



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 INGENIERO EN MECATRÓNICA**

**TEMA: INVESTIGACIÓN DE LA LOCOMOCIÓN DE LOS
ROBOTS OMNIDIRECCIONALES PARA EL DISEÑO Y
CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO ROBOT RUEDA
ESFÉRICA PARA MEJORA DE LA MOVILIDAD EN ESPACIOS
REDUCIDOS**

**AUTORES: EDWIN FRANCISCO MORENO BALSECA
ADRIAN ALEJANDRO ALAY ROMERO**

DIRECTOR: ING. OSCAR ARTEAGA

LATACUNGA

2018



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 **“INVESTIGACIÓN DE LA LOCOMOCIÓN DE LOS ROBOTS OMNIDIRECCIONALES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO ROBOT RUEDA ESFÉRICA PARA MEJORA DE LA MOVILIDAD EN ESPACIOS REDUCIDOS”** realizado por los señores **Edwin Francisco Moreno Balseca** y **Adrian Alejandro Alay Romero**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo que 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 los señores **Edwin Francisco Moreno Balseca** y **Adrian Alejandro Alay Romero** para que lo sustenten públicamente.

Latacunga, 13 marzo del 2018

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

Nosotros, **Edwin Francisco Moreno Balseca** con cédula de identidad N° **050332499-8** y **Adrian Alejandro Alay Romero** con cédula de identidad N° **120674085-2** declaramos que este trabajo de titulación “**INVESTIGACIÓN DE LA LOCOMOCIÓN DE LOS ROBOTS OMNIDIRECCIONALES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO ROBOT RUEDA ESFÉRICA PARA MEJORA DE LA MOVILIDAD EN ESPACIOS REDUCIDOS**”, 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 ellos nos declaramos responsables del contenido, veracidad y alcance de la investigación mencionada.

Latacunga, 13 marzo del 2018

Edwin Francisco Moreno Balseca

C.C.: 050332499-8

Adrian Alejandro Alay Romero

C.C.: 120674085-2



ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

CARRERA DE INGENIERÍA EN MECATRÓNICA

AUTORIZACIÓN

Nosotros, **Edwin Francisco Moreno Balseca** y **Adrian Alejandro Alay Romero**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en el repositorio de la institución el presente trabajo de titulación “**INVESTIGACIÓN DE LA LOCOMOCIÓN DE LOS ROBOTS OMNIDIRECCIONALES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO ROBOT RUEDA ESFÉRICA PARA MEJORA DE LA MOVILIDAD EN ESPACIOS REDUCIDOS**”, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra autoría y responsabilidad.

Latacunga, 13 marzo del 2018

Edwin Francisco Moreno Balseca

C.C.: 050332499-8

Adrian Alejandro Alay Romero

C.C.: 120674085-2

DEDICATORIA

A mis Padres Edwin y Martha, quienes con su amor, trabajo y sacrificio para conmigo han sido mi ejemplo de esfuerzo y motivación cada día y el apoyo incondicional en todo tiempo. A mis Hermanos Alex, Ariel y Madeline, que han sido mi ayuda, compañía y comprensión incondicional. A mis Abuelitos Mario, Julita, Olguita y Rogelio por enseñarme el valor de la perseverancia y la humildad en cada momento.

A mis amigos y compañeros, quienes durante el desarrollo de esta tesis estuvieron ahí apoyándome y guiándome en este proceso, cada día dando ánimos y no dejándome caer.

Francisco

Mi proyecto de investigación se la dedico con todo mi amor y cariño a mis padres Olinda Romero y Walter Alay por su sacrificio y esfuerzo, por permitirme elegir una carrera del futuro como es ingeniería mecatrónica. Por creer en mi capacidad, aunque hemos pasado por momentos difíciles siempre han estado brindándome su comprensión al no dejarme decaer para que siguiera adelante y siempre sea perseverante cumpliendo con mis ideales.

A mis queridos hermanos Mauricio, Robinson y Jefferson por ser mi fuente de motivación. A los avances tecnológicos por ser mi biblioteca de inspiración para poder superarme cada día más y así poder luchar para que la vida nos depare un futuro mejor.

Adrian

AGRADECIMIENTO

“No temas, porque yo estoy contigo; no desmayes, porque yo soy tu Dios que te esfuerzo; siempre te ayudaré, siempre te sustentaré con la diestra de mi justicia”. ISAIAS 41:10. Doy gracias a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme colmado de fé, sabiduría, salud y fuerza para lograr mis objetivos. Agradezco a todos mis familiares, amigos y personas que han sido de ayuda durante este tiempo y me han brindado el sano consejo cuando lo he requerido.

Francisco

Doy gracias a mis padres por ser mis formadores de manera directa o indirecta, personas de gran sabiduría quienes se han esforzado por ayudarme a llegar al logro de ser un ingeniero mecatrónico. Sencillo no ha sido toda esta travesía intelectual, por eso me tomo la molestia de agradecer a mis tutores académicos por las ganas de transmitirme sus conocimientos y dedicación. A mis compañeros y amigos presentes en el desarrollo de este proyecto de investigación, quienes sin esperar nada a cambio compartieron su conocimiento, alegrías y tristezas. Gracias a todos ustedes he logrado un objetivo de vida muy importante, que, es culminar el desarrollo del proyecto de investigación y obtener una afable titulación profesional.

Adrian

ÍNDICE

CARÁTULA	i
CERTIFICACIÓN	ii
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE	vii
RESUMEN	xvii
ABSTRACT	xviii
CAPÍTULO I	1
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Planteamiento del problema	5
1.3 Descripción resumida del proyecto	6
1.4 Justificación e importancia	7
1.5 Objetivos	8
1.5.1 Objetivo General	8
1.5.2 Objetivos específicos	8
1.6 Metas	8
1.7 Hipótesis	8
1.8 Variables de investigación	9
CAPÍTULO II	10
FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN	10
2.1 Robótica	10
2.2 Robots móviles con ruedas	10
2.3 Sistemas de Locomoción	11
2.4 Tipos de sistemas de locomoción de robots móviles	12
2.4.1 Locomoción basada en patas	12

2.4.2	Locomoción mediante ruedas	13
2.5	Tipos de ruedas.....	20
2.5.1	Ruedas omnidireccionales	20
2.6	Robots omnidireccionales	21
2.7	Estructura de un robot omnidireccional.	21
2.7.1	Omnidireccional de 3 ruedas.....	22
2.7.2	Omnidireccional de 4 ruedas.....	23
2.8	Análisis de ventajas y desventajas de los sistemas de locomoción ..	25
2.9	Análisis cinemático y cinético de robot rueda esférica	26
2.9.1	Postulados para el modelado	27
2.9.2	Descripción del modelado	28
2.9.3	Coordenadas.....	29
2.9.4	Fuerzas del sistema	31
2.9.5	Velocidades angulares de las ruedas.....	33
2.9.6	Energía y torque en los planos YZ/XZ.....	35
2.9.7	Conversión de torques	38
	CAPÍTULO III.....	43
	DISEÑO MECÁNICO Y DE CONTROL.....	43
3.1	Introducción.....	43
3.2	Parámetros de diseño	43
3.3	Diseño geométrico del prototipo.....	43
3.4	Análisis cinemático del prototipo robot rueda esférica	44
3.4.1	Velocidades angulares de las ruedas.....	44
3.4.2	Posición de las ruedas	46
3.4.3	Velocidades lineales de la rueda.....	48
3.4.4	Fuerzas del Sistema.....	48
3.4.5	Fuerza de rozamiento estático y dinámico	51

3.4.6	Torques del prototipo	53
3.4.7	Fuerza en la garra de sujeción	54
3.4.8	Cálculo de las inercias del prototipo	55
3.4.9	Cálculo ecuación de movimiento para el plano yz/xz.	56
3.5	Análisis de fuerzas y momentos flectores	58
3.6	Selección componentes mecánicos	63
3.6.1	Selección de motor.....	63
3.6.2	Selección del Reductor.....	66
3.6.3	Selección del sistema de amortiguamiento	67
3.6.4	Selección de la rueda	69
3.7	Diseño de base inferior 2.....	70
3.7.1	Selección del material para base inferior 2.....	71
3.7.2	Criterios sobre el espacio y ubicación	71
3.7.3	Información del modelo	72
3.7.4	Cargas y sujeciones en el chasis	73
3.7.5	Resultados de los esfuerzos en el chasis.....	74
3.8	Diseño del soporte para motores	76
3.8.1	Selección del material para el soporte	76
3.8.2	Criterios de espacio y ubicación.....	77
3.8.3	Información del modelo	78
3.8.4	Cargas y sujeciones en el acople.....	79
3.8.5	Resultados de los esfuerzos en el acople	80
3.9	Diseño de las garras de sujeción	82
3.9.1	Selección del material para garras de sujeción	82
3.9.2	Criterios de espacio y ubicación.....	82
3.9.3	Información del modelado	83
3.9.4	Cargas y sujeciones en la garra de sujeción	84

3.9.5	Resultados de los esfuerzos en la garra de sujeción	85
3.10	Diseño de los acoples para perfil-base	87
3.10.1	Criterios de diseño	87
3.10.2	Información del modelo	87
3.10.3	Cargas y sujeciones en el acople perfil base	88
3.10.4	Resultados de los esfuerzos en el acople perfil base.....	89
3.11	Diseño de la base inferior redonda de componentes electrónicos	91
3.11.1	Requerimientos de diseño.....	91
3.11.2	Especificaciones del diseño de la base	91
3.11.3	Ubicación de componentes	92
3.11.4	Información del modelado	92
3.11.5	Cargas y sujeciones en la base inferior.....	93
3.11.6	Resultados de los esfuerzos en la base inferior.....	94
3.12	Diseño sistema de control	96
3.12.3	Algoritmo de control	100
3.12.4	Diagrama de conexión entre componentes electrónicos.....	101
3.12.5	Diagrama del circuito de alimentación.....	102
3.13	Prototipo final	102
3.14	Lectura y pruebas del control	103
CAPÍTULO IV	104
4	CONSTRUCCIÓN	104
4.1	Procesos de construcción	104
4.2	Maquinaria.....	104
4.3	Instrumentos de medición	104
4.4	Construcción del chasis.....	104
4.4.1	Construcción de las garras de sujeción.....	105
4.4.2	Sub ensamble garras con el chasis.....	107

4.4.3	Construcción acoples para amortiguadores	108
4.4.4	Sub ensamble amortiguadores con el chasis	108
4.4.5	Sub ensamble del motor con el reductor	108
4.4.6	Construcción de los acoples para motores.....	109
4.4.7	Sub ensamble acople de motor con el chasis	111
4.4.8	Sub ensamble motor, reductor, acople y rueda omnidireccional	111
4.4.9	Construcción de acople perfil para bases redondas.....	112
4.4.10	Sub ensamble acoples con el perfil.....	113
4.4.11	Construcción de las bases redondas de la parte superior.....	113
4.4.12	Sub ensamble del perfil con las bases redondas	114
4.4.13	Ensamble final.....	114
CAPÍTULO V		115
PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		115
5.1	Pruebas a realizar	115
5.1.1	Pruebas de estabilidad.....	115
5.1.2	Pruebas de rotación en el mismo eje	117
5.1.3	Pruebas de desplazamiento.....	119
5.1.4	Prueba de sorteo de obstáculos.....	121
5.2	Análisis de resultados	122
5.3	Costo del proyecto	123
5.4	Validación de Hipótesis	124
5.4.1	Planteamiento de la hipótesis.....	124
5.4.2	Validación de hipótesis.....	124
CONCLUSIONES		127
RECOMENDACIONES.....		128
REFERENCIAS		129
ANEXOS.....		132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Análisis de sistemas de locomoción para robots móviles	25
Tabla 2	Descripción de los parámetros utilizados para el modelado	29
Tabla 3	Descripción diagrama cuerpo libre.....	31
Tabla 4	Parámetros de fuerzas del sistema.....	50
Tabla 5	Detalle de peso estructura superior sobre base inferior 2	60
Tabla 6	Detalle estructura superior 2	61
Tabla 7	Detalle estructura superior 3	62
Tabla 8	Matriz de comparación de motores.....	64
Tabla 9	Características maxon eci-40	65
Tabla 10	Características del reductor GP42c	67
Tabla 11	Matriz de selección de un amortiguador	68
Tabla 12	Características suspensión Ke Zhen 250	69
Tabla 13	Matriz comparativa de selección del tipo de rueda	69
Tabla 14	Especificaciones rueda omnidireccional	70
Tabla 15	Características de materiales para chasis	71
Tabla 16	Materiales para soporte	76
Tabla 17	Elementos técnicos para el robot	97
Tabla 18	Hoja técnica driver ESCON 50/5.....	97
Tabla 19	Datos técnicos del sensor IMU MPU6050.....	98
Tabla 20	Cargas eléctricas del prototipo	99
Tabla 21	Selección del microcontrolador	100
Tabla 22	Prueba estabilidad en piso de asfalto.....	115
Tabla 23	Prueba estabilidad en piso de mármol	116
Tabla 24	Prueba estabilidad en piso de adoquín	117
Tabla 25	Prueba de rotación mismo eje sentido horario.....	117
Tabla 26	Prueba de rotación sentido anti horario.....	118
Tabla 27	Prueba de desplazamiento lineal	119
Tabla 28	Prueba de sorteo con 3 obstáculos	121
Tabla 29	Prueba de sorteo obstáculo periféricamente.....	122
Tabla 30	Análisis económico del proyecto.....	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Plataforma del ballbot.....	2
Figura 2	Robot ball segway.....	3
Figura 3	Simbot.....	4
Figura 4	Composición interna del sistema de locomoción.....	5
Figura 5	Esquemático del prototipo del robot.....	6
Figura 6	Locomoción mediante patas.....	12
Figura 7	Robot bípedo KHR3HV.	13
Figura 8	Robot cuadrúpedo TITAN VIII.	13
Figura 9	Robot hexápodo Erle-Spider.....	13
Figura 10	Sistema de locomoción Ackerman.....	14
Figura 11	NavLab 2.	15
Figura 12	Sistema de locomoción triciclo.	15
Figura 13	Neptune.....	16
Figura 14	Sistema de locomoción diferencial.	16
Figura 15	Pioneer 2 DX.....	17
Figura 16	Terregator.	17
Figura 17	Robot tipo oruga	18
Figura 18	Sistema locomoción síncrona	19
Figura 19	Sistema locomoción omnidireccional.....	19
Figura 20	Convencionales, castor, Bola y Omnidireccionales.	20
Figura 21	Ruedas a)Simple, b)Doble, c)Alternada d)Mecanum.	21
Figura 22	a) Montacargas b) Robots futbolistas NXT.....	21
Figura 23	Robot omnidireccional 3 ruedas.....	22
Figura 24	Robot rueda esférica.	23
Figura 25	Robot ORM SOW.....	24
Figura 26	Vehículo deportivo omnidireccional MMR25.....	25
Figura 27	a) Modelado plano yz, b) Modelado plano xy	29
Figura 28	Diagrama cuerpo libre del modelado	31
Figura 29	Diagrama de cuerpo libre de las ruedas.	33
Figura 30	a) Torque en la esfera b) Torque en el cuerpo	37
Figura 31	Bosquejo torques del cuerpo generados por los motores .	38
Figura 32	Torques del cuerpo por los motores y fuerzas	39
Figura 33.	Diseño geométrico del prototipo	44

