
<b>Figura 33.</b> Margen de error en la distribución del peso de la silla.....	71
<b>Figura 34.</b> Llantas Mecanum RB-Nex-74.....	72
<b>Figura 35.</b> Motor NPC-2212.....	74
<b>Figura 36</b> Construcción del asiento .....	75
<b>Figura 37.</b> Construcción de la estructura.....	76
<b>Figura 38.</b> Construcción de la tapa de fibra de vidrio .....	76
<b>Figura 39.</b> Construcción de la silla de ruedas omnidireccional .....	77
<b>Figura 40.</b> Diagrama de bloques abstracto del sistema.....	78
<b>Figura 41.</b> Diagrama de bloques del sistema electrónico .....	79
<b>Figura 42.</b> Distribución de terminales de Sabertooth 2x32 .....	80
<b>Figura 43.</b> Microcontrolador conectado a dos Sabertooth 2x32 .....	81
<b>Figura 44.</b> Configuración del interruptor DIP en modo serie.....	82



<b>Figura 45.</b> Pestaña general de configuraciones para Sabertooth 2x32 .....	82
<b>Figura 46.</b> Diagrama de bloques de la adquisición de datos .....	83
<b>Figura 47.</b> Sensor ultrasónico HC-SR04 .....	84
<b>Figura 48.</b> Sensor seguidor de línea de 5 canales .....	85
<b>Figura 49.</b> Batería LIPO 6 celdas .....	86
<b>Figura 50.</b> Diagrama de fuente de alimentación .....	86
<b>Figura 51.</b> Breaker 32 A .....	87
<b>Figura 52.</b> Paro de emergencia .....	89
<b>Figura 53.</b> Circuito electrónico de la tarjeta acondicionadora de los sensores, drivers y microcontrolador. ....	90
<b>Figura 54.</b> Diseño 3D del PCB, Tarjeta de control .....	91
<b>Figura 55.</b> Aplicación joystick silla de ruedas omnidireccional.....	92
<b>Figura 56.</b> Direcciones de desplazamiento de la silla de ruedas. ....	93
<b>Figura 57.</b> Diagrama de flujo del mando en modo autónomo .....	95
<b>Figura 58.</b> Distribución de pines utilizados .....	96
<b>Figura 59.</b> Diagrama de bloques de las señales hacia el microcontrolador.....	97
<b>Figura 60.</b> Diagrama de comunicaciones del sistema .....	99
<b>Figura 61.</b> Módulo Bluetooth HC-06 .....	100
<b>Figura 62.</b> Diagrama de bloques secuencial del sistema .....	101
<b>Figura 63.</b> Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema .....	101
<b>Figura 64.</b> Componentes electrónicos integrados en la silla de ruedas.....	102
<b>Figura 65.</b> Joystick Virtual en la aplicación .....	104
<b>Figura 66.</b> Gráfica de velocidad vs tiempo en modo manual .....	105

<b>Figura 67.</b> Gráfica de velocidad vs tiempo en modo manual con mayor velocidad.....	105
<b>Figura 68.</b> Silla de ruedas omnidireccional en el piso de cemento .....	107
<b>Figura 69.</b> Velocidad Vertical, horizontal y diagonal, piso de cemento en modo manual.....	108
<b>Figura 70.</b> Velocidad Vertical, horizontal y diagonal, piso de cemento en modo manual con mayor velocidad .....	109
<b>Figura 71.</b> Silla de ruedas omnidireccional en el piso de mármol.....	110
<b>Figura 72.</b> Velocidad Vertical, horizontal y diagonal, piso de mármol en modo manual.....	111
<b>Figura 73.</b> Velocidad Vertical, horizontal y diagonal, piso de mármol en modo manual con mayor velocidad .....	112
<b>Figura 74.</b> Silla de ruedas omnidireccional en una rampa.....	113
<b>Figura 75.</b> Pista de obstáculos en trayectorias de 6 y 8 metros .....	115
<b>Figura 76.</b> Pruebas de maniobrabilidad en modo manual .....	116
<b>Figura 77.</b> Pruebas de maniobrabilidad en modo manual con mayor velocidad.	117
<b>Figura 78.</b> Trayectoria definida para el mando autónomo .....	118
<b>Figura 79.</b> Velocidad en la trayectoria definida en modo autónomo .....	119

## RESUMEN

En el presente trabajo de titulación se realiza el estudio de los parámetros del movimiento omnidireccional a nivel cinemático y cinético, con el objetivo de diseñar y construir una silla de ruedas omnidireccional, la misma que está compuesta por una estructura cómoda para el usuario, un control autónomo, manual y ruedas omnidireccionales, colocadas estratégicamente para la optimización de desplazamientos, tiempo y recursos. Para la generación del movimiento omnidireccional se utilizaron cuatro ruedas omnidireccionales, acopladas a motores con reductores de velocidad independientemente para el control de velocidad de la silla de ruedas, asegurando que cumpla con el objetivo de ejecutar movimientos para agilizar el desplazamiento en lugares con movilidad reducida, gracias a la simultaneidad de direcciones con un rango de 0 a 360° que aporta el movimiento omnidireccional. Se implementó un sistema de control autónomo y manual el cual será comandado por un joystick virtual, a fin de conseguir los movimientos convencionales adelante, atrás, izquierda, derecha, más los nuevos movimientos proporcionados por las ruedas omnidireccionales y su coordinación diagonales y giro en su propio eje, ya sea en sentido horario o antihorario, la silla de ruedas cuenta también con un sistema de detección de obstáculos a lo largo de su trayectoria para evitar colisiones.

### ***PALABRAS CLAVE:***

- **SILLA DE RUEDAS OMNIDIRECCIONAL**
- **CONTROL AUTÓNOMO**
- **MOVIMIENTOS OMNIDIRECCIONALES**

## ABSTRACT

In the present grade project focus in the study of the parameters of the omnidirectional movement at kinematic and kinetic level is carried out, with the aim of designing and constructing an omnidirectional wheelchair, which is composed of a comfortable structure for the user, an autonomous control, manual and omnidirectional wheels, strategically placed for the optimization of movements, time and resources. For the generation of the omnidirectional movement, four omnidirectional wheels were used, coupled to motors independently with speed reducers, to control the speed of the wheelchair, ensuring that it complies with the objective of executing movements to speed up movement in places with reduced mobility, thanks to the simultaneity of directions with a range of 0 to 360° provided by the omnidirectional movement. An autonomous and manual control system was implemented which will be commanded by a virtual joystick, in order to achieve the conventional movements front, back, left, right, plus the new movements provided by the omnidirectional wheels and their coordination diagonals and rotation in its own axis either clockwise or counter-clockwise, the wheelchair also has a system of obstacle detection along its path to avoid collisions.

### KEYWORDS:

- ***WHEELCHAIR OMNIDIRECTIONAL***
- ***AUTONOMOUS CONTROL***
- ***OMNIDIRECTIONAL MOVEMENTS***

# CAPÍTULO I

## EL PROBLEMA

### 1.1. Planteamiento del Problema

En la actualidad se presentan grandes dificultades, en cuanto a movilización de aquellas personas que sufren de pérdida total o parcial del movimiento en sus extremidades inferiores, una solución a este problema son las sillas de ruedas, las mismas que presentan varias ventajas, como mejorar el estilo de vida de una persona, prestar beneficios de movilidad y ampliar las actividades sociales y comunitarias.

Sin embargo, las sillas convencionales del mercado, no permiten un fácil desplazamiento en ambientes con espacios reducidos, debido a estructuras de dimensiones grandes, las cuales colisionan fácilmente con los objetos alrededor entorpeciendo el desplazamiento y además requiriendo de trayectorias extras para llegar a un punto deseado, lo que genera un gasto de la batería en sillas de ruedas eléctricas y un tiempo mayor para realizar una trayectoria básica, generando una dificultad al momento de la interacción del usuario en espacios confinados.

Por lo cual se propone el diseño y construcción de un proyecto que ayudará con el movimiento de personas con discapacidad, que consta de una silla de ruedas omnidireccional con un control autónomo, optimizando los desplazamientos en ambientes con movilidad reducida.

## **1.2. Antecedentes**

La primera silla de ruedas ligera de acero y plegable fue creada en 1932 por el ingeniero Harry Jennings para su amigo Herbert Everest, quien había sufrido un accidente minero, ambos eran ingenieros mecánicos. El diseño original de esta primera silla plegable se sigue utilizando a día de hoy en sillas básicas por todo el planeta, por supuesto con algunas mejoras. (Baez Martinez , 2000)

En la actualidad se han dado pasos agigantados, las sillas han evolucionado acorde al material, características y forma de operación; proporcionando cada día mayor posibilidad de características al usuario. Un ejemplo es el Centro Especial de Trabajo (CET) Esclatec de Barcelona que ha diseñado una silla omnidireccional Estel, que facilita el desplazamiento de las personas con discapacidad y es especialmente útil en espacios públicos, como museos y exposiciones.

El uso de sillas de ruedas motorizadas es un gran paso hacia la integración de las personas gravemente discapacitadas, lo que les permite una movilidad autocontrolada sin ayuda externa. (Hoyer, Borgolte, & Jochheiman, 1999)

Una silla de ruedas mejora la calidad de vida de las personas discapacitadas, ayuda a la accesibilidad e interacción con su entorno. Sin embargo, el funcionamiento de las mismas presenta varias dificultades en ambientes con movilidad reducida, por lo tanto, mediante el movimiento omnidireccional a través de un sistema y configuración adecuada permite realizar todas las maniobras en cualquier dirección con el objetivo de optimizar desplazamientos y a la vez reducir el uso de los recursos en la generación de movimientos. (Esclatec, 2015)

Las dimensiones, aumento de movimientos, reducción de espacio no son las únicas mejoras que podrían presentar los nuevos diseños. Estos pueden poseer un sinnúmero de nuevas aplicaciones que incluirían las tecnologías de vanguardia y controles como redes neuronales, inteligencia artificial, controles mioeléctricos, etc., involucrando de esta manera a personas que no posean con un alto grado de habilidad para operar una silla de ruedas.

Un robot omnidireccional posee una configuración que le permite realizar movimientos en cualquier dirección, con el objetivo de movilizarse hacia un punto con mayor facilidad a pesar de tener una estructura compleja. Este tipo de robots presentan varias aplicaciones tales como: carros móviles de entretenimiento, robots para exploraciones arqueológicas, robots transportadores de materiales peligrosos entre otras aplicaciones. (García, Vargas, Díaz, & González, 2016)

### **1.3. Justificación e Importancia**

Los entornos domésticos estándar y oficinas a menudo son estructuras complejas y, por lo tanto, requieren una alta maniobrabilidad. Debido a sus limitaciones cinemáticas, las sillas de ruedas convencionales no son adecuadas para moverse dentro de las salas compactas. Y se puede alcanzar un aumento de la movilidad mediante el uso de conceptos de conducción omnidireccionales. (Hoyer, Borgolte, & Jochheiman, 1999)

El sistema omnidireccional permite desplazamientos laterales y diagonales optimizando desplazamientos, gracias a las llantas omnidireccionales que integra, las cuales disponen de un grado de libertad más que las convencionales; su

estructura liviana y ergonómica proporciona mayor comodidad junto al perfecto ajuste y dimensionamiento que posee.

Mediante este proyecto se pretende garantizar la calidad de vida de las personas con discapacidad, brindar una vida digna con iguales oportunidades para todas las personas contribuyendo con la cohesión, inclusión y equidad de las mismas en ámbitos sociales y culturales, y fortalecer las capacidades y potencialidades de las mismas, cumpliendo así con los objetivos que persigue el Plan Nacional de Desarrollo.

También será una manera de provisionar de ayuda técnica y mediante esta lograr la inclusión laboral y comunitaria a las personas discapacitadas, con el objetivo de cumplir la misión “Las Manuelas” que se enfocan en este grupo de atención prioritario, que requieren de un cuidado especial por medio de mecanismos de respuesta inclusivos e integrales. (Plan Nacional de Desarrollo, 2017)

Además de contribuir con los planes del Gobierno mencionados, la realización del proyecto puede fomentar una posible construcción de estas sillas a futuro en el país, aportando con el cambio de la Matriz Productiva que busca en uno de sus ejes la sustitución selectiva de importaciones con bienes y servicios que se producen actualmente y ser capaces de reemplazarlos a corto plazo, ayudando de esta manera con las relaciones sociales que se desprenden de estos procesos. (SENPLADES, 2012)



## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo General**

Estudiar los parámetros del movimiento omnidireccional para diseñar y construir una silla de ruedas con control autónomo, optimizando su desplazamiento en ambientes con movilidad reducida.

### **1.4.2. Objetivos Específicos**

- Estudiar la cinemática y cinética del movimiento omnidireccional, para el desplazamiento de la silla de ruedas.
- Investigar las propiedades tecnológicas y físicas de diferentes tipos de estructuras para sillas de ruedas omnidireccionales.
- Diseñar la estructura de la silla de ruedas omnidireccional y un mecanismo que provea comodidad para el usuario.
- Construir la silla de ruedas en conjunto con el mecanismo para la movilidad de las ruedas, que proporcionen los movimientos necesarios para generar desplazamientos en espacios reducidos.
- Implementar el control autónomo y manual, que permita el accionamiento de los actuadores de cada rueda para su movimiento omnidireccional.
- Realizar evaluaciones experimentales de la silla de ruedas omnidireccional y su comportamiento en base al algoritmo de control propuesto.

## CAPÍTULO II

### FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

#### 2.1. Robots Omnidireccionales

Para definir un “robot omnidireccional” se parte desde la premisa de un significado por separado. La palabra robot posee muchos significados, unificándolos se puede definir que “robot” es un dispositivo mecánico dotado con movilidad y cierto grado de complejidad en la parte de control, que proporciona utilidad a los usuarios. (Barrientos, Peñin, Balaguer, & Aracil, 2007)

Por otra parte, el término “Omnidireccional” hace referencia a un tipo de desplazamiento con un grado más de libertad con respecto al convencional, que facilita la interacción y el desplazamiento con el entorno.

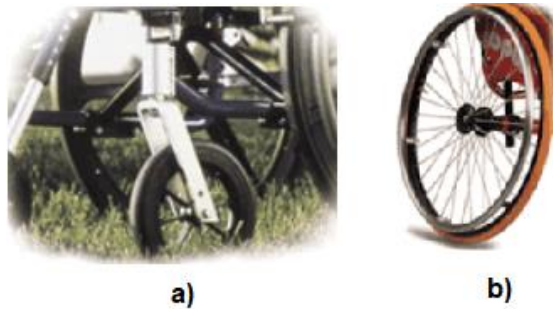
Por lo tanto “Robot Omnidireccional” no, es más, que un mecanismo dotado con un grado de movilidad mayor que posee las características necesarias para efectuar más movimientos, facilitando su desplazamiento independientemente de orientación y acoplamiento en espacios reducidos. (Martinez & Sisto, 2009)

Se parte desde esta premisa donde el presente proyecto tiene como finalidad asociar dicho mecanismo a una silla de ruedas con el afán de proveerla de mejores características funcionales.

#### 2.2. Tipos de ruedas

Las sillas de ruedas convencionales poseen dos tipos de ruedas: delanteras y traseras, las ruedas delanteras como se observa en la Figura 1 a), facilitan el giro de la silla y permiten diferente estabilidad de acuerdo a su diámetro, el diámetro de

estas puede variar entre 75 mm y 200 mm. Las ruedas traseras como se observa en la Figura 1 b), permiten la ejecución del movimiento de la silla, el diámetro puede variar entre 550 mm y 600 mm. Teniendo en cuenta que la rueda de menor diámetro requiere menor esfuerzo para su movilidad, pero también se necesitan más impulsos. (Sunrise Medical Co., 2015)



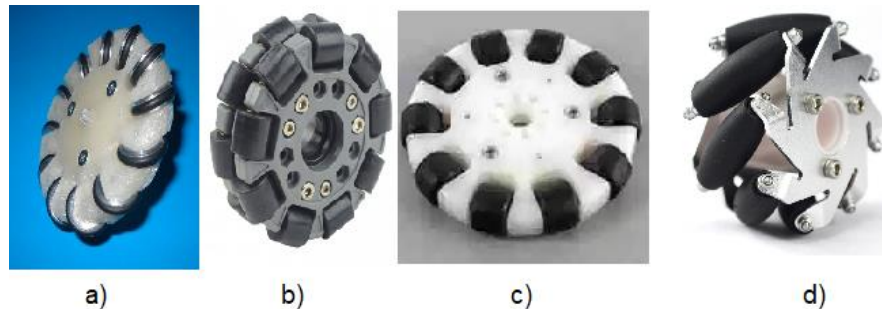
**Figura 1.** Ruedas de sillas convencionales.  
a) Ruedas delanteras, b) Ruedas Traseras.  
Fuente: (Sunrise Medical Co., 2015)

Las sillas de ruedas eléctricas están compuestas por ruedas direccionales y motrices como se muestran en la Figura 2. Las ruedas motrices presentan mayor tamaño y adquieren la potencia de los motores, las ruedas direccionales permiten maniobrar con mayor facilidad la silla de ruedas. (Gómez, 1999)



**Figura 2.** a) Ruedas Direccionales, b) Ruedas Motrices  
Fuente: (Adas Mobility, 2019)

La silla de ruedas omnidireccional está compuesta con ruedas especiales que generan movimientos omnidireccionales, entre estas se tienen las ruedas simples, dobles, alternadas y mecanum como se observa en la Figura 3. Las cuales están conformadas por una gran cantidad de rodillos de acuerdo a su diámetro. (Santiago, 2009)



**Figura 3.** Ruedas especiales. a) Ruedas Simples, b) Ruedas Dobles, c) Ruedas Alternadas, d) Ruedas Mecanum  
Fuente: (Santiago, 2009)

### 2.3. Sistemas de locomoción de robots móviles

El hablar de un “sistema de locomoción” es hacer referencia a movimiento, por lo tanto, se dice que es el encargado de la traslación del robot y está clasificado por diversos sistemas, especificados a continuación:

#### 2.3.1. Locomoción por ruedas

Debido a su simplicidad de operación y aplicación es el tipo de locomoción más utilizado, posee múltiples ventajas entre las que se puede resaltar la estabilidad, aplicación en velocidades altas y variabilidad de subsistemas. Se utiliza generalmente en terrenos que no son irregulares.

### 2.3.1.1. Locomoción diferencial

Este tipo de locomoción no posee ruedas directrices, para cambiar de dirección se modifica la velocidad relativa de las ruedas. Es comandado únicamente por dos ruedas fijas con ayuda de una o dos ruedas locas. Dado que es un sistema muy inestable, no se lo utiliza a velocidades altas ni a gran escala.

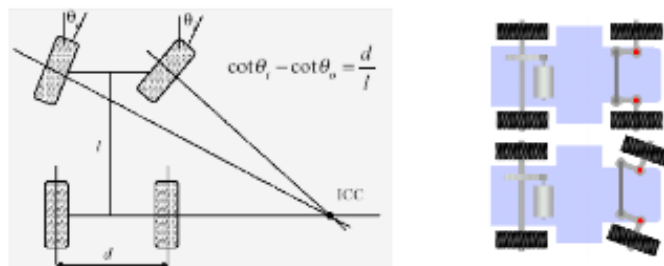


**Figura 4.** Configuración diferencial. a) Robot Pioneer 2DX y Tetra-DS IV, b) Control de dirección

Fuente: (Abslab, 2019)

### 2.3.1.2. Locomoción Ackerman

El sistema Ackerman es uno de los más utilizados en la cotidianidad, es el sistema presente en los automóviles y uno de lo más estables incluso a altas velocidades. Su control se centra en el movimiento único de sus dos ruedas delanteras, haciendo de las dos traseras solo un seguimiento de las anteriores. La única limitante de dicho sistema es la imposibilidad de giros con radios de curvaturas muy pequeños.

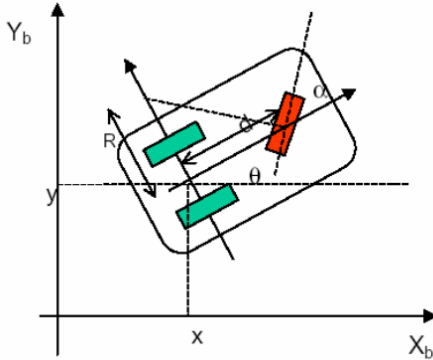


**Figura 5.** Locomoción Ackerman

Fuente: (Cerón Correa, 2005)

### 2.3.1.3. Locomoción Triciclo

El sistema de Triciclo posee tres ruedas fijas, la llanta delantera sirve para la dirección y las otras dos poseen libre movimiento, para tracción. Son inestables en terrenos de difícil acceso.

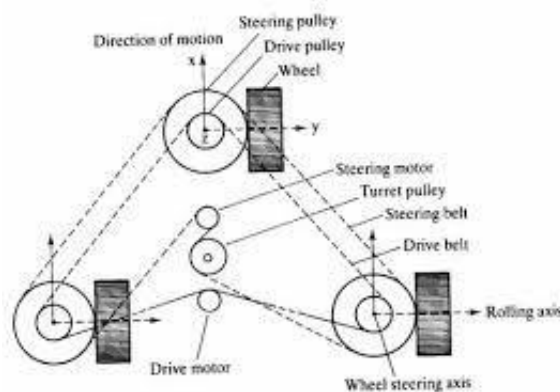


**Figura 6.** Locomoción Triciclo

Fuente: (Cerón Correa, 2005)

### 2.3.1.4. Locomoción Síncrona

Compuesto por un sistema de tres llantas (en forma de triángulo equilátero) y con una superficie circular sobrepuesta. Su control se centra en dos motores independientes con una velocidad y dirección similar para cada llanta.



**Figura 7.** Locomoción Síncrona

Fuente: (Cerón Correa, 2005)

### **2.3.1.5. Locomoción Omnidireccional**

Es un sistema de locomoción poco convencional debido a que explora nuevas funcionalidades gracias a la implementación de nuevos elementos como por ejemplo las ruedas omnidireccionales que gracias a los dos grados de libertad que poseen, proporcionan una amplia gama de desplazamientos sin necesidad de reorientarse como en cualquier otro tipo de sistema de locomoción. (Cerón Correa, 2005)

Entre los principales desplazamientos podemos mencionar:

- Adelante
- Izquierda
- Derecha
- Diagonales
- Giro Horario (en su propio eje).
- Giro Anti horario (en su propio eje).

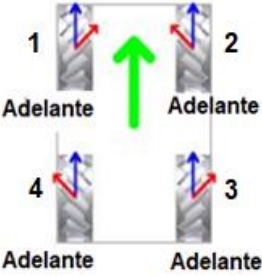
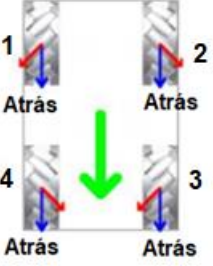

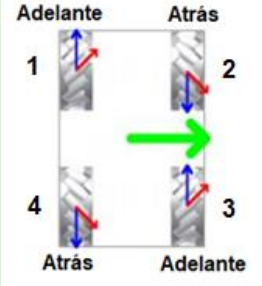
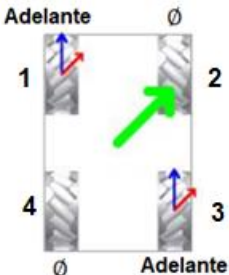
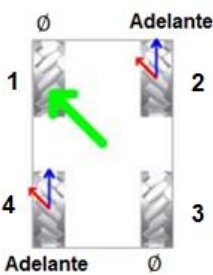
Además del sinfín de número de desplazamientos perpendiculares según la complejidad del control que le sea proporcionado.

A diferencia de otras, las ruedas mecanum realizan cierto tipo de combinaciones según la dirección de desplazamiento. Es importante recalcar que las ruedas únicamente realizan un movimiento horario y anti horario, es decir, hacia adelante y hacia atrás respectivamente.

A continuación, se ejemplifica, como se desplazará la silla de ruedas en algunas direcciones. (Woods, 2006)

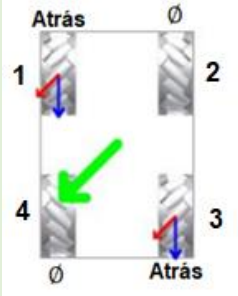
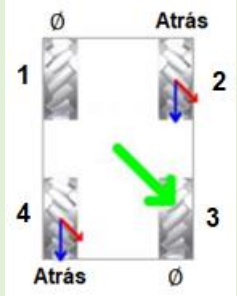
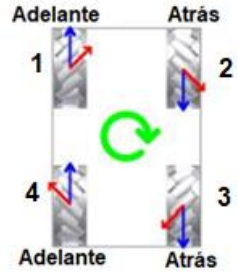

**Tabla 1**

*Combinación de velocidades para obtener los movimientos omnidireccionales*

<p>Adelante (↑): desplazamiento de 4 llantas a velocidad total</p> 	<p>Atrás (↓): desplazamiento de 4 llantas a velocidad total</p> 
<p>Izquierda (←): desplazamiento de 4 llantas a velocidad total.</p> 	<p>Derecha (→): desplazamiento de 4 llantas a velocidad total</p> 
<p>A 45° (↗): Únicamente las llantas 1 y 3 a velocidad mayor para compensar la falta de las otras dos.</p> 	<p>A 135° (↖): Únicamente llantas 2 y 4 a velocidad mayor para compensar la falta de las otras dos.</p> 

CONTINÚA 



<p>A 225° (↙):</p> 	<p>A 315° (↘):</p> 
<p>Giro en el propio eje en sentido horario (↻)</p> 	<p>Giro en el propio eje en sentido antihorario (↺)</p> 

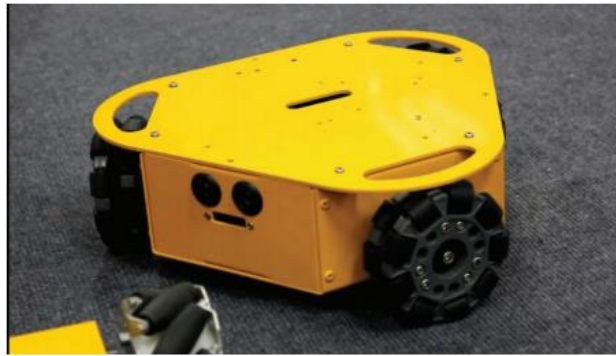
Fuente: (Woods, 2006)

El resto de movimientos localizados entre los ángulos ya descritos, se realizan mediante una combinación de todas las llantas, con una velocidad mayor únicamente en dos llantas, ya sean 1 – 3 o 2 – 4 que controlan la dirección.

Este sistema de locomoción a su vez está dividido en dos, según el tipo de ruedas omnidireccionales utilizadas.

#### a) Rueda omnidireccional

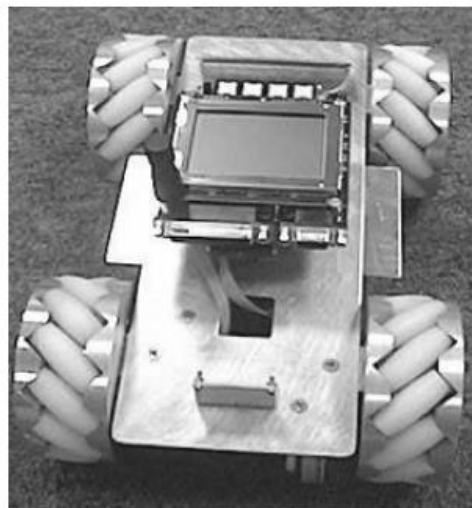
Se puede partir desde tres ruedas colocadas en forma triangular, ver Figura 8. Las características de estas llantas son el poseer rodillos perpendiculares a la dirección de giro de la llanta o circunferencia exterior de la llanta (componente activa). (Iza & Taco, 2016).



**Figura 8.** Robot triangular con tres  
ruedas omnidireccionales  
Fuente: (Robot Nexus, 04)

### b) Rueda Mecanum

Con cierta similitud a las ruedas descritas anteriormente, están formadas con múltiples rodillos colocados a cierto ángulo con respecto a la circunferencia exterior de la llanta (componente activa), por lo general de  $45^\circ$ . El robot omnidireccional está compuesto por 4 ruedas como se ilustra en la Figura 9.