Figura 34. Componentes de velocidad rueda.....	45
Figura 35. Orientación de las ruedas	47
Figura 36. Diagrama cuerpo libre prototipo robot rueda esférica	49
Figura 37. Distancia centro de esfera a centro de gravedad.....	51
Figura 38. Distribución apoyos del prototipo.....	52
Figura 39. Diagrama cuerpo libre esfera y superficie.....	52
Figura 40. Diagrama cuerpo libre rueda y esfera	53
Figura 41. Inercia en la esfera.....	55
Figura 42. Inercia en el cuerpo	55
Figura 43. Inercia de la rueda.....	56
Figura 44. Análisis de cargas en garra	58
Figura 45. Análisis de carga acople de motor	59
Figura 46. Análisis de carga de base inferior 2.....	60
Figura 47. Fuerzas, torques de la base inferior.....	61
Figura 48. Peso en el acople perfil base	62
Figura 49. Fuerzas, torques y pesos en el prototipo	63
Figura 50. Motor maxon Ec-i40.....	65
Figura 51. Reductor GP42c	66
Figura 52. Peso de soporte para amortiguadores.....	67
Figura 53. Suspensión Ke Zhen 250.....	69
Figura 54. Rueda omnidireccional 100mm	70
Figura 55. Bosquejo de diseño del chasis.....	72
Figura 56. Información del modelado chasis	73
Figura 57. Información del material para chasis	73
Figura 58. Cargas y sujeciones en el chasis	74
Figura 59. Análisis de tensiones base del chasis	74
Figura 60. Análisis de desplazamientos base del chasis	75
Figura 61. Análisis factor de seguridad base del chasis.....	76
Figura 62. Soporte para motores.....	78
Figura 63. Información modelado acople de motor	79
Figura 64. Información material para acople motor.....	79
Figura 65. Cargas y sujeciones en acople motor	80
Figura 66. Análisis de tensiones acople de motor.....	80
Figura 67. Análisis de desplazamientos de acople de motor.....	81

Figura 68.	Análisis factor de seguridad acople de motor.....	82
Figura 69.	Garra de sujeción.....	83
Figura 70.	Información modelado de garra de sujeción.....	84
Figura 71.	Información material para la garra de sujeción.....	84
Figura 72.	Cargas y sujeciones en la garra de sujeción.....	85
Figura 73.	Análisis de tensión de la garra	85
Figura 74.	Análisis de desplazamiento de la garra	86
Figura 75.	Análisis de factor de seguridad de la garra.....	86
Figura 76.	Acople perfil-base.....	87
Figura 77.	Información del modelado acople perfil base	88
Figura 78.	Información material acople perfil base.....	88
Figura 79.	Cargas y sujeciones acople perfil base	89
Figura 80.	Análisis de tensiones acople perfil base	89
Figura 81.	Análisis de desplazamiento acople perfil base	90
Figura 82.	Análisis factor de seguridad acople perfil base.....	91
Figura 83.	Base inferior para componentes electrónicos	92
Figura 84.	Ubicación componentes sobre base inferior redonda	92
Figura 85.	Información del modelado base inferior	93
Figura 86.	Información material base inferior	93
Figura 87.	Cargas y sujeciones base inferior.....	94
Figura 88.	Análisis de tensiones base inferior	94
Figura 89.	Análisis de desplazamiento base inferior.....	95
Figura 90.	Análisis factor de seguridad base inferior.....	96
Figura 91.	Sistema de control del prototipo	96
Figura 92.	Detalle del driver ESCON 50/5.....	98
Figura 93	Detalle IMU MPU6050.....	98
Figura 94	Detalle Batería HRB 5S 6000mAh	100
Figura 95.	Diagrama de control del prototipo.....	101
Figura 96	Conexión de componentes del prototipo	102
Figura 97.	Circuito de alimentación	102
Figura 98.	Prototipo final.....	103
Figura 99	Lectura de entradas y salidas.....	103
Figura 100.	Diseño 2D del chasis	105
Figura 101.	Corte chorro de agua del chasis.....	105

Figura 102. Diseño 2D de la garra	106
Figura 103. Disposición área de trabajo en máquina de corte.....	106
Figura 104. Corte chorro de agua de la garra.....	107
Figura 105. Garra de sujeción.....	107
Figura 106. Sub ensamble garras con chasis	107
Figura 107. Acoples para amortiguadores	108
Figura 108. Sub ensamble amortiguador con el chasis	108
Figura 109. Sub ensamble motor con reductor.....	109
Figura 110. Medidas del reductor	109
Figura 111. Diseño 2D del acople para motor	109
Figura 112. Corte chorro de agua del acople del motor	110
Figura 113. Proceso de soldadura de acople de motor	110
Figura 114. Limado de exceso de suelda	111
Figura 115. Sub ensamble acople de motor con el chasis.....	111
Figura 116. Sub ensamble motor, reductor y acople.....	112
Figura 117. Sub ensamble motor, reductor, acople y rueda	112
Figura 118. Acople perfil	113
Figura 119. Sub ensamble acople con el perfil	113
Figura 120. Bases redondas de acrílico.....	113
Figura 121. Sub ensamble perfil con base redonda	114
Figura 122. Ensamble final del prototipo	114
Figura 123. Prueba estabilidad en asfalto.....	115
Figura 124. Prueba estabilidad en mármol	116
Figura 125 Prueba estabilidad en adoquín	116
Figura 126 Prueba de desplazamiento lineal.....	119
Figura 127. Sorteo de 3 obstáculos.....	121
Figura 128. Sorteo periférico de obstáculo	122
Figura 129. Gráfica de normal en $t=1.8595$	125

RESUMEN

El presente trabajo de titulación realiza la investigación de la locomoción de los robots omnidireccionales para diseñar e implementar el prototipo robot rueda esférica. El prototipo consta de tres llantas omnidireccionales acopladas a la estructura a 120° de separación entre cada rueda, cada uno de los tres motores son de corriente continua que permiten el movimiento continuo con una relación de transmisión de 12:1 para reducir la velocidad de giro a 83 RPM de acuerdo a los parámetros de diseño. Físicamente la estructura consta de tres partes: parte superior, central e inferior. En la parte superior se ubican las tarjetas de control para los motores, las baterías, sensor giroscopio y acelerómetro IMU6050 y tarjeta de control de todo el sistema. En la parte central se ubican el conjunto motores-reductores y ruedas a 45° de inclinación con respecto al eje vertical y a 120° de separación simétrica entre motores y amortiguadores sobre la parte intermedia. En la parte inferior se encuentran las garras de sujeción entre la estructura y la rueda esférica. Con respecto a la construcción e implementación se utilizó algunas técnicas de prototipado como la impresión 3D para piezas de acople, corte láser para las bases acrílico y corte por chorro de agua para obtener las garras y base central en aluminio. En lo que se refiere a la parte electrónica y de control se implementó un algoritmo de control PID que recibe como señales de entrada los datos de pitch y roll a través del procesamiento de valores del giroscopio y acelerómetro del sensor IMU, para enviar señales de control a los motores y estabilizar bajo el enfoque de péndulo invertido al prototipo. Al realizar las pruebas de funcionamiento, se obtuvo una velocidad promedio de desplazamiento lineal de 0.32m/s y al comparar el robot rueda esférica con plataformas omnidireccionales se obtuvo un 166.03% de mejora en tiempo de sorteo de obstáculos y un 535.65% en mejora en tiempo de rotación.

PALABRAS CLAVE:

- **ROBOTS**
- **ROBOT OMNIDIRECCIONAL**
- **ROBÓTICA**
- **PÉNDULO INVERTIDO**

ABSTRACT

The present work of titration realizes the investigation of the locomotion of the omnidirectional robots to design and implement the prototype robot spherical wheel. The prototype consists of three omnidirectional wheels coupled to the structure at 120° separation between each wheel, each of the three engines are direct current that allow continuous movement with a ratio of 12: 1 to reduce the speed of rotation at 83 RPM according to the design parameters. Physically the structure consists of three parts: top, middle and bottom. In the upper part there are the control cards for the motors, the batteries, the gyroscope sensor and the IMU6050 accelerometer and the control card of the whole system. In the central part are located the motor-gearboxes and wheels at 45° inclination with respect to the vertical axis and at 120° of symmetrical separation between engines and shock absorbers on the intermediate part. In the lower part there are the clamping claws between the structure and the spherical wheel. With respect to the construction and implementation, some prototyping techniques were used, such as 3D printing for coupling parts, laser cutting for acrylic bases and water jet cutting to obtain the claws and the central base in aluminum. Regarding the electronic and control part, a PID control algorithm was implemented that receives the pitch and roll data as input signals through the processing of the gyroscope and accelerometer values of the IMU sensor, to send control signals to the engines and stabilize under the inverted pendulum approach to the prototype. When performing the performance tests, an average speed of linear displacement of 0.32m / s was obtained and when comparing the spherical wheel robot with omnidirectional platforms a 166.03% improvement in obstacle draw time was obtained and 535.65% improvement in time of rotation.

KEYWORDS:

- **Spherical wheel robot**
- **Omnidirectional robot**
- **Inverted pendulum**

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Antecedentes

En el último siglo, la robótica ha tenido un desarrollo muy importante en lo que a investigación se refiere, abarcando desde robots móviles con sistemas muy simples hasta robots industriales con un mayor grado de complejidad, contemplando así una amplia área de interés en lo que se refiere a mejoras en la movilidad en traslación y rotación en diferentes terrenos y espacios. Los robots móviles se clasifican en robots con ruedas y con patas, estos se caracterizan por su capacidad de desplazamiento en un entorno desconocido o conocido parcialmente, sus aplicaciones cubren una gran variedad de campos, tales como trabajos subterráneos, tareas submarinas, movilización de objetos, misión espacial y exploración, vigilancia e intervención de seguridad, entre otros. (González Jiménez & Ollero Baturone, 2016).

Los robots con ruedas son el tipo de robot móvil preferido para muchos tipos de aplicaciones como movilidad en espacios reducidos, transporte de objetos, aplicaciones de exteriores. Estas plataformas robóticas han sido investigadas desde los principios de la robótica debido a que se requiere desarrollar máquinas autónomas que se transporten por si solas en distintos tipos de espacios. El estudio de los robots móviles con ruedas ha sido fructífero y han surgido distintas configuraciones con distintas aplicaciones, entre las más importantes se puede destacar a las configuraciones de robot diferencial, ackerman, oruga, skid steer y omnidireccional.

Los robots omnidireccionales son plataformas con configuraciones más complicadas que las configuraciones tradicionales y que tienen la característica de mejoras en la movilidad del prototipo al realizar movimientos a través de ruedas mecanum y derivadas. En la actualidad se están desarrollando robots móviles omnidireccionales empleando una sola esfera

como su rueda, este tipo de robot es también conocido como ballbot, el cual pertenece a una clase especial de robot-equilibrio y posee un solo punto de contacto con el suelo, capaz de lograr un mayor grado de agilidad que la mayoría de los robots móviles con ruedas, los mismos que presentan limitaciones direccionales en movimientos a diferencia el robot ballbot el cual se desplaza en cualquier dirección y también puede girar alrededor de un eje vertical (Ríos G. & Bueno L., 2008).

A nivel internacional el desarrollo de este tipo de sistema de locomoción se encuentra localizado en los siguientes proyectos:

Andrea Bonci, Massimiliano Pirani & Sauro Longhi 2016 titulado: “Embedded solutions for a class of highly unstable, underactuated and self-balancing robotic systems” traducido al español significa: “Soluciones integradas para una clase de sistemas robóticos altamente inestables, no accionados y auto equilibrados”. Este documento presenta un marco didáctico en sistemas electrónicos integrados que se utiliza para despertar la conciencia en estudiantes e ingenieros sobre los problemas de diseño que surgen en la realización de una clase de robots y vehículos aéreos poco desarrollados que deben ser controlados robustamente debido a su inestabilidad intrínseca. El sistema se basa en una placa integrada de uso general equipada con un microcontrolador de 32 bits que es capaz de administrar todas las tareas básicas de esta plataforma robótica: detección, actuación, control y comunicación. En la figura 1 se ilustra el prototipo desarrollado por parte de esta investigación. (Bonci, Pirani, & Longhi, 2016)

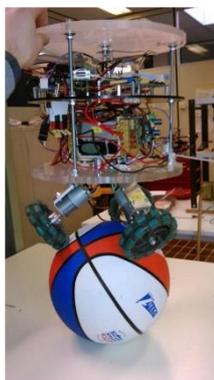


Figura 1 Plataforma del ballbot

Fuente: (Bonci, Pirani, & Longhi, 2016)

Pham Dinh Ba et al 2016 titulado: “Development of a robot balancing on a ball” traducido al español significa: “Balancing and translation control of a ball segway that a human can ride” traducido al español significa: “Equilibrio y control de traslación de un balón segway que un humano puede montar”. Un balón segway, es el robot tipo ballbot que puede llevar a una persona. El robot es de un tamaño grande y tiene una estructura similar a un automóvil montada en un solo neumático esférico con un asiento que un humano puede montar. Basado en el modelo cinemático del balón segway, el modelo dinámico 3D completo. También, en la ecuación de Lagrange y el método de desacoplamiento. Después de linealizar el modelo dinámico, se aplica un sistema de control de dos circuitos a cada plano para equilibrar el control, mantener la estabilidad y traslación de un punto a otro. El equilibrio y la transferencia del rendimiento del balón segway se evalúan mediante experimentos. La figura 2 ilustra un bosquejo del ball segway, también se aprecia el ball segway culminado. (Dinh Ba & et al, 2016)

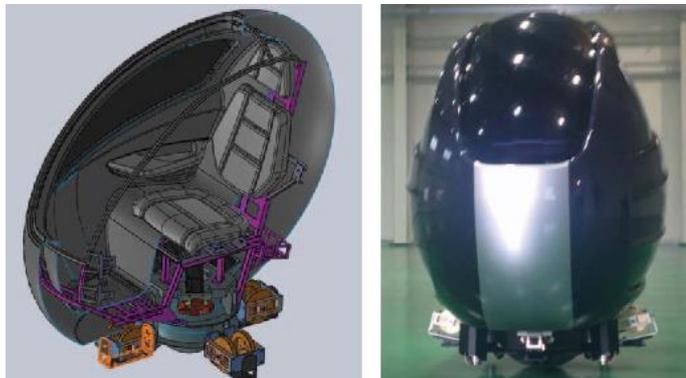


Figura 2 Robot ball segway

Fuente: (Dinh Ba & et al, 2016)

Fong & Uppill 2009 titulado: “Design, Construction, and Evaluation of a Ballbot with a Spherical Induction Motor” traducido al español significa: “Diseño, construcción y evaluación de un Ballbot con un motor de inducción esférico”. Ballbots son robots móviles dinámicos y de tamaño humano que se balancean sobre una sola rueda esférica. Originalmente se desarrollaron para abordar problemas fundamentales con la locomoción en robots móviles estáticamente estables: los robots móviles estáticamente estables deben

tener bases anchas y baja aceleración para evitar vuelcos durante el movimiento. Esto resulta en robots lentos, torpes y gordos. Los robots móviles dinámicamente estables, como los Ballbot, evitan este problema al equilibrarse activamente.

Los mecanismos de accionamiento tradicionales para los ballbots han sido mecánicamente complejos, y han implicado ruedas omnidireccionales o correas dentadas y rodillos de acero. Este trabajo detalla el diseño, la construcción y la evaluación de un robot de bola accionado con un motor de inducción esférico (SIM). El SIM es extremadamente simple mecánicamente, con solo el rotor moviéndose con respecto a los estatores; cuando se usa como unidad de un Ballbot, resulta en un robot móvil con solo dos partes móviles. La figura 3 ilustra al simbot en tamaño humano y un sistema de tracción con rodillos.



Figura 3 Simbot

Fuente: (Seyfarth, 2016)

A nivel nacional se localizó solo un proyecto casi similar referente a este nuevo sistema de locomoción, sin embargo, cabe destacar que, en el país, la Universidad de las Fuerzas Armadas es la primera en investigar sobre la movilidad con un robot de rueda esférica:

Pérez Camejo 2017 titulado: “Construcción de un robot móvil esférico controlado inalámbricamente para la ejecución de proyectos de investigación formativa y generativa de la facultad de ingeniería en sistemas electrónica e industrial.” Este robot consta de una carcasa esférica externa de 245 mm de diámetro accionada por una unidad interna de locomoción basado en péndulo que concentra el centro de masa del prototipo, dos servomecanismos

inteligentes, totalmente comandado de forma inalámbrica desde una aplicación web desarrollada con enfoque a la tecnología táctil de un smartphone o al teclado de un ordenador. En la figura 4 se ilustra el prototipo del robot móvil esférico con sus componentes internos. (Pérez Camejo, 2017)

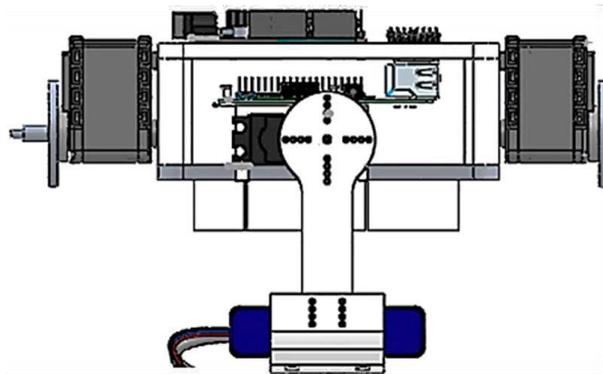


Figura 4 Composición interna del sistema de locomoción

Fuente: (Pérez Camejo, 2017)

1.2 Planteamiento del problema

Actualmente las investigaciones en el campo de la robótica, están relacionadas a diferentes aplicaciones en robots omnidireccionales, los cuales requieren de una alta complejidad en el diseño de la estructura del robot para poder desplazarse en cualquier dirección, viéndose limitados al ser utilizados en superficies irregulares.

Además, la mayoría de robots omnidireccionales con ruedas siempre giran sobre un único eje perpendicular al plano de rotación de la rueda, es decir similar a una rueda convencional. El principal problema de un robot móvil omnidireccional es el no poder desplazarse en áreas reducidas, pero, existe una solución parcial a ello que es un robot móvil omnidireccional pequeño de igual manera surge otro inconveniente que es el no poder trasladar cargas. Lo que se limita a un solo ya sea en espacios reducidos o transporte de cargas.

La diferencia de un robot móvil omnidireccional equilibrado que se traslada sobre una esfera, es que puede realizar ambas tareas de desplazamientos en espacios reducidos y combinado con cargas. El desplazamiento lo realiza en cualquier dirección, gira alrededor de un eje vertical, da al sistema un único

punto de contacto con el suelo permitiendo reducir la fricción y el espacio que necesita el sistema para conseguir un cambio de dirección.

El nivel de investigación de robots omnidireccionales con ruedas esféricas a nivel nacional es casi nulo, por lo que, es necesario asentar las primeras bases en investigación acerca del mismo, por lo que, mediante la realización de este proyecto se obtendrá una estructura amortiguada del robot, con un sistema de desplazamiento sobre una rueda esférica motriz (REM), siendo esta una solución en cuanto a mejora de la movilidad para los robots móviles omnidireccionales actuales. En virtud de lo mencionado se propone realizar un prototipo “Robot rueda esférica tipo omnidireccional”.

1.3 Descripción resumida del proyecto

El presente proyecto se basa en la investigación, diseño y construcción de un robot rueda esférica tipo omnidireccional, para la movilización de dicho robot por diversas superficies lisas. Desarrollando un prototipo con una estructura rígida que le permita amortiguar los cambios de superficies existentes y soportar cargas sobre la estructura. Además, de una distribución estratégica para la plataforma de carga, circuito de control, fuente de alimentación, controladora de motores, sensor de medición inercial(IMU), ESC (Controlador electrónico de velocidad), motores con reductores. ruedas omnidireccionales y la ubicación de la rueda esférica motriz, en la figura 5 se presenta un esquema del prototipo. Por último, se implementará un algoritmo de control para verificar la movilidad del prototipo a través de la manipulación del movimiento de los motores con los datos obtenidos del sensor IMU.

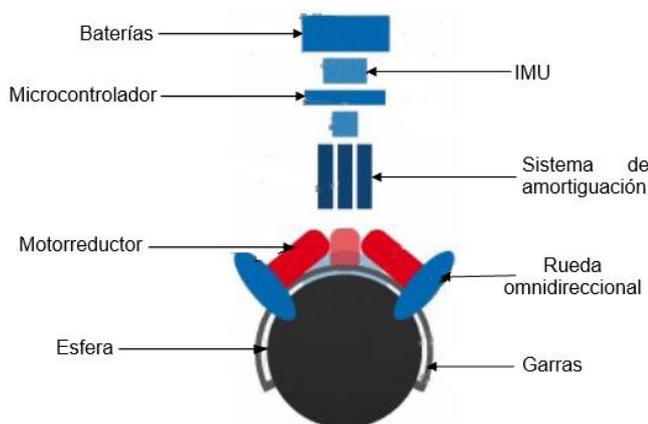


Figura 5 Esquemático del prototipo del robot

Los parámetros fundamentales para el diseño de la estructura del robot rueda esférica son su altura, masa, centro de gravedad y el par máximo que los actuadores pueden proporcionar. La exigencia de estos parámetros determina el momento de inercia del robot, la aceleración y agilidad. Los coeficientes de fricción de todas las partes implicadas en la transmisión también, juegan un papel importante en el diseño del sistema. Además, tener en cuenta la relación entre el momento de inercia del cuerpo del robot y la rueda esférica motriz, con el fin de prevenir la rotación no deseada de la esfera.

1.4 Justificación e importancia

Los sistemas mecánicos evolucionan constantemente gracias a los cambios tecnológicos que se producen en sus elementos constituyentes. En el caso de la rueda encontramos un componente, que, a pesar de las mejoras tecnológicas introducidas a lo largo de la historia, no ha cambiado radicalmente en cuanto a su definición: una rueda convencional gira siempre sobre un único eje, perpendicular al plano de rotación de la rueda.

El presente trabajo, generaliza el concepto de rueda motriz, mediante la representación de un prototipo que permite el desplazamiento de una rueda esférica en todas las direcciones de un plano denominado plano de locomoción. Este diseño permite el desplazamiento controlado de la rueda esférica en cualquier dirección de una superficie plana, horizontal o inclinada, mejorando así la movilidad en espacios reducidos mediante versatilidad de movimientos que se basan en la traslación y rotación.

El desarrollo de un prototipo inicial puede ser visto como un primer paso para el estudio de la cinemática y dinámica de los robots omnidireccionales esféricos, desarrollando nuevos sistemas móviles basados en el principio de desplazamiento omnidireccional a través de una rueda esférica, lo cual permitirá extender los límites del estado del arte de los sistemas holonómicos, temas de gran importancia en el ámbito de la robótica y mecatrónica; innovando en investigación a nivel nacional en estos nuevos sistemas de movimiento, lo cual no existe actualmente en Ecuador.

Con el perfeccionamiento y avance de este tipo de proyectos se pretende implementar en robots estacionarios este sistema como un nuevo medio de

desplazamiento. Dentro del campo de la medicina, se pretende utilizar este tipo de robots como robots de información, robots asistentes, entre otros.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Investigar la locomoción de los robots omnidireccionales para el diseño y construcción del prototipo robot rueda esférica para tareas de desplazamiento.

1.5.2 Objetivos específicos

- Investigar y analizar los parámetros de diseño de locomoción de los robots omnidireccionales a través de la recopilación de información de fuentes científicas aplicado a robots móviles.
- Diseñar y simular un prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional mediante el uso de CAD y CAE.
- Construir el prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional.
- Evaluar experimentalmente la estructura del prototipo con el control de estabilidad propuesto sobre un robot rueda esférica tipo omnidireccional en diversos ambientes de trabajo.

1.6 Metas

- Investigar y recopilar información sobre sistemas de locomoción aplicados a robots omnidireccionales hasta la segunda semana.
- Diseñar y simular el prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional hasta la sexta semana.
- Construir el prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional hasta la décima cuarta semana.
- Realizar pruebas experimentales con correcciones de errores hasta la décima octava semana.
- Registrar la información obtenida a lo largo del desarrollo del proyecto para anexarla como evidencia del trabajo realizado

1.7 Hipótesis

- La implementación del prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional permitirá una mejora de la movilidad en espacios reducidos.

1.8 Variables de investigación

- **Variable independiente:** prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional
- **Variable dependiente:** mejora de la movilidad en espacios reducidos.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS TEÓRICOS E INVESTIGACIÓN

Las bases teóricas constituyen el corazón del trabajo de investigación, pues es sobre este que se construye todo el trabajo. Una buena base teórica formará la plataforma sobre la cual se construye el análisis de los resultados obtenidos en el trabajo, sin ella no se puede analizar los resultados. (Pérez, 2017)

2.1 Robótica

La robótica es la sinergia de la mecánica, la electrónica, la informática y complementada con el razonamiento o inteligencia artificial con la finalidad de fabricar robots que poseen la capacidad de realizar labores dificultosos o imposibles para los seres humanos, con el detalle de, siempre conseguir una funcionalidad automática.

Según el ex escritor Asimov atribuye un conjunto de tres normativas que se denominan como las tres leyes de la robótica.