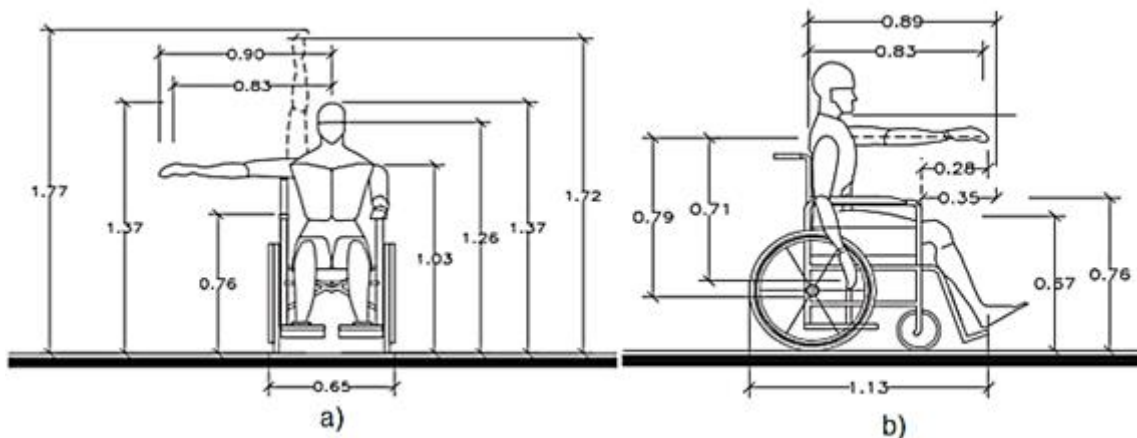
**Figura 9.** Robot omnidireccional  
con ruedas Mecanum  
Fuente: ( Bräunl, 2006)

### 2.3.2. Otros tipos de locomoción

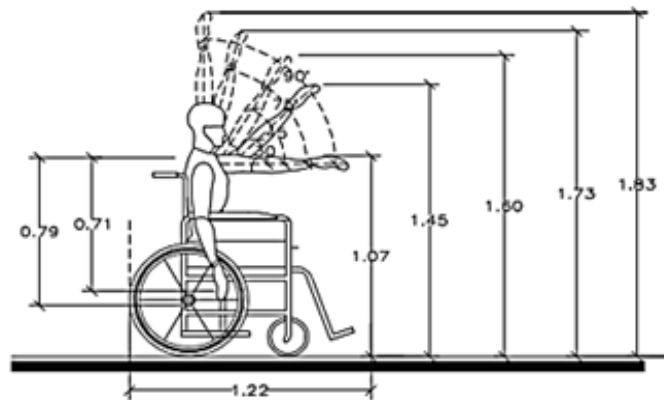
Aquí se engloba al resto de robots con diferente locomoción: las pistas de deslizamiento, conocidos también como robot oruga; robots con patas y por último los robots articulados. Por lo general, casi todos estos tipos de locomoción implican una velocidad baja y en algunos casos, como las pistas de deslizamientos, su aplicación se centra en terrenos de superficies irregulares. (Iza & Taco, 2016).

### 2.4. Antropometría

La antropometría de las personas discapacitadas que ocupan una silla de ruedas, contempla las dimensiones laterales, frontales, alcance estándar, y las rotaciones en varios ángulos de la silla de ruedas, como se muestran en Figura 10 a la Figura 12 respectivamente. La medición se realiza con el usuario sentado sobre un plano horizontal y la espalda erguida. Las dimensiones de las sillas de ruedas se asocian con cada usuario en relación a su edad y tipo de dispositivo a utilizar. (Velasco & León, 2012)

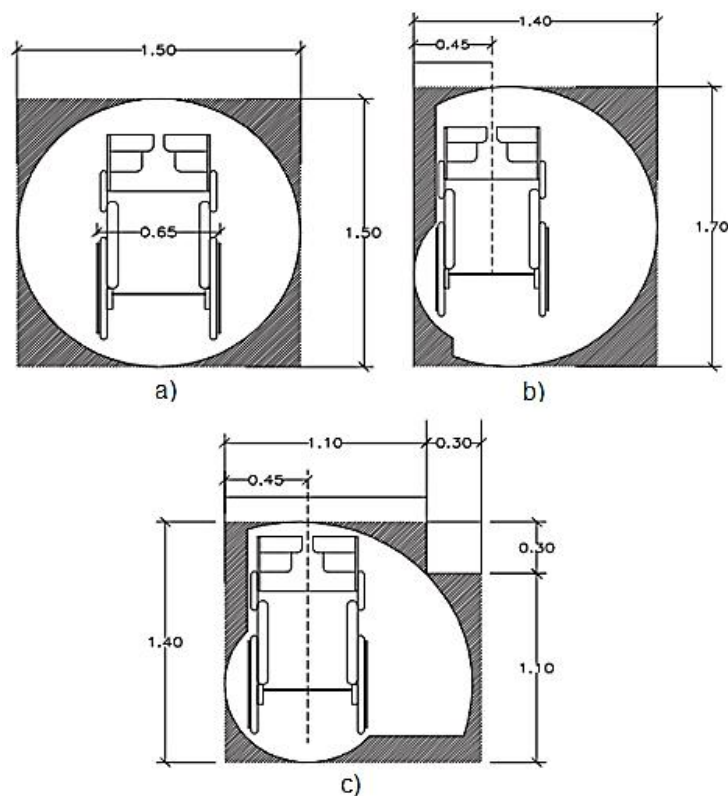


**Figura 10.** Dimensiones promedio. a) Laterales, b) Frontales  
Fuente: (Velasco & León, 2012)



**Figura 11.** Alcance Estándar  
Fuente: (Velasco & León, 2012)

El espacio de maniobra debe ser de 1.5 m de diámetro donde se requiera un cambio de dirección de los usuarios de sillas de ruedas. En situaciones excepcionales el espacio puede reducirse a 1.2 m. (Ziegler, 2003)



**Figura 12.** Rotación de la silla de ruedas. a) 360°, b) 180°, c) 90°  
Fuente: (Velasco & León, 2012)

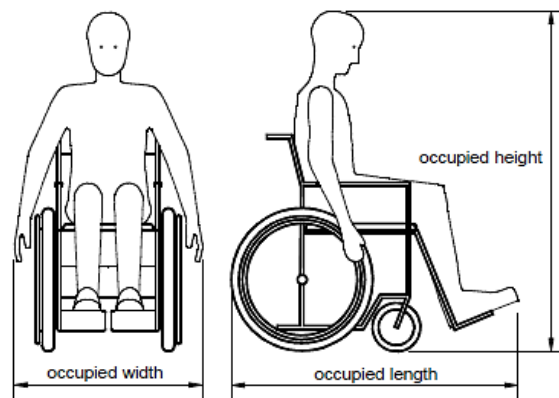
## 2.5. Especificaciones para la construcción de silla de ruedas

Para la construcción de la silla de ruedas se deben tomar en cuenta ciertos parámetros que hacen referencia al sistema de soporte del cuerpo, como son: respaldo, asiento, reposabrazos y reposapiés.

Los porcentajes de acuerdo a la distribución de presión sobre la silla de ruedas son: (Ziegler, 2003)

- Muslos y nalgas: 65%
- Pies: 19%
- Espalda: 12%
- Antebrazos: 4%

Además del peso que posee la silla de ruedas, se deben tomar en cuenta los valores típicos y límites recomendados, ver Tabla 2, que proporciona la Norma ISO 7176-5 tales como longitud, ancho y altura incluido el usuario como se muestra en la Figura 13.



**Figura 13.** Dimensiones de la silla de ruedas con el usuario

Fuente: (Ziegler, 2003)

**Tabla 2***Recomendaciones generales de dimensiones de la silla de ruedas*

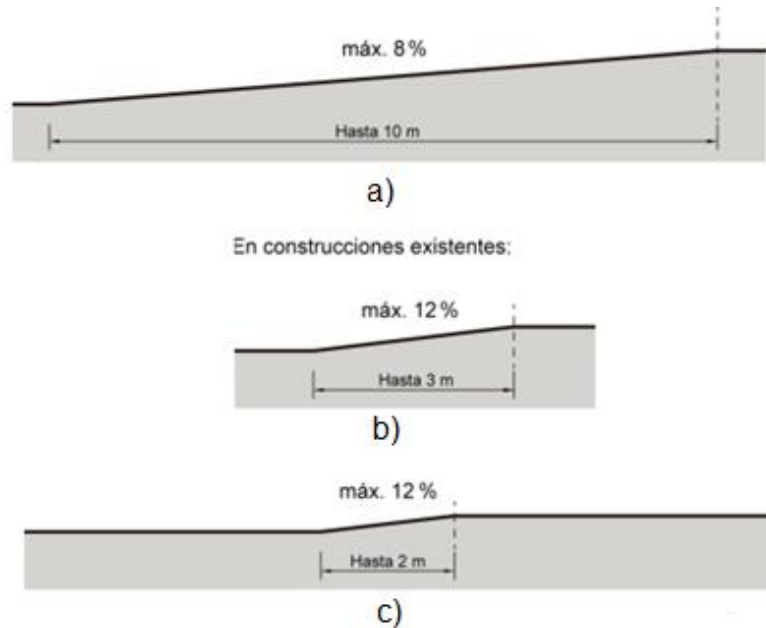
<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>VALOR</b>
Longitud	1200 – 1300 <i>mm</i>
Ancho	740 – 800 <i>mm</i>
Altura	1500 – 1600 <i>mm</i>
Borde delantero asiento-hueco poplíteo	3 – 5 <i>cm</i>
Inclinación del asiento	1° – 4°
Distancia escápula-respaldo	2.5 <i>cm</i>
Inclinación respaldo-asiento	100° – 110°
Altura reposabrazos (Debajo del codo)	2 <i>cm</i>
Altura reposabrazos-suelo	70 – 76 <i>cm</i>
Altura reposapiés	Mín 5 <i>cm</i>

Fuente: (Ziegler, 2003)

**Rampas Fijas**

Según la norma NTE INEN 2245 se establecen pendientes longitudinales máximas como se observa en la Figura 14, específicos para los siguientes tramos de rampas.

- a) Extensiones de 10 metros: Máx. 8%
- b) Extensiones de 3 metros: Máx. 12%
- c) Extensiones de 2 metros: Máx. 12%



**Figura 14.** Longitudes y pendientes de rampas fijas  
Fuente: (NTE INEN 2245, 2016)

## 2.6. Investigación de la maniobrabilidad omnidireccional de una plataforma robótica.

La silla de ruedas omnidireccional presenta varias ventajas en cuanto a maniobrabilidad, ya que además de moverse como una silla de ruedas convencional, se traslada en cualquier dirección sin tener que girar previamente y también realiza un giro sobre su propio eje, evitando de esta manera ocupar grandes espacios.

Por otra parte, una silla de ruedas convencional o una silla de ruedas eléctrica poseen varias limitaciones en cuanto al espacio que ocupan para movilizarse ya que al querer moverse hacia un lado deben retroceder, y de ahí orientarse hacia su objetivo, por tanto, pueden causar cierta molestia a personas de su alrededor. (Esclatec, 2015)

La estructura de la silla de ruedas es de vital importancia para conseguir una distribución del peso equitativa sobre las ruedas omnidireccionales, proporcionando estabilidad y evitando accidentes con el usuario además de generar bienestar y comodidad al mismo.

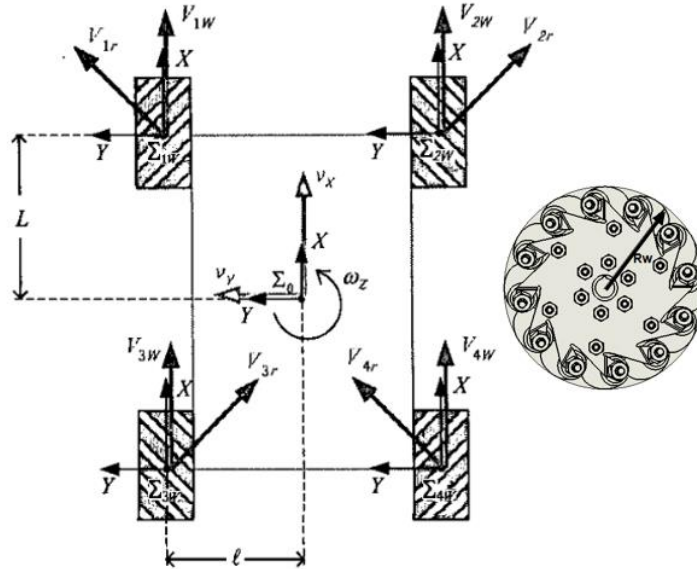
Las ruedas mecanum se utilizan en aplicaciones donde se requiera una alta maniobrabilidad, esto ocurre porque cada rueda está conectada a un motor, lo que permite un control de forma independiente de cada una. Funcionan adecuadamente en suelos lisos y duros, además de ser eficientes en cuanto al manejo en espacios reducidos ya que pueden moverse en todas las direcciones y por ende contribuyen con el ahorro de tiempo. (Martínez & Sisto, 2009)

## **2.7. Cinemática de movimiento**

Para explicar cómo está regido dicho movimiento se toma como punto de partida el estudio para 4 llantas mecanum.

A partir de la Figura 15, se plantean ecuaciones para el cálculo de las principales velocidades que posee la estructura. (Martínez & Sisto, 2009)





**Figura 15.** Disposición de las ruedas Mecanum y sistemas de coordenadas  
Fuente: (Martinez & Sisto, 2009)

Con objeto de facilitar el estudio se enumeró las llantas de la siguiente manera:

<i>Superior izquierda</i> = 1	<i>Superior derecha</i> = 2
<i>Inferior izquierda</i> = 3	<i>Inferior derecha</i> = 4

Los parámetros que se deben conocer son:

$R_w$  = Radio de la rueda

$V_{iw}$  = Vector velocidad lineal de la rueda

$\dot{\theta}_i$  = Velocidad angular de la rueda

$V_{ir}$  = Vector velocidad lineal del rodillo de la rueda

$L$  = Longitud al centro respecto al eje X

$l$  = Longitud al centro respecto al eje Y

$v_x$  = Velocidad lineal en X

$v_y$  = Velocidad lineal en Y

$\omega_z$  = Velocidad angular (estructura)

La velocidad en la componente X de la rueda, es decir, ( $V_{iX}$ ) es la responsable de aportar la velocidad lineal de la rueda y es igual a la suma de ( $V_{iW}$ ) más la velocidad aportada en el sentido de los rodillos de las ruedas  $\left(\frac{V_{ir}}{\cos 45^\circ}\right)$ .

De manera similar la velocidad en la componente Y, viene condicionada por la velocidad de los rodillos ( $V_{iY}$ ) =  $\frac{V_{ir}}{\sin 45^\circ}$ .

Por lo tanto, a partir de la Figura 15 las ecuaciones de la velocidad para ambas coordenadas de cada llanta se expresan:

$$V_{1X} = V_{1W} + \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}} \qquad V_{1Y} = \frac{V_{1r}}{\sqrt{2}} \qquad \text{Ecuación 1}$$

$$V_{2X} = V_{2W} + \frac{V_{2r}}{\sqrt{2}} \qquad V_{2Y} = -\frac{V_{2r}}{\sqrt{2}} \qquad \text{Ecuación 2}$$

$$V_{3X} = V_{3W} + \frac{V_{3r}}{\sqrt{2}} \qquad V_{3Y} = -\frac{V_{3r}}{\sqrt{2}} \qquad \text{Ecuación 3}$$

$$V_{4X} = V_{4W} + \frac{V_{4r}}{\sqrt{2}} \qquad V_{4Y} = \frac{V_{4r}}{\sqrt{2}} \qquad \text{Ecuación 4}$$

O en función de la longitud y velocidad angular:

$$V_{1X} = v_X - l\omega_z \qquad V_{1Y} = v_Y + L\omega_z \qquad \text{Ecuación 5}$$

$$V_{2X} = v_X + l\omega_z \qquad V_{2Y} = v_Y + L\omega_z \qquad \text{Ecuación 6}$$

$$V_{3X} = v_X - l\omega_z \qquad V_{3Y} = v_Y - L\omega_z \qquad \text{Ecuación 7}$$

$$V_{4X} = v_X + l\omega_z \qquad V_{4Y} = v_Y - L\omega_z \qquad \text{Ecuación 8}$$

Simplificando ambas ecuaciones en una sola ecuación en función de la velocidad angular:

$$V_{1W} = v_X - v_Y - (L + l)\omega_Z \quad \text{Ecuación 9}$$

$$V_{2W} = v_X + v_Y + (L + l)\omega_Z \quad \text{Ecuación 10}$$

$$V_{3W} = v_X + v_Y - (L + l)\omega_Z \quad \text{Ecuación 11}$$

$$V_{4W} = v_X - v_Y + (L + l)\omega_Z \quad \text{Ecuación 12}$$

Combinando las ecuaciones desde la Ecuación 9 a la Ecuación 12, se tiene:

$$V_W = J \cdot V_0 \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde  $V_W = [V_{1W}, V_{2W}, V_{3W}, V_{4W}]^T$  corresponde a la velocidad angular en cada una de las llantas,  $V_0 = [v_X, v_Y, \omega_Z]^T$  es el vector de velocidades cartesianas y  $J$  es una matriz de transformación como se observa en la Ecuación 14:

$$J = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -(L+l) \\ 1 & 1 & (L+l) \\ 1 & 1 & -(L+l) \\ 1 & -1 & (L+l) \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 14}$$

Despejando la velocidad lineal deseada  $V_0 = [v_X, v_Y, \omega_Z]^T$  de la Ecuación 13

$$V_0 = (J^T \cdot J)^{-1} J^T \cdot V_W + \{I - [(J^T \cdot J)^{-1} (J^T \cdot J)]\} \quad \text{Ecuación 15}$$

$$V_0 = (J^T \cdot J)^{-1} J^T \cdot V_W + (I - [I])$$

$$V_0 = (J^T \cdot J)^{-1} J^T \cdot V_W$$

$$V_0 = (J^T \cdot J)^{-1} J^T \cdot [R_W \dot{\theta}]$$

Por lo tanto, las ecuaciones directas de cinemática en función de cada una de las 4 llantas:

$$\begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{4} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 & -1 \\ -\frac{1}{(L+l)} & \frac{1}{(L+l)} & -\frac{1}{(L+l)} & \frac{1}{(L+l)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_W \dot{\theta}_1 \\ R_W \dot{\theta}_2 \\ R_W \dot{\theta}_3 \\ R_W \dot{\theta}_4 \end{bmatrix} \quad \text{Ecuación 16}$$

Finalmente, las expresiones de las velocidades angular y lineal de la estructura quedan expresados de la siguiente manera:

$$v_X = \frac{R_W}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \quad \text{Ecuación 17}$$

$$v_Y = \frac{R_W}{4} (-\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4) \quad \text{Ecuación 18}$$

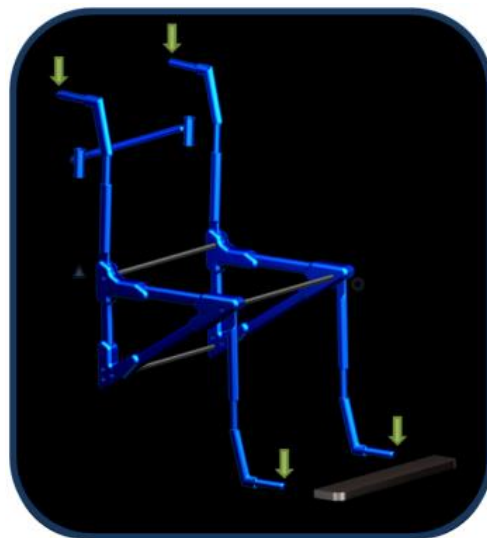
$$\omega_z = \frac{R_W}{4(L+l)} (-\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 - \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4) \quad \text{Ecuación 19}$$

## 2.8. Estructuras de sillas de ruedas

La estructura de una silla de ruedas está directamente ligada al tipo de silla de ruedas y a la aplicación de la misma. Para la descripción de cada una de las estructuras existentes se parte de la siguiente clasificación.

### 2.8.1. Silla de rueda tradicional

Este diseño es el más sencillo y por lo tanto económico en el mercado actual. Está formado por cuatro puntos de apoyo, dos traseros que terminan a una altura mayor respecto a los delanteros, debido a que será dónde se colocarán las llantas de diámetro mayor, las mismas que serán las responsables de la propulsión de la persona como se indica en la Figura 16 (Restrepo Viera & Soto Gonzales, 2009).



**Figura 16.** Arquitectura prototipo  
silla tradicional

Fuente: (Restrepo Viera & Soto Gonzales, 2009)

Los valores referenciales a dimensiones y características de las sillas de ruedas, viene propuesto por el fabricante y el modelo de cada silla. A continuación, en la Tabla 3, se puede observar algunos modelos de sillas tradicionales y sus características.

**Tabla 3**  
*Características de sillas de ruedas tradicionales*

<b>Modelo</b>	<b>Peso máx. del usuario</b>	<b>Anchura del asiento</b>	<b>Profundidad del asiento</b>	<b>Longitud</b>	<b>Anchura</b>
Avantgarde CLT	100 kg	32 – 50 cm	36 – 52 cm	71 – 104 cm	49 – 72cm
Avantgarde CS	140 kg	32 – 50 cm	36 – 52 cm	71 – 104 cm	50 – 72cm
Avantgarde CV	140 kg	32 – 50 cm	36 – 52 cm	78.5 – 104cm	49 – 72cm
Motus CS	125/140 kg	35.5 – 55 cm	36 – 54 cm	74 – 107 cm	52 – 75cm
Blizzard	120 kg	32 – 46 cm	36 – 48 cm	-	-
Ventus	100/140 kg	28 – 44cm	30 – 50 cm	-	-

Fuente: (Otto Bock Ibérica S.A., 2013)

### 2.8.2. Silla de ruedas eléctrica

Las sillas de ruedas eléctricas tienen un costo elevado comparado con las estudiadas anteriormente debido a la integración de los componentes electrónicos que rigen su desplazamiento. Existen múltiples variaciones de modelos, por ejemplo, en la Figura 17, a) se puede observar que la estructura consta de una columna redonda central que es donde se ejerce todo el peso e interconecta al asiento con el mecanismo de locomoción; en la b) la silla Manza posee cuatro puntos de apoyo que terminan en la conexión con el sistema de locomoción, con una distribución del peso uniforme de la persona. Cada uno de los modelos presenta ventajas como estabilidad, precio accesible, etc.



**Figura 17.** Sillas de ruedas eléctricas. a) Silla de ruedas R400,  
b) Silla de ruedas eléctrica Monza  
Fuente: (Arsenalsupremo & SCI Geriatria, 2019)

En la Tabla 4, se ilustran algunos modelos de sillas de ruedas eléctricas y sus características de diseño.

**Tabla 4**  
*Características de sillas de ruedas eléctricas*

Modelo	Velocidad	Peso máx. del usuario	Autonomía	Anchura	Altura
A-200	6 km/h	100 kg	Hasta 20 km	57 cm	103 cm
B-400	6 km/h	140 kg	Hasta 30 km	58 cm	106 cm
B-500	6 km/h	140 kg	Aprox. 35 km	42 cm	–
C1000 DS	6 km/h	200 kg	Aprox. 35 km	38 – 48 cm	108 cm
PQ - TME1006 (omnidireccional)	3.2 km/h	75 kg	Aprox. 20 km	40 cm	105 cm
Xeno (bipedestadora)	6 – 10 km/h	136 kg	Aprox. 35 km	–	122 cm

Fuente: (Otto Bock Ibérica S.A., 2013)

### 2.8.3. Sillas de bipedestación

Consiste en un mecanismo de elevación que permite pasar de la posición estándar de una silla de ruedas a una posición vertical de dos ruedas como se ilustra en la Figura 18. Su estructura es una de las más complejas, el material de construcción es altamente resistente y por lo general presentan un precio al mercado elevado. (Armijos Comina & Criollo Simbaña, 2018)



**Figura 18.** Transición de una silla de bipedestación  
 Fuente: (Ghani & Thoki, 2016)

#### 2.8.4. HandBike (triciclo de mano)

Es una adaptación nueva que proporciona movilidad a personas con discapacidad parcial, mediante la propulsión de las manos, son utilizadas para ambientes como playas o recientemente en competencias denominadas “Handcycling”. (Aldana Galtés, 2014)



**Figura 19.** HandBike  
Fuente: (Bike-On, 2018)

#### 2.9. Tipos de mando de control

El mando de control es el responsable del funcionamiento de la silla de ruedas, constituye la interacción entre el usuario y la silla de ruedas, donde se reciben las órdenes para ejecutar los respectivos movimientos. De manera general se pueden clasificar en dos tipos: convencionales y autónomos.

Hay ciertas consideraciones que se deben tomar para implementar el mando de control de una silla de ruedas:

- Correcta postura
- Seleccionar el mando de control conveniente para la silla de ruedas.
- Implementar un soporte único para el control (joystick, soporte para celular, etc.)



- Especificar y programar los parámetros de la silla (comandos de movimiento, autonomía, velocidad, etc.)

### **2.9.1. Convencionales**

Cada control posee ventajas y características únicas que facilitan su operación al usuario. A continuación, se detallarán los principales modelos que se pueden implementar en una silla de ruedas.

#### **a) Joystick**

Consiste en una palanca que puede ser operado por uno o varios dedos de la mano, puede venir acompañado de botones o a su vez ser virtual mediante una aplicación en Smartphone.

#### **b) Pantalla táctil**

Es similar al mouse táctil de una laptop donde el desplazamiento del dedo controla la trayectoria, funciona de manera similar a un joystick con la opción de programar más combinaciones de comandos para efectuar los movimientos.

#### **c) Pulsadores.**

Es una serie de botones, donde cada orden se programa en cada botón. Para efectuar cada acción es necesario presionar o accionarlos. Su aplicación más común es mediante un panel de 5-6 botones. (Valle, 2013)

### **2.9.2. Autónomo**

Para que un control sea autónomo debe poseer cierta capacidad para realizar acciones de control y/o adaptarse a un entorno.

El método de proporcionar autonomía a un sistema de control es mediante la implementación de:

- a) Sensores
- b) Lógica Borrosa
- c) Redes neuronales
- d) Computación Evolutiva

Cada una de las estrategias listadas con anterioridad aporta características de funcionamiento únicas y han sido aplicados exitosamente al campo industrial, comercial y académico. (Santos, 2011)

### **2.10. Sistema de control Autónomo**

Un sistema de control autónomo está compuesto por un hardware y un software, los cuales interaccionan con el medio ambiente por largos períodos de tiempo y sin intromisión externa por parte del ser humano.

Existen varios grados de autonomía, en donde los controladores fijos convencionales cuentan con un grado de autonomía bajo, los cuales se encargan de tolerar variaciones de los parámetros y perturbaciones que se presentan en la planta, para considerar a un sistema de control con un grado de autonomía alto, este debe realizar más funciones que los controladores convencionales además del seguimiento y regulación de los parámetros del sistema.

Un sistema de control autónomo inteligente parte de la evolución de los sistemas de control convencionales añadiendo elementos inteligentes, dando como resultado un control que sea capaz de compensar fallas en el sistema sin intervención externa.

Estos controladores pueden utilizarse en una gran variedad de sistemas, debido a su alto nivel de adaptación tanto en la planta como en el entorno, en donde su disposición autónoma se considera como una característica importante y apetecible en los sistemas avanzados.

El controlador autónomo se encarga del ajuste y supervisión de los algoritmos de control, además debe contar con una tolerancia a fallas de alto grado, utilizando métodos algorítmico-numéricos y los métodos simbólicos basados en la técnica e informática respectivamente.

Para alcanzar su autonomía debe trabajar conjuntamente con sistemas de control convencionales, planificación y además mediante su funcionamiento puede requerir de alguna capacidad de aprendizaje para mejorar su rendimiento. Estos controladores son evolutivos y parten de los existentes sustentados con las necesidades reales que se presenten. (Antsaklis, Passino, & Wang, 1991)

## **2.11. Dispositivos Electrónicos**

### **2.11.1. Sensores**

#### **2.11.1.1. Sensor de Distancia**

Los sensores de distancia permiten la detección de obstáculos a una distancia predeterminada dependiente del alcance máximo del componente.

Para desarrollar la aplicación de detección de obstáculos, es factible utilizar un sensor ultrasónico, debido a las características que proporciona en cuanto a alcance, material del objeto a detectar, interferencias, vida útil y velocidad de conmutación como se observa en la siguiente tabla.

**Tabla 5**  
*Tipos Sensores de distancia y características*

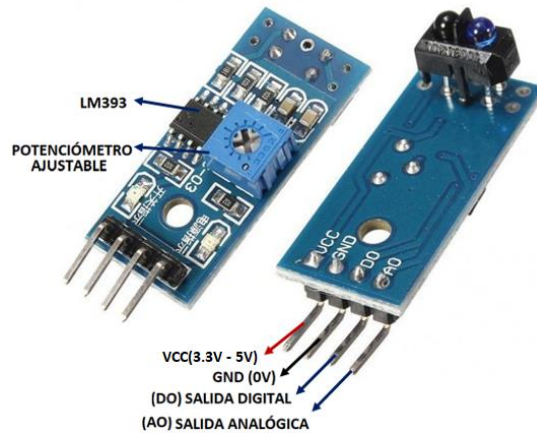
	<b>CAPACITIVO</b>	<b>INDUCTIVO</b>	<b>ÓPTICO</b>	<b>ULTRASÓNICO</b>
<b>ALCANCE</b>	(5 – 20) mm Máx.: 60 mm	0.8 – 250mm	10 m	20mm – 10m
<b>MATERIAL DEL OBJETO A DETECTAR</b>	Objetos que posean constante dieléctrica > 1	Metálicos Ferrosos	Todo tipo de objetos	Amplia gama de diferentes materiales
<b>INTERFERENCIAS</b>	Sensibles a la suciedad	Sensible a campos magnéticos	Sensible a la suciedad	Sensores ultrasónicos cercanos
<b>VIDA ÚTIL</b>	Elevada	Elevada	100.000 h	Elevada
<b>VELOCIDAD DE CONMUTACIÓN</b>	300KHz (3.3 ms)	Min:5000 Hz (0.1s – 0.2ms) 10 –Máx.: 20KHz (0.05ms)	10 – 1000Hz (100 – 1ms)	1 – 125Hz (1s – 8ms)

Fuente: (Colomer, 2018)

### 2.11.1.2. Sensor de Línea

El sensor seguidor de línea como se observa en la Figura 20, es un dispositivo compacto, que permite la detección de un objeto por medio del haz de infrarrojos reflectantes del mismo, debido a que el emisor de luz y el detector que consta de un fototransistor se encuentran en la misma dirección.