1. Un robot no puede perjudicar a un ser humano, ni con su inacción permitir que un ser humano sufra daño.
2. Un robot ha de obedecer las órdenes recibidas de un ser humano, excepto si tales órdenes entran en conflicto con la primera ley.
3. Un robot debe proteger su propia existencia mientras tal protección no entre en conflicto con la primera y segunda ley.

Estas tres leyes ayudan a regular el accionar de los robots, por consecuencia, la robótica ya no es parte del mundo ficticio de la ciencia ficción, ni mucho menos nuestro futuro a llegar, porque, la robótica ya está aquí en nuestro presente tangible. (Hernández & et al, 2015)

2.2 Robots móviles con ruedas

De acuerdo con Ollero (2001) los robots móviles fueron “creados desde los años treinta para desarrollar funciones inteligentes tales como descubrir caminos en laberintos”. Acorde a estas necesidades, la robótica se ha extendido y enfocado en la rama de los robots móviles, para incrementar su

autonomía permitiendo limitar en la mayoría de trabajos riesgosos la intervención humana.

La simplicidad estructural y mayor eficiencia al momento de movilizarse en terrenos duros y libres de obstáculos convierten a los robots móviles con ruedas la elección adecuada. Cabe destacar que las velocidades de estos van acorde a la aplicación y el entorno de desplazamiento del robot. Pero el mayor inconveniente de un robot móvil mediante rueda es el desplazamiento en terrenos blandos.

Existen múltiples tipos de locomoción para los robots móviles mediante ruedas desde tres hasta un sin número de ruedas implementadas en la estructura del robot. Las diferencias en sus características y propiedades de estos sistemas son de acuerdo a las dimensiones, cargas, maniobrabilidad y eficiencia energética.

2.3 Sistemas de Locomoción

Un sistema de locomoción es el mecanismo empleado a un robot que le permite moverse de un lugar a otro en un entorno deseado, inspirado en la locomoción humana o animal. Esto nos permite obtener robots que caminan, saltan, serpentean, ruedan, nadan, etc. Todo robot necesita poseer algún método de propulsión ya sean motores o energía.

Dentro de un sistema de locomoción existen los grados de libertad que posee un robot, cabe destacar que, un robot no es holonómico si el número de grados de libertad controlables es menor al número total de grados de libertad del robot y un robot es holonómico si el número de grados de libertad controlables es igual al número total de grados de libertad del robot.

Para los robots móviles basados en ruedas necesitan tener un peso distribuido uniformemente, ya que, el centro de gravedad de un robot se acentúa en el centro de su estructura garantizando un sistema de locomoción estable.

Para obtener un sistema de locomoción eficiente para un robot móvil se debe considerar los siguientes parámetros para el diseño:

- Estabilidad.

- Maniobrabilidad.
- Controlabilidad
- Tracción.
- Capacidad de subir pendientes.
- Mantenimiento.
- Impacto ambiental.

2.4 Tipos de sistemas de locomoción de robots móviles

El sistema de locomoción de los robots móviles es la característica fundamental para el diseño y construcción del robot, condicionada por su entorno. A continuación, se nombran los sistemas de locomoción más comunes en los robots móviles:

- Con patas.
- Con ruedas.
- Otros.

2.4.1 Locomoción basada en patas

Los robots que poseen un sistema de locomoción mediante patas el mecanismo y control posee un grado de complejidad mucho mayor que los robots con sistemas de locomoción mediante ruedas, obteniendo una estabilidad dinámica, como también el consumo energético en este sistema de locomoción es muy elevado. Mediante la figura 6, se explica la coordinación de todas las patas existentes del robot generando estabilidad. Las patas que se apoyan en una superficie dan como resultado los vértices de un polígono conteniendo de manera ideal el centro de gravedad del robot.

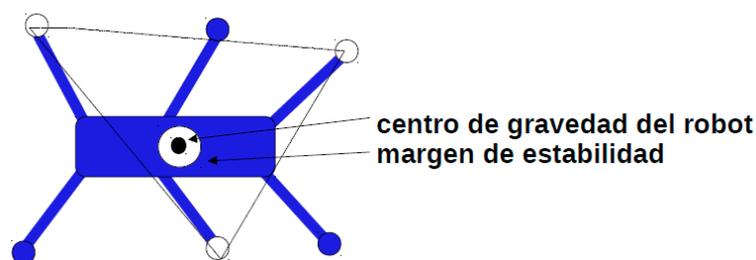


Figura 6. Locomoción mediante patas

Fuente: (Martínez Carranza, 2017)

La omnidireccionalidad mediante este sistema de locomoción con patas es posible. Existen tres tipos de configuración más comunes como son: bípedos, cuadrúpedos, hexápodos ilustrados en la figura 7, figura 8 y figura 9, respectivamente.



Figura 7. Robot bípedo KHR3HV.

Fuente: (Bravo, 2011)

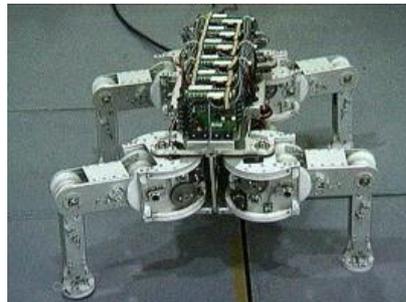


Figura 8. Robot cuadrúpedo TITAN VIII.

Fuente: (Ollero, 2001)



Figura 9. Robot hexápodo Erle-Spider.

Fuente: (Iglesias, 2015)

2.4.2 Locomoción mediante ruedas

Los robots con un sistema de locomoción mediante ruedas es la alternativa más frecuente para el diseño de los mismos debido a que posee una estabilidad estática. Estos robots poseen una regla general que es, si un

obstáculo cuyas dimensiones es igual o mayor al radio de sus ruedas el robot obtendrá dificultades para sobre montar el obstáculo.

A continuación, se citará los sistemas de locomoción mediante ruedas más utilizados para los robots móviles que son:

a. Ackerman

El sistema de locomoción tipo ackerman es el más utilizado para robots móviles que poseen cuatro ruedas convencionales. Este principio de funcionamiento permite al robot desplazarse en línea recta o en arco como se observa en la figura 10.

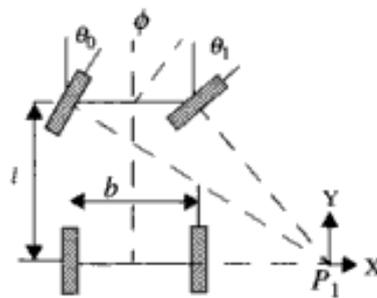


Figura 10. Sistema de locomoción Ackerman.

Fuente: (Ollero, 2001)

Según la figura 10, las ruedas se ubican de manera paralela un par de ruedas delanteras con el otro par de ruedas traseras, siendo las ruedas delanteras quienes dan dirección a la trayectoria del robot. Para realizar un giro por parte del robot se basa en un eje de rotación que consta en un punto de intersección P_1 entre las prolongaciones del punto centro las ruedas delanteras hacia la prolongación del eje x de las ruedas traseras, sin embargo necesita de una condición que es $\theta_1 > \theta_0$, esto quiere decir que el ángulo θ_1 de la rueda interior delantera gira un ángulo levemente superior al ángulo θ_0 de la rueda exterior delantera. Esta consideración permite eliminar desplazamientos involuntarios por parte del robot.



Figura 11. NavLab 2.

Fuente: (Ollero, 2001)

La figura 11 muestra el navLab 2, siendo este un vehículo todoterreno un claro ejemplo de este sistema de locomoción. El principal inconveniente de este sistema de locomoción ackerman es sus limitadas maniobras.

b. Triciclo

El sistema de locomoción tipo triciclo es la más apta en el área industrial para el transporte de cargas pesadas a baja velocidad. El diseño, elaboración y control resulta sencillo. Los robots elaborados a base este sistema de locomoción consta con una rueda convencional centrada orientable. A continuación, se muestra en la figura 12 el principio de funcionamiento de este sistema de locomoción:

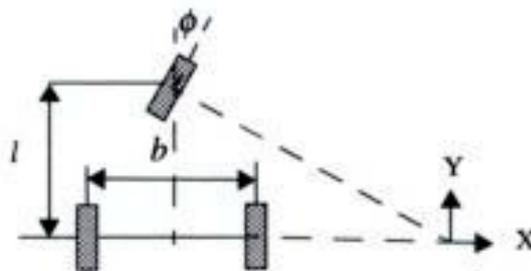


Figura 12. Sistema de locomoción triciclo.

Fuente: (Ollero, 2001)

Según la figura 12, se ubican dos ruedas fijas convencionales traseras sobre un eje en común con movimiento libre, la otra rueda convencional centrada orientable cumpliendo la función de tracción y dirección del robot. El giro se realiza sobre un punto de intersección entre la prolongación del centro de la rueda convencional centrada orientable hacia la prolongación del eje x de las ruedas traseras.

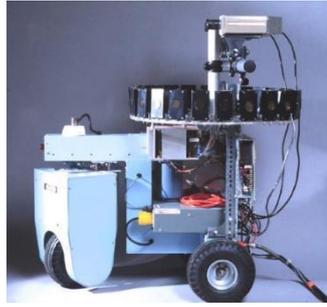


Figura 13. Neptune.

Fuente: (Bambino, 2008)

La figura 13 muestra al robot neptune fabricado por la Universidad Carnegie Mellon, claro ejemplo de un robot con sistema de locomoción tipo triciclo. La maniobrabilidad es mayor comparado con el sistema de locomoción tipo ackerman, pero, el principal inconveniente es su inestabilidad en superficies irregulares.

c. Direccionamiento diferencial

Este tipo de sistema locomoción tipo direccionamiento diferencial el nombre de este tipo de locomoción se debe a su direccionamiento dado por las velocidades relativas entre las dos ruedas laterales. Estas ruedas sirven de tracción y dirección a la vez. A continuación, se muestra en la figura 14, el principio de funcionamiento de este sistema de locomoción:

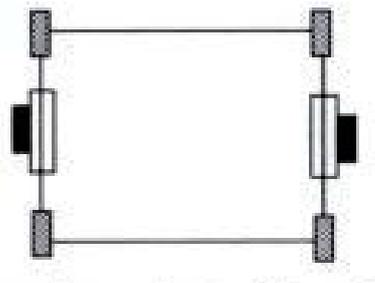


Figura 14. Sistema de locomoción diferencial.

Fuente: (Ollero, 2001)

Según la figura 14, se ubican las dos ruedas fijas convencionales de manera lateral al robot, siendo estas controladas de manera independiente. También se implementan una o más ruedas tipo castor utilizadas como soporte para el robot generando estabilidad.



Figura 15. Pioneer 2 DX.

Fuente: (Bambino, 2008)

La figura 15 muestra un ejemplo del sistema de locomoción direccionamiento diferencial implementado en el robot pioneer 2 DX fabricado por activemedia, La tracción y dirección asociado con el robot puede independizar las consignas de la velocidad lineal y angular. Un aspecto a tomar en consideración es el desgaste de las ruedas, esto genera cambio de diámetro de las ruedas distorsionando el control para la dirección del robot.

d. Skid Steer

El sistema locomoción tipo skid steer tiene como característica principal varias ruedas en la parte lateral del robot móvil, estas ruedas actúan de manera simultánea y se muestra en la figura 16.



Figura 16. Terregator.

Fuente: (Brode, 2016)

En la figura 16 se muestra al robot terregator digno ejemplo para este sistema de locomoción. El reto de este sistema es la combinación de las velocidades de las ruedas del lado izquierdo con el lado derecho para obtener un movimiento o trayectoria deseada. El robot mencionado anteriormente tiene como aplicación la minería.

e. Cintas de deslizamiento

Los robots móviles que poseen un sistema de locomoción mediante cintas de desplazamiento son llamados comúnmente como robots móviles tipo oruga. Tanto el impulso como el direccionamiento se lo realiza mediante cintas de deslizamiento. Las principales desventajas son la pérdida de velocidad a cambio de obtener mayor potencia y el consumo excesivo de energía. Este tipo de robot se muestra en la figura 17.

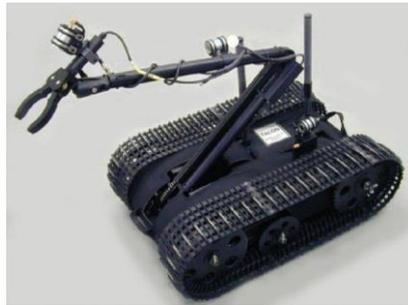


Figura 17. Robot tipo oruga

Fuente: (Cazorla, 2011)

En la figura 17 se observa un robot militar móvil tipo oruga llamado talon. Analógicamente su funcionamiento es similar al sistema de locomoción tipo skid steer, siendo el sistema de las pistas para las cintas de desplazamiento básicamente las ruedas de gran diámetro para el robot. Este tipo de locomoción es común mente empleados para navegación en superficies irregulares y blandos como: arena, nieve, gradas, etc. La cinta de desplazamiento le ayuda al robot sobrepasar obstáculos voluminosos que no pueden superar los robots móviles con ruedas.

f. Síncronas

Este sistema de locomoción tipo síncrona tiene como principio de funcionamiento la actuación simultánea de todas las ruedas especialmente a robots móviles de tres ruedas, permitiendo un movimiento síncrono al robot. Puede controlarse mediante dos motores, uno para controlar la dirección y el otro motor es para la tracción, figura 18.

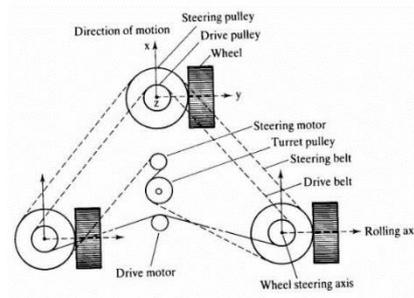


Figura 18. Sistema locomoción síncrona

Fuente: (Bambino, 2008)

En la figura 18 podemos observar un mecanismo adicional para la transmisión de correas concéntricas, este mecanismo también puede ser sustituido con un mecanismo engrane-corona. Este mecanismo permite a las ruedas y al chasis del robot dirigirse a la misma dirección.

g. Omnidireccional

Este sistema permite mayor libertad en el movimiento de un robot móvil. El componente principal del sistema de locomoción tipo omnidireccional son las ruedas suecas o ruedas omnidireccionales, permitiendo el movimiento omnidireccional para un robot móvil, es decir, realiza movimientos complicados reduciendo las restricciones cinemáticas del sistema de locomoción, figura 19.



Figura 19. Sistema locomoción omnidireccional

Fuente: (Podnar, 1985)

En la figura 19 se ilustra al robot uranus, ejemplo de este sistema de locomoción desarrollado en la universidad de Carnegie Mello. Los robots móviles omnidireccionales son aptos de trasladarse simultáneamente y rotar sobre el eje perpendicular, pero, sobre una superficie plana. Posicionando a estos robots como los de mayor maniobrabilidad.

2.5 Tipos de ruedas

Los tipos de ruedas más comunes empleados a los robots móviles para el desplazamiento de la plataforma robótica son las siguientes, ilustradas en la figura 20.

- Ruedas Convencionales.
- Ruedas de castor.
- Ruedas de bola.
- Ruedas omnidireccionales.

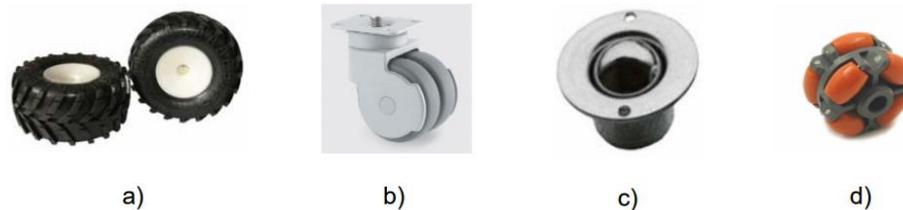


Figura 20 Ruedas: Convencionales, castor, Bola y Omnidireccionales.

Fuente: (Silva Ortigoza & et al, 2007)

2.5.1 Ruedas omnidireccionales

Las ruedas omnidireccionales permiten a los robots ruedas esféricas realizar movimientos con menos restricciones. El diseño de la rueda omnidireccional es similar a una rueda convencional con la diferencia que la rueda omnidireccional posee una corona de rodillos. El giro de los rodillos se realiza en un eje perpendicular a la dirección de avance, esto permite a los rodillos girara sobre sí mismo al aplicarse una fuerza lateral. Las ruedas omnidireccionales convierten un robot no holonómico a un robot holonómico. Las ruedas omnidireccionales conservan tres grados de libertad que son: girar sobre su eje, rotar sobre el eje vertical y deslizarse lateralmente. Mediante estos tres grados de libertad el robot móvil se desplaza de un punto a otro con una trayectoria recta. (Martínez & Sisto, 2009)

Las ruedas omnidireccionales poseen cuatro configuraciones ilustrados en la figura 21, dichas configuraciones toman como referencia la corona de rodillos. Los rodillos que se encuentran en las ruedas omnidireccionales se les conoce como componentes pasivos.

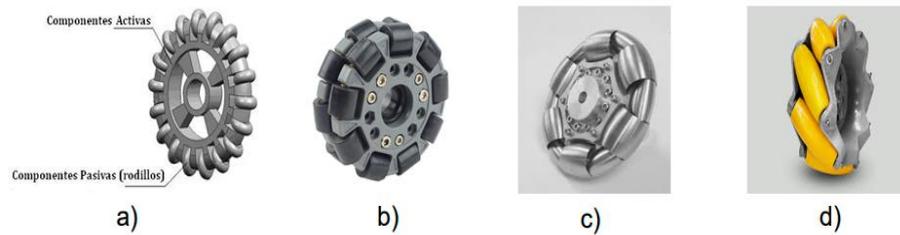


Figura 21 Ruedas a)Simple, b)Doble, c)Alternada d)Mecanum.

2.6 Robots omnidireccionales

Un robot omnidireccional se define como un vehículo que cuenta con movilidad en cualquier dirección desde un punto arbitrario del sistema de coordenadas sin realizar rotaciones previas al desplazamiento, llegando a su destino con la orientación deseada. Esta condición se debe a que la disposición de las ruedas brinda al robot tres grados de libertad en el plano xy , movimiento en el eje x , y , orientación ϕ (yaw).

Otra definición indica que:

“Un sistema omnidireccional posee la misma cantidad de posicionamientos posibles que la cantidad de coordenadas necesarias para localizar un vehículo de forma única en un plano”. (Martínez & Sisto, 2009)

Los robots omnidireccionales presentan una de las estructuras más eficientes para realizar movimientos frontales, laterales y rotacionales sobre una superficie plana, una de sus características principales es el tipo de sus ruedas, figura 22



Figura 22. a) Montacargas b) Robots futbolistas NXT.

2.7 Estructura de un robot omnidireccional.

Otro aspecto importante a considerar en la construcción del robot

omnidireccional es el diseño estructural y el número de ruedas a utilizarse. Los robots omnidireccionales se clasifican por la cantidad de ruedas implementados a su estructura, se clasifican en dos grupos:

- Robots omnidireccionales de tres ruedas.
- Robots omnidireccionales de cuatro ruedas.

Los robots omnidireccionales de tres ruedas poseen como ventajas el control y dirección simple, como desventajas poseen limitaciones en la estabilidad y tracción. En cambio, los robots omnidireccionales de cuatro ruedas poseen como ventajas mayor estabilidad y tracción, como desventajas la mecánica y controles más complejos.

2.7.1 Omnidireccional de 3 ruedas

Esta estructura tiene una configuración triangular, es decir posee tres ruedas omnidireccionales las cuales se encuentran dispuestas a 120° entre sí, para este tipo de disposición se usan ruedas universales. La figura 23 ilustra al robot rovio como ejemplo de este tipo de estructura para los robots omnidireccionales.



Figura 23. Robot omnidireccional 3 ruedas

Fuente: (Dr. Iacovino, 2012)

Este tipo de estructuras posee la ventaja de que su control es simple, ya que para cada velocidad deseada del vehículo existe una única combinación en las velocidades de las ruedas (a diferencia de los vehículos omnidireccionales de más de 3 ruedas). A su vez, una determinada combinación de velocidades en las ruedas determina una única velocidad del vehículo. (Lalama, 2014).

a. Robot rueda esférica

El robot rueda esférica es un robot móvil omnidireccional de tres diseñado con el principio de un péndulo invertido equilibrándose sobre una pelota o esfera, siendo la esfera el sistema de tracción, por consiguiente, solo contiene un único punto de contacto con el suelo. Para realizar algún tipo de desplazamiento en cualquier dirección en el plano el robot se inclina espontáneamente y girar sobre su propio eje, realizando movimientos de manera única. Es un sistema muy inestable.

El objetivo del prototipo robot rueda esférica tiene como objetivo demostrar un gran nivel de agilidad y rapidez de desplazamiento para la mejora de las locomociones mencionadas en este capítulo.

El sistema de locomoción de un robot rueda esférica es como un mouse invertido, se basa en el sentido inverso de la esfera de un mouse, donde, la esfera gira por accionamiento de las tres ruedas omnidireccionales, para el robot rueda esférica se puede utilizar tres tipos de configuraciones de las ruedas omnidireccionales como son: rueda omnidireccional simple, doble y alternada, figura 24.



Figura 24 Robot rueda esférica.

Fuente: (Fankhauser & Gwerder, 2010)

2.7.2 Omnidireccional de 4 ruedas

La diferencia entre los robots omnidireccionales de cuatro ruedas con los robots de tres ruedas es el desbloqueo de la limitación existente en la disponibilidad de las ruedas omnidireccionales simples y dobles, a ruedas omnidireccionales alternadas y mecanum. Además, se puede integrar mecanismos activos en la estructura del robot con la finalidad de aumentar los grados de libertad en cada una de las ruedas que permitan al robot desplazarse en caminos irregulares.

A continuación, se detallará los dos tipos más comunes de los robots omnidireccionales de cuatro ruedas:

a. Robot omnidireccional de cuatro ruedas orientables

Este tipo de diseño incorpora el sistema de transmisión continuamente variable (CVT), que permite al robot mayor maniobrabilidad a diferencia de un robot móvil con tracción diferencial. También, poseen ruedas omnidireccionales alternadas proporcionando un grado de libertad adicional en cada eje, pero, este tipo de ruedas se limitan a desplazarse en superficies regulares porque pierden las características de omnidireccionalidad en superficies irregulares. En la figura 25, se ilustra al robot ORM SOW que posee una configuración de un robot móvil diferencial y un robot omnidireccional convirtiéndose en un híbrido que se ajusta a las características de un robot omnidireccional de cuatro ruedas orientables.



Figura 25 Robot ORM SOW.

Fuente: (Song & Byun, 2006)

b. Robot omnidireccional de cuatro ruedas mecanum

Tal como lo indica su nombre este tipo de robot omnidireccional posee ruedas omnidireccionales mecanum cuya distribución se realiza paralelamente al chasis del robot. Al chasis se le incorpora un sistema de amortiguación, barras de suspensión, permitiendo convertir al chasis en un diseño más complejo, pero, con la finalidad de que el robot pueda desplazarse en superficies irregulares, rígidos y suaves, sin alterar las condiciones de omnidireccionalidad.

Estos robots tienen una capacidad de carga elevada en comparación a los anteriores, además se desplazan a grandes velocidades. Son utilizados en áreas industriales con caninos estrechos. La compañía de vehículos Mitsubishi lanzó una idea del vehículo deportivo omnidireccional MMR25

ilustrado en la figura 26, adaptado a la configuración de un robot omnidireccional de cuatro ruedas mecanum.



Figura 26 Vehículo deportivo omnidireccional MMR25.

Fuente: (Civantos, 2011)

2.8 Análisis de ventajas y desventajas de los sistemas de locomoción

Una vez citados todos los sistemas de locomoción que utilizan los robots móviles se procede a realizar una tabla comparativa de las ventajas y desventajas que poseen entre ellos, con la finalidad de profundizar dicho análisis en los distintos sistemas de locomoción:

Tabla 1

Análisis de sistemas de locomoción para robots móviles

SISTEMAS DE LOCOMOCIÓN PARA ROBOTS MÓVILES			
TIPO DE LOCOMOCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS	
Mediante patas	<ul style="list-style-type: none"> • Superan obstáculos con facilidad. • Resistentes al desgaste. • Desplazamiento en la mayoría de terrenos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de mecanismo complejo. • Consumo elevado de energía. • Mayor complejidad en el control. • Equilibrio complicado. 	
Mediante ruedas	Ackerman	<ul style="list-style-type: none"> • Fácil implementación. • Excelente estabilidad. • Diseño sencillo. • Alcanza altas velocidades. 	<ul style="list-style-type: none"> • Ángulo de giro limitado. • Restricciones holónomas. <ul style="list-style-type: none"> • Maniobras limitadas.
	Triciclo	<ul style="list-style-type: none"> • Tracción en ruedas traseras o delanteras. • No hay deslizamiento. • Uso de una rueda no holonómico. • Diseño fácil. 	<ul style="list-style-type: none"> • Centro de gravedad inestable. • Inestabilidad en terrenos irregulares. • Pérdida de tracción en pendientes.

CONTINÚA



Diferencial	<ul style="list-style-type: none"> • Variación de velocidad ajustable y rápida. • Configuración fácil de ruedas. • Económica. 	<ul style="list-style-type: none"> • Precisar el control para trayectorias. • Desgaste de neumáticos. • Desplazamiento en áreas sin obstáculos.
Skid Steer	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor tracción al suelo. • Mayor número de aplicaciones. • Desplazamiento en todos los terrenos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño complejo. • Mayor consumo de energía. • Compleja coordinación de velocidades para el desplazamiento.
Cintas de deslizamiento	<ul style="list-style-type: none"> • Se adhiere a toda clase de superficies. • Excelente estabilidad. • Mejor movilidad y controlabilidad para desplazamientos. • Sistema de control sencillo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Consumo de energía muy elevado. • Diseño mecánico muy complejo. • Vibraciones muy elevadas. • Imposible realizar trayectorias curvas.
Síncronas	<ul style="list-style-type: none"> • Posee motores independientes. • Fácil sistema de control. • Desplazamiento lineal preciso. 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabricación costosa. • Diseño mecánico complejo. • Difícil implementación.
Omnidireccional	<ul style="list-style-type: none"> • Diseño mecánico sencillo. • Gira en su propio eje vertical. • Movimientos en todas las direcciones. • Sistema holonómico. • Gran estabilidad. • Desplazamiento en la mayoría de superficies. 	<ul style="list-style-type: none"> • Sistema de control muy complejo. • Difícil implementación. • Componentes costosos.

2.9 Análisis cinemático y cinético de robot rueda esférica

El análisis cinemático del robot trata del estudio de movimiento del mismo inmerso al análisis de posición, velocidad y aceleración de cada componente del robot sin considerar las fuerzas existentes que ayudan a provocar el movimiento del robot. A demás se considera la geometría de la estructura y componentes para conseguir un centro de gravedad apropiado.