El transmisor y el receptor del sensor se encuentran en un cabezal de plomo, su configuración ayuda a obtener la distancia como salida analógica y también se puede obtener como salida digital al usar el LM393 con un potenciómetro ajustable, acoplados conjuntamente en la placa. La alimentación del sensor es desde 3.3V a 5V. (Vishay Intertechnology, 2017)



**Figura 20.** Sensor seguidor de línea

Fuente: (Sunrom, 2018)

### 2.11.2. Batería Lipo

Presenta la capacidad de almacenar altas densidades de energía gracias a su composición química a base de polímeros de iones de Litio, además posee una mejor eficiencia a diferencia de otras tecnologías a causa de que posee menores dimensiones y peso.

Este tipo de baterías presentan un voltaje de 3,7 V por cada celda que posee, las baterías Lipo presentan 6 versiones, según el número de celdas y a su vez, el voltaje y corriente que almacenan.

- 1S: 1 celda → 3.7 V
- 2S: 2 celdas → 7.4 V
- 3S: 3 celdas → 11.1 V
- 4S: 4 celdas → 14.8 V
- 5S: 5 celdas → 18.5 V
- 6S: 6 celdas → 22.2 V

Al trabajar con baterías Lipo es importante conocer que el rango de las baterías nunca debe bajar de los 3V, ni exceder los 4.2V porque podría ocasionar daños y afectar su vida útil.

En la configuración interna de este tipo de batería se dice que suelen estar compuesta por “packs”, por ejemplo:

- 3S1P o 3S: conformado por un “pack” de 3 celdas.
- 3S2P o 6S: conformado por dos “pack” de 3 celdas en paralelo.

Si las celdas se encuentran conectadas en paralelo, significa que dispone de una capacidad de corriente mayor medida en miliamperios.

La capacidad de corriente o amperaje del que goza cada batería, es la responsable de proporcionar la alimentación a componentes electrónicos, por lo tanto, mientras mayor sea esta, mayor es el número de elementos y el tiempo de descarga. (LRP Electronic, 2015)



**Figura 21.** Batería LIPO  
Fuente: (LRP Electronic, 2015)

### 2.11.3. Tecnologías de Comunicación Inalámbrica

Existen diversas tecnologías para comunicaciones inalámbricas, a la hora de transmitir datos se recurre a las más conocidas tales como Bluetooth, Wi-Fi y GSM.

La selección de estas tecnologías depende de los requerimientos de la aplicación a desarrollarse, mostrando ventajas o desventajas ya sean en costos, ancho de banda y consumo de energía.

#### **2.11.3.1. Bluetooth**

El sistema de comunicación bluetooth fue desarrollado por Ericsson en 1994, de modo que sustituya el cableado de una variedad de dispositivos, constituye una especificación industrial en cuanto a redes inalámbricas de área personal. Presenta características de gran utilidad tales como conexiones entre terminales móviles, además permite la conexión entre periféricos o dispositivos de audio. (Regino, 2014)

Entre sus principales características se tiene:

- Operación en banda libre de 2.4 GHz
- Capacidad de transmisión de 3Mbps
- Permite ahorro energético en la batería del dispositivo
- Precio económico en la implementación del dispositivo
- Alcance de 100 metros de acuerdo al transmisor Bluetooth.

#### **2.11.3.2. GSM**

El Sistema global de comunicaciones móviles se basa en la tecnología digital, siendo el más utilizado en comunicación de dispositivos móviles, permite la conexión a través del teléfono móvil hacia los computadores, con el acceso a Internet, fax, e-mail y redes LAN. (Ingeniatic, 2011)

### **2.11.3.3. WIFI**

Permite la conexión de dispositivos de forma inalámbrica mediante la implementación de modelos de interconexión abierta OSI. Permitiendo el acceso de conexión a espacios o zonas de difícil acceso mediante cableado.

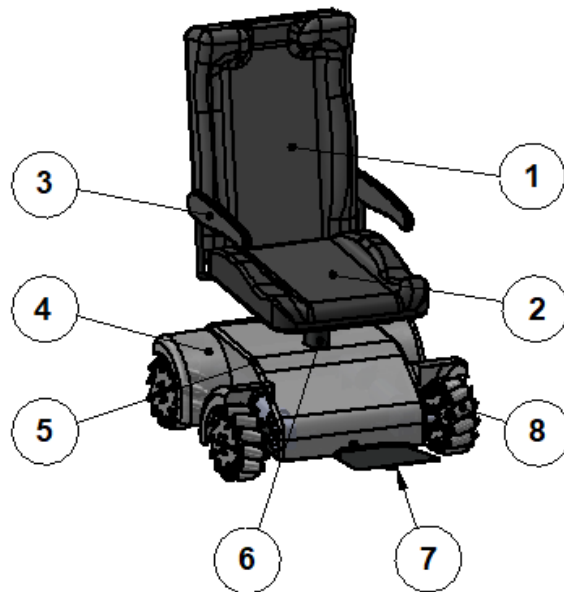
Su consumo de potencia y costo es elevado a comparación de otras tecnologías, su rango de operación es de 5 GHz, con una velocidad de 54 Mbps. (Regino, 2014)



## CAPÍTULO III

# DISEÑO MECÁNICO Y CONSTRUCCIÓN DE LA SILLA DE RUEDAS OMNIDIRRECCIONAL

En este capítulo se parte de los requerimientos del usuario y la especificación del funcionamiento omnidireccional que posee la silla de ruedas, para lograr una selección de componentes, diseño y análisis de la estructura mecánica adecuados; con el objetivo de garantizar su efectividad y proceder a la respectiva construcción de la misma.



**Figura 22.** Esquema y partes de la silla de ruedas omnidireccional

- |                 |                          |
|-----------------|--------------------------|
| 1. Espaldar     | 5. Estructura            |
| 2. Asiento      | 6. Columna               |
| 3. Reposabrazos | 7. Reposapiés            |
| 4. Cubierta     | 8. Rueda omnidireccional |

### 3.1. Parámetros de diseño

Para la elaboración del diseño y la selección de componentes es necesario considerar los siguientes parámetros de construcción descritos en la **Tabla 6**.

Los parámetros son establecidos de acuerdo al capítulo 2, donde se describen las principales características y normas que poseen las sillas de ruedas convencionales disponibles en el mercado.

**Tabla 6**

*Parámetros de diseño*

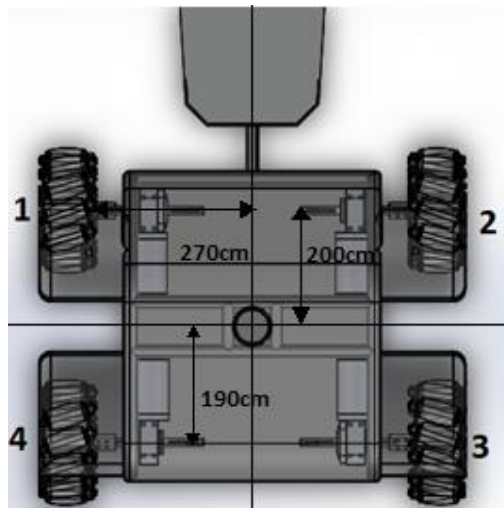
PARÁMETROS	DEFINICIÓN
<b>Carga máxima</b>	Se establece una carga máxima de 80 <i>kg</i> , valor superior al promedio de una persona con cuadriplejía o paraplejía.
<b>Peso máximo de la silla de ruedas</b>	El material a utilizar es resistente capaz de soportar el peso del usuario y no sufrir ningún daño, pero a la vez ligero para facilitar su transporte.  El peso máximo es de 30 <i>kg</i> .
<b>Dimensiones máximas de la silla de ruedas</b>	Debido a que uno de los objetivos es optimizar desplazamientos dentro de un espacio cerrado, esta debe ser capaz de pasar por cualquier puerta sin problema. Dimensiones máximas de la silla de ruedas: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud: 1200 <i>mm</i></li> <li>• Ancho: 700 <i>mm</i>.</li> <li>• Altura: 1100 <i>mm</i>.</li> </ul>
<b>Velocidad máxima</b>	La velocidad máxima es de 0,85 <i>m/s</i> para garantizar la seguridad del usuario.
<b>Pendiente máxima y grado inclinación de la rampa para la silla de ruedas</b>	Pendiente máx: 12%  Grado de inclinación: 7°

CONTINÚA 

<b>Control</b>	El control se realiza mediante una aplicación móvil por lo que debe poseer un soporte extra en un reposabrazos  Dimensiones: 10 cm * 15cm.
<b>Sensorización</b>	Para el control autónomo es necesario la implementación de múltiples sensores que serán los encargados de seguir la trayectoria deseada por el usuario y detectar obstáculos.

### 3.2. Diseño Cinemático del movimiento Omnidireccional de la silla de ruedas.

Redefiniendo la Ecuación 19, se puede expresar la velocidad angular que posee la silla de ruedas en función del posicionamiento de las llantas, el radio de las mismas y la velocidad angular del motor a escoger. Ver Figura 23.



**Figura 23.** Configuración de las llantas mecanum

Considerando que:

$$L_1 = 200mm$$

$$L_2 = 190mm$$

$$l = 270\text{mm}$$

$$|\dot{\theta}_1| = |\dot{\theta}_2| = |\dot{\theta}_3| = |\dot{\theta}_4|$$

$$\omega_z = \frac{R_\omega}{4} \left( -\frac{\dot{\theta}_1}{(L_1 + l)} + \frac{\dot{\theta}_2}{(L_1 + l)} - \frac{\dot{\theta}_3}{(L_2 + l)} + \frac{\dot{\theta}_4}{(L_2 + l)} \right)$$

$$\omega_z = \frac{R_\omega}{4} \left( -\frac{\dot{\theta}_1}{(0.47\text{m})} + \frac{\dot{\theta}_2}{(0.47\text{m})} - \frac{\dot{\theta}_3}{(0.46\text{m})} + \frac{\dot{\theta}_4}{(0.46\text{m})} \right) \quad \text{Ecuación 20}$$

Se especifica todos los datos necesarios para el cálculo, entre los que se tiene:

$$\phi_{llanta} = 8\text{in} = 203.2\text{mm} = 2R_\omega = 0.1016\text{m}$$

$$\omega_{llanta} = \dot{\theta} = 285\text{rpm} = 29.84 \text{ rad/s}$$

Se reemplaza los valores para una trayectoria arbitraria. Donde el giro para atrás será representado con valor negativo y se obtiene:

Izquierda ( $\leftarrow$ ): desplazamiento de 4 llantas a velocidad total.

$$\begin{array}{ll} 1 = \text{atrás} & 2 = \text{adelante} \\ 4 = \text{adelante} & 3 = \text{atrás} \end{array}$$

$$\omega_z = \frac{R_\omega}{4} \left( -\frac{\dot{\theta}_1}{(0.47\text{m})} + \frac{\dot{\theta}_2}{(0.47\text{m})} - \frac{\dot{\theta}_3}{(0.46\text{m})} + \frac{\dot{\theta}_4}{(0.46\text{m})} \right)$$

$$\omega_z = \frac{0.101 \text{ m}}{4} \left( -\frac{(-29.84)}{(0.47\text{m})} + \frac{(29.84)}{(0.47\text{m})} - \frac{-(29.84)}{(0.46\text{m})} + \frac{(29.84)}{(0.46\text{m})} \right) \text{rad/s}$$

$$\omega_z = 6.52 \text{ rad/s}$$

Y reemplazando los valores en la Ecuación 17 y Ecuación 18.

$$v_x = \frac{R\omega}{4} (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 + \dot{\theta}_4)$$

$$v_x = \frac{0.101m}{4} (29.84 + 29.84 + 29.84 + 29.84) \frac{rad}{s}$$

$$v_x = 3.03 \frac{m}{s}$$

$$v_y = \frac{R\omega}{4} (-\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_3 - \dot{\theta}_4)$$

$$v_y = \frac{0.10161m}{4} (-(-29.84) + 29.84 - (-29.84) + 29.84) \frac{rad}{s}$$

$$v_y = \frac{0.101}{4} \frac{m}{s}$$

$$v_y = 3.03 \frac{m}{s}$$

Como se puede observar la velocidad angular y lineal tanto de la componente X como de la componente Y, son mayor a la velocidad objetiva. Por lo que es necesario multiplicar por un factor reductor para obtener dicha velocidad.

$$v_{X(obj)} = v_x * \frac{1}{5}$$

$$v_{X(obj)} = \left(3.03 \frac{m}{s}\right) * \frac{1}{5} = 0.60 \frac{m}{s}$$

$$v_{y(obj)} = v_y * \frac{1}{5}$$

$$v_{y(obj)} = \left(3.032 \frac{m}{s}\right) * \frac{1}{5} = 0.60 \frac{m}{s}$$

Donde:

$$v_{obj} = \sqrt{(v_{x(prog)})^2 + (v_{y(prog)})^2}$$

$$v_{obj} = \sqrt{\left(0.60 \frac{m}{s}\right)^2 + \left(0.60 \frac{m}{s}\right)^2}$$

$$v_{obj} = 0.85 \frac{m}{s}$$

Velocidad que es aproximada a la definida en los parámetros de diseño. Es importante recalcar que esta velocidad es la máxima a la que el usuario podrá realizar los desplazamientos.

$$v_{obj} \approx v_{dis}$$

De la misma manera la velocidad angular se ve directamente afectada por este factor de conversión, donde el dato de la velocidad angular sería:

$$\omega_{z(obj)} = \omega_z \cdot \frac{1}{5}$$

$$\omega_{z(obj)} = 6.52 \text{ rad/s} \cdot \frac{1}{5} = 1.30 \text{ rad/s}$$

### 3.3. Diseño Cinético de la silla de ruedas omnidireccional

Los principales aspectos que se consideran para la construcción a nivel cinético, es la integración de cada uno de los componentes que son parte de la silla de ruedas, así como los parámetros o requerimientos que rigen o condicionan las características de los mismos. La selección de cada uno de los componentes busca garantizar que sean potentes, resistentes y duraderos para que no existan fallos durante la construcción y aplicación.

### 3.3.1. Determinación de Cargas

Es importante describir la distribución del peso de la persona en toda la silla de ruedas incluido el asiento de la silla, para la selección de componentes y las respectivas características que poseen.

De la sección 2.5 se tienen los siguientes valores porcentuales correspondientes a la distribución del peso de una persona en una silla de ruedas:

- *Muslos y Nalgas* = 65 % = 52 kg
- *Pies* = 19 % = 15.2 kg
- *Espalda* = 12 % = 9.6 kg
- *Antebrazos* = 4 % = 3.2 kg

De donde se concluye, que todo el peso de la persona excepto el 19 % que corresponde al peso de los pies está distribuidos en la parte superior; y es soportado por la columna que une la estructura con el asiento.

Sumando el 81% restante, es decir  $52kg + 9.6 kg + 3.2 kg$  se tiene un total 64.8 kg aplicado en el asiento.

La silla de ruedas también se divide en tres secciones principales para su análisis, con su respectiva distribución del peso:

- *Asiento* = 5.5 kg
- *Columna* = 0.5 kg
- *Estructura* = 24 kg

Con un peso total de 30 kg para toda la silla de ruedas.

Otro factor importante a considerar son las fuerzas presentes en la silla de ruedas, entre las cuales se tiene: fuerza de rozamiento, peso, fuerza normal, etc.

Debido a que ningún desplazamiento posee un coeficiente ideal igual a uno y presenta rozamiento, es importante analizar el material del piso por donde la silla se desplazará.

En esta sección se utiliza el peso total de la silla, debido a que el análisis es realizado desde el punto más bajo, donde ya intervienen todas las cargas presentes tanto de la persona como de la silla misma, es decir:

$$P_{total} = P_{m\acute{a}x}(persona) + P_{objetivo}(silla)$$

Donde:

$$P_{m\acute{a}x}(persona) = 80kg$$

$$P_{objetivo}(silla) = 30kg$$

$$P_{total} = 110 kg$$

La fuerza de rozamiento viene dada por la siguiente ecuación:

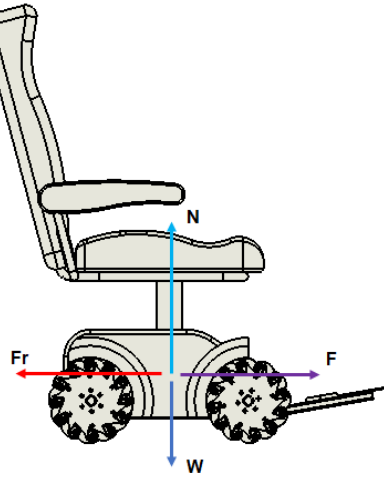
$$F_r = \mu N$$

**Ecuación 21**

Donde:

$$\mu_{k(nylon-cemento)} = 0.8 \quad (\text{Ver ANEXO A})$$





$$\sum F_y = 0$$

$$N - W = 0$$

$$N = m \cdot g$$

$$N = 110 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$N = 1079 \text{ N}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$F - F_r = 0$$

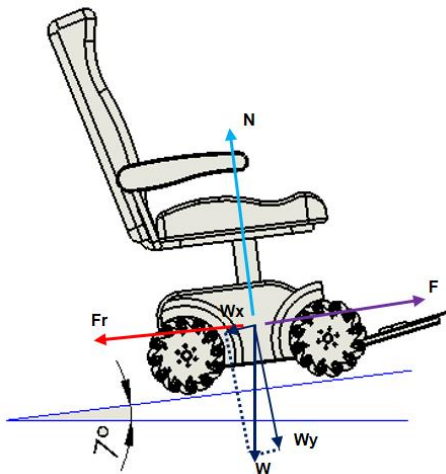
$$F = F_r$$

$$F_r = \mu N$$

$$F_r = \mu \cdot 1079.1 \text{ N}$$

$$F_r = 0.8 \cdot 1079 \text{ N}$$

$$F = F_r = 863.2 \text{ N}$$



$$\sum F_y = 0$$

$$N - W_y = 0$$

$$N - W \cdot \cos(7^\circ) = 0$$

$$N = m \cdot g \cdot \cos(7^\circ)$$

$$N = 110 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot \cos(7^\circ)$$

$$N = 1071 \text{ N}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$N - W_x = 0$$

$$F - F_r - W \cdot \sin(7^\circ) = 0$$

$$F = F_r + W \cdot \sin(7^\circ)$$

$$F = F_r + m \cdot g \cdot \sin(7^\circ)$$

$$F_r = \mu N = 0.8 \cdot 1071 \text{ N}$$

$$F_r = 856.8 \text{ N}$$

$$F = 856.8 \text{ N} + 110 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2 \cdot \sin(7^\circ)$$

$$F = 988.3 \text{ N}$$

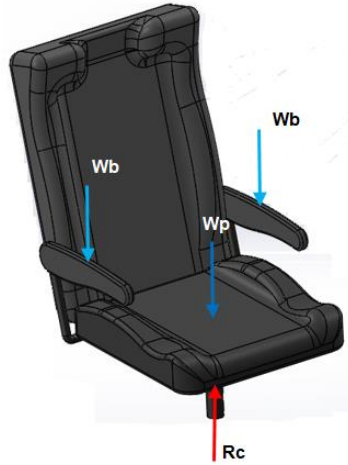
### 3.3.2. Análisis Estático

#### 3.3.2.1. Asiento

Como se especificó con anterioridad, el peso de la persona está distribuido en todo el asiento, sin embargo, con objeto de análisis; dichas fuerzas distribuidas se condensan en una sola carga puntual ubicada en el centro. La carga puntual se ve representada por  $WaT$  y es correspondiente al 81% del peso máximo de la persona más el peso del asiento.

$$WaT = (64.8 \text{ kg} + 5.5 \text{ kg}) \cdot 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$Wa = 689.6 \text{ N}$$



$$\sum F_y = 0$$

$$R_c - W_{aT} = 0$$

$$R_c = W_{aT} = 689.6 \text{ N}$$

### 3.3.2.2. Columna

Las cargas que interactúan en la columna son: la reacción de la columna, el peso de la columna y la reacción transmitida hacia la estructura. Este dato aporta al análisis de la determinación de seguridad en la columna mediante el criterio de Johnson para columnas cortas.



$$\sum F_y = 0$$

$$R_e - R_c - W_c = 0$$

$$R_e = R_c + W_c$$

$$R_e = 689.6 \text{ N} + (0.5 \text{ kg} \cdot 9.81 \text{ m/s}^2)$$

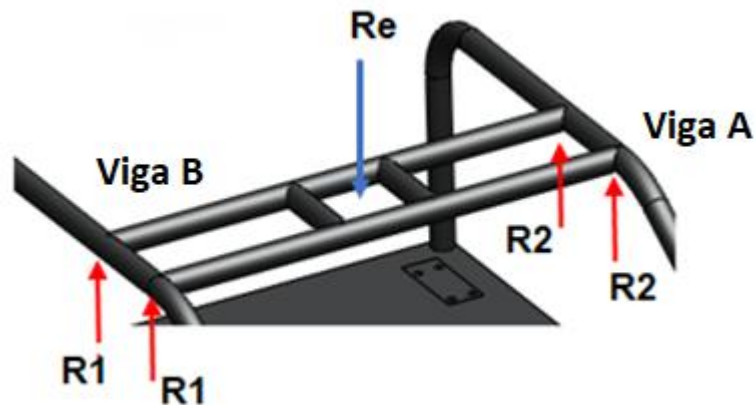
$$R_e = 689.6 \text{ N} + 4.9 \text{ N}$$

$$R_e = 694.5 \text{ N}$$

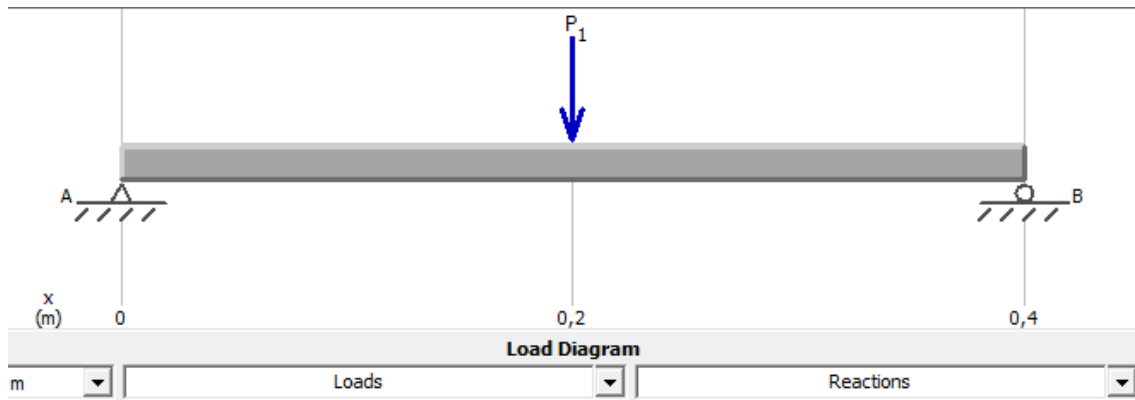
### 3.3.2.3. Estructura

El peso transmito a la estructura mediante la columna es correspondiente al valor de la reacción  $R_e$ , este valor se distribuye equitativamente en las dos vigas horizontales que soportan a la columna.

Al ser dos vigas paralelas, el valor de la fuerza de la reacción  $R_e = 695 \text{ N}$  se reparte en partes iguales obteniendo una fuerza equivalente a  $P_1 = 347.5 \text{ N}$  para el análisis de cada viga independiente.



Las vigas horizontales miden  $40 \text{ cm}$  y un diámetro de  $\frac{3}{4} \text{ in} = 19.05 \text{ mm}$  y  $2 \text{ mm}$ .



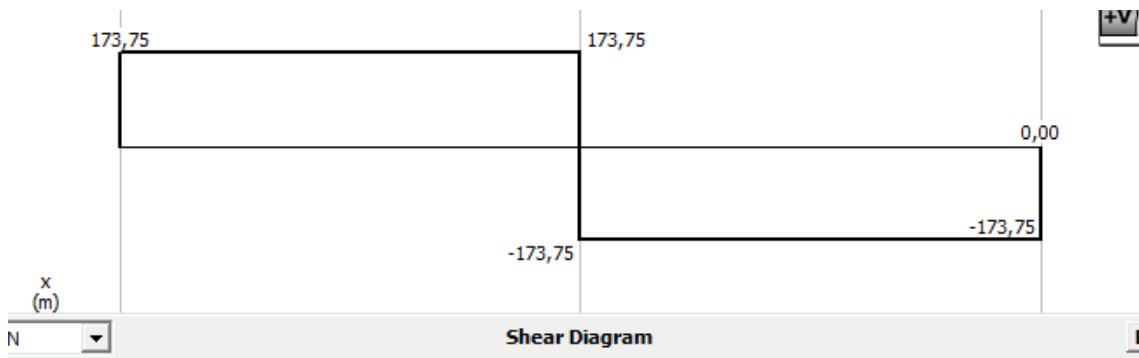
**Figura 24.** Diagrama de cargas de la viga A

Dónde:

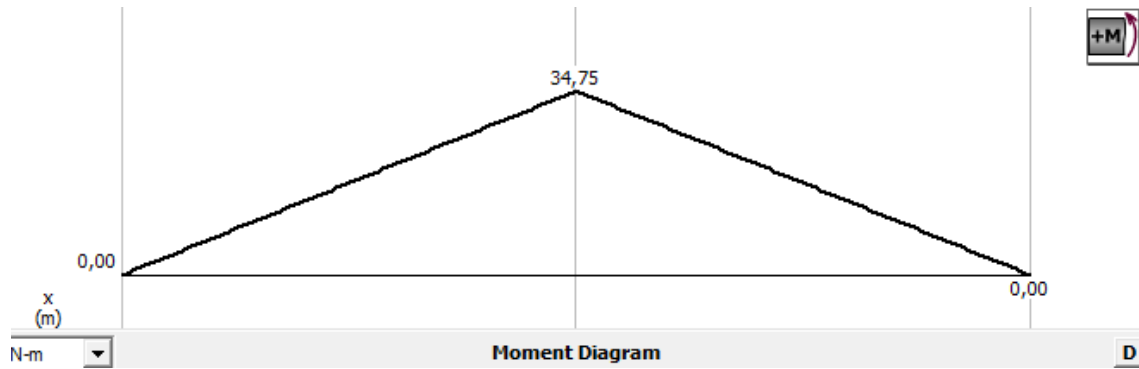
$$P_1 = 347,5 \text{ N}$$

$A$  = soporte en el extremo 1

$B$  = soporte en el extremo 2



**Figura 25.** Diagrama de fuerzas cortantes



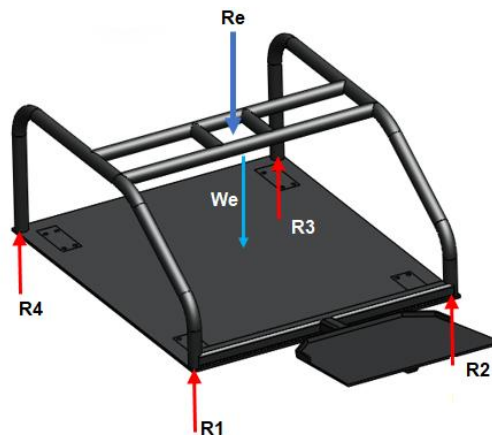
**Figura 26.** Diagrama de momentos flexionante

De la Figura 25 y Figura 26 se tiene que la fuerza cortante y el momento máximo.

$$V \equiv 347.25 \text{ N}$$

$$M = 34.75 \text{ Nm}$$

La estructura alberga todas las cargas transmitidas por la columna más su propio peso, a más de todas las reacciones provenientes de cada una de las ruedas como se observa en la siguiente figura. Para el cálculo de las reacciones se realiza un análisis tridimensional compuesto por dos sistemas dimensionales.



Debido a la configuración de distancias observada en la Figura 23, se tienen los siguientes datos:

$$RT = R_e + We$$

$$d1 = 200mm$$

$$R1 = R2$$

$$d2 = 270mm$$

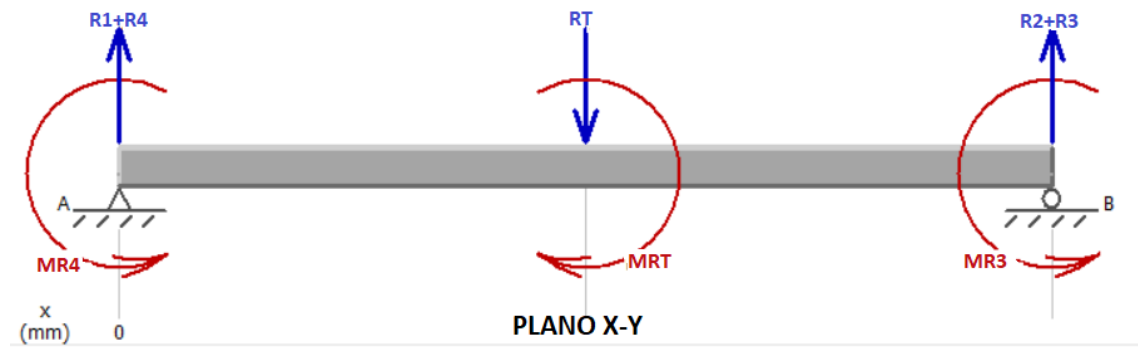
$$R3 = R4$$

$$d3 = 190mm$$

Donde:

$$R_e = 695N$$

$$We = 24Kg \cdot 9.81 m/s^2 = 235.44N$$



$$\sum Fy = 0$$

$$RT = R1 + R4 + R2 + R3$$

$$RT = 2R1 + 2R3$$

$$\sum Mz = 0$$

$$MRT = MR4 + MR3$$

$$RT \cdot d1 = (d3 + d1)R3 + (d3 + d1)R4$$

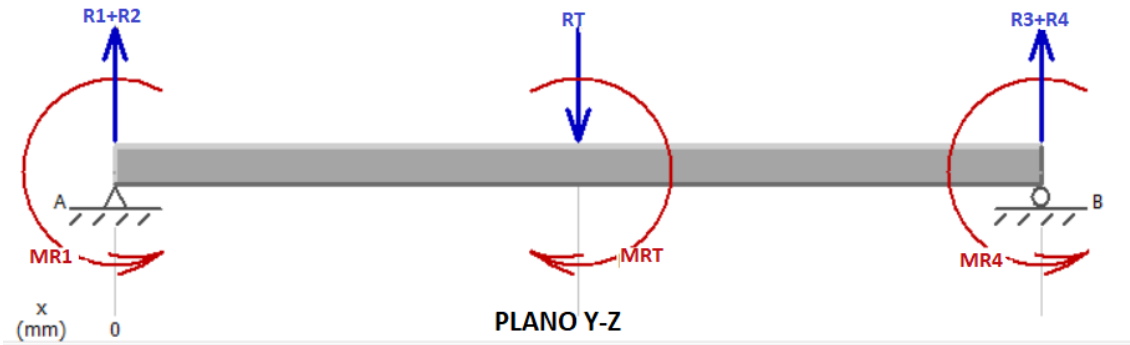
$$RT \cdot d1 = d1(R3 + R4) + d3(R3 + R4)$$

$$RT \cdot d1 = d1(2R3) + d3(2R3)$$

$$(695N + 235.44N) \cdot 0.2m = 0.2m(2 \cdot R3) + 0.19m(2 \cdot R3)$$

$$186N = 0.4R3 + 0.38R3$$

$$R3 = R4 = 238.46N$$



$$\sum Fy = 0$$

$$RT = R1 + R2 + R3 + R4$$

$$RT = 2R1 + 2R3$$

$$\sum Mx = 0$$

$$MRT = MR1 + MR4$$

$$RT \cdot d2 = (2d2)R1 + (2d2)R4$$

$$RT = 2R1 + 2R4$$

$$2R1 = RT - 2R3$$

$$R1 = \frac{(695N + 235.44N) - 2(197.8N)}{2}$$

$$R1 = R2 = 267.72N$$



### 3.4. Análisis de Esfuerzos

#### 3.4.1. Columna

La columna está fabricada de un tubo de acero ASTM A36, posee un diámetro mayor para asegurar que no falle, el diámetro seleccionado es de  $2in = 50.8mm$ . A continuación, las características del mismo:

**Tabla 7**

*Características del tubo de Acero para la columna.*

CARACTERÍSTICAS DEL TUBO DE ACERO DE 2" ASTM A36	
Tubería Estructural	Tubo Redondo
Cantidad requerida	14 cm
Peso por m	2.41 kg
Peso Total	0.34 kg
Diámetro exterior	2" = 50.8 mm
Espesor	2 mm
Esfuerzo a la cedencia ( $S_y$ )	250MPa

Fuente: (IPAC, 2014)

Para verificar que el factor de seguridad se cumpla en esta sección de la columna se realizan los siguientes cálculos.

Primero se calcula la relación de esbeltez para definir si es una columna larga o corta (**Mott, pág. 606**) la ecuación es:

$$SR = \frac{KL}{r} \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

$SR =$  Relación de esbeltez

$L = \text{Longitud real de la columna} = 140\text{mm}$

$K = \text{Factor de fijación de los extremos} = 2.10 \text{ (un extremo fijo y otro libre)}$

$r = \text{Radio de giro de la sección transversal de la columna}$

$$r = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

**Ecuación 23**

Para el cálculo del radio de la sección transversal se calcula a partir de la relación de Inercia y Área de un tubo hueco.

Donde:

$I = \text{Inercia de tubo circular hueco}$

$A = \text{Área de tubo circular hueco}$

$D = \text{Diámetro externo de la columna}$

$d = \text{Diámetro interno de la columna}$

$$I = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{64}$$

**Ecuación 24**

$$I = \frac{\pi[(50.8\text{mm})^4 - (50.8\text{mm} - 4\text{mm})^4]}{64}$$

$$I = 91.43 \times 10^3 \text{ mm}^4$$

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$$

$$A = \frac{\pi[(50.8\text{mm})^2 - (50.8\text{mm} - 4\text{mm})^2]}{4}$$

$$A = 306.61 \text{ mm}^2$$

Reemplazando los datos en la Ecuación 23:

$$r = \sqrt{\frac{91.43 \times 10^3 \text{ mm}^4}{306.61 \text{ mm}^2}}$$

$$r = 17.26 \text{ mm}$$

Reemplazando los datos en la Ecuación 22:

$$SR = \frac{2.10 \cdot (140 \text{ mm})}{17.26 \text{ mm}}$$

$$SR = 17.03$$

Determinación de la constante de la columna:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{S_y}}$$

**Ecuación 25**

Donde:

$C_c$  = Relación de esbeltez de transición, o constante de columna

$E$  = Módulo de elasticidad del material = 207 GPa

Reemplazando los datos en la Ecuación 25, se tiene que:

$$C_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 (207 \text{ GPa})}{250 \text{ MPa}}}$$

$$C_c = 127.84$$

Con los resultados obtenidos en la Ecuación 22 y Ecuación 25, se comparan los valores y sí:

- $SR$  es menor a  $C_c$  : la columna es corta y se utiliza la fórmula de J. B. Johnson.

- $C_c$  es menor a  $SR$ : la columna es larga y se utiliza la fórmula de Euler.

$$SR < C_c$$

$$17.03 < 127.84$$

Debido a que la relación de esbeltez es menor a la constante de la columna, se dice que la columna es corta y la ecuación empleada es la de Johnson:

$$P_{cr} = AS_y \left[ 1 - \frac{S_y(KL/r)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde:

$P_{cr}$  = Carga crítica en la columna

$A$  = Área de la sección transversal =  $306.61 \text{ mm}^2$

$KL/r$  =  $SR$  = Relación de esbeltez = 17.03

$E$  = Módulo de elasticidad del material = 207 GPa

Remplazando los valores en la Ecuación 26:

$$P_{cr} = (306.61 \text{ mm}^2)(250 \text{ MPa}) \left[ 1 - \frac{(250 \text{ MPa})(17.03)^2}{4\pi^2(207 \times 10^3 \text{ MPa})} \right]$$

$$P_{cr} = 76652.5 \text{ MPa} \cdot \text{mm}^2$$

$$P_{cr} = 76652.5 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{mm}^2 \cdot \frac{(1\text{m})^2}{(1 \times 10^3 \text{mm})^2}$$

$$P_{cr} = 76.652 \text{ kN}$$

Una vez calculada la carga crítica  $P_{cr}$  se determina la carga máxima que puede soportar la columna.

$$P_{adm} = \frac{P_{cr}}{N}$$

**Ecuación 27**

Donde:

$P_{adm}$  = Carga admisible o máxima en la columna

$P_{cr}$  = Carga crítica en la columna = 76.652 kN

$N$  = Factor de diseño = 4

De la Ecuación 27 se obtiene que:

$$P_{adm} = \frac{76.652 \times 10^3 \text{ N}}{4}$$

$$P_{adm} = 19.163 \text{ kN}$$

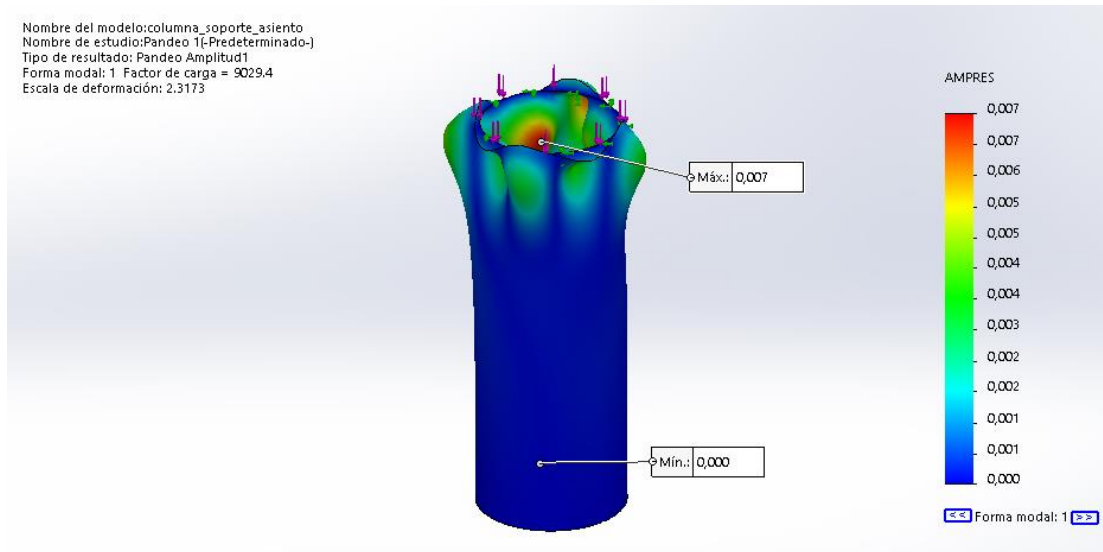
Finalmente, para garantizar que la columna sea segura, se compara que la carga real sea menor a la carga admisible. La carga real es igual a la reacción  $R_e = 695 \text{ N}$

$$P_{adm} > R_e$$

$$19,16 \text{ kN} > 695 \text{ N}$$

Por lo tanto, la selección de la columna de dos pulgadas es segura y garantiza que el sistema funcione correctamente sin posibilidad de pandeo.

En la Figura 27, se observa el análisis mediante el software Solidworks acerca del comportamiento de la columna al someterle a la carga especificada. Se muestra que el factor de seguridad o factor carga crítica es mayor a 1, por lo tanto no presenta un pandeo previsto.



**Figura 27.** Análisis de la columna en Solidworks

### 3.4.2. Estructura

Analizando diferentes alternativas de material, se seleccionó el acero ASTM A36, para la construcción de la estructura, por su alta resistencia a cargas aplicadas además de poseer buena maquinabilidad y alta disponibilidad en el mercado.

Se construyó con tubos redondos de  $\frac{3}{4}$  in, con 2mm de espesor.

**Tabla 8**

*Características del tubo de Acero seleccionado*

CARACTERÍSTICAS DEL TUBO de 3/4 " DE ACERO ASTM A36	
Tubería Estructural	Tubo Redondo
Cantidad requerida	9m = 1½ tubo
Peso por 6m	5 kg
Peso Total	7.5 kg
Diámetro exterior	3/4 " = 19.05 mm
Espesor	2 mm
Esfuerzo a la cedencia	250MPa

Fuente: (IPAC, 2014)

Según **(Mott, 2009.Cap 3)** para una carga estática, el esfuerzo de diseño viene condicionado por la siguiente ecuación:

$$\sigma_{x \text{ flex}} = \frac{M}{S} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde:

$\sigma_{x \text{ flex}} =$  Esfuerzo debido a flexión en el eje X sobre la viga inferior

$M =$  Momento flexionante = 34.75 [Nm]

$S =$  Módulo de sección (de un tubo hueco)

$$S = \frac{\pi}{32} \left( \frac{D^4 - d^4}{D} \right) \quad \text{Ecuación 29}$$

$$S = \frac{\pi}{32} \left( \frac{19.05^4 - (19.05 - 4)^4}{19.05} \right) = 798.17 \text{ mm}^3$$

Remplazando en la Ecuación 28:

$$\sigma_{x \text{ flex}} = \frac{34.75 \text{ Nm}}{798.16 \text{ mm}^3} = 43.54 \text{ MPa}$$

Con el objetivo de obtener los esfuerzos principales para la teoría de Von Mises, se aplican las siguientes ecuaciones **(Mott, 2009.Cap 4)**, considerando que  $\tau_{xy}$  (esfuerzo cortante) es igual a cero.

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left( \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \right)^2 + (\tau_{xy})^2} \quad \text{Ecuación 30}$$

$$\sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + (\tau_{xy})^2}$$

**Ecuación 31**

Donde:

$\sigma_1 =$  Esfuerzo principal máximo

$\sigma_2 =$  Esfuerzo principal mínimo

$\sigma_x =$  Esfuerzo normal sobre el eje axial de la viga

$\sigma_y =$  Esfuerzo total en el eje  $y = 0$

$$\sigma_x = \sigma_{x \text{ flex}} + \sigma_{x \text{ axial}}$$

$$\sigma_x = \sigma_{x \text{ flex}} + 0$$

$$\sigma_x = \sigma_{x \text{ flex}} = 43.54 \text{ MPa}$$

Por lo tanto, reemplazando la Ecuación 30:

$$\sigma_1 = \frac{43.54 \text{ MPa} + 0}{2} + \sqrt{\left(\frac{43.54 \text{ MPa} + 0}{2}\right)^2 + 0}$$

$$\sigma_1 = 43.54 \text{ MPa}$$

Y la Ecuación 31:

$$\sigma_2 = \frac{43.54 \text{ MPa} + 0}{2} - \sqrt{\left(\frac{43.54 \text{ MPa} + 0}{2}\right)^2 + 0}$$

$$\sigma_2 = 0 \text{ MPa}$$



Aplicando el Método de la energía de distorsión para esfuerzos estáticos biaxiales en materiales dúctiles (Esfuerzo de von Mises) localizado en **(Mott, 2009.**

**Cap. 5):**

$$\sigma' = \sqrt{(\sigma_1)^2 + (\sigma_2)^2 - (\sigma_1)(\sigma_2)}$$

**Ecuación 32**

Remplazando la Ecuación 32:

$$\sigma' = \sqrt{(43.54 \text{ MPa})^2 + 0 - (43.54 \text{ MPa})(0)}$$

$$\sigma' = 43.54 \text{ MPa}$$

#### **3.4.2.1. Diseño del Factor de Seguridad**

Finalmente se calcula el factor de seguridad, a partir de las características del material seleccionado, como se muestra en la Tabla 8.

$$f_{s_c} = \frac{S_y}{\sigma'}$$

**Ecuación 33**

$$f_{s_c} = \frac{250 \text{ MPa}}{43.54 \text{ MPa}}$$

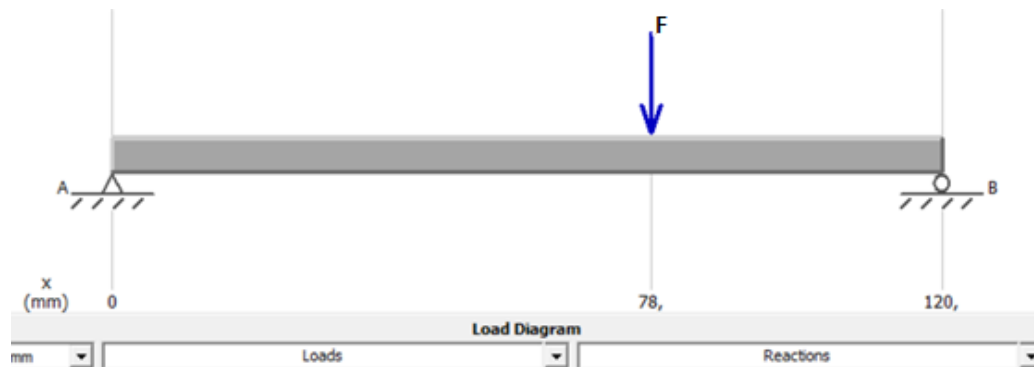
$$f_{s_c} = 5.74$$

Se tiene que el factor de seguridad calculado es mayor al factor de seguridad de diseño, garantizando que no existan fallas en la estructura.

$$f_{s_d} < f_{s_c}$$

$$4 < 5.74$$

### 3.4.3. Diseño del eje rueda-motor



**Figura 28.** Diagrama de cargas en el eje de motor

$$\sum M_1 = 0$$

$$-d_1 \cdot F + d_2 R_2 = 0$$

$$(-78\text{mm}) \cdot (267.72\text{Nmm}) + (120\text{mm}) \cdot R_2 = 0$$

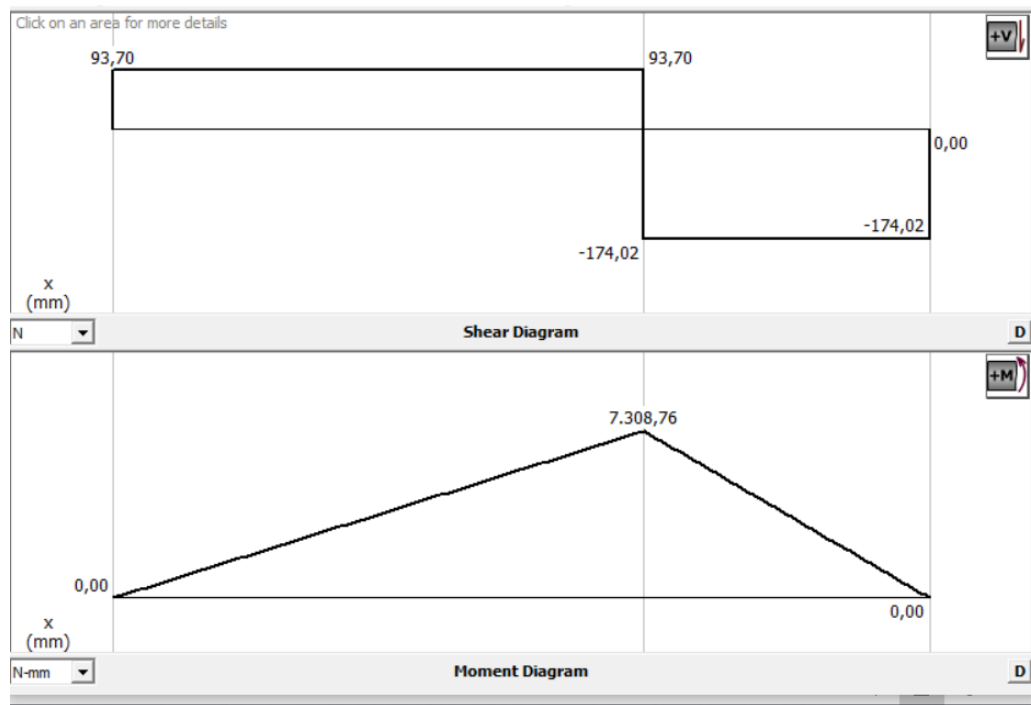
$$R_2 = 174.018 \text{ N}$$

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 - F + R_2 = 0$$

$$R_1 - 267.72 \text{ N} + 174.018 \text{ N} = 0$$

$$R_1 = 93.702 \text{ N}$$



**Figura 29.** Diagrama de fuerza cortante y momento flexionante

Se calcula la resistencia a la fatiga mediante las constantes  $a$  y  $b$  que se encuentran en el ANEXO C:

$$S_e' = 0.5 \cdot S_{ut}$$

$$S_e' = 0.5 \cdot (420 \text{ MPa})$$

$$S_e' = 210 \text{ MPa}$$

$$a = 4.51$$

$$b = -0.265$$

$$k_a = a \cdot S_{ut}^b$$

$$k_a = 4.51 \cdot (420)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.9099$$

La fórmula de  $kb$  se toma del ANEXO D, en función del diámetro del eje, y la ecuación para el cálculo es igual a:

$$d = \text{diámetro menor} = 19\text{mm}$$

$$kb = \left( \frac{d}{7.62} \right)^{-0.107}$$

$$kb = \left( \frac{19 \text{ mm}}{7.62} \right)^{-0.107}$$

$$kb = 0.9068$$

Se especifica el valor de  $kc$  a partir del ANEXO E para ensayos de fatiga, el factor de temperatura de operación  $kd$  del ANEXO F y por último el factor de confiabilidad  $ke$  al 95 % del ANEXO G.

Debido a que no existen efectos varios el valor de  $Kf$  es igual a 1.

$$kc = 0.59 \text{ (torsión)}$$

$$kd = 1$$

$$ke = 0.868 \text{ (95\% confiabilidad)}$$

$$kf = 1$$

Se calcula la resistencia a la fatiga en una ubicación crítica ( $Se$ ), de la siguiente ecuación:

$$Se = ka \cdot kb \cdot kc \cdot kd \cdot ke \cdot kf \cdot Se'$$

$$Se = (0.9099) \cdot (0.9068) \cdot (0.59) \cdot (1) \cdot (0.868) \cdot (1) \cdot 210\text{MPa}$$

$$Se = 88.73 \text{ MPa}$$

Se calcula el esfuerzo nominal de la siguiente ecuación a partir del momento flexionante obtenido en la Figura 29.

$$\sigma_o = \frac{M}{\frac{I}{c}} = \frac{M \cdot c}{I}$$

$$\sigma_o = \frac{(7308.76 \text{ Nmm}) \cdot 32}{\pi \cdot (19\text{mm})^3}$$

$$\sigma_o = 10.853 \text{ MPa}$$

Se calcula el factor de concentración del esfuerzo por fatiga  $K_f$ , a partir de la siguiente ecuación:

$$K_f = 1 + q(K_t - 1)$$

Para  $r$ , se asume un valor equivalente a la décima parte del diámetro menor, que ayudará a determinar el valor de la sensibilidad a la muesca sometida a flexión:

$$r = \frac{d}{10}$$

$$r = \frac{19 \text{ mm}}{10} = 1.9 \text{ mm}$$

Con este valor se toma el dato de  $q$  del ANEXO H.

$$q = 0.9$$

El factor  $K_t$  de concentración de esfuerzos, se calcula para obtener el esfuerzo resultante máximo a partir de la relación entre diámetros. El factor  $K_t$  del ANEXO I.

$$\frac{D}{d} = \frac{25.4 \text{ mm}}{19 \text{ mm}} = 1.33$$

$$\frac{r}{d} = \frac{1.9 \text{ mm}}{19 \text{ mm}} = 0.1$$

$$K_t = 1.63$$

Remplazando en la ecuación, se tiene:

$$K_f = 1 + (0.9) \cdot (1.63 - 1)$$

$$K_f = 1.567$$

Para el esfuerzo máximo de flexión se aplica la siguiente ecuación.

$$\sigma_{max} = K_f \cdot \sigma_o$$

$$\sigma_{max} = 1.567 \cdot (10.853 \text{ MPa})$$

$$\sigma_{max} = 17.006 \text{ MPa}$$

Se halla la concentración de esfuerzo  $K_{ts}$  a partir del ANEXO K para el cálculo de la concentración de esfuerzo por torsión.

$$K_{ts} = 1.43$$

Remplaza los datos:

$$K_{fs} = 1 + (0.98) \cdot (1.43 - 1)$$

$$K_{fs} = 1.4214$$

Finalmente, el valor de esfuerzo máximo de torsión es igual a:

$$\tau_{max} = K_{fs} \cdot \frac{16 T}{\pi d^3}$$

$$\tau_{max} = 1.4214 \cdot \frac{16 (25.10 \text{ Nm})}{\pi (19 \text{ mm})^3} \cdot \frac{1000 \text{ mm}}{1 \text{ m}} = 26.49 \text{ MPa}$$

### 3.4.3.1. Análisis estructural

Se realiza un análisis estático de los elementos críticos de la silla de ruedas omnidireccional tales como; la estructura y la columna.

Y posteriormente se comparan los valores hallados mediante ecuaciones en las secciones previas con los resultados obtenidos a través del software, para definir al diseño como válido de acuerdo a la correspondencia de resultados.

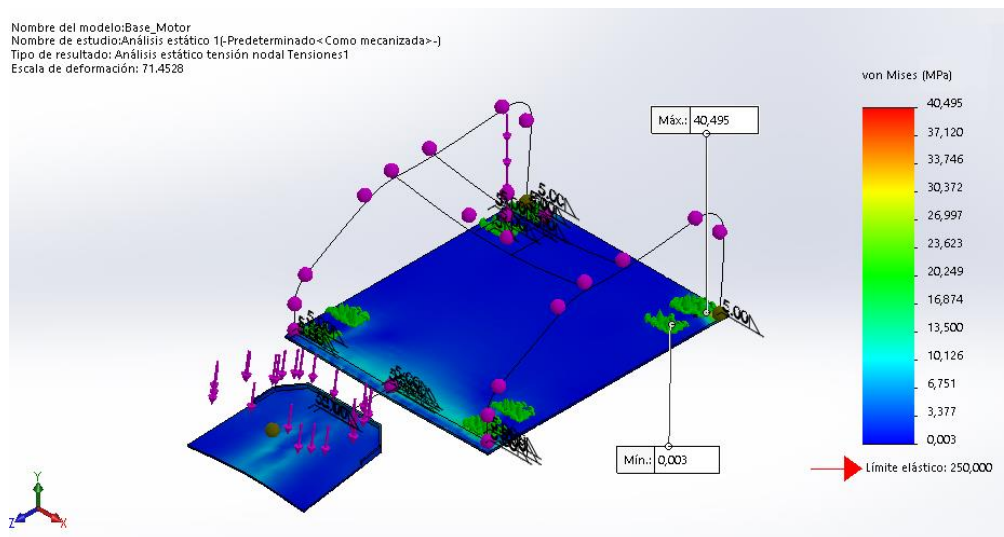
#### a) Teoría de Von Mises

La Teoría de Von Mises o de la energía de la distorsión máxima es parte de las fallas en materiales dúctiles bajo cargas estáticas, este fallo se debe a que la energía de distorsión elástica sobrepasa el límite de tensión, causado por un esfuerzo cortante produciendo una deformación en la pieza.

**Tabla 9**

*Tensiones de Von Mises en la estructura*

NOMBRE	TIPO	MÍN.	MÁX.
Tensiones 1	VON: Tensiones de Von Mises	$3.83 \times 10^{-3}$ MPa Nodo: 19255	45.74 MPa Nodo: 19154



**Figura 30.** Tensión de Von Mises en la estructura

La máxima tensión como se observa en la Figura 30 se halla en las esquinas de la estructura que soportan uniformemente las cargas de la silla y la persona, con un valor de  $45,74 \text{ MPa}$ . El límite elástico del material es  $250 \text{ MPa}$  el cual supera a la tensión máxima indicando de esta manera que el diseño es seguro.

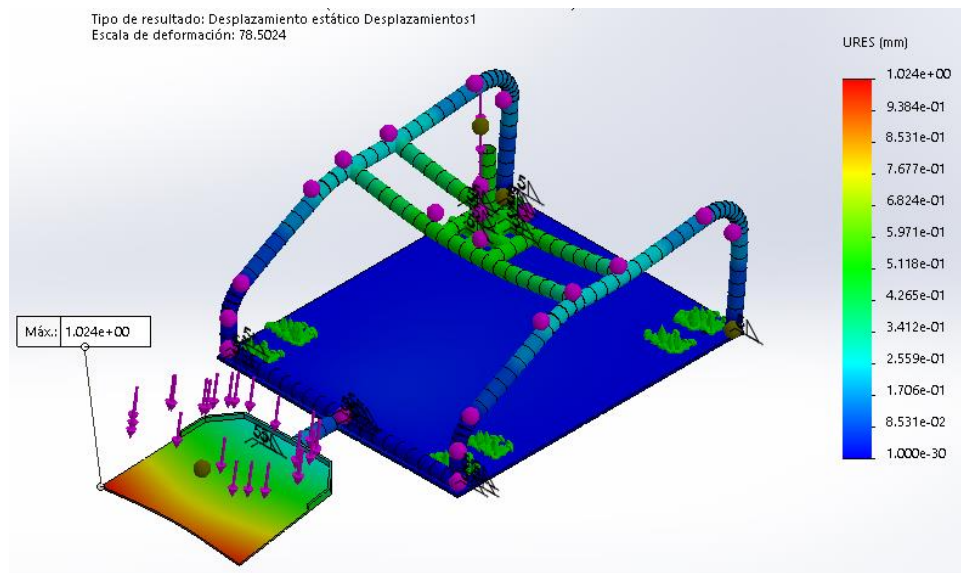
### b) Desplazamientos Resultantes

Los desplazamientos resultantes (URES), muestran el desplazamiento de cada uno de los componentes de acuerdo a su sistema de referencia inicial tales como UX, UY, UZ que se desplazan en dirección X, Y, Z respectivamente.

**Tabla 10**

*Desplazamientos resultantes de la estructura.*

NOMBRE	TIPO	MÍN.	MÁX.
Desplazamientos	URES: Desplazamientos	0 mm	1.024 mm
1	resultantes	Nodo: 3041	Nodo: 45



**Figura 31.** Desplazamientos Resultantes de la estructura

El máximo desplazamiento como se observa en Figura 31, se produce en el reposapiés de la silla debido a que el usuario coloca un 19% de su peso en esta



área, tal como se especifica en la sección 3.3.1. Y su valor máximo del desplazamiento es de  $1.024\text{ mm}$ , también se puede observar que existe cierto desplazamiento de  $0.51\text{ mm}$  en la sección que soporta la silla y el resto del peso de la persona.