El modelo cinemático y cinético del robot rueda esférica se desarrolló en base al proyecto “Modelado y control de un ballbot” documento propuesto por (Fankhauser & Gwerder, 2010).

2.9.1 Postulados para el modelado

Planos verticales independientes

Al modelar los planos bidimensionales, los planos verticales se analizan independientemente.

Cuerpos rígidos / piso

El sistema total constará de dos cuerpos rígidos: la bola, el cuerpo del robot con el sistema de accionamiento y las ruedas omnidireccionales unidas a ella. El tener cuerpos rígidos descuida la deformación de los cuerpos debido a las complejas formas de geometría que puedan tener. Además, que la deformación del suelo es completamente nula.

Fricción

Los tipos de fricción como la rodadura y fricción cinética son insignificantes. Considerando solamente la fricción estática para el modelado.

Sin deslizamiento

Se analiza el modelado sin deslizamiento entre la esfera y el suelo y entre la esfera y las ruedas omnidireccionales. Esto implica que:

- Los pares aplicados de los motores están restringidos al punto en que no se produce deslizamiento entre la esfera y las ruedas omnidireccionales.
- La fricción estática es lo suficientemente alta, es decir, la fricción estática nunca será superada de tal manera que se garantiza que no habría deslizamiento.
- La esfera está siempre en contacto con el suelo, por lo que no se produce ningún salto. También el suelo es lo suficientemente rugoso para evitar el deslizamiento y evitar que no existan obstáculos que ocasionen que la bola se deslice.

Suelo Horizontal

El suelo en el cual el robot rueda esférica se mueve, es horizontal, lo que implica que la esfera no tenga energía potencial.

Retardo de tiempo insignificante

El retardo de tiempo entre las mediciones de los sensores y el control de los actuadores es insignificante.

Ruedas Omnidireccionales

Las 3 ruedas omnidireccionales, que tienen más de un punto de contacto, se modelan como 1 rueda omnidireccional que tiene un solo punto de contacto.

2.9.2 Descripción del modelado

- Las ruedas omnidireccionales y los motores se modelan como ruedas de accionamiento que incluyen los motores. Cada plano del modelado contiene una rueda de accionamiento que gira alrededor del eje ortogonal a dicho plano.
- En el plano vertical, el cuerpo se modela como un paralelepípedo sólido. Obviamente, la masa del cuerpo no se distribuye de manera uniforme, dividiéndolo en una parte superior e inferior con una distribución de masa uniforme, pero de una densidad diferente. Esto permite como el centro de masa no está exactamente en el centro del cuerpo.
- En el plano vertical, la esfera se modela como un disco que sólo rota alrededor del eje ortogonal al plano.
- En el plano horizontal, la esfera se modela como un disco con un radio r_s .

Los modelados 2D se dividen en un modelado para el plano yz y un modelado para el plano xy. El modelado para el plano xz es idéntico al modelado para el plano yz, por lo que solo se tratará el modelado para el plano yz y las ecuaciones de movimiento para el plano yz se pueden convertir fácilmente a las ecuaciones de movimiento para el plano xz.

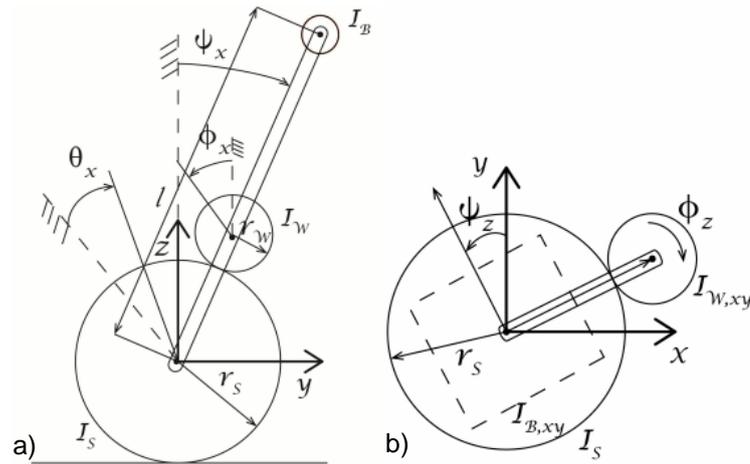


Figura 27. a) Modelado plano yz, b) Modelado plano xy

Tabla 2

Descripción de los parámetros utilizados para el modelado

Parámetro	Descripción
r_s	Radio de la esfera
r_w	Radio de la rueda
I_s	Momento de inercia de la esfera
I_w	Momento de inercia de la rueda en el plano yz y plano xz
$I_{w,xy}$	Momento de inercia de la rueda en el plano xy.
I_B	Momento de inercia del cuerpo del robot en el plano yz, xz
$I_{B,xy}$	Momento de inercia del cuerpo del robot en el plano xy
l	Distancia entre los centros de masa de la esfera y el cuerpo del robot.
θ_x, θ_y	Orientación de la esfera plano xy
ψ_x, ψ_y, ψ_z	Orientación del cuerpo
ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z	Orientación de la rueda

2.9.3 Coordenadas

Para derivar las ecuaciones de movimiento, las coordenadas necesitan ser definidas. Las coordenadas son definidas como se muestra para el plano yz y el plano xy en la figura 27, donde θ_x y θ_y indican la orientación de la esfera, ψ_x, ψ_y y ψ_z indican la orientación del cuerpo y ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z indican la orientación de la rueda. La traslación de la esfera a lo largo de los ejes x y y se deriva fácilmente de θ_x y θ_y .

Por lo tanto, las coordenadas mínimas para los 3 diferentes planos están definidas por:

$$q_{YZ} = \begin{bmatrix} \theta_X \\ \psi_X \end{bmatrix}, q_{XZ} = \begin{bmatrix} \theta_Y \\ \psi_Y \end{bmatrix}, q_{XY} = [\psi_Z] \quad \text{Ec 2. 1}$$

Coordenadas cartesianas en el plano yz

La posición expresada en coordenadas cartesianas para la esfera está denotada por y_S, z_S , para el cuerpo está denotada por y_B, z_B y para la rueda está denotada por y_W, z_W . El marco de coordenadas se elige de manera que el origen está a la misma altura que el centro de la esfera.

$$\begin{bmatrix} y_S \\ z_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_S \theta_X \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 2}$$

$$\begin{bmatrix} y_B \\ z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_S \theta_X + l \sin \psi_X \\ l \cos(\psi_X) \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 3}$$

$$\begin{bmatrix} y_W \\ z_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_S \theta_X + (r_S + r_W) \sin \psi_X \\ (r_S + r_W) \cos \psi_X \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 4}$$

Estas coordenadas son necesarias para calcular las ecuaciones de movimiento para el plano yz.

Coordenadas cartesianas en el plano xy

En el plano xy, el marco de coordenadas se elige de manera que el origen está localizado en el centro de la esfera. Solamente el movimiento de la rueda y el cuerpo es de importancia para las ecuaciones de movimiento. El cuerpo solo gira y no se mueve en el plano xy, lo que implica que la posición de la rueda necesita ser determinada y es denotada por $x_{W,xy}, y_{W,xy}$.

$$\begin{bmatrix} x_{W,xy} \\ z_{W,xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (r_S + r_W) \cos \psi_Z \\ (r_S + r_W) \sin \psi_Z \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 5}$$

2.9.4 Fuerzas del sistema

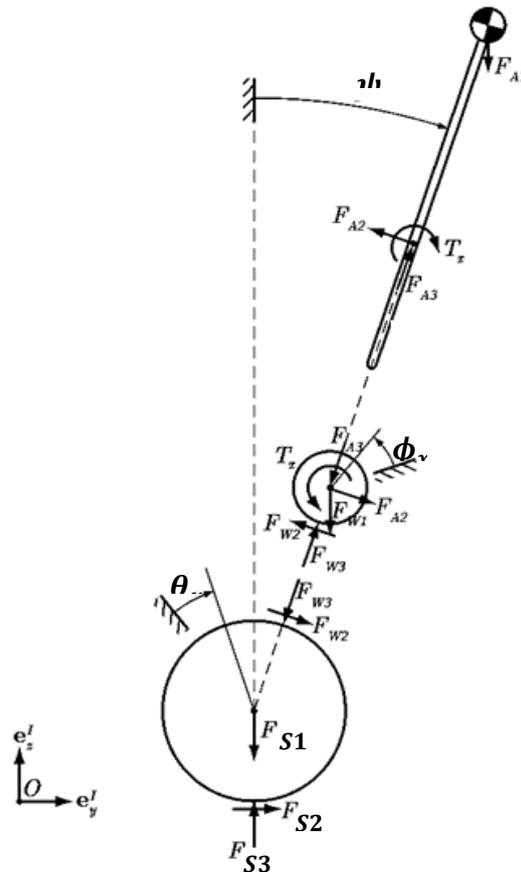


Figura 28. Diagrama cuerpo libre del modelado

Fuente: (Fankhauser & Gwerder, 2010)

Tabla 3

Descripción diagrama cuerpo libre

Parámetro	Descripción
ϕ_x	Ángulo orientación rueda al eje x
θ_x	Ángulo orientación esfera al eje x
ψ_x	Ángulo orientación cuerpo al eje x
F_{S1}, F_{W1}, F_{A1}	Peso de esfera, rueda y del cuerpo
F_{S2}, F_{W2}, F_{A2}	Fuerza contacto esfera, rueda y cuerpo
F_{S3}, F_{W3}, F_{A3}	Reacciones puntos de contacto esfera, rueda y cuerpo
$\ddot{x}_S, \ddot{x}_W, \ddot{x}_A$	Aceleración esfera, rueda y cuerpo en eje x
$\ddot{z}_S, \ddot{z}_W, \ddot{z}_A$	Aceleración esfera, rueda y cuerpo en eje z
Θ_S	Inercia de la esfera
Θ_W	Inercia de la rueda
Θ_A	Inercia del cuerpo
m_{tot}	Masa total del sistema incluido la esfera

Realizando sumatoria de fuerzas

Esfera

Sumatoria de fuerzas en el eje x

$$\Sigma F_x = m_S * \ddot{x}_S$$

$$m_S \ddot{x}_S = F_{S2} + F_{W2} \cos \psi_x - F_{W3} \sin \psi_x$$

Ec 2. 6

Sumatoria de fuerzas en el eje z

$$\Sigma F_z = m_S * \ddot{z}_S$$

$$m_S * \ddot{z}_S = F_{S3} - F_{S1} - F_{W2} \sin \psi_x - F_{W3} \cos \psi_x$$

Ec 2. 7

Sumatoria de fuerzas del momento angular

$$\Theta_S \ddot{\phi}_x = F_{W2} r_S - F_{S2} r_S$$

Ec 2. 8

Rueda de accionamiento

Sumatoria de fuerzas en el eje x

$$m_W \ddot{x}_W = -F_{W2} \cos \psi_x + F_{W3} \sin \psi_x + F_{A2} \cos \psi_x - F_{A3} \sin \psi_x$$

Ec 2. 9

Sumatoria de fuerzas en el eje z

$$m_W \ddot{z}_W = -F_{W1} + F_{W2} \sin \psi_x + F_{W3} \cos \psi_x - F_{A2} \sin \psi_x - F_{A3} \cos \psi_x$$

Ec 2. 10

Conservación del momento angular

$$\Theta_W \ddot{\psi}_x = -F_{W2} r_S + M_x$$

Ec 2. 11

Cuerpo del robot

Sumatoria de fuerzas en el eje x

$$m_A \ddot{x}_A = -F_{A2} \cos \psi_x + F_{A3} \sin \psi_x$$

Ec 2. 12

Sumatoria de fuerzas en el eje z

$$m_A \ddot{z}_A = -F_{A1} + F_{A2} \sin \psi_x + F_{A3} \cos \psi_x$$

Ec 2. 13

Conservación del momento angular

$$\Theta_A \ddot{\theta}_x = -F_{A2} (l - r_S - r_W) + M_x$$

Ec 2. 14

Fuerzas potenciales

$$F_{S1} = m_S * g$$

Ec 2. 15

$$F_{W1} = m_W * g$$

Ec 2. 16

$$F_{A1} = m_A * g$$

Ec 2. 17

Resolviendo las ecuaciones para las fuerzas F_{A2} y F_{A3}

$$F_{A2} = m_A(g \sin \psi_x - r_S \ddot{\theta}_x \cos \psi_x - \ddot{\psi}_x l) \quad \text{Ec 2. 18}$$

$$F_{A3} = m_A(g \cos \psi_x + r_S \ddot{\theta}_x \sin \psi_x - \dot{\psi}_x^2 l) \quad \text{Ec 2. 19}$$

Con estos resultados, las fuerzas F_{W2} y F_{W3} pueden ser calculadas

$$F_{W2} = (m_A + m_W)(g \sin \psi_x - r_S \ddot{\theta}_x \cos \psi_x) - \zeta \ddot{\psi}_x \quad \text{Ec 2. 20}$$

$$F_{W3} = (m_A + m_W)(g \cos \psi_x + r_S \ddot{\theta}_x \sin \psi_x) - \zeta \dot{\psi}_x^2 \quad \text{Ec 2. 21}$$

Con los resultados, las fuerzas F_{S2} y F_{S3} pueden ser calculadas

$$F_{S2} = \zeta(\ddot{\psi}_x \cos \psi_x - \dot{\psi}_x^2 \sin \theta_x) + r_S m_{tot} \ddot{\theta}_x \quad \text{Ec 2. 22}$$

$$F_{S3} = -\zeta(\ddot{\psi}_x \sin \psi_x + \dot{\psi}_x^2 \cos \theta_x) + g m_{tot} \quad \text{Ec 2. 23}$$

Donde

$$m_{tot} = m_S + m_A + m_W \quad \text{Ec 2. 24}$$

$$\zeta = l m_A + (r_S + r_W) m_W \quad \text{Ec 2. 25}$$

2.9.5 Velocidades angulares de las ruedas

El movimiento esperado del robot se obtiene variando la velocidad para cada rueda en consecuencia. Para encontrar la velocidad angular de las tres ruedas ($\omega_1, \omega_2, \omega_3$), se debe proporcionar tres velocidades conocidas como la velocidad en la dirección x (v_x), velocidad en y (v_y) y la velocidad de rotación alrededor del cuerpo (ω_o), figura 29 (Han, Han, & Jo, 2014)

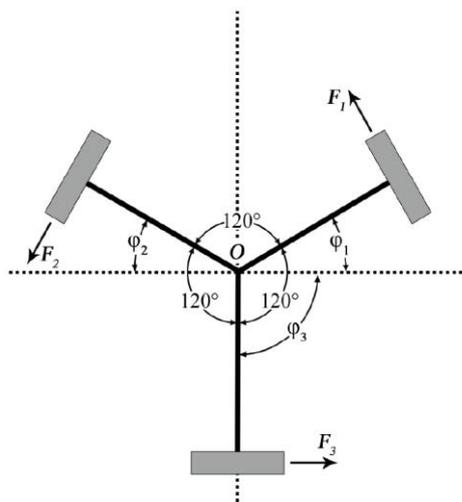


Figura 29. Diagrama de cuerpo libre de las ruedas.