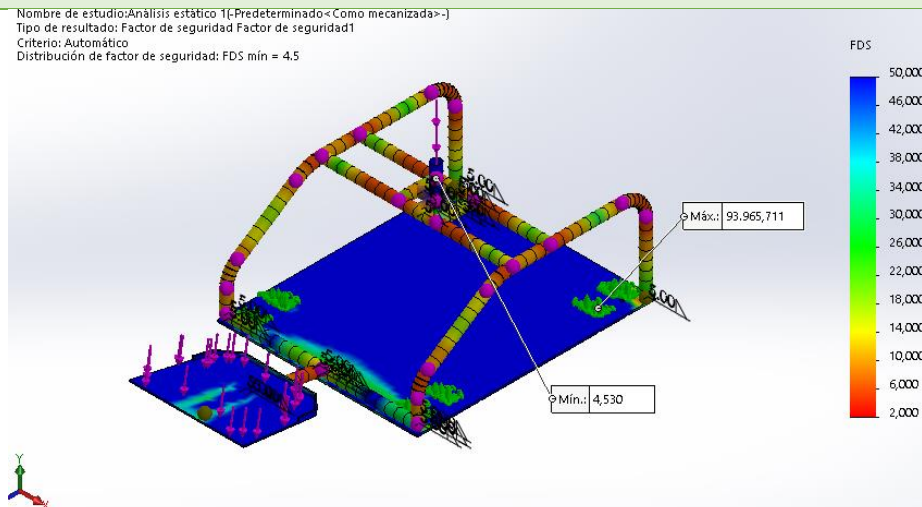
### c) Factor de seguridad

En el libro de Mott se establece que el factor de seguridad es el responsable de indicar si el modelo se encuentra con un diseño adecuado o falla de acuerdo al mismo, en donde cualquier material si es sometido a un esfuerzo hasta su máxima resistencia a la cedencia, se le atribuye un **factor  $N = 1$** , como el más bajo ya que está al borde de la fractura máxima.

**Tabla 11**

*Factor de seguridad de la estructura*

NOMBRE	TIPO	MÍN.	MÁX.
Factor de seguridad 1	Automático	4.538 Nodo: 19383	93965.711 Elemento: 4412



**Figura 32.** Factor de seguridad de la estructura

El mínimo valor del factor de seguridad como se observa en la Figura 32, se encuentra en la sección que soporta el asiento y el peso de la persona en la parte superior de la estructura, y es de 4.54, el cual sobrepasa el límite de 4 requerido como se explica en los parámetros de diseño, haciendo que este diseño sea seguro.

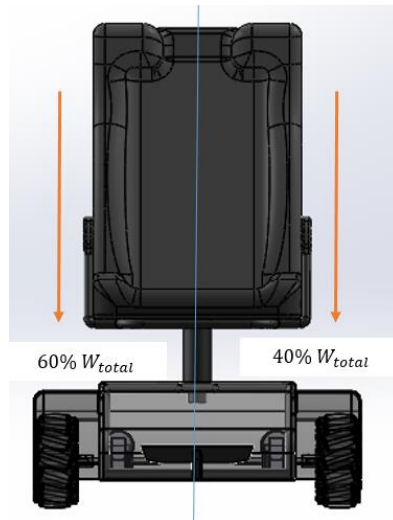
**Figura 32**

### **3.5. Selección de Componentes**

#### **3.5.1. Ruedas Mecanum**

El diámetro de la llanta seleccionado es de  $8in$  equivalente a  $203.2mm$  debido a que son las llantas mecanum con mayor disponibilidad en el mercado y a la estabilidad que aportan a la silla de ruedas gracias a sus dimensiones comparadas con otras opciones existentes.

El factor más importante para la selección del modelo de las llantas es la capacidad de carga que poseen. Para asegurar que las llantas soporten la máxima carga del diseño, se establece un margen de error de 10% en la distribución del peso, el mismo que se adiciona a un lado de la silla, por algún cambio rápido de dirección al momento del desplazamiento, como se observa en la Figura 33.



**Figura 33.** Margen de error en la distribución del peso de la silla

Por lo tanto:

$$P_{error/llanta} = P_{total} \times 60\%$$

$$P_{error} = 110 \text{ kg} \cdot 60\% = 66 \text{ kg}$$

$$P_{error/llanta} = \frac{66 \text{ kg}}{2} = 33 \text{ kg}$$

El valor de los 66 kg se encuentran ejerciendo la carga equivalente sobre la llantas del lado izquierdo, es decir 33 kg sobre cada una de las llantas de esta sección.

Por eso, el mínimo peso que deben soportar en conjunto es:

$$\text{Capacidad de carga de la llantas} = 33 \text{ kg} \times 4$$

$$\text{Capacidad de carga de la llantas} 132 \text{ kg}$$

En base a este análisis las llantas seleccionadas son las RB-Nex-74 de la compañía Nexus Robot.



**Figura 34.** Llantas Mecanum  
RB-Nex-74

Fuente: (Nexus Robot, 2018)

**Tabla 12**

*Características de Llantas Mecanum RB-Next-74*

CARACTERÍSTICA	VALOR
<b>Diámetro</b>	8 in = 203.2 mm
<b>Ancho</b>	78mm
<b>Numero de Rodillos</b>	12
<b>Material del rodillo</b>	Nylon
<b>Longitud del rodillo</b>	67mm
<b>Capacidad de carga</b>	150 kg
<b>Peso Unitario</b>	2.5 kg

Fuente: (Nexus Robot, 2018)

### 3.5.2. Motor

#### 3.5.2.1. Torque

El torque está presente en cada una de las llantas, en el centro de cada una de ellas y el cálculo lo determina la siguiente ecuación.

$$T = F \cdot \frac{\Phi_{llanta}}{2} \quad \text{Ecuación 34}$$

$$T = 988.3 \text{ N} \cdot \frac{0.2032 \text{ m}}{2}$$

$$T = 100.41 \text{ Nm}$$

Donde el torque para cada rueda es:

$$T_{llanta} = \frac{100.41 \text{ Nm}}{4} = 25.10 \text{ Nm}$$

### 3.5.2.2. Potencia requerida para el motor

$$P_{llanta} = T_{llanta} * \omega_{req} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$\omega_{req} = \frac{V_{req}}{R_{llanta}}$$

$$\omega_{req} = \frac{0.85 \text{ m/s}}{0.2032 \text{ m}} = 4.18 \text{ rad/s} \approx 40 \text{ rpm}$$

Remplazando los datos obtenidos en la **Ecuación 35**.

$$P_{llanta} = 25.10 \text{ Nm} * 4.18 \text{ rad/s}$$

$$P_{llanta} = 105 \text{ W} = 0.14 \text{ hp}$$

Los elementos capaces de proveer movimiento a la silla de ruedas son los motores. Se utilizan cuatro, debido a la necesidad de manipular independientemente cada una de las llantas para la configuración mecanum.

Para la selección de un motor adecuado, se toman los datos previamente calculados. La potencia total de 420 W, con una distribución para cada motor de 105 W y un valor de velocidad aproximado a 40 rpm.

Por tal razón, el motor que cumple con los requerimientos anteriores es el *NPC – 2212*. Es un motor resistente y versátil que cuenta con un reductor de engranes que permite adaptar la velocidad y potencia mecánica requerida en el proyecto.



**Figura 35.** Motor NPC-2212

Fuente: (NPC Robotics, 2011)

**Tabla 13**

*Características del Motor NPC-2212*

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje	12 V
Velocidad	285 rpm
Relación de transmisión	21: 1
Peso	5.1lb (2.31 kg)

Fuente: (NPC Robotics, 2011)

### **3.6. Construcción de los componentes mecánicos de la silla de ruedas.**

Una vez seleccionados los parámetros de diseño, el material de construcción y las dimensiones de los perfiles que forman la estructura de la silla de ruedas, se procede a su construcción.

### 3.6.1. Construcción del Asiento

El asiento está regido netamente a los parámetros de diseño, cuenta con dimensiones que le permiten a la silla pasar por cualquier puerta, pero a la vez proporciona comodidad al usuario. En la Figura 36 se ilustra su construcción. También se implementó dos reposabrazos.

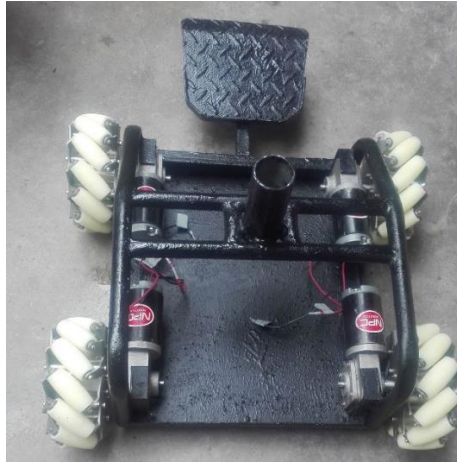


**Figura 36** Construcción del asiento

### 3.6.2. Construcción de la Estructura

Es la parte más analizada debido a la carga que reposa sobre esta, se construye de perfiles de acero ASTM A36 seleccionado previamente.

A esta construcción se le suma las llantas mecanum escogidas y el reposapiés como se aprecia en la Figura 37.



**Figura 37.** Construcción de la estructura

Por cuestiones de seguridad para los circuitos de control y estética se fabricó una tapa de fibra de vidrio que recubre toda la estructura.



**Figura 38.** Construcción de la tapa de fibra de vidrio

El diseño de la silla de ruedas omnidireccional es modular y su ensamble consta de dos partes asiento y estructura el cual se realiza mediante una columna por medio de un tornillo de mariposa, con un peso equivalente a 30 kg, la construcción de la parte mecánica se observa en la Figura 39.





**Figura 39.** Construcción de la silla de ruedas omnidireccional

## CAPÍTULO IV

# DISEÑO ELECTRÓNICO DE LA SILLA DE RUEDAS OMNIDIRRECCIONAL

El funcionamiento de la silla de ruedas omnidireccional está ligado directamente a la implementación del diseño electrónico, es por eso que en este capítulo se estudian las características e interacción de los elementos electrónicos implicados en el control.

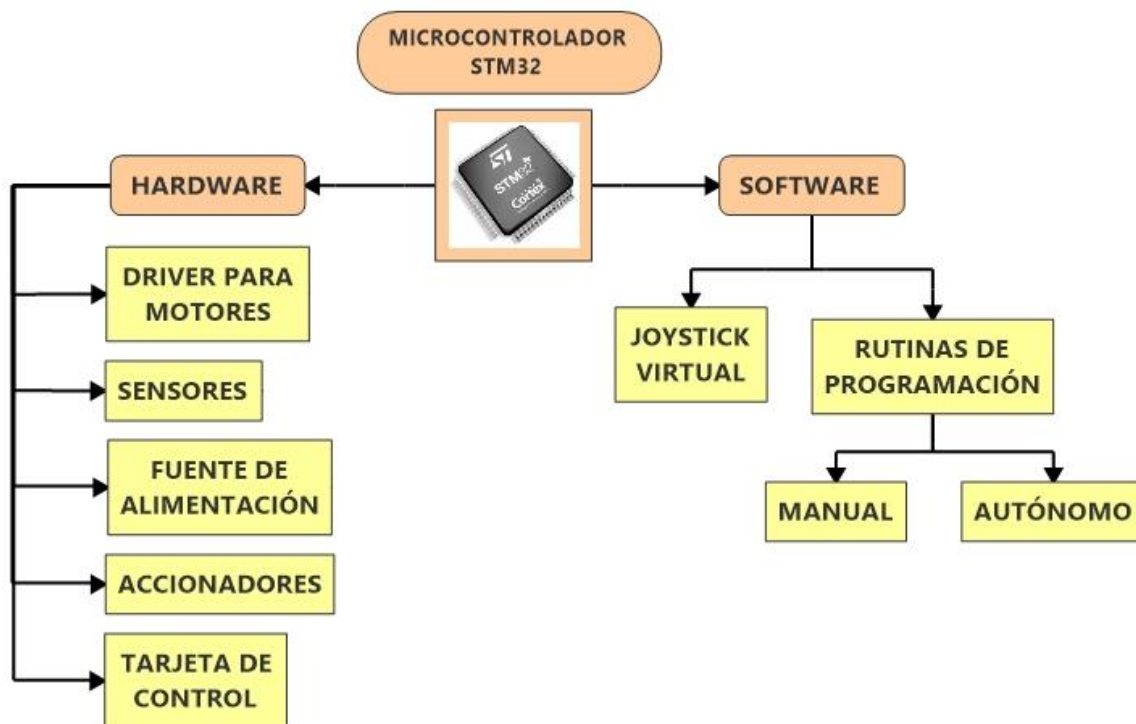
Se tiene como punto de partida la especificación del sistema de control, el mismo que consta de dos controladores, uno para el mando manual y el segundo para el autónomo. Ambos controladores pueden ser seleccionados por el usuario mediante el Joystick virtual gracias a una aplicación en celulares Android.

A continuación, se realiza la comunicación mediante el microcontrolador STM32F407 hacia los sensores y actuadores para ejecutar los desplazamientos especificados por el usuario, como se ilustra en el diagrama de bloques abstracto de la Figura 40.



**Figura 40.** Diagrama de bloques abstracto del sistema

En la Figura 41, se puede observar que el microcontrolador es el responsable del enlace entre el hardware y software, es decir, entre la programación realizada tanto para el control manual, como para el control autónomo; con los elementos electrónicos como: sensores, accionadores, tarjeta de control, etc.



**Figura 41.** Diagrama de bloques del sistema electrónico

Cada uno de los elementos se describe detalladamente a continuación, así como la comunicación del sistema y la implementación del control en la silla de ruedas

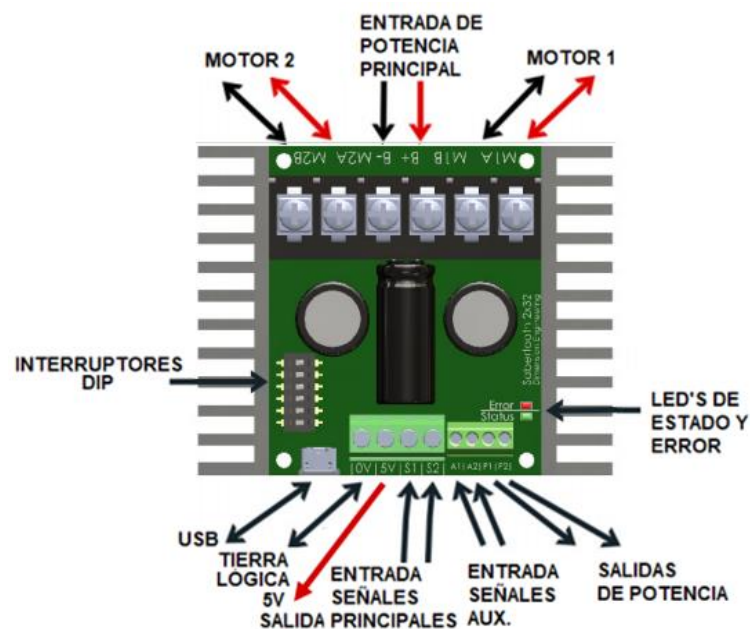
#### 4.1. Hardware

El hardware se compone de varios elementos físicos tales como: driver para motores, sensores, fuente de alimentación, accionadores, módulo bluetooth, tarjeta de control. Los mismos que conjuntamente con el software, permiten el desarrollo del sistema.

#### 4.1.1. Driver para Motores

##### Sabertooth 2x32

Los motores NPC-2212 son controlados mediante la tarjeta Sabertooth 2x32, debido a su capacidad de controlar dos motores a la vez, además puede suministrar 32 A por motor, y dentro de su modo operativo resulta robusto, flexible, potente y de fácil uso, sus componentes y terminales se muestran en la Figura 42.



**Figura 42.** Distribución de terminales de Sabertooth 2x32

Fuente: (Dimension Engineering, 2016)

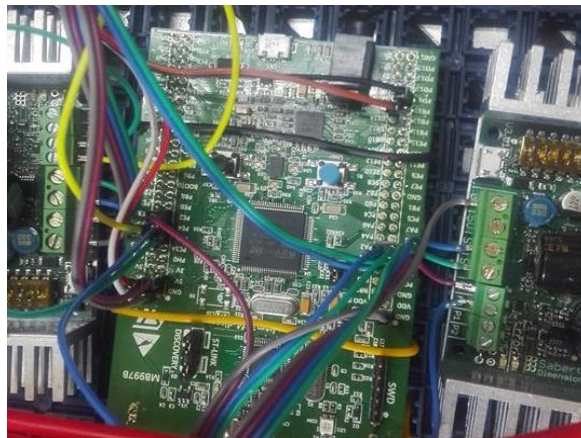
La entrada de alimentación principal que posee el driver, se encuentra en los terminales B+ y B- y admite una fuente de alimentación o batería desde 6V a 33.6V, además posee terminales con una conexión a tierra lógica de 0V y una salida de 5V que permite alimentar circuitos adicionales.

La conexión del Motor 1 se realiza en los terminales M1A y M1B y el Motor 2 en M2A y M2B, debido a la independencia de motores que presenta la configuración mecanum, son necesarios dos drivers ya que cada uno se encarga del control de dos motores.

Las entradas de señales principales admiten la conexión de señales analógicas, serie o R/C. Las entradas auxiliares se utilizan en caso de adicionar un control, y las salidas de potencia se conectan a cargas de potencia moderadas.

El Sabertooth 2x32 posee seis interruptores DIP que admiten configurar el modo de operación del driver, el cual permite cuatro principales modos de control, tales como: analógico, radio, serie, USB y un modo de usuario especial.

En el presente proyecto se empleó el modo serie para controlar el Sabertooth 2x32, el cual recibe comandos seriales desde el microcontrolador STM32F407, las conexiones respectivas se realizan a los terminales S1 y S2 del driver, con los pines seriales TX y RX del microcontrolador respectivamente, además proporciona una salida de 5V para alimentar al microcontrolador.



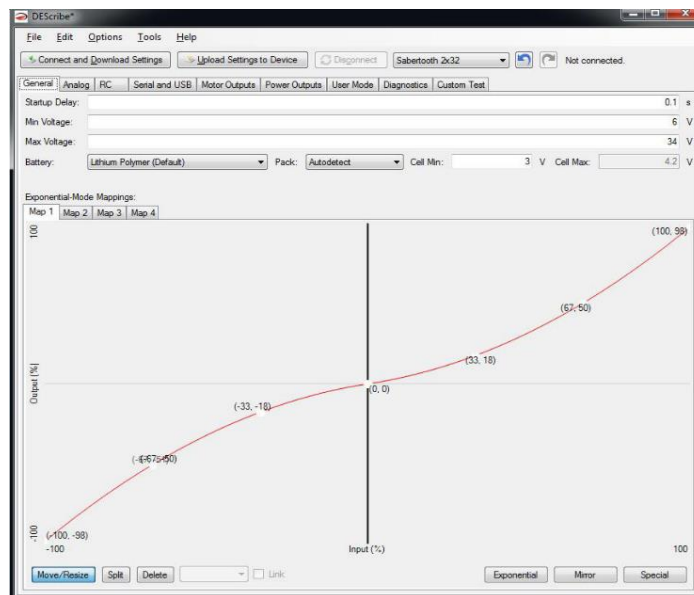
**Figura 43.** Microcontrolador conectado a dos Sabertooth 2x32

La configuración de los interruptores DIP en modo serie se obtiene como se muestra en la Figura 44, con la opción de configurar el driver por comandos en serie de paquete o serie en texto plano, a los cuales responde automáticamente el driver.



**Figura 44.** Configuración del interruptor DIP en modo serie  
Fuente: (Dimension Engineering, 2016)

Para realizar la configuración del controlador Sabertooth 2x32 se requiere del software DEDscribe que permite modificar, monitorear, ajustar y actualizar los controladores previamente descritos que se usan en el motor, se muestra en la Figura 45 una pestaña general del software.



**Figura 45.** Pestaña general de configuraciones para Sabertooth 2x32

#### 4.1.2. Sensores

Tanto para el mando manual o autónomo de la silla de ruedas, es necesario la adquisición de datos que los sensores proveen.

Los sensores empleados en el proyecto son de línea y de distancia. Estos cumplen funciones específicas, como la detección de la trayectoria y de un posible obstáculo en la trayectoria.

En esta etapa como se observa en la Figura 46, se realiza una conexión de los sensores a su alimentación de 3.3 voltios para el envío de datos hacia el microcontrolador STM, que se encarga de tomar decisiones de acuerdo a los resultados que muestran estos.



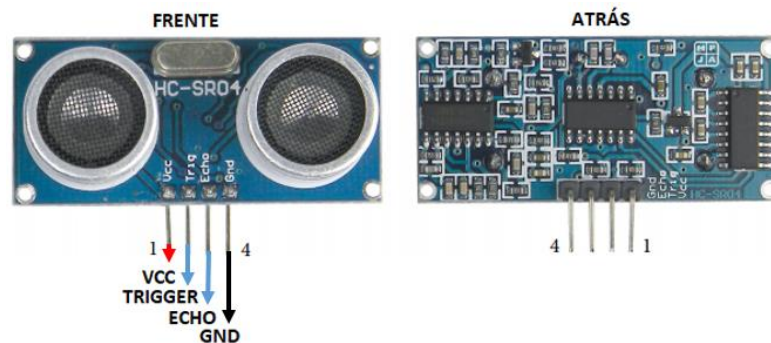
**Figura 46.** Diagrama de bloques de la adquisición de datos

Los sensores de línea permiten que el mecanismo se mueva sin interacción del usuario, de acuerdo a una trayectoria, previamente proyectada en el suelo del espacio a ocupar, mientras que el sensor de distancia se encarga de detectar algún obstáculo en el trayecto y evitar que colisione el dispositivo, enviando una señal para que todo el sistema se detenga.

##### 4.1.2.1. Sensor Ultrasónico HC-SR04

Los sensores ultrasónicos realizan la detección de objetos por medio de sonido, con el afán de obtener la distancia entre el emisor y el objeto más cercano que se

encuentre en su trayectoria, el sensor utilizado en el proyecto es el HC-SR04 como se observa en la Figura 47, se encarga de enviar una onda sonora a una determinada frecuencia, la cual rebota en el objeto y vuelve hacia el sensor, las características del sensor se muestran en la Tabla 14.



**Figura 47.** Sensor ultrasónico HC-SR04

Fuente: (Elijah J. Morgan, 2014)

**Tabla 14**

*Características sensor ultrasónico HC-SR04*

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Fuente de alimentación	5V DC
Corriente de trabajo	15 mA
Rango de distancia	2400 cm
Resolución	0.3 cm
Ángulo de medición	30°
Peso	10 gr.

Fuente: (Elijah J. Morgan, 2014)

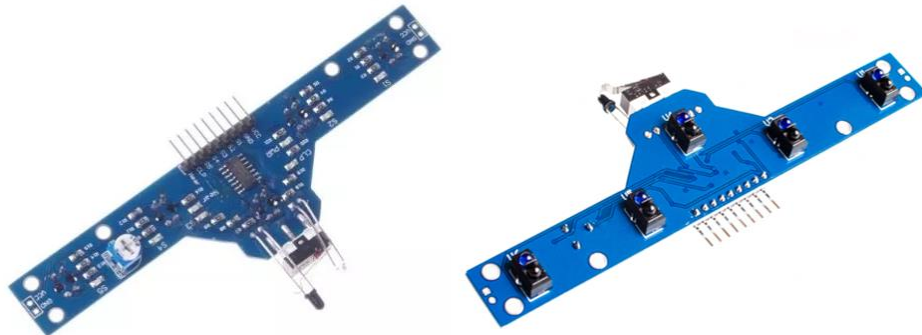
#### 4.1.2.2. Sensor seguidor de línea de 5 canales

Se opta por utilizar el módulo denominado sensor de línea de 5 canales como se muestra en la Figura 48, el cual posee 4 sensores de línea que se encargan del



seguimiento espaciado horizontal, 1 sensor de seguimiento colocado en el centro para la detección de líneas cruzadas.

Debido a las dimensiones que presenta la silla de ruedas omnidireccional se colocan dos módulos, para que adquiriera una mejor detección en los cambios de trayectoria.



**Figura 48.** Sensor seguidor de línea de 5 canales  
Fuente: (Electronics, 2018)

#### 4.1.3. Fuente de Alimentación

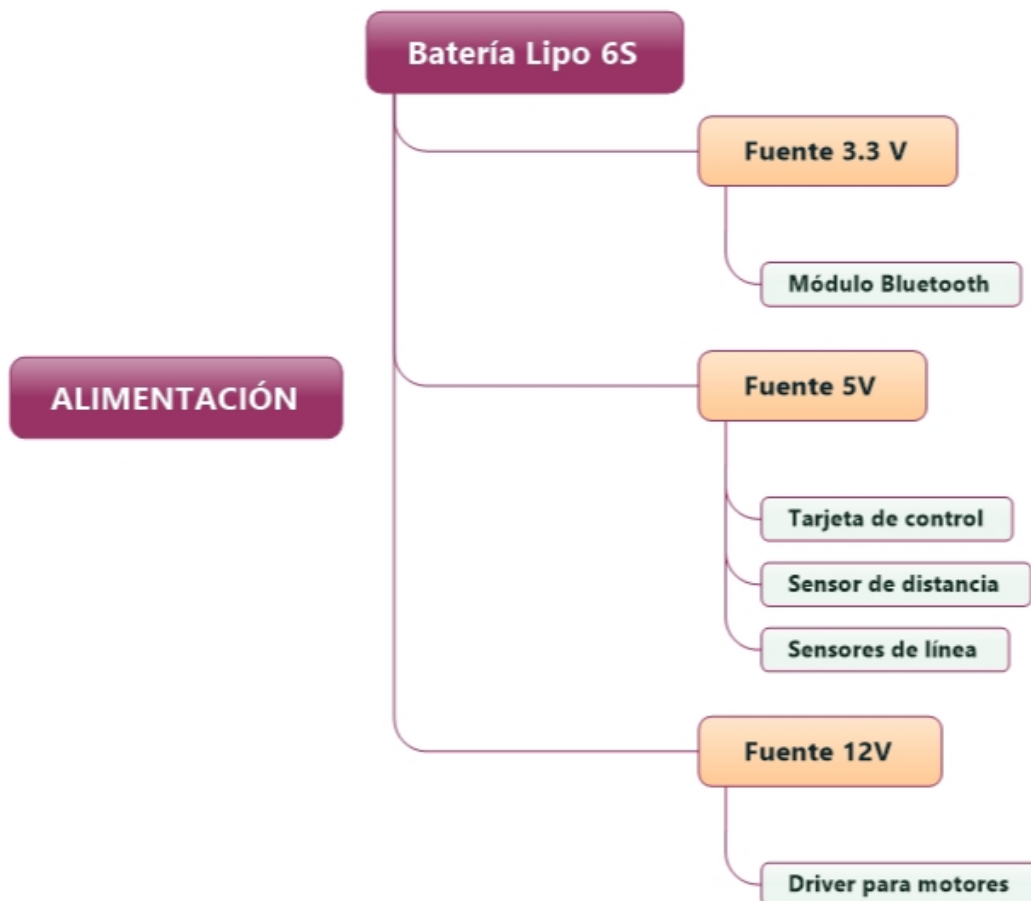
La silla de ruedas omnidireccional posee varios componentes que requieren de un voltaje y consumo de corriente predeterminado para funcionar, entre estos: motores, sensores y el microcontrolador STM32F407 Discovery.

Para la alimentación de todo el sistema se utiliza una batería Li-Po ilustrada en la Figura 49, que tiene la característica de ser recargable y puede almacenar una gran cantidad de energía, las características se describen en la Tabla 15.



**Figura 49.** Batería LIPO 6 celdas  
Fuente: (Hobbyking, 2019)

Dado el número de componentes electrónicos que conforman el control, se emplea una batería de 6 celdas como se ilustra en la Figura 50.



**Figura 50.** Diagrama de fuente de alimentación

**Tabla 15**  
*Características de batería LIPO 6SP1*

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje	22.2 V
Corriente	5000 mA
Número de celdas	6 celdas
Factor de descarga	20 – 30 C
Peso	805 g
Dimensiones	144x51x56mm

Fuente: (Hobbyking, 2019)

#### 4.1.4. Accionadores

##### 4.1.4.1. Breaker de Encendido/Apagado

La implementación del breaker es con la finalidad de proteger al sistema electrónico, así como, de controlar el paso de la corriente para el encendido y apagado de la silla de ruedas. Ver Figura 51.



**Figura 51.** Breaker 32 A

Fuente: (DETA, 2019)

La selección del breaker se realizó en base al amperaje total que consumen todos los componentes con objeto de garantizar su eficacia. En la Tabla 16 se observa que el amperaje seleccionado corresponde a 32 A.

**Tabla 16**  
*Características de Breaker 32 A*

CARACTERÍSTICA	VALOR
Amperaje	32 A
Voltaje	250 V
Dimensiones	17.5x 73 x 83 mm

Fuente: (DETA, 2019)

#### 4.1.4.2. Paro de Emergencia

Para la prevención de posibles fallos al sistema, se implementó un accionador de seguridad, que funciona como paro de emergencia. El mismo que está compuesto por dos estados:

- Accionado: Paro total del sistema, impidiendo el control por medio del Joystick.
- Liberado: Permite el accionamiento del sistema y la maniobrabilidad mediante el Joystick virtual.

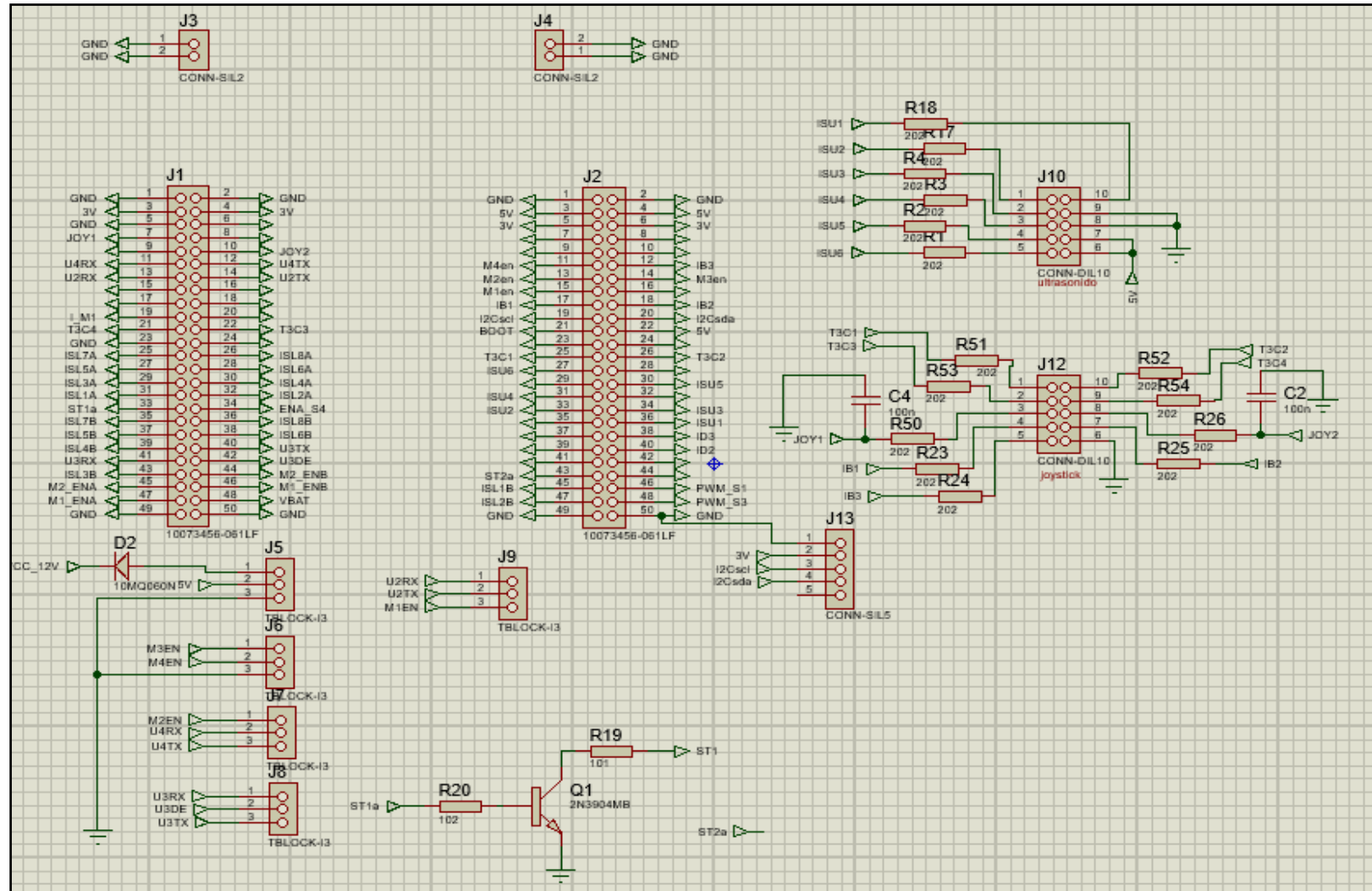
Está ubicado estratégicamente sobre uno de los reposabrazos, como se observa en la Figura 52, para que sea de fácil acceso al usuario en caso de que este lo requiera.



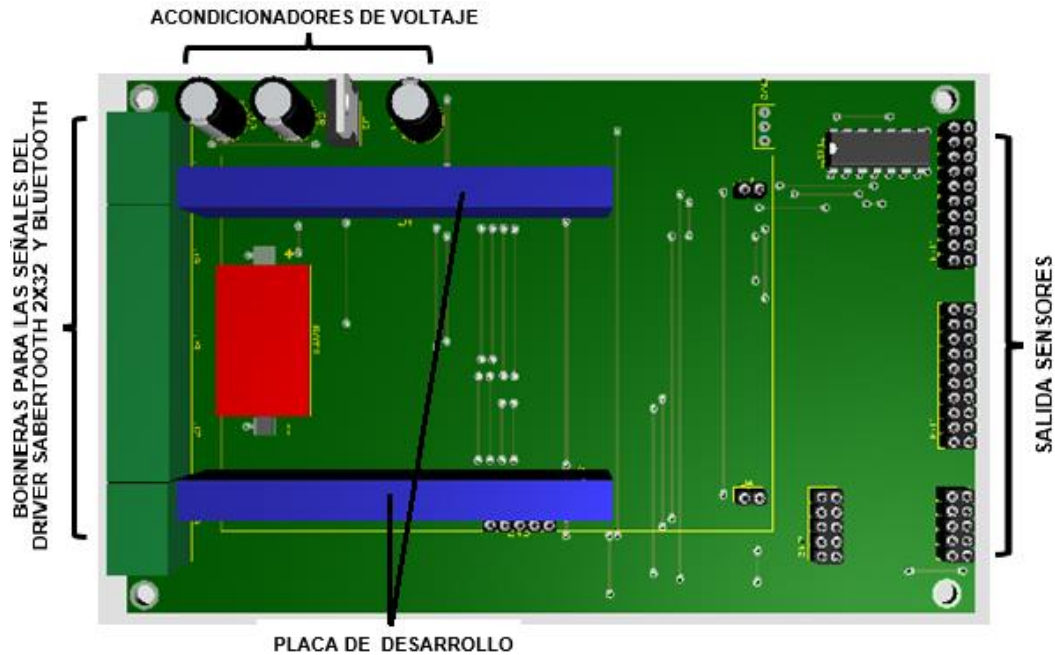
**Figura 52.** Paro de emergencia

#### **4.1.5. Tarjeta de Control**

La Tarjeta es la parte central del control electrónico. Su diseño se lo realizó por medio del software Proteus, considerando las dimensiones que debe ocupar en la silla de ruedas omnidireccional y con el objetivo de acondicionar las señales para el correcto funcionamiento del microcontrolador, drivers y sensores. El circuito electrónico que realiza todas las aplicaciones se muestra en la Figura 53 y a continuación se realiza el diseño del PCB de la placa con los componentes a utilizar como se observa en la Figura 54.



**Figura 53.** Circuito electrónico de la tarjeta acondicionadora de los sensores, drivers y microcontrolador.



**Figura 54.** Diseño 3D del PCB, Tarjeta de control

## 4.2. Software

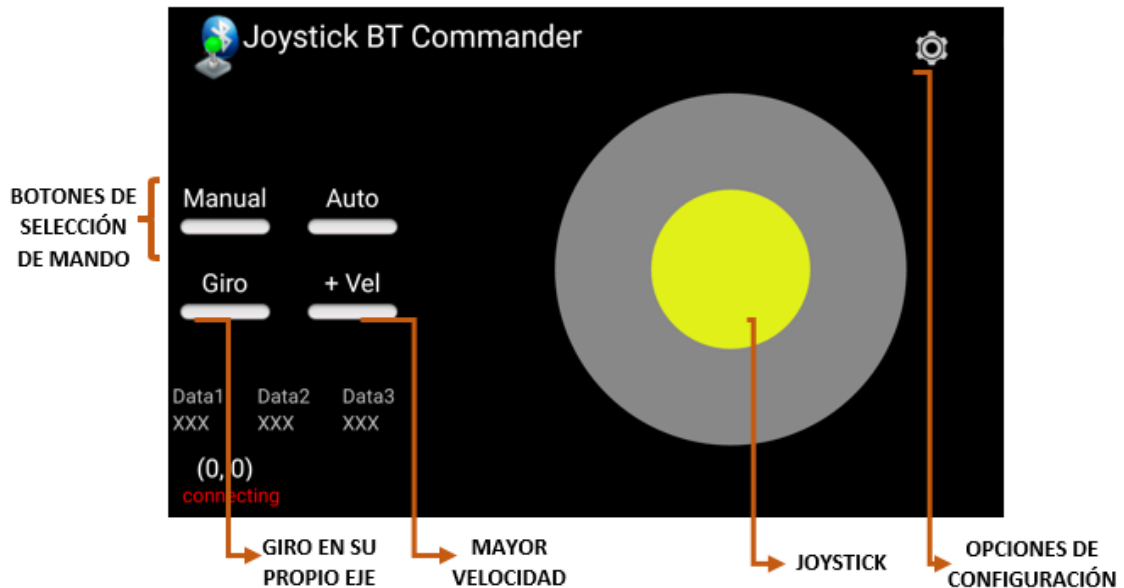
La sinergia entre el software y el hardware es lo que hace posible la interacción de la silla de ruedas omnidireccional con el usuario y, por ende, el movimiento de esta por las distintas trayectorias deseadas.

Al hablar de software se abarca a los códigos, rutinas de programación y dispositivos programables. Aquellos son los responsables de enviar las órdenes a la tarjeta de control para la posterior ejecución de los componentes mecánicos como motores y llantas.

### 4.2.1. Joystick Virtual

El mando de control que se seleccionó para ejecutar los movimientos de la silla de ruedas omnidireccional es un joystick virtual, este controlador se encuentra disponible mediante una aplicación móvil en la tienda Play Store y es accesible para los usuarios de Android.

La aplicación se denomina Joystick BT Commander y se puede observar en la Figura 55; está disponible para ciertos dispositivos móviles como Smartphones o Tablets.



**Figura 55.** Aplicación joystick silla de ruedas omnidireccional

La configuración de la aplicación se realizó de acuerdo a las necesidades que presenta el control de la silla de ruedas.

Se ingresaron diferentes botones:

- Selección de mando: manual y autónomo
- Activar o desactivar el giro en su propio eje.
- Mayor velocidad.

Para un mejor desenvolvimiento del joystick se configura el movimiento “activar el auto retorno al centro”, que ayuda a detener la silla de ruedas en el caso de que el usuario deje de comandar el joystick.



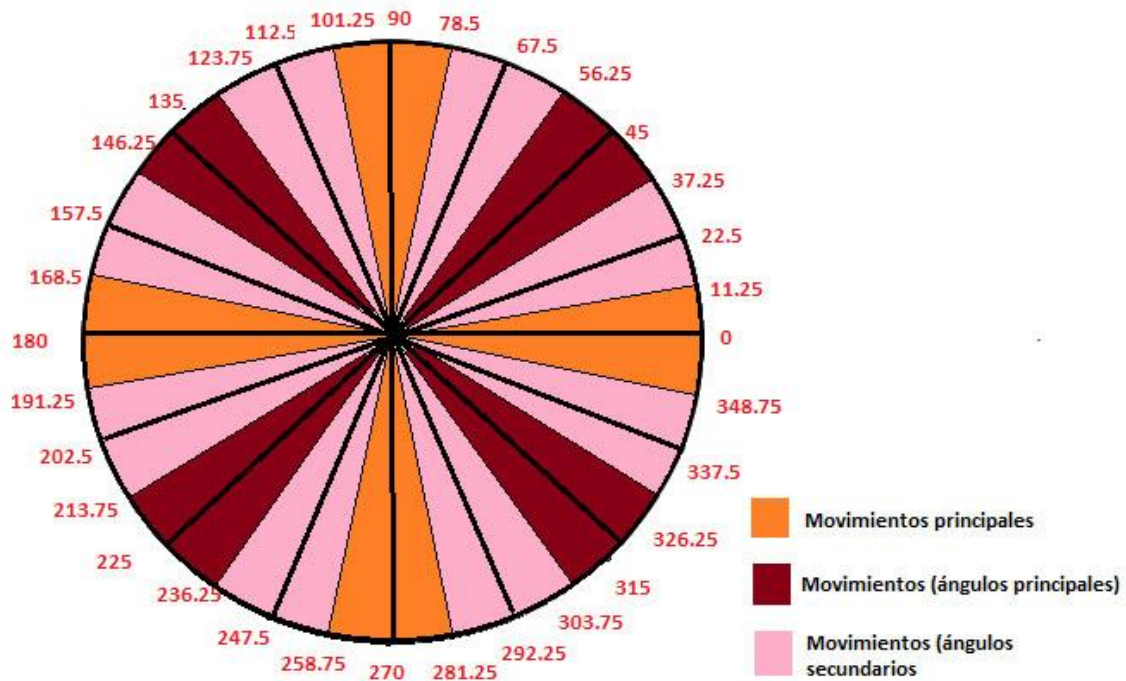
Las opciones de configuración que posee la aplicación son:

- Conexión mediante bluetooth entre el sistema y dispositivo.
- Opciones para configurar las propiedades de botones y joystick.
- Opción de reseteo a configuraciones de fábrica

#### 4.2.2. Rutinas de Programación

##### 4.2.2.1. Manual

En el modo manual, la silla de ruedas posee la capacidad de trasladarse en torno a 360° de acuerdo a la locomoción omnidireccional, en el presente proyecto se realizan las rutinas de programación para diferentes direcciones de desplazamiento como se observa en la Figura 56.



**Figura 56.** Direcciones de desplazamiento de la silla de ruedas.

De acuerdo al estudio de la cinemática del movimiento omnidireccional realizado en la sección 3.1 , se procede a configurar las velocidades de cada rueda para conseguir las direcciones previamente descritas.

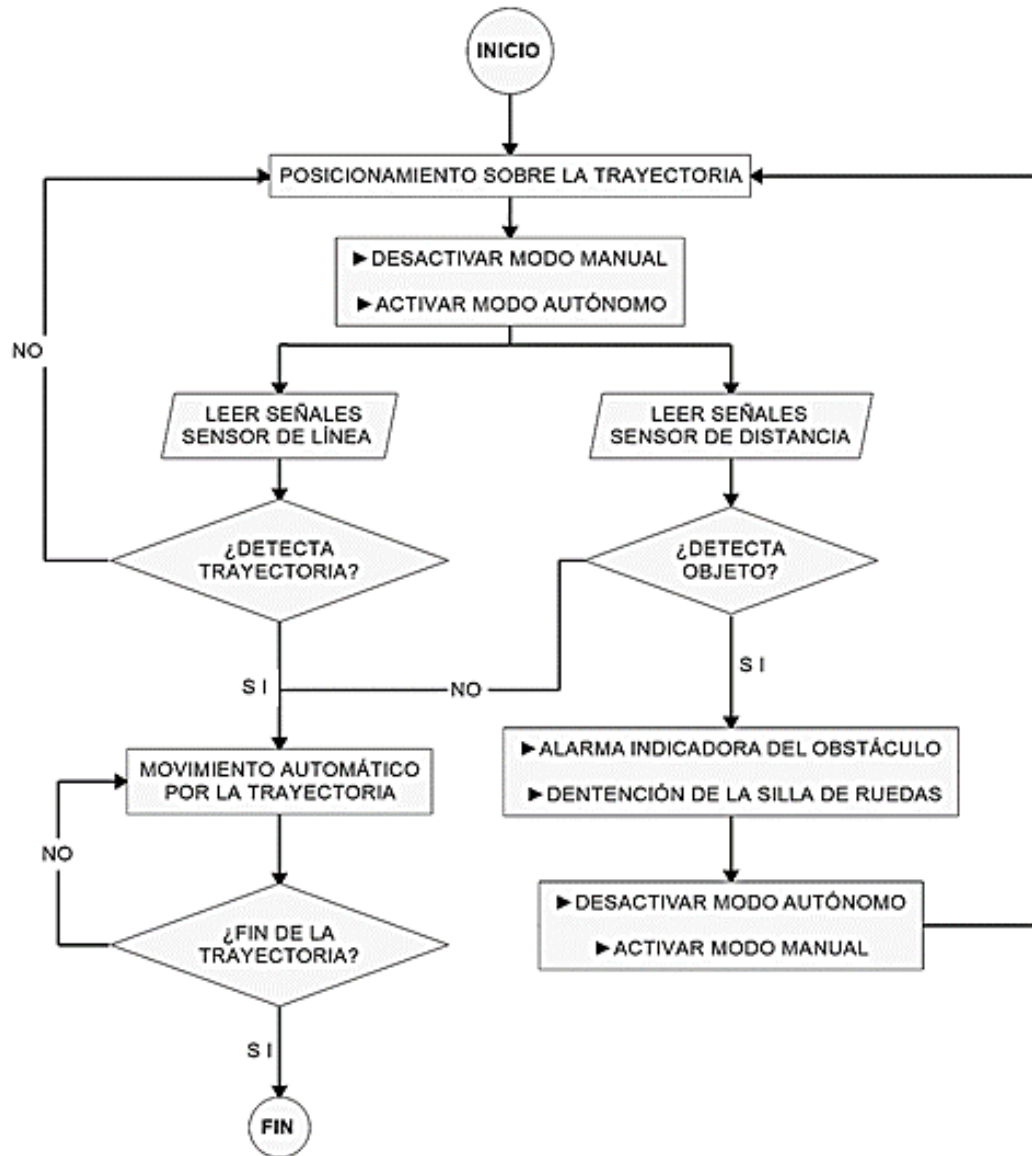
Mediante la aplicación del joystick virtual se consigue el control de la silla de ruedas y es necesario habilitar el modo manual para conseguir el movimiento que requiera el usuario.

Una de las características principales que proporciona el movimiento omnidireccional, es el giro en su propio eje, es por esto que la silla de ruedas cuenta con una opción de giro ya sea en sentido horario o antihorario sobre su propio eje, movimientos que se consiguen mediante la activación del botón “Giro” y “Manual” al mismo tiempo, acompañados del movimiento del joystick en el sentido deseado.

#### **4.2.2.2. Autónomo**

En el modo autónomo, se realizaron rutinas de programación entorno al seguimiento de una trayectoria establecida y detección de obstáculos, tomando en cuenta que el sensor de línea realiza un control proporcional, el cual se encarga de verificar en un determinado tiempo que el direccionamiento de la silla de ruedas permanezca a lo largo de la trayectoria.

Para observar el funcionamiento del control autónomo se procede con el siguiente proceso como se ilustra en el diagrama de flujo de la Figura 57.



**Figura 57.** Diagrama de flujo del mando en modo autónomo

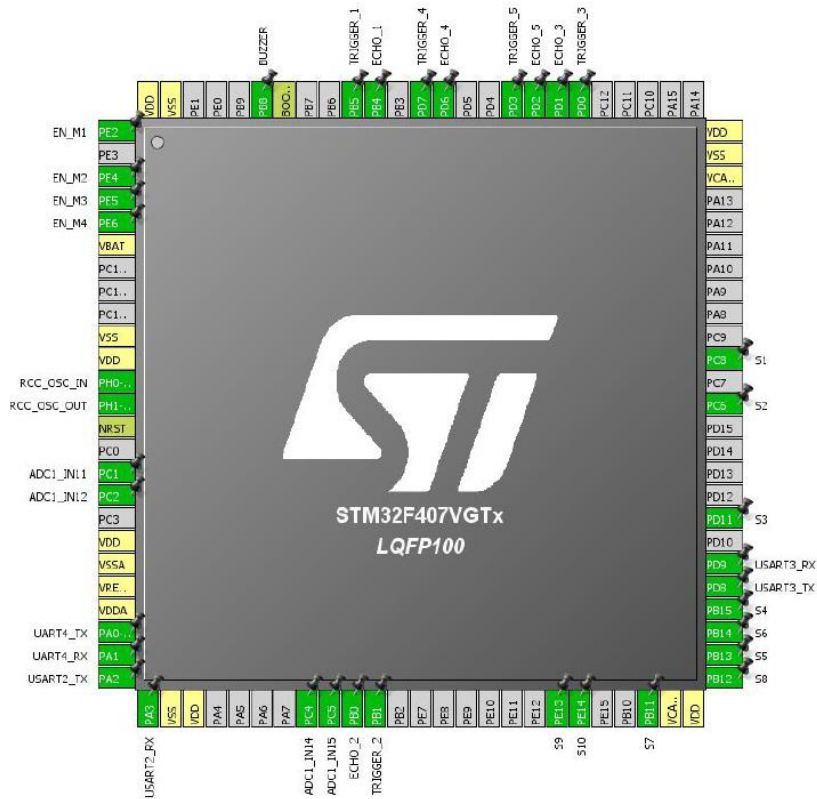
### 4.3. Microcontrolador STM 32

Para poder controlar los elementos que conforman la silla de ruedas omnidireccional es necesario implementar un microcontrolador STM32F407 el cual se encarga de accionar el sistema o parte del mismo de acuerdo a las necesidades que presente el entorno.

Este microcontrolador presenta mayores ventajas en comparación con otros como PIC o AVR, debido a su operación a alta velocidad y capacidad, brindando un rendimiento ideal para el proyecto.

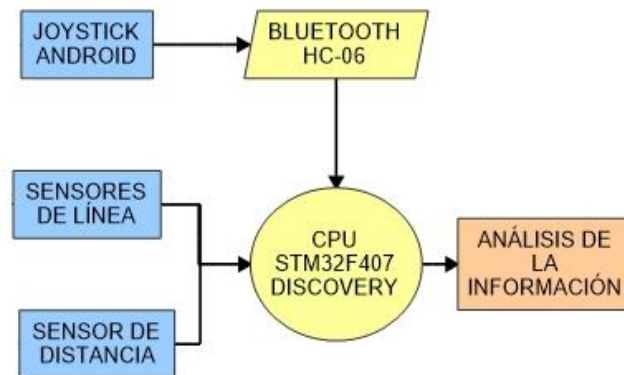
Mediante el programa STM32CubeMX se puede realizar la configuración y distribución de pines para la correcta programación del CPU STM32F407 Discovery, en donde se colocan las diferentes entradas y salidas ya sean analógicas o digitales que se usarán para desarrollar la aplicación.

En la Figura 58 se pueden observar los pines utilizados para la respectiva programación del sistema, estos se marcan en color verde cuando se encuentran en uso.



**Figura 58.** Distribución de pines utilizados

Lo primero en seleccionarse son las entradas analógicas para recibir información de los sensores de línea y el sensor de distancia. Después las salidas de los cuatro motores y una entrada para el bluetooth que se encarga de transmitir información de la aplicación del joystick virtual. En la Figura 59 se observa el diagrama de la recepción y envío de señales al microcontrolador.



**Figura 59.** Diagrama de bloques de las señales hacia el microcontrolador

#### 4.3.1. Métodos de programación del microcontrolador STM 32

Existen varios recursos que ofrece el microcontrolador STM en cuanto a su programación ya sea esta por sondeo, interrupciones o DMA. Como se observa en la Tabla 17.

**Tabla 17**

*Tipos de recursos de programación del microcontrolador STM 32*

TIPO DE RECURSO	CARACTERÍSTICAS
<b>Programación por Sondeo</b>	-Permite programar instrucciones que se realizarán de manera consecutiva de arriba hacia abajo. -Suele complicar el uso del microcontrolador en algunas aplicaciones que se necesitan de su transcurso al mismo tiempo.

**CONTINÚA** 

<b>Programación por Interrupciones</b>	-Mediante subrutinas este recurso ofrece una interrupción ya sea interna o externa. Al final del subproceso regresa al punto exacto del programa principal que se encontraba ejecutando.
<b>Programación por DMA</b>	-Controla los periféricos y transfiere su información directamente como USART y ADC a las memorias o viceversa. -Es posible combinar este tipo de programación con ciertas interrupciones.

Fuente: (Salazar Espinoza, 2016)

Para la programación del microcontrolador STM 32, se opta por utilizar estos tres recursos debido a la ventaja que presenta cada uno considerando la optimización del microcontrolador, que ayuda a realizar las diferentes tareas y protege los datos del sistema.

El controlador STM32F407 brinda un beneficio de núcleo Cortex-M4 que posee la unidad de punto flotante, facilitando las aplicaciones direccionables ya que aumentan su rango de manejo.

#### **4.3.2. Timers**

Se cuenta con 17 temporizadores, cada uno posee diferente modo de operación y utilidad. Para el presente control se utilizan los Timers 1,7, y 14, para el cálculo de la dirección, actualizar las velocidades y ángulo de los motores; y captar las señales del sensor de distancia respectivamente.

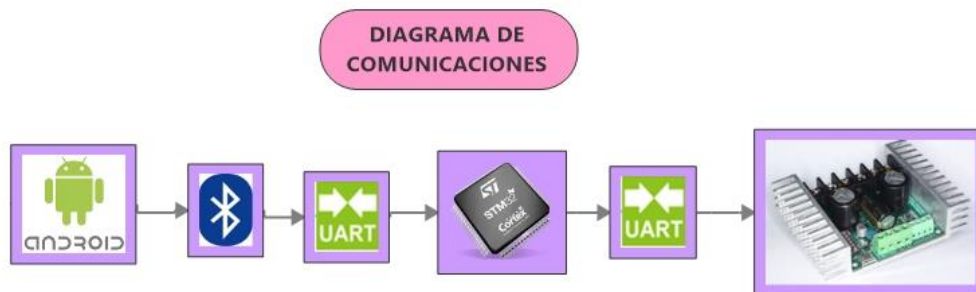
Para la configuración de los timers se procede a registrar los diferentes parámetros como son: Prescaler y Counter Period, para que cumplan conjuntamente con la frecuencia requerida.

### 4.3.3. Puertos GPIO

Se configuran los pines para entradas y salidas en el microcontrolador. Como entradas se tiene el paro de emergencia que ayuda a detener el movimiento de la silla de ruedas omnidireccional, y en las salidas dos puentes H, que permiten controlar el sentido de giro de los motores, a estos componentes se los designa de la siguiente manera: S1, S2, S3, EN\_M1, EN\_M2, EN\_M3, EN\_M4.

### 4.4. Comunicación del sistema

El control del sistema es por medio de un joystick virtual mediante la aplicación Joy BT Comander descrita previamente. Al ser un dispositivo virtual es necesario integrar un módulo de comunicación que realice la conexión entre el dispositivo Android y la tarjeta controladora. Como se ilustra en la Figura 60.



**Figura 60.** Diagrama de comunicaciones del sistema

La comunicación seleccionada para formar parte del control de la silla es el módulo Bluetooth HC-06 por sus características acorde a distancia, costos y efectividad en dispositivos celulares.

El módulo HC-06, es un dispositivo que permite conectividad inalámbrica entre una PC o Smartphone y microcontroladores como arduino o PIC.



**Figura 61.** Módulo Bluetooth HC-06

Fuente: (Mechatronics, 2019)

Entre las características principales del módulo HC-06 es su configuración, la cual viene predeterminada para trabajar como esclavo esperando captar alguna señal enviada por el otro dispositivo de conexión. El resto de características de operación se describe en la Tabla 18.