Fuente: (Han, Han, & Jo, 2014)

Donde:

F_1, F_2, F_3 : fuerzas tangenciales de las ruedas

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$: orientación de las ruedas

Resolviendo la sumatoria de fuerzas en las componentes x,y.

$$Ma_x = -F_1 \sin \varphi_1 - F_2 \sin \varphi_2 + F_3 \sin \varphi_3 \quad \text{Ec 2. 26}$$

$$Ma_y = F_1 \cos \varphi_1 - F_2 \cos \varphi_2 - F_3 \cos \varphi_3 \quad \text{Ec 2. 27}$$

$$MR\alpha_o = F_1 + F_2 + F_3 \quad \text{Ec 2. 28}$$

Sustituyendo $\varphi_1 = \varphi_2 = 30^\circ$ y $\varphi_3 = 90^\circ$ en (Ec 2.26)(Ec 2.27) y transformando en una matriz:

$$\begin{bmatrix} Ma_x \\ Ma_y \\ MR\alpha_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.5 & -0.5 & 1 \\ 0.866 & -0.866 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 29}$$

Obteniendo la inversa la de matriz (Ec 2.29):

$$\begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -0.33 & 0.58 & 0.33 \\ -0.33 & -0.58 & 0.33 \\ 0.67 & 0 & 0.33 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Ma_x \\ Ma_y \\ MR\alpha_o \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 30}$$

Sustituyendo $a = r_w \omega'$ en (Ec 2.30) y simplificando e integrando se obtienen las velocidades angulares de las tres ruedas:

$$\omega_1 = \frac{-0.33v_x + 0.58v_y + 0.33r\omega_o}{r_w} \quad \text{Ec 2. 31}$$

$$\omega_2 = \frac{-0.33v_x - 0.58v_y + 0.33r\omega_o}{r_w} \quad \text{Ec 2. 32}$$

$$\omega_3 = \frac{0.67v_x + 0.33r\omega_o}{r_w} \quad \text{Ec 2. 33}$$

Donde:

$\omega_1, \omega_2, \omega_3$ = velocidad angular de cada rueda

v_x, v_y = velocidad lineal en x,y.

ω_o = velocidad angular de rotación.

r = radio de contacto rueda con esfera

La velocidad lineal de las ruedas se define mediante la siguiente expresión:

$$V_i = r_{c,i} * \omega_i, \quad i = 1,2,3 \quad \text{Ec 2. 34}$$

Donde:

$r_{c,i}$ =posición de las ruedas

ω_i =velocidad angular de las ruedas

2.9.6 Energía y torque en los planos YZ/XZ

2.9.6.1 Energía cinética y potencial del sistema

Energías en la esfera

La energía cinética de la esfera se define como la suma de la energía cinética de translación y rotación.

$$E_{c_{S,yz}} = \frac{1}{2} m_S v_{S,yz}^T * v_{S,yz} + \frac{1}{2} I_S \omega_s^2$$

Donde:

m_S : masa de la esfera

$v_{S,yz}$: velocidad de la esfera

$$v_{S,yz}^T * v_{S,yz} = |v_{S,yz}|^2$$

$$v_{S,yz}^T * v_{S,yz} = \dot{y}_S^2 + \dot{z}_S^2$$

$$v_{S,yz}^T * v_{S,yz} = r_S^2 \omega_s^2$$

Sustituyendo en la ecuación de la energía cinética de la esfera

$$E_{c_{S,yz}} = \frac{1}{2} m_S r_S^2 \omega_s^2 + \frac{1}{2} I_S \omega_s^2 \quad \text{Ec 2. 35}$$

La energía potencial de la esfera es cero porque se asume que la esfera solo se mueve sobre superficies horizontales.

$$E_{p_{S,yz}} = 0 \quad \text{Ec 2. 36}$$

Energía del cuerpo

La energía cinética del cuerpo está definida por:

$$E_{c_{C,yz}} = \frac{1}{2} m_C v_{C,yz}^T * v_{C,yz} + \frac{1}{2} I_C \dot{\psi}_x^2$$

Donde:

m_C : masa del cuerpo

$$v_{C,yz}^T * v_{C,yz} = \dot{y}_C^2 + \dot{z}_C^2$$

$$v_{C,yz}^T * v_{C,yz} = r_S^2 \omega_s^2 + 2r_S l \omega_s \dot{\psi}_X \cos \psi_X + l^2 \dot{\psi}_X^2$$

Sustituyendo en la ecuación de la energía cinética del cuerpo

$$Ec_{c,yz} = \frac{1}{2} m_C (r_S^2 \omega_s^2 + 2r_S l \omega_s \dot{\psi}_X \cos \psi_X + l^2 \dot{\psi}_X^2) + \frac{1}{2} I_C \dot{\psi}_X^2$$

$$Ec_{c,yz} = \frac{1}{2} m_A (r_S^2 \omega_s^2 + 2r_S * l * \omega_s \dot{\psi}_X \cos \psi_X) + \frac{1}{2} (I_C + m_A l^2) \dot{\psi}_X^2 \quad \text{Ec 2. 37}$$

$$I'_C = I_C + m_C l^2$$

Donde:

I_C : momento de inercia del cuerpo alrededor del eje del centro de masa

I'_C : momento de inercia del cuerpo alrededor del eje de rotación del cuerpo

La energía potencial del cuerpo está definida por:

$$Ep_{c,yz} = m_A g * l * \cos \psi_X \quad \text{Ec 2. 38}$$

Energía en la rueda

La energía cinética de la rueda está definida por:

$$Ec_{W,yz} = \frac{1}{2} m_W v_{W,yz}^T * v_{W,yz} + \frac{1}{2} I_W \dot{\phi}_x^2$$

Donde:

m_W : masa de la rueda

$$\dot{\phi}_x = \frac{r_S}{r_W} (\omega_s - \dot{\psi}_X)$$

$$v_{W,yz}^T * v_{W,yz} = \dot{y}_W^2 + \dot{z}_W^2$$

$$v_{W,yz}^T * v_{W,yz} = r_S^2 \omega_s^2 + 2r_S (r_S + r_W) \omega_s \dot{\psi}_X \cos \psi_X + (r_S + r_W)^2 \dot{\psi}_X^2$$

Entonces:

$$Ec_{W,yz} = \frac{1}{2} m_W (r_S^2 \omega_s^2 + 2r_S (r_S + r_W) \omega_s \dot{\psi}_X \cos \psi_X + (r_S + r_W)^2 \dot{\psi}_X^2) + \frac{1}{2} I_W \left(\frac{r_S}{r_W} (\omega_s - \dot{\psi}_X) \right)^2 \quad \text{Ec 2. 39}$$

La energía potencial de la rueda está definida por:

$$Ep_{W,yz} = m_W g (r_S + r_W) \cos \psi_X \quad \text{Ec 2. 40}$$

2.9.6.2 Torques externos

El único par externo del sistema es el par que genera el motor, el cual se transmite a la rueda y está denotado por $T_{W,yz}$ que es la entrada del modelo y tiene una sola componente en la dirección x ; es decir $T_{W,yz} = T_X$. Usando la

relación entre $\dot{\phi}_x$ y los rangos de las coordenadas mínimas ω_s y $\dot{\psi}_x$, el jacobiano geométrico denotado por J asigna velocidades de articulación a velocidades de efecto final, se muestra en la figura 30.

$$\dot{\phi}_x = \frac{r_s}{r_w} (\omega_s - \dot{\psi}_x)$$

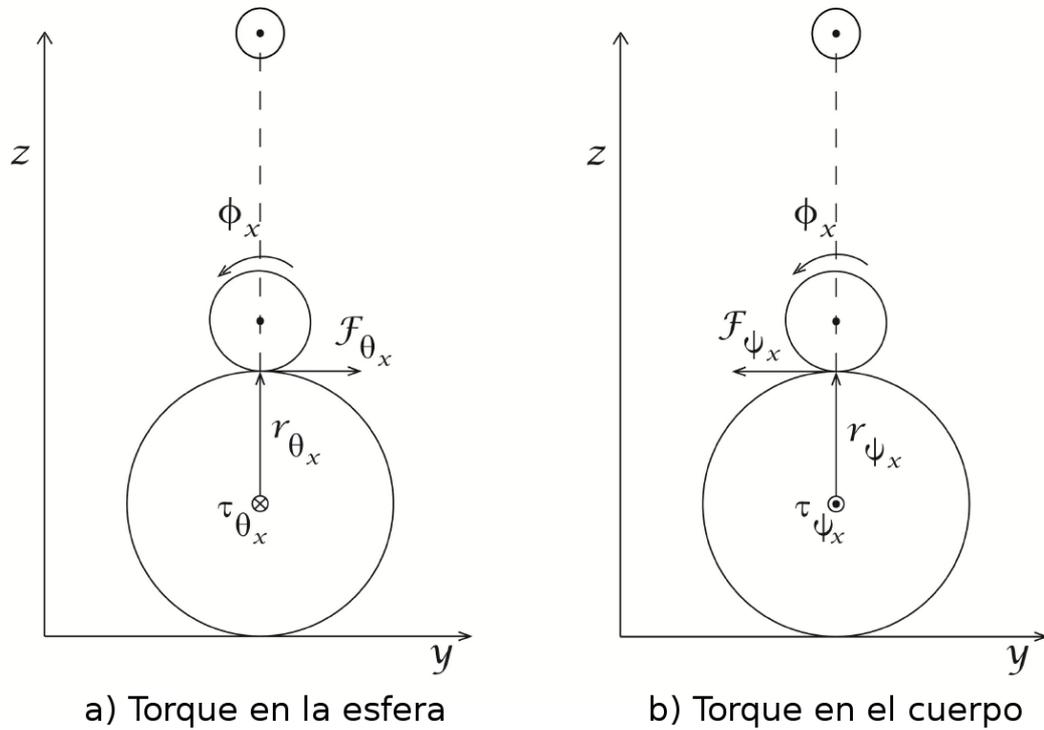


Figura 30. a) Torque en la esfera b) Torque en el cuerpo

Fuente: (Blonk, 2014)

Donde:

T_{θ_x} =torque de coordenadas mínimas esfera

F_{θ_x} =fuerza en coordenadas mínimas esfera

T_{ψ_x} =torque de coordenadas mínimas cuerpo

F_{ψ_x} =fuerza en coordenadas mínimas cuerpo

La relación entre el torque de entrada y los torques de control de las coordenadas mínimas está dada por:

$$T_{ext} = \begin{bmatrix} T_{\theta_x} \\ T_{\psi_x} \end{bmatrix}$$

$$T_{ext} = J^T T_X$$

$$T_{ext} = \begin{bmatrix} \frac{r_s}{r_w} \\ \frac{r_s}{r_w} \\ -\frac{r_s}{r_w} \end{bmatrix} T_X$$

Ec 2. 41

2.9.7 Conversión de torques

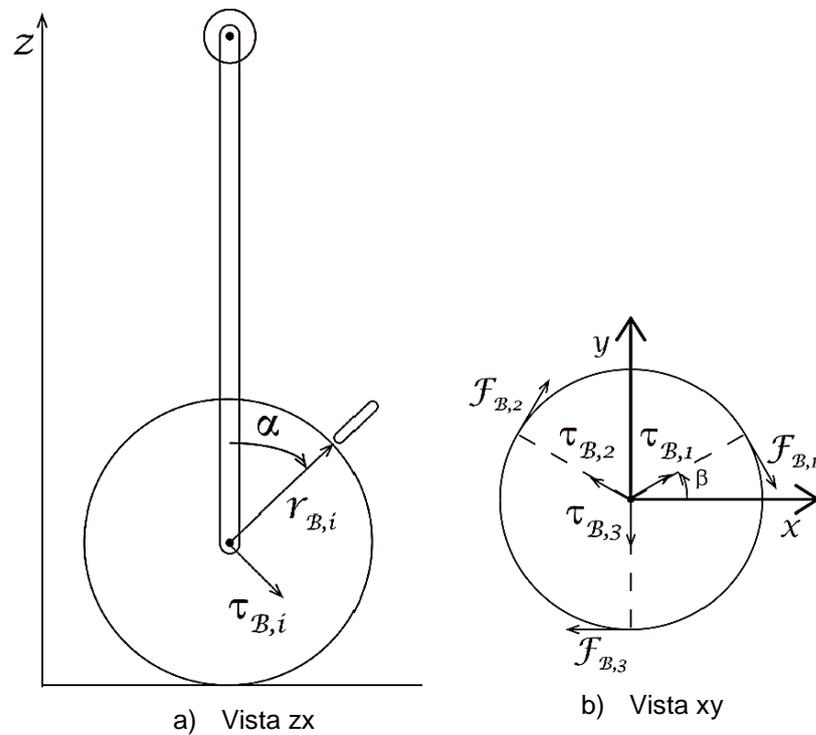


Figura 31. Bosquejo torques del cuerpo generados por los motores

Fuente: (Blonk, 2014)