**Tabla 18**

*Características de Módulo Bluetooth HC-06*

CARACTERÍSTICA	VALOR
Voltaje de Operación	3.3 V / 5V
Corriente de Operación	< 40 mA
Alcance	10 metros
Velocidad de Transmisión	1.2 Mbps hasta 1.3Mbps
Interfaz	Puerto serial UART TTL

Fuente: (Mechatronics, 2019)



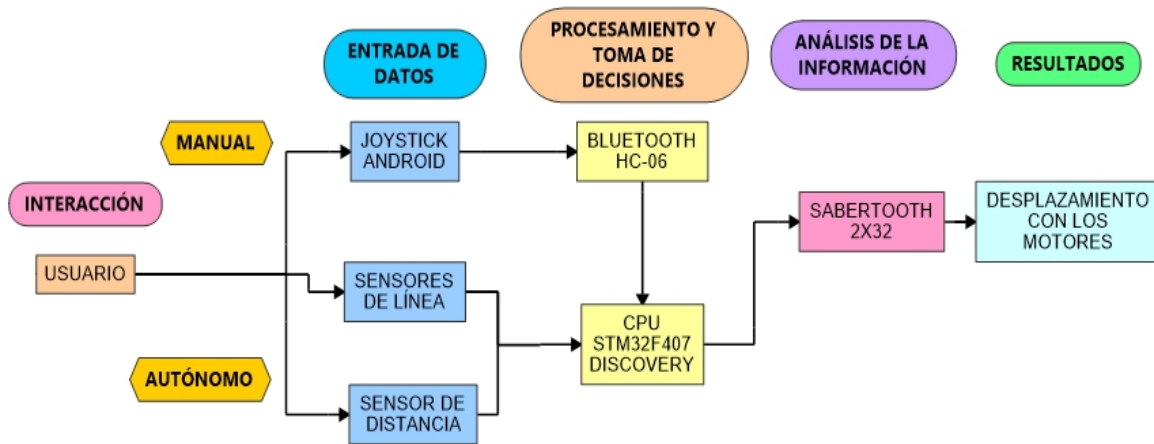


Figura 62. Diagrama de bloques secuencial del sistema

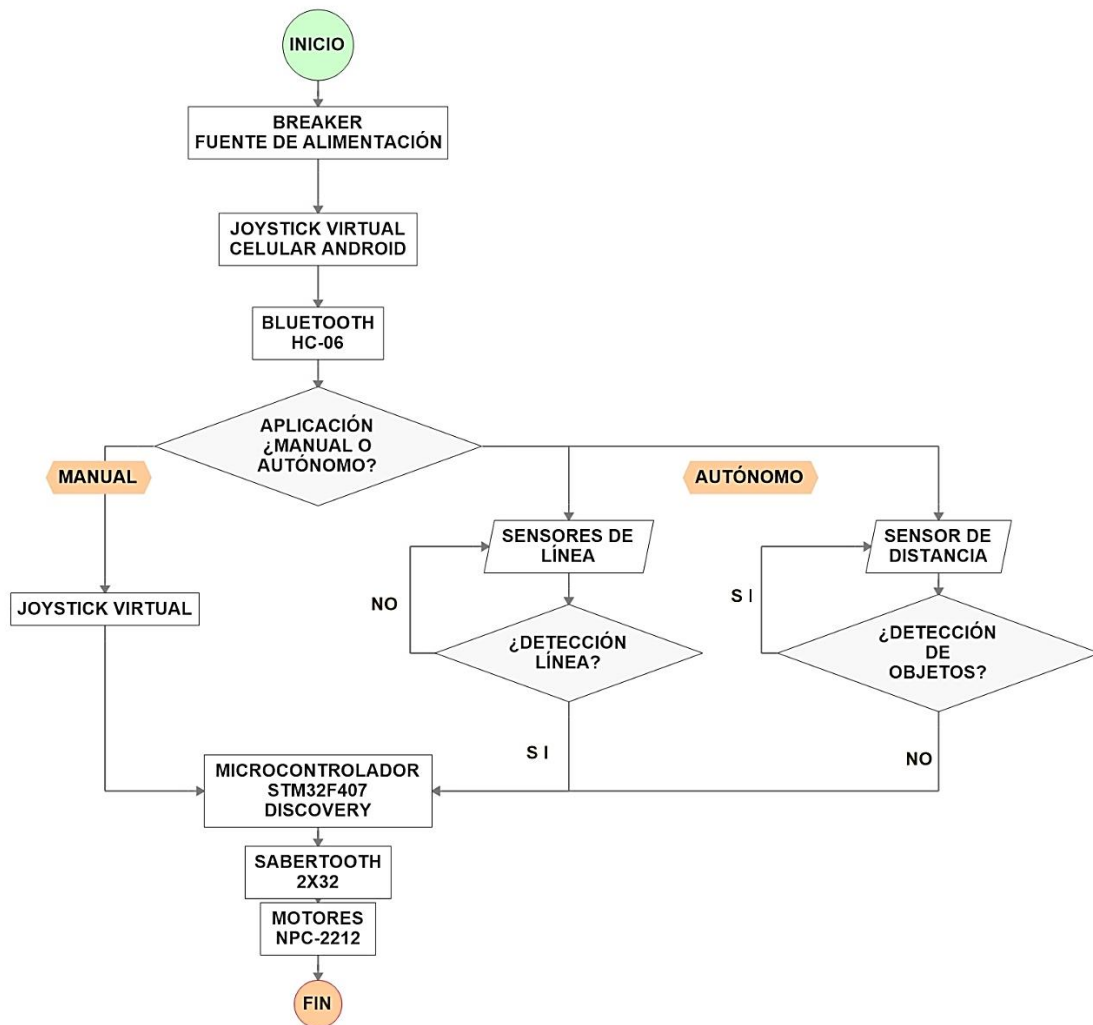


Figura 63. Diagrama de flujo del funcionamiento del sistema

#### 4.5. Implementación del sistema de control

Se procede con la elaboración de la placa PCB en baquelita, se perforó de acuerdo a los pines necesarios y se implementaron los componentes en la tarjeta soldando cada uno de estos para posteriormente instalarlo en el espacio designado dentro de la estructura de la silla de ruedas omnidireccional.



**Figura 64.** Componentes electrónicos integrados en la silla de ruedas

## CAPÍTULO V

### PRUEBAS Y RESULTADOS

Con objetivo de evidenciar que el diseño y la construcción de una silla de ruedas omnidireccional cumple con los objetivos planteados en la sección 1.4, se realizan múltiples pruebas de funcionamiento para obtener datos de velocidad real para el respectivo análisis vs la velocidad calculada; así como la visualización del comportamiento de la silla frente a distintos materiales del piso y a las trayectorias predefinidas para el control autónomo. Cada una de las respuestas de los diferentes tipos de análisis servirá para la validación de la hipótesis estudiada dentro de este capítulo

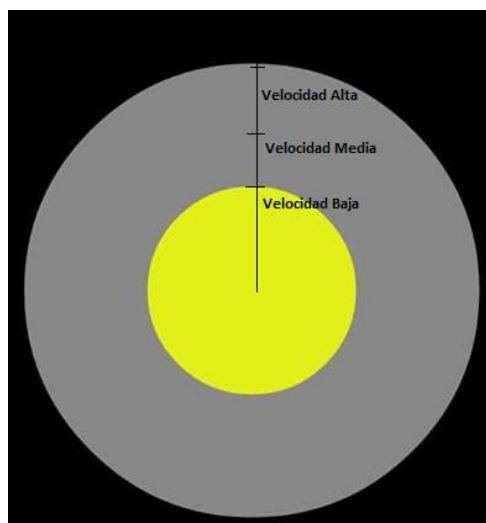
#### **5.1. Movimiento Omnidireccional de la silla de ruedas**

Con anterioridad se estudió cada una de las ecuaciones que rigen al movimiento omnidireccional de un sistema de locomoción omnidireccional tipo mecanum, a continuación, en base a cada uno de los componentes ya escogidos que forman la silla de ruedas, se obtienen los siguientes valores reales. También se contempla la desviación que posee al ejecutar cada una de las direcciones y el funcionamiento de la misma en el mando autónomo.

##### **5.1.1. Cálculo de velocidades de funcionamiento de la silla de ruedas**

Para el cálculo de la velocidad lineal, que es la principal a analizar se aplican distintas pruebas de funcionamiento, es decir se establece una distancia exacta por donde la silla de ruedas se debe desplazar y se toma el tiempo que tarda en recorrer dicha distancia.

La aplicación permite moverse en distintas velocidades según el posicionamiento del joystick virtual como se ilustra en la Figura 65. En las pruebas se realiza con la velocidad al máximo para asegurar la efectividad en el cálculo.

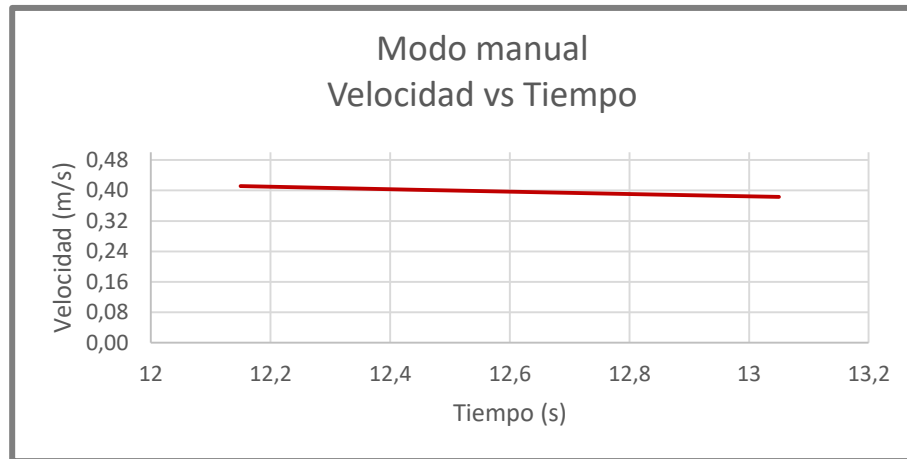


**Figura 65.** Joystick Virtual en la aplicación

**Tabla 19**

*Cálculo de la velocidad de funcionamiento en modo Manual*

DISTANCIA (m)	TIEMPO (s)	VELOCIDAD (m/s)
5	13,05	0,38
5	12,85	0,39
5	12,5	0,40
5	12,40	0,40
5	12,15	0,41
	<b>PROMEDIO</b>	<b>0,40</b>

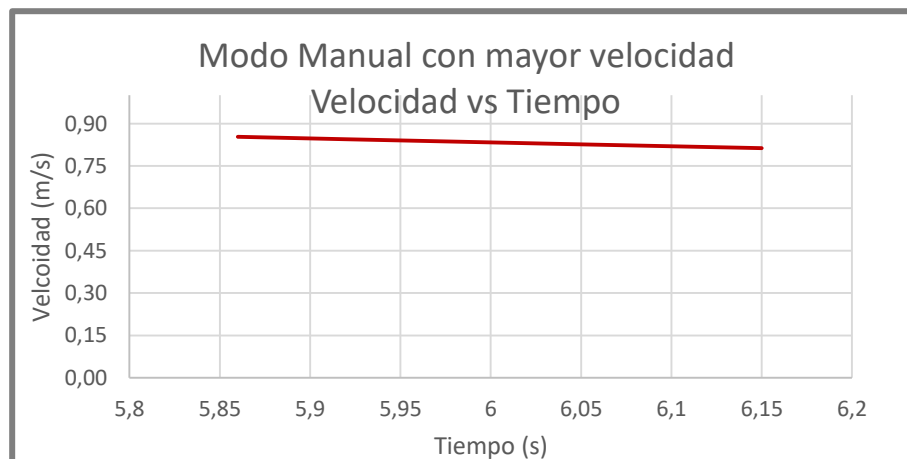


**Figura 66.** Gráfica de velocidad vs tiempo en modo manual

**Tabla 20**

*Cálculo de la velocidad de funcionamiento en mando manual con mayor velocidad*

DISTANCIA (m)	TIEMPO (s)	VELOCIDAD (m/s)
5	6,15	0,81
5	5,92	0,84
5	6,01	0,83
5	6,05	0,83
5	5,86	0,85
<b>PROMEDIO</b>		<b>0,83</b>



**Figura 67.** Gráfica de velocidad vs tiempo en modo manual con mayor velocidad

### **5.1.2. Análisis entre velocidad calculada y velocidad real de la silla de ruedas omnidireccional**

La velocidad obtenida mediante los cálculos de la cinemática omnidireccional es igual a 0,85 m/s, mientras que la velocidad real adquirida en las pruebas de funcionamiento de la silla de ruedas en el “modo manual” con “+Vel” posee un promedio de 0,83 m/s, similar a la velocidad planteada en los parámetros de diseño cumpliendo de esta manera el objetivo planteado.

De la misma manera se tiene un “modo manual” con una velocidad relativamente más baja con respecto a la anterior, con el afán de proporcionar un rango más amplio de velocidad, con un valor promedio de 0,40 m/s.

### **5.1.3. Pruebas de trayectorias libres con control manual.**

#### **5.1.3.1. Trayectoria Plana**

Dentro del control manual se realiza distintas pruebas de funcionamiento entre las que se tiene, prueba con dos diferentes materiales: cemento (rugoso) y mármol (liso) con el objetivo de observar el comportamiento de la silla en las diferentes trayectorias y la velocidad en los mismos. Las pruebas son realizadas en usuarios con un peso diferente uno del otro, para observar si la velocidad se ve afectada por dicho factor.

## a) Cemento

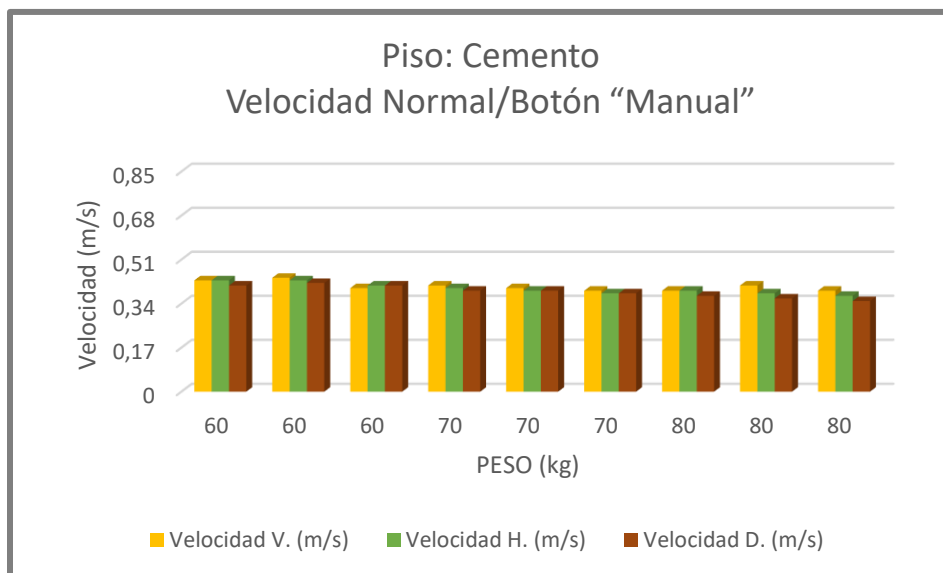


**Figura 68.** Silla de ruedas omnidireccional en el piso de cemento

**Tabla 21**

*Pruebas de trayectorias planas en cemento en modo manual*

Piso: Cemento						
Velocidad Normal/Botón "Manual"						
Distancia (5m)	Vertical		Horizontal		Diagonal	
Peso (kg)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
60	11,53	0,43	11,62	0,43	12,05	0,41
	11,45	0,44	11,71	0,43	11,97	0,42
	12,39	0,40	12,09	0,41	12,33	0,41
70	12,30	0,41	12,48	0,40	12,74	0,39
	12,60	0,40	12,90	0,39	12,85	0,39
	12,80	0,39	13,05	0,38	13,02	0,38
80	12,85	0,39	12,96	0,39	13,56	0,37
	12,33	0,41	13,15	0,38	13,71	0,36
	12,74	0,39	13,65	0,37	14,09	0,35



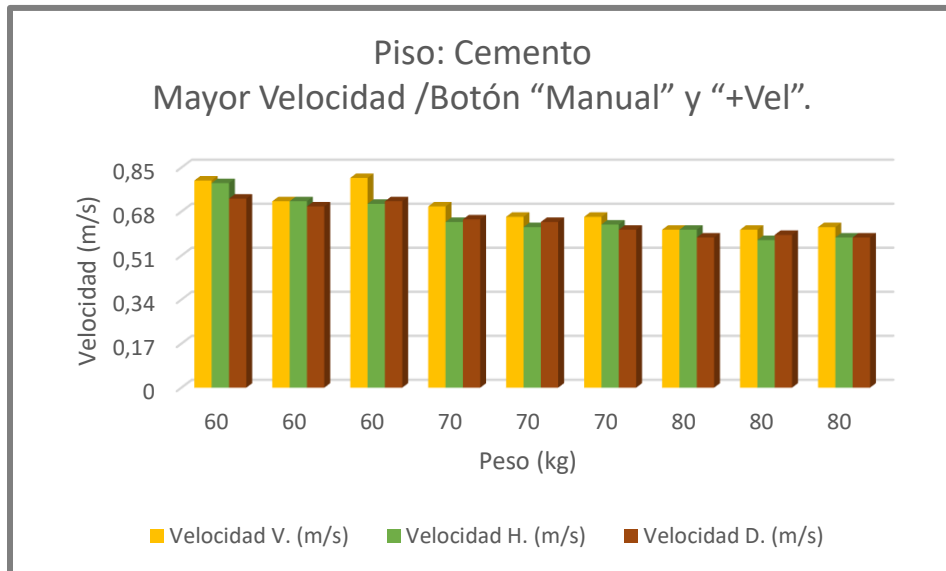
**Figura 69.** Velocidad Vertical, horizontal y diagonal, piso de cemento en modo manual

**Tabla 22**

*Pruebas de trayectorias planas en cemento mayor velocidad*

Piso: Cemento Mayor Velocidad /Botón "Manual" y "+Vel".						
Distancia (5m)	Vertical		Horizontal		Diagonal	
Peso (kg)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
60	6,24	0,80	6,33	0,79	6,85	0,73
	6,92	0,72	6,98	0,72	7,12	0,70
	6,15	0,81	7,02	0,71	6,93	0,72
70	7,13	0,70	7,18	0,64	7,64	0,65
	7,56	0,66	8,05	0,62	7,86	0,64
	7,60	0,66	7,94	0,63	8,15	0,61
80	8,15	0,61	8,23	0,61	8,61	0,58
	8,22	0,61	8,77	0,57	8,47	0,59
	8,05	0,62	8,60	0,58	8,56	0,58





**Figura 70.** Velocidad Vertical, horizontal y diagonal, piso de cemento en modo manual con mayor velocidad

El cemento al poseer cierta rugosidad presenta un coeficiente de rozamiento mayor que se ve reflejado directamente en el cálculo de la velocidad, es decir, en los resultados se observa que la velocidad disminuye con respecto a la objetiva, y de igual manera los desplazamientos presentan un cierto grado de dificultad al momento de empezar la trayectoria debido a la inercia. El peso es un factor que afecta directamente en la velocidad de la silla de ruedas omnidireccional.

## b) Mármol

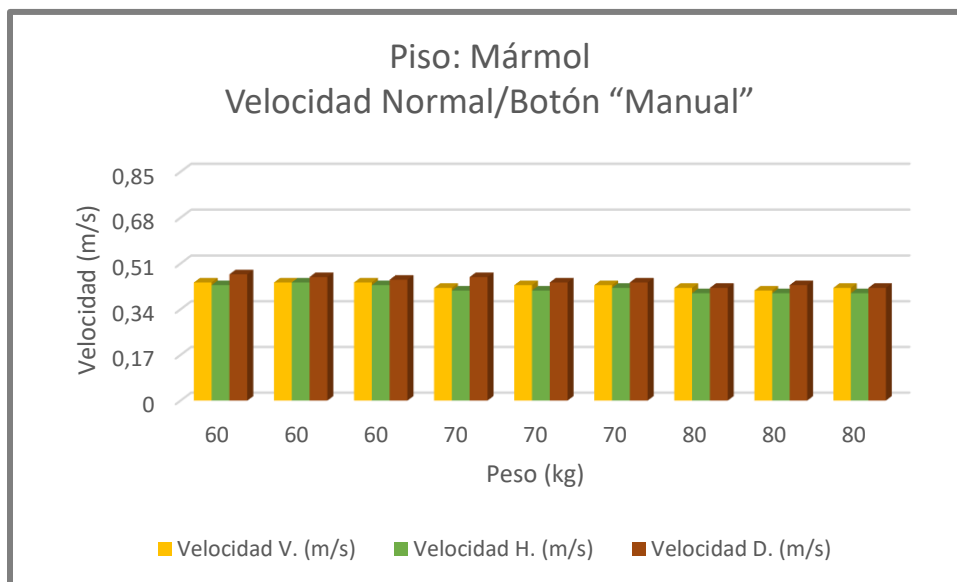


**Figura 71.** Silla de ruedas omnidireccional en el piso de mármol

**Tabla 23**

*Pruebas de trayectorias planas en mármol con velocidad normal*

Piso: Mármol						
Velocidad Normal/Botón "Manual"						
Distancia (5m)	Vertical		Horizontal		Diagonal	
Peso (kg)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
60	11,48	0,44	11,59	0,43	10,55	0,47
	11,32	0,44	11,37	0,44	10,98	0,46
	11,41	0,44	11,62	0,43	11,13	0,45
70	11,89	0,42	12,08	0,41	10,86	0,46
	11,76	0,43	12,13	0,41	11,25	0,44
	11,63	0,43	11,99	0,42	11,47	0,44
80	12,05	0,42	12,55	0,40	11,90	0,42
	12,29	0,41	12,48	0,40	11,71	0,43
	11,94	0,42	12,36	0,40	12,04	0,42

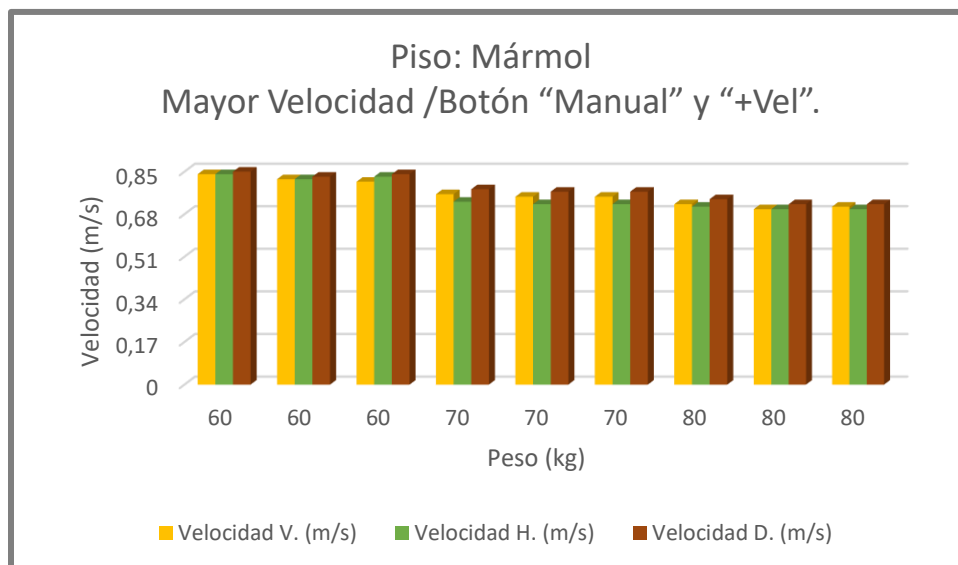


**Figura 72.** Velocidad Vertical, horizontal y diagonal, piso de mármol en modo manual

**Tabla 24**

*Pruebas de trayectorias planas en piso de mármol con mayor velocidad*

<b>Piso: Mármol</b>						
<b>Mayor Velocidad /Botón "Manual" y "+Vel".</b>						
Distancia (5m)	Vertical		Horizontal		Diagonal	
Peso (kg)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
<b>60</b>	5,92	0,84	5,98	0,84	5,88	0,85
	6,07	0,82	6,12	0,82	6,03	0,83
	6,18	0,81	6,06	0,83	5,92	0,84
<b>70</b>	6,54	0,76	6,87	0,73	6,38	0,78
	6,71	0,75	6,91	0,72	6,52	0,77
	6,69	0,75	6,94	0,72	6,47	0,77
<b>80</b>	6,91	0,72	7,02	0,71	6,79	0,74
	7,11	0,70	7,23	0,70	6,97	0,72
	7,04	0,71	7,14	0,70	6,92	0,72



**Figura 73.** Velocidad Vertical, horizontal y diagonal, piso de mármol en modo manual con mayor velocidad

El segundo material donde se realizan las pruebas es mármol, que posee un acabado liso, facilitando el desplazamiento de la silla en cada trayectoria, la velocidad de las pruebas presenta un valor similar al especificado en los parámetros de diseño y cada desplazamiento realizado en las distintas direcciones se realizó de manera efectiva.

Similar a las pruebas realizadas en cemento, el peso es un factor que influye directamente en la velocidad, sin embargo, el peso promedio de personas con paraplejia es equivalente al mínimo peso probado en las pruebas de funcionamiento, lo que garantiza la velocidad objetiva para los usuarios.

### 5.1.3.2. Pruebas con rampas

Dentro del control manual también se realizan pruebas en rampas normalizadas equivalentes a 12% (7 grados) para verificar que la silla de ruedas posee la fuerza necesaria para realizar este tipo de desplazamiento.

La silla de ruedas omnidireccional es capaz de realizar desplazamientos en rampas normalizadas tanto de subida como de bajada gracias a la potencia y torque de los 4 motores independientes de cada una de las ruedas.



**Figura 74.** Silla de ruedas omnidireccional en una rampa

### 5.1.3.3. Desviación de trayectoria

Se considera la desviación de trayectoria en los desplazamientos realizados vertical, horizontal y diagonal, realizando pruebas en diferentes pisos y en el modo manual con mayor velocidad.

**Tabla 25**

*Desviación de trayectoria*

DESVIACIÓN DE TRAYECTORIA (mm)						
Peso (kg)	Piso: Mármol			Piso: Cemento		
	Vertical	Horizontal	Diagonal	Vertical	Horizontal	Diagonal
60	5	23	11	13	30	18
	7	20	10	12	35	20
	3	25	15	15	28	23
	0	15	0	17	33	20
	8	18	12	12	30	15

CONTINÚA 

	11	28	17	18	42	26
<b>70</b>	10	30	19	20	47	25
	13	27	17	18	45	30
	9	28	20	17	40	25
	11	33	16	22	51	28
	15	45	24	25	58	55
<b>80</b>	15	40	30	30	60	52
	18	42	28	35	65	48
	20	44	32	28	55	40
	24	53	35	35	62	45

Como se observa en la *Tabla 25*, el margen de error en la desviación de trayectoria, no supera los 65 mm en ninguno de los desplazamientos realizados, indicando de manera aceptable el seguimiento de las trayectorias ejecutadas por el usuario.

Los pesos con los cuales se realizan las pruebas afectan directamente al funcionamiento y por ende a la desviación de trayectoria, siendo el peso mayor aplicado en donde se presenta más desviación, debido a la inercia que debe superar para empezar el movimiento de la silla de ruedas omnidireccional.

#### **5.1.4. Pruebas de maniobrabilidad en mando manual**

El objetivo principal dentro de la construcción de la silla de ruedas es la optimización de trayectoria en espacios con movilidad reducida, es por eso, que se realizó un tipo de pruebas con obstáculos que verifiquen que la silla de ruedas es capaz de desplazarse en espacios reducidos hacia cualquier dirección y en menor tiempo con respecto a las sillas de ruedas eléctricas convencionales. Para más

exactitud en los resultados, la prueba se realiza con distintos usuarios para probar la maniobrabilidad de cada uno al comandar la silla en cada pista de obstáculos.

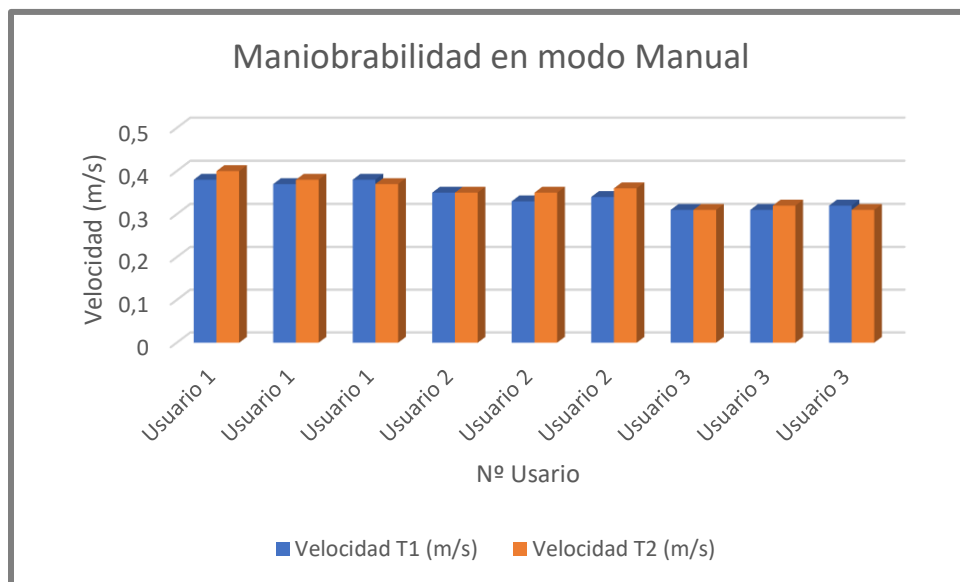


**Figura 75.** Pista de obstáculos en trayectorias de 6 y 8 metros

**Tabla 26**

*Pruebas de maniobrabilidad en modo manual*

Piso: Cemento				
Velocidad Normal/Botón "Manual"				
Nº Usuario	Trayectoria 1: 6m		Trayectoria 2: 8m	
	Tiempo (s)	Velocidad T1 (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad T2 (m/s)
Usuario 1	15,88	0,38	20,15	0,40
	16,04	0,37	21,20	0,38
	15,95	0,38	21,64	0,37
Usuario 2	17,18	0,35	22,91	0,35
	18,01	0,33	23,17	0,35
	17,66	0,34	22,38	0,36
Usuario 3	19,15	0,31	25,57	0,31
	19,22	0,31	25,11	0,32
	18,97	0,32	25,62	0,31



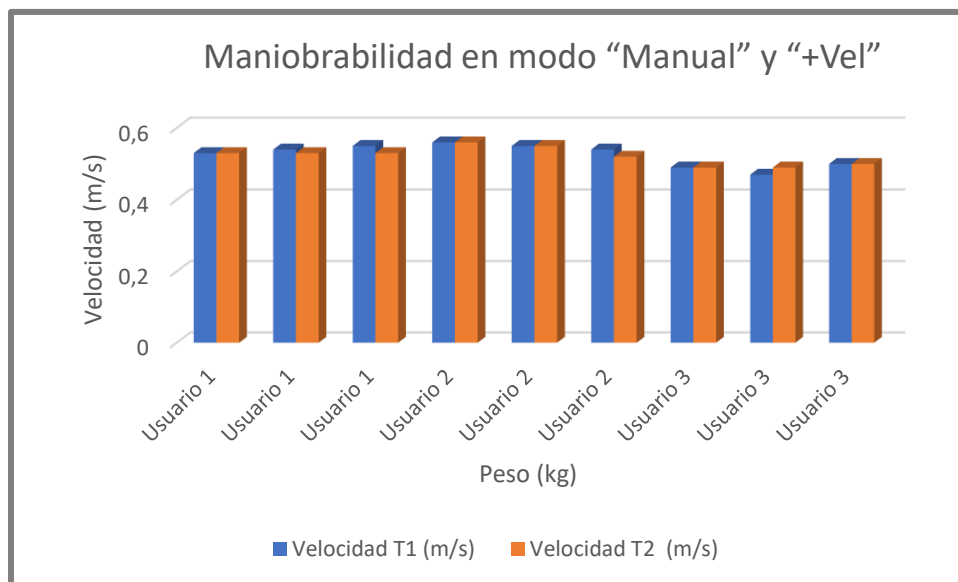
**Figura 76.** Pruebas de maniobrabilidad en modo manual

**Tabla 27**

*Pruebas de maniobrabilidad en modo manual con mayor velocidad*

<b>Piso: Cemento</b>				
<b>Mayor Velocidad /Botón "Manual" y "+Vel".</b>				
Nº Usuario	Trayectoria 1: 6m		Trayectoria 2: 8m	
	Tiempo (s)	Velocidad T1 (m/s)	Tiempo (s)	Velocidad T2 (m/s)
<b>Usuario 1</b>	11,35	0,53	15,17	0,53
	11,12	0,54	15,13	0,53
	10,92	0,55	14,98	0,53
<b>Usuario 2</b>	10,81	0,56	14,32	0,56
	10,97	0,55	14,64	0,55
	11,04	0,54	15,26	0,52
<b>Usuario 3</b>	12,15	0,49	16,23	0,49
	12,70	0,47	16,31	0,49
	11,94	0,50	15,85	0,50



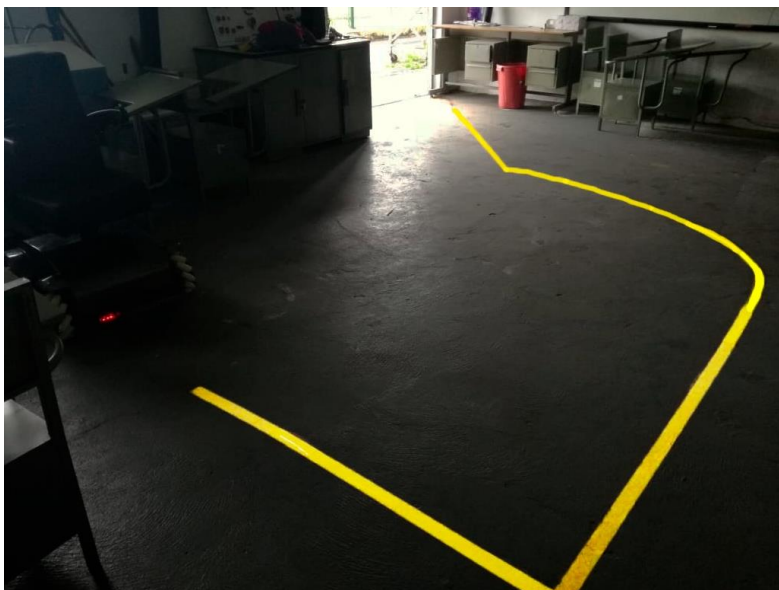


**Figura 77.** Pruebas de maniobrabilidad en modo manual con mayor velocidad

Como se observa en la Figura 75, se realizó una pista de obstáculos para ilustrar la maniobrabilidad que poseen los diferentes usuarios y la facilidad de desplazamiento en espacios con movilidad reducida. Se destacan los movimientos omnidireccionales y por ende la optimización de tiempo y desplazamientos que proporciona la silla de ruedas.

#### 5.1.5. Pruebas de trayectorias predefinidas con control autónomo

El control autónomo de la silla de ruedas permite el desplazamiento por distintas trayectorias definidas, es decir, para su funcionamiento es necesario utilizar señalética normalizada en el piso, la misma que será detectada por la silla de ruedas para efectuar los distintos desplazamientos hasta finalizar la trayectoria de manera automática, a más de realizar una detección de obstáculos. Similar al mando manual, las pruebas se realizaron con distintos usuarios para observar si el peso de cada uno de estos, es un factor que influye en los resultados de velocidad. La pista tiene una distancia aproximada a 9m.

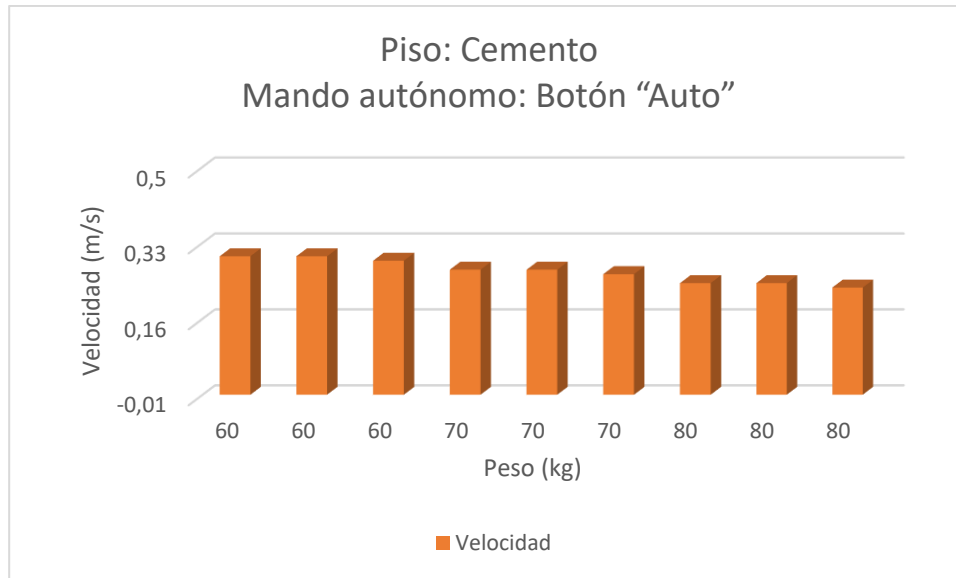


**Figura 78.** Trayectoria definida para el mando autónomo

**Tabla 28**

*Pruebas de trayectoria con control autónomo*

Piso: Cemento		
Mando autónomo: Botón "Auto"		
Distancia (9m)	Trayectoria 1	
Peso (kg)	Tiempo (s)	Velocidad (m/s)
60	29,22	0,31
	28,94	0,31
	29,46	0,30
70	32,17	0,28
	31,89	0,28
	32,53	0,27
80	35,57	0,25
	35,84	0,25
	36,05	0,24



**Figura 79.** Velocidad en la trayectoria definida en modo autónomo

## 5.2. Validación de la hipótesis

### 5.2.1. Planteamiento de la Hipótesis

Mediante el diseño y construcción de la silla de ruedas omnidireccional con control autónomo se optimizarán los desplazamientos en ambientes con movilidad reducida.

### 5.2.2. Cumplimiento de la hipótesis

Para el cumplimiento de la hipótesis se utiliza el método de Chi-cuadrado en función de las pruebas realizadas en el mando manual. Primero se plantea la hipótesis alternativa y la hipótesis nula.

- **H1 (hipótesis alternativa):** Mediante el diseño y construcción de la silla de ruedas omnidireccional con control autónomo se optimizarán los desplazamientos en ambientes con movilidad reducida.

- **H0 (hipótesis nula):** Mediante el diseño y construcción de la silla de ruedas omnidireccional con control autónomo no se optimizarán los desplazamientos en ambientes con movilidad reducida.

El valor observado de Chi-cuadrado ( $\lambda^2$ ), se obtiene de la siguiente ecuación:

$$\lambda^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

$O_i =$  Frecuencia absoluta observada o empírica

$E_i =$  Frecuencia esperada

Nivel de confianza = 95%

En la Tabla 29 se observa las pruebas realizadas para diferentes desplazamientos y pesos.

**Tabla 29**  
Pruebas de funcionamiento

Nº	Desplazamiento	Peso	Funcional	No Funcional	Nº Pruebas
1	Vertical	60	10	0	10
		70	10	0	10
		80	10	0	10
2	Horizontal	60	10	0	10
		70	9	1	10
		80	5	5	10
3	Diagonal	60	10	0	10
		70	10	0	10
		80	8	2	10
		TOTAL	82	8	90

El primer paso es calcular la frecuencia para las pruebas funcionales, mediante la siguiente ecuación:

$$E_i(\text{funcional}) = \frac{\text{Repeticiones} \cdot \# \text{pruebas funcionales}}{\# \text{pruebas totales}}$$

$$E_i(\text{funcional}) = \frac{10 \cdot 82}{90}$$

$$E_i(\text{funcional}) = 9,11$$

Posteriormente se realiza el cálculo de la frecuencia para las pruebas no funcionales:

$$E_i(\text{No funcional}) = \frac{\text{Repeticiones} \cdot \# \text{pruebas funcionales}}{\# \text{pruebas totales}}$$

$$E_i(\text{No funcional}) = \frac{10 \cdot 8}{90}$$

$$E_i(\text{No funcional}) = 0,89$$

Las frecuencias funcional y no funcional se colocan en la Tabla 30, con objetivo de calcular las frecuencias esperadas a partir de las frecuencias observadas en las pruebas.

**Tabla 30**  
Cálculo de frecuencias esperadas

Desplazamiento	Peso	O	E	O - E	(O - E) <sup>2</sup>	$\frac{(O - E)^2}{E}$
Vertical Funcional	60	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	70	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	80	10	9,11	0,89	0,792	0,087
Horizontal Funcional	60	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	70	9	9,11	-0,11	0,012	0,001

CONTINÚA 

	80	5	9,11	-4,11	16,892	1,854
<b>Diagonal Funcional</b>	60	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	70	10	9,11	0,89	0,792	0,087
	80	8	9,11	-1,11	1,232	0,135
<b>Vertical No Funcional</b>	60	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	70	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	80	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
<b>Horizontal No Funcional</b>	60	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	70	1	0,89	0,11	0,012	0,013
	80	5	0,89	4,11	16,892	18,98
<b>Diagonal No Funcional</b>	60	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	70	0	0,89	-0,89	0,792	0,89
	80	2	0,89	1,11	1,232	1,384

Reemplazando en la Ecuación 36, se tiene:

$$\lambda_{calculado}^2 = 28,229$$

Se calcula los grados de libertad mediante la siguiente ecuación:

$$v = (\#de\ pruebas - 1)(\#de\ opciones - 1)$$

$$v = (9 - 1)(2 - 1)$$

$$v = 8$$

Del ANEXO B se toma el valor porcentual referente al nivel de confianza 95% y 8 grados de libertad, de donde se obtiene un valor de:

$$\lambda_{tabulado}^2 = 15,507$$

Para comprobar el cumplimiento de la hipótesis alternativa, se comparan los valores:

$$\lambda_{calculado}^2 \geq \lambda_{tabulado}^2$$

$$28,229 \geq 15,507$$

### 5.2.3. Análisis de cumplimiento de la Hipótesis

Según el método de chi-cuadrado, se observa que el margen de error en la desviación de trayectoria presentada en las pruebas posee un valor mínimo que no influye en el seguimiento de trayectoria deseada por el usuario, por lo tanto, si se presenta la optimización de desplazamientos.

En las pruebas de maniobrabilidad con pistas de obstáculos, el desplazamiento realizado por cada uno de los usuarios se desarrolló con efectividad, garantizando el desplazamiento de la silla omnidireccional en espacios con movilidad reducida.

### 5.3. Análisis económico del proyecto

Al finalizar el diseño y construcción de la silla de ruedas omnidireccional, se procede con el análisis de los gastos generados para el desarrollo mecánico, electrónico y de control del proyecto como se observa en la Tabla 31.

**Tabla 31**

*Gastos del proyecto*

SISTEMA ELECTRÓNICO Y DE CONTROL			
CANTIDAD	DETALLE	VALOR UNITARIO \$	VALOR TOTAL \$
2	Sensor seguidor de línea de 5 canales	18	36
1	Sensor ultrasónico	4	4
1	Microcontrolador STM32F407 Discovery	47	47
2	Sabertooth 2x32	150	300
1	Batería Lipo 6S	150	150
1	Módulo Bluetooth HC-06	8	8
1	Paro de emergencia	5	5
1	Breaker 32 A	15	15
1	Bocina	2	2
1	Bornera Conector DC De Corriente	1	1

CONTINÚA 

1	Baquelita de 18*20	5	5
1	Bornera 26 pines	4,95	4,95
2	Zócalo de 20 pines	0,50	1
3	Capacitores	0,80	2,40
1	Regulador de voltaje	1	1
1	Kit de cables y conectores	40	40
1	Soporte de celular	8	8
		<b>SUBTOTAL 1</b>	<b>630,35</b>

### SISTEMA MECÁNICO

CANTIDAD	DETALLE	VALOR UNITARIO \$	VALOR TOTAL \$
$1\frac{1}{2}$	Tubos circulares de acero 6m, 3/4x2mm	40	60
4	Motores NPC-2212	250	1000
4	Ruedas Omnidireccionales Mecanum	200	800
2	Esponjas	40	80
2	Tapizado	25	50
1	Fibra de vidrio	100	100
30	Tornillos	0,1	3
1	Eje de acero	9	9
		<b>SUBTOTAL 2</b>	<b>2102</b>

DETALLE	Valor Total \$
Herramientas	100
Construcción de la silla de ruedas omnidireccional	500
Mecanizado de ejes	120
Diseño e implementación placas y control	1500
<b>TOTAL</b>	<b>4952.35</b>



## CAPÍTULO VI

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- Mediante el estudio de la cinemática omnidireccional se determina la combinación de movimientos de las ruedas, para ejecutar los desplazamientos omnidireccionales y las ecuaciones para el cálculo de la velocidad teórica, que viene condicionada por la selección del diámetro de las ruedas mecanum y de la potencia de los motores, obteniendo un valor teórico de velocidad de 0,85 m/s.
- Por medio del estudio de la cinética de la silla de ruedas omnidireccional, se establece la potencia requerida que deben proporcionar los motores igual a 420 W, para proveer una fuerza mínima de 988,3 N necesaria para desplazamientos en rampas y superficies planas.
- La distribución del peso estudiada en la cinética de la silla de ruedas, establece que el 81% correspondiente al peso de la persona, reposa sobre la columna que une el asiento con la estructura, haciendo a este elemento el más crítico de todo el conjunto con una posible deformación de 7 mm, para cargas mayores al peso permitido de 80 kg.
- Mediante la simulación del software CAE, se obtuvo un factor de seguridad de 5,74 en la estructura, mayor al factor de diseño igual a 4, debido a las características que presenta el acero ASTM A36 y a las fuerzas aplicadas.

- Las dimensiones de la silla de ruedas están diseñadas de acuerdo a la Norma ISO 7176-5 y a los requerimientos del usuario, obteniendo las medidas de longitud, ancho y altura igual a 1200,700 y 1100 mm respectivamente, favoreciendo a su desplazamiento en espacios con movilidad reducida.
- La implementación del control manual permite el accionamiento de los actuadores de la silla de ruedas mediante un Joystick virtual, con una distribución de 16 partes iguales y una tolerancia de 22.5 °; donde la maniobrabilidad de la persona es un factor que no influye directamente en el desplazamiento final de la silla de ruedas.
- A través del control autónomo, la silla de ruedas cumple las funciones de seguir una trayectoria predefinida mediante una señalética en el piso, detectar obstáculos y detener el desplazamiento de la silla de ruedas, indicando la detección mediante una alarma para la posterior evasión del obstáculo por el usuario.
- El peso del usuario es un factor que afecta directamente en la velocidad de la silla de ruedas, sin embargo, para las pruebas de funcionamiento se tomaron valores superiores al peso promedio de personas parapléjicas y por lo tanto la velocidad alcanzada en la pruebas de funcionamiento se asemeja al valor planteado en los parámetros de diseño equivalente a 0,85 m/s
- El desplazamiento de la silla de ruedas presenta un margen de desviación en la trayectoria menor cuando la silla es operada en velocidad alta. El desplazamiento lateral presenta una desviación mayor al resto de desplazamientos sobre todo con la carga crítica de 80 Kg.

## 6.2. Recomendaciones

- Implementar ruedas omnidireccionales mecanum con capacidad de carga superior a 150 kg para incrementar el peso admisible del usuario.
- Optimizar el espacio dentro de la estructura para implementar el sistema de transmisión en conjunto con el sistema electrónico.
- Implementar un sistema de transmisión que permita aumentar el torque de los motores con objetivo de mejorar el desempeño de la silla de ruedas en rampas con pendientes superior al 12% (7grados).
- Implementar un número mayor de sensores de proximidad en cada lado de la silla de ruedas omnidireccional, con el propósito de detectar obstáculos en cualquier dirección.
- Integrar sensores con mayor capacidad de sensorización con el objetivo de realizar un desplazamiento autónomo en pisos reflectantes y de diferentes tonalidades.
- Integrar nuevos sensores con características inteligentes que permitan realizar desplazamiento sin necesidad de una trayectoria señalizada.
- Aumentar el número de baterías con el afán de obtener una mayor autonomía de la silla de ruedas omnidireccional

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bräunl, T. (Julio de 2006). *Embedded Robotics: Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems*.
- Abslab. (05 de Enero de 2019). *Robots Móviles Terrestres*.
- Adas Mobility. (2019). *Manual de Usuario R400*. Recuperado el 08 de 06 de 2018, de <https://www.ortopediasilvio.com/pdfs/r400.pdf>
- Aldana Galtés, D. (05 de Junio de 2014). Proyecto de adaptación de triciclo para el uso de personas con disminución de la movilidad física. Catalunya, España: ESCOLA D'ENGINYERIA DE TERRASSA.
- Antsaklis, P., Passino, K., & Wang, S. (1991). An Introduction to Autonomous Control Systems. *IEEE*, 5-13.
- Armijos Comina, J., & Criollo Simbaña, T. (2018). Diseño y construcción de una silla de bipedestación eléctrica para personas cuadripléjicas activada por voz, de bajo costo. Sangolquí, Pichincha, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Arsenalsupremo, & SCI Geriatria. (2019). Fabricantes de Sillas de ruedas electrica.
- Baez Martinez , L. (2000). *Breve historia de la silla de ruedas*. Recuperado el 28 de 06 de 2018, de Cronología y curiosidades históricas desde la antigüedad hasta nuestros días.: [http://www.minusval2000.com/otros/reportajes/historia\\_silla\\_de\\_ruedas/index.html](http://www.minusval2000.com/otros/reportajes/historia_silla_de_ruedas/index.html)
- Barrientos, A., Peñin, L., Balaguer, C., & Aracil, R. (2007). *Fundamentos de Robótica*. McGraw-Hill.
- Bike-On. (2018). *Bike-On*. Recuperado el 26 de 08 de 2018, de <https://bike-on.com/hasebikes-kettwiesel-custom-handcycle.html>
- Cerón Correa, A. (2005). *Sistemas Roboóticos Teleoperados. Ciencia e Ingeniería Neogranadina*. Bogota, Colombia: Universidad Militar Nueva Granada.
- Colomer, J. (Junio de 2018). *Universitat Oberta Catalunya*. Recuperado el 10 de Marzo de 2019, de <http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/80846/6/jacobarTFM0618memoria.pdf?fbclid=IwAR2sxxgGrOX5CY2rOcQAoyXBdZHcmW4R2OTwajBRUt1MvYJ3BxrQCQb7d98E>
- DETA. (06 de 03 de 2019). *Bunnings*. Recuperado el 06 de 01 de 2019, de Warehouse: [https://www.bunnings.com.au/deta-32a-plug-in-circuit-breaker\\_p4430389](https://www.bunnings.com.au/deta-32a-plug-in-circuit-breaker_p4430389)

- Dimension Engineering. (2016). Recuperado el 25 de 11 de 2018, de Dimension Engineering:  
<https://www.dimensionengineering.com/datasheets/Sabertooth2x32.pdf>
- Electronics. (2018). *Electronics*. Recuperado el 15 de 02 de 2019, de <https://www.electronicsecuador.com/>
- Elijah J. Morgan. (16 de 11 de 2014). *HC-SR04 User Guide*. Recuperado el 10 de 03 de 2019, de [https://www.mpja.com/download/hc-sr04\\_ultrasonic\\_module\\_user\\_guidejohn.pdf?fbclid=IwAR2UP\\_53jpNLJAD8TvTBF\\_FbEdjNfQqd0xT-05nYSbGx6gQixIzVsNNYm6k](https://www.mpja.com/download/hc-sr04_ultrasonic_module_user_guidejohn.pdf?fbclid=IwAR2UP_53jpNLJAD8TvTBF_FbEdjNfQqd0xT-05nYSbGx6gQixIzVsNNYm6k)
- Esclatec. (18 de 03 de 2015). *Estel*. Recuperado el 26 de 05 de 2018, de <http://esclatec.com/portfolio/estel/>
- García, D., Vargas, J., Díaz, G., & González, A. (2016). *Diseño Mecatrónico de un Robot Móvil*. Recuperado el 16 de 05 de 2018, de <http://www.mecatronica.net/emilio/CapLibros/2016-Cap30-Libro-IMEM.pdf>
- Ghani, A., & Thoki, M. (07 de Marzo de 2016). Sit to stand and stand to sit control mechanisms of two wheeled wheelchair. *Journal of biomechanical engineering*.
- Gómez, P. (1999). Sillas de ruedas. Características técnicas y antropométricas. *Rehabilitación*, 361-491.
- Hobbyking. (2019). Recuperado el 14 de 12 de 2018, de Hobbyking: [https://hobbyking.com/en\\_us/catalogsearch/result/?cat=&q=baterias+lipo](https://hobbyking.com/en_us/catalogsearch/result/?cat=&q=baterias+lipo)
- Hoyer, H., Borgolte, U., & Jochheiman, A. (1999). *La Silla de Ruedas Omnidireccional*. Tokyo: Japanese Society for Rehabilitation of Persons with Disabilities.
- Ingeniatic. (2011). *GSM (Sistema Global para las telecomunicaciones móviles)*. Recuperado el 10 de 01 de 2019, de <https://www.etsist.upm.es/estaticos/ingeniatic/index.php/tecnologias/item/471-gsm-sistema-global-para-las-telecomunicaciones-m%C3%B3viles.html>
- IPAC. (2014). *IPAC*. Recuperado el 16 de 07 de 2018, de Duferco Group: <http://www.ipac-acero.com/producto-detalle.php?id=8&fbclid=IwAR3Ra2KDMf4rSFITv5gdJk5KTGZaB7roR8p7A694nVxYOYG0EeEsNv3IXeA>
- Iza, J., & Taco, G. (2016). Investigación de maniobrabilidad de una plataforma robótica con sistema de tracción omnidireccional e implementación en el proyecto de investigación "Tele – Operación Bilateral Corporativo de Múltiples Manipuladores Móviles". Latacunga, Cotopaxi, Ecuador: Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L.

- LRP Electronic. (10 de 02 de 2015). *Manual de Instrucciones Batería Lipo*. Recuperado el 10 de 02 de 2019, de [https://www.lrp.cc/fileadmin/product\\_downloads/instructions\\_es/79837\\_es.pdf](https://www.lrp.cc/fileadmin/product_downloads/instructions_es/79837_es.pdf)
- Martinez, S., & Sisto, R. (2009). *Control y Comportamiento de Robots Omnidireccionales*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.
- Martínez, S., & Sisto, R. (2009). *Control y Comportamiento de Robots Omnidireccionales*. *FING*, 26-27.
- Mechatronics, N. (11 de 03 de 2019). Obtenido de <https://naylampmechatronics.com/inalambrico/24-hc06-modulo-bluetooth.html>
- Mott, R. L. (2009). *Resistencia de materiales*. México: Pearson Education.
- Nexus Robot. (2018). *Robot shop*. Recuperado el 03 de 06 de 2018, de <https://www.robotshop.com/en/203mm-steel-mecanum-wheel-set-2x-left-2x-right.html?fbclid=IwAR3i-pEvQiTiyG5JZtDVmSYevlsqo6OKB0YFzi-t4AzciPCz7d02PyyhiZA>
- NPC Robotics. (2011). Recuperado el 30 de 04 de 2018, de NPC Robotics: <https://hobby.npcrobotics.com/store/npc-2212/>
- NTE INEN 2245. (2016). *NTE INEN 2245 Accesibilidad de las personas al medio físico. Rampas*. Quito-Ecuador. Recuperado el 20 de 11 de 2018, de [www.normalizacion.gob.ec](http://www.normalizacion.gob.ec)
- Otto Bock Ibérica S.A. (22 de Marzo de 2013). Información técnica de productos de movilidad. *Mobility Solutions*. España. Recuperado el 2018 de Noviembre de 05
- Plan Nacional de Desarrollo. (2017). Recuperado el 18 de 03 de 2018, de [http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Plan\\_Nacional\\_para\\_el\\_Buen\\_Vivir.pdf](http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/07/Plan_Nacional_para_el_Buen_Vivir.pdf)
- Regino, A. (19 de 08 de 2014). *Tecnologías Inalámbricas*. Recuperado el 09 de 01 de 2019, de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70218/fichero/2.Tecnolog%C3%ADas+Inal%C3%A1mbricas.pdf>
- Restrepo Viera, D., & Soto Gonzales, A. (2009). *Diseño, análisis y construcción de una silla de ruedas plegable fabricada en espuma de poliuretano y fibra de vidrio*. Medellín, Colombia: UNIVERSIDAD EAFIT.
- Robot Nexus. (2018 de 05 de 04). *Omni Wheel*. Recuperado el 21 de 12 de 2018, de <https://www.nexusrobot.com/product/3wd-100mm-omni-wheel-arduino-kit-10016.html>

- Salazar Espinoza, C. (07 de Abril de 2016). *Universidad superior Politecnica de Chimborazo*. Recuperado el 2019 de Enero de 14, de <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/5008>
- Santiago, R. (22 de 11 de 2009). *Control y Comportamiento de Robots Omnidireccionales*. Recuperado el 15 de 07 de 2018
- Santos, M. (2011). Un Enfoque Aplicado del Control Inteligente. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* , 285-288.
- SENPLADES. (2012). *Secretaría Nacional de Desarrollo*. Recuperado el 20 de 01 de 2018, de Transformación de la Matriz Productiva: [http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/01/matriz\\_productiva\\_WEBtodo.pdf](http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2013/01/matriz_productiva_WEBtodo.pdf)
- Sunrise Medical Co. (17 de Octubre de 2015). *Sunrise Medical Co*. Recuperado el 13 de 08 de 2018, de [http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/imagina\\_\\_biomecanica\\_de\\_una\\_silla\\_de\\_ruedas.pdf](http://www.sld.cu/galerias/pdf/sitios/rehabilitacion-bio/imagina__biomecanica_de_una_silla_de_ruedas.pdf)
- Sunrom. (2018). *Sunrom*. Recuperado el 29 de 01 de 2019, de <https://www.sunrom.com/p/lineobstacle-sensor-tcrt5000>
- Valle, I. (Septiembre de 2013). Sillas de ruedas eléctricas. Opciones de mandos de control y cambios de posturas. *Ministerio de sanidad , servicios sociales e igualdad*. España: CEAPAT.
- Velasco, E., & León, E. (12 de 2012). *Norma de Accesibilidad*. Recuperado el 12 de 09 de 2018, de [http://www.libreacceso.org/wp-content/uploads/2013/09/norma\\_accesibilidad\\_inifed.pdf](http://www.libreacceso.org/wp-content/uploads/2013/09/norma_accesibilidad_inifed.pdf)
- Vishay Intertechnology. (2017). *Reflective Optical Sensor with Transistor Output*. Recuperado el 11 de 02 de 2019, de <https://www.vishay.com/docs/83760/tcrt5000.pdf>
- Woods, B. (October de 2006). Honours thesis omni-directional wheelchair.
- Ziegler, J. (2003). *ISO 7176-5. Working Area of Wheelchairs*. NY. USA: IDEA Center. Recuperado el 04 de 06 de 2018, de [https://www.udeworld.com/spaceworkshop2003/Papers/WEB%20-%20Working%20Area%20of%20%20Wheelchairs%20\\_Ziegler\\_.pdf](https://www.udeworld.com/spaceworkshop2003/Papers/WEB%20-%20Working%20Area%20of%20%20Wheelchairs%20_Ziegler_.pdf)

# ANEXOS





# ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

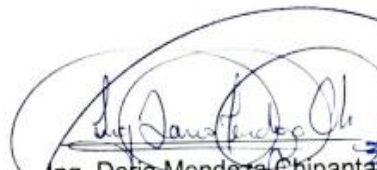
## CERTIFICACIÓN


Se certifica que el presente trabajo fue realizado por las señoritas **CÁRDENAS ZUMBA, SCARLET GISSELL** y **ORTIZ ALVARADO, PAMELA YAJAIRA**.

En la ciudad de Latacunga, a los 13 días del mes de mayo del 2019.

Aprobado por:

  
Ing. Oscar Artega López  
DIRECTOR DEL PROYECTO

  
Ing. Darío Mendoza Chipantás  
DIRECTOR DE CARRERA

  
Dr. Rodrigo Vaca Corrales  
SECRETARIO ACADÉMICO