Para la conversión de torque se utiliza la relación entre los torques de las ruedas en los planos anteriormente desarrollados y los torques reales de las ruedas. Esta relación se deriva bajo el principio de conservación del torque del cuerpo del robot.

$$T_{C,x} + T_{C,y} + T_{C,z} = T_{C,1} + T_{C,2} + T_{C,3}$$

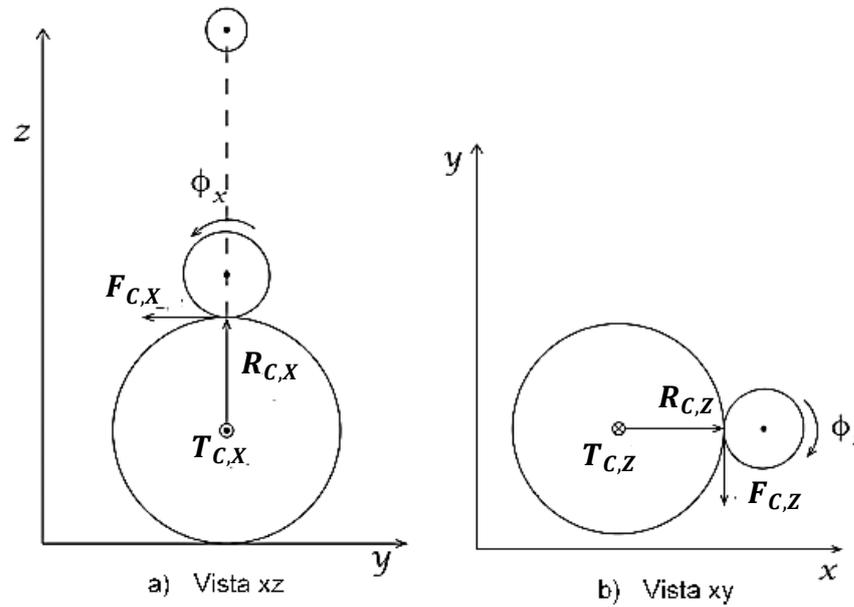


Figura 32. Torques del cuerpo por los motores y fuerzas

Fuente: (Blonk, 2014)

Donde:

$T_{C,i}$: Torque vector del cuerpo generado por el torque de la rueda i ($i = 1, 2, 3$)

$T_{C,j}$: Torque del cuerpo generado por el torque de la rueda j ejes ($j = x, y, z$)

$F_{C,i}$: Fuerza ortogonal a $T_{C,i}$

$r_{C,j}$: Palanca correspondiente a $F_{C,j}$

Los vectores de torque se calculan de la siguiente manera:

$$T_{C,i} = r_{C,i} \times F_{C,i} \quad \text{Ec 2. 42}$$

$$T_{C,j} = r_{C,j} \times F_{C,j} \quad \text{Ec 2. 43}$$

2.9.7.1 Cálculo de torques reales del cuerpo

Las fuerzas que actúan en el cuerpo se encuentran a través de las fuerzas generadas por las ruedas.

$$F_{C,1} = \frac{T_1}{r_w} \begin{bmatrix} \sin \beta \\ -\cos \beta \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 44}$$

$$F_{C,2} = \frac{T_2}{r_w} \begin{bmatrix} \sin \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\cos \left(\beta + \frac{2\pi}{3} \right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 45}$$

$$F_{C,3} = \frac{T_3}{r_W} \begin{bmatrix} \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 46}$$

Las posiciones de las ruedas se definen como

$$r_{C,1} = r_S \begin{bmatrix} \sin(\gamma) \cos(\beta) \\ \sin(\gamma) \sin(\beta) \\ \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 47}$$

$$r_{C,2} = r_S \begin{bmatrix} \sin(\gamma) \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\gamma) \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 48}$$

$$r_{C,3} = r_S \begin{bmatrix} \sin(\gamma) \cos\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin(\gamma) \sin\left(\beta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\gamma) \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 49}$$

Sustituyendo las fuerzas y las posiciones en la ecuación:

$$T_{C,1} = \begin{bmatrix} \frac{r_S \cos(\gamma) T_1 \cos(\beta)}{r_W} \\ \frac{r_S \cos(\gamma) T_1 \sin(\beta)}{r_W} \\ -\frac{\sin(\gamma) r_S T_1}{r_W} \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 50}$$

$$T_{C,2} = \begin{bmatrix} \frac{r_S \cos(\gamma) T_2 \cos\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right)}{r_W} \\ \frac{r_S \cos(\gamma) T_2 \sin\left(\beta + \frac{2\pi}{3}\right)}{r_W} \\ -\frac{\sin(\gamma) r_S T_2}{r_W} \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 51}$$

$$T_{C,3} = \begin{bmatrix} \frac{r_S \cos(\gamma) T_3 \cos\left(-\beta + \frac{2\pi}{3}\right)}{r_W} \\ -\frac{r_S \cos(\gamma) T_3 \sin\left(-\beta + \frac{2\pi}{3}\right)}{r_W} \\ -\frac{\sin(\gamma) r_S T_3}{r_W} \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 52}$$

2.9.7.2 Cálculo de los torques reales del cuerpo en los ejes $T_{C,j}$

Las fuerzas reales en los ejes se obtienen a través del torque generado en las ruedas.

$$F_{C,x} = \frac{T_x}{r_w} \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{C,y} = \frac{T_y}{r_w} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$F_{C,z} = \frac{T_z}{r_w} \begin{bmatrix} \sin(\beta) \\ -\cos(\beta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Las palancas están definidas por

$$r_{C,x} = r_s \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$r_{C,y} = r_s \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$r_{C,z} = r_s \begin{bmatrix} \cos(\beta) \\ \sin(\beta) \\ 0 \end{bmatrix}$$

Los torques del cuerpo del robot son generados por el sistema virtual

$$T_{C,x} = \begin{bmatrix} \frac{r_s T_x}{r_w} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{C,y} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{r_s T_y}{r_w} \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$T_{C,z} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{r_s T_z}{r_w} \end{bmatrix}$$

Sustituyendo las ecuaciones

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2 \cos(\beta)}{3 \cos(\gamma)} & \frac{2 \sin(\beta)}{3 \cos(\gamma)} & \frac{1}{3 \sin(\gamma)} \\ -\frac{\cos(\beta) + \sqrt{3} \sin(\beta)}{3 \cos(\gamma)} & \frac{-\sin(\beta) + \sqrt{3} \cos(\beta)}{3 \cos(\gamma)} & \frac{1}{3 \sin(\gamma)} \\ \frac{-\cos(\beta) + \sqrt{3} \sin(\beta)}{3 \cos(\gamma)} & \frac{\sin(\beta) + \sqrt{3} \cos(\beta)}{3 \cos(\gamma)} & \frac{1}{3 \sin(\gamma)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix}$$

Ec 2. 53

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \cos(\beta) & -\frac{\cos(\gamma)[\cos(\beta) + \sqrt{3} \sin(\beta)]}{2} & -\frac{\cos(\gamma)[\cos(\beta) - \sqrt{3} \sin(\beta)]}{2} \\ \cos(\gamma) \sin(\beta) & -\frac{\cos(\gamma)[\sin(\beta) - \sqrt{3} \cos(\beta)]}{2} & -\frac{\cos(\gamma)[\sin(\beta) + \sqrt{3} \cos(\beta)]}{2} \\ \sin(\gamma) & \sin(\gamma) & \sin(\gamma) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \end{bmatrix} \quad \text{Ec 2. 54}$$

CAPÍTULO III

DISEÑO MECÁNICO Y DE CONTROL

3.1 Introducción

En el presente capítulo se describe el diseño final del prototipo, que comenzó con un diseño preliminar que se fue modificando y optimizando durante la etapa de diseño, a fin de cumplir con todos los requerimientos funcionales exigidos para este tipo de robots.

3.2 Parámetros de diseño

Los parámetros de diseño del prototipo robot rueda esférica a ser implementado se basa en lo siguiente:

- Peso estimado de la estructura = 10kg
- Velocidad de desplazamiento = 0.35m/s
- Cantidad de motores = 3
- Cantidad de amortiguadores = 3
- Diámetro de la esfera = 220mm
- Altura máxima = 1000mm
- Ancho máximo = 400mm
- Ángulo de separación entre motores = 120°
- Ángulo de inclinación de motores = 45°
- Ángulo de separación ente amortiguadores = 120°
- Ángulo de separación tarjetas de control = 120°
- Desplazamiento máximo amortiguadores=2mm

3.3 Diseño geométrico del prototipo

De acuerdo a los parámetros de diseño y requerimientos funcionales, se propone para el prototipo robot rueda esférica la geometría mostrada en la figura 33.

Los principales elementos que componen el prototipo se muestran en la figura y son:

1. Chasis del prototipo

2. Garras de sujeción
3. Amortiguadores
4. Esfera
5. Cuerpo superior

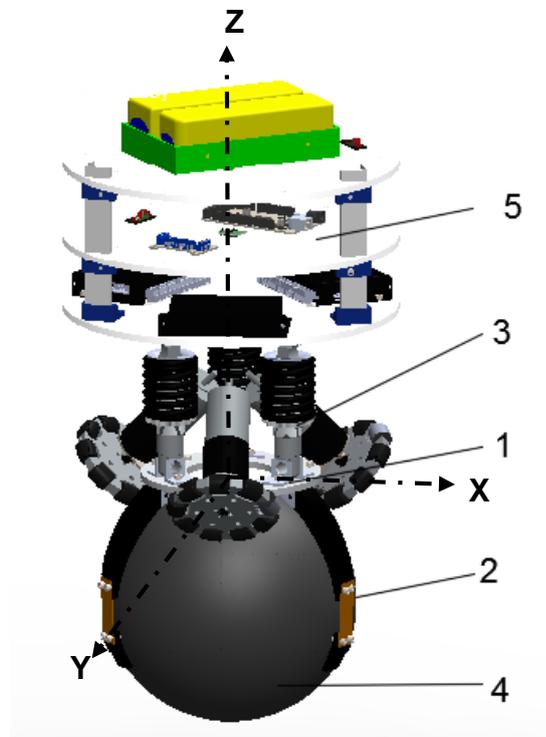


Figura 33. Diseño geométrico del prototipo

Por medio del software CAD, se utilizaron comandos para crear y editar los componentes del prototipo, para después modelar y ensamblar el prototipo final a ser implementado y posteriormente realizar su análisis de esfuerzos, deformaciones y factor de seguridad, con la finalidad de cumplir con los requerimientos establecidos en los parámetros de diseño.

3.4 Análisis cinemático del prototipo robot rueda esférica

3.4.1 Velocidades angulares de las ruedas

La velocidad de desplazamiento para el prototipo es $V = 0.35m/s$. Se procede a calcular las componentes de la velocidad según se indica en la figura 34.

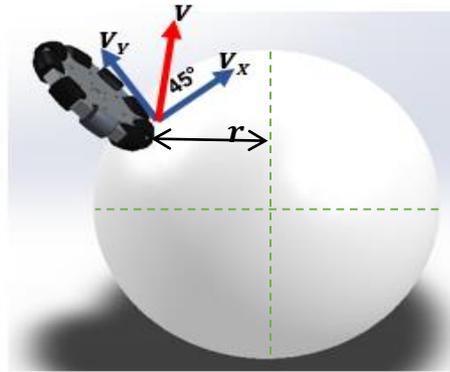


Figura 34. Componentes de velocidad rueda

$$V_X = V \cos 45^\circ = 0.35 * \cos 45^\circ = 0.24 \text{ m/s}$$

$$V_Y = V \sin 45^\circ = 0.35 * \sin 45^\circ = 0.24 \text{ m/s}$$

$$r = 90\text{mm} \text{ (Figura 34)}$$

Donde

V_X = velocidad en la componente x.

V_Y = velocidad en la componente y.

r = distancia del centro hasta la rueda.

Utilizando las ecuaciones (Ec2.31)(Ec2.32)(Ec2.33), obtenidas anteriormente en el análisis cinemático, se calcula el valor de las velocidades angulares de las tres ruedas, sustituyendo el valor de las variables conocidas $V_X, V_Y, r_w, r, \omega_0$.

$$\omega_1 = \frac{-0.33V_X + 0.58V_Y + 0.33r\omega_0}{r_w} \quad \text{Ec 2. 31}$$

$$\omega_2 = \frac{-0.33V_X - 0.58V_Y + 0.33r\omega_0}{r_w} \quad \text{Ec 2. 32}$$

$$\omega_3 = \frac{0.67V_X + 0.33r\omega_0}{r_w} \quad \text{Ec 2. 33}$$

Donde:

ω_0 = velocidad angular de rotación cuerpo

Dado que ω_0 es una variable de entrada necesaria para el cálculo de las velocidades angulares, esta no es constante y cuyo valor depende del tipo de movimiento a realizar. Para movimientos de desplazamiento vertical sea para

adelante o para atrás, la velocidad del cuerpo debe ser cero $\omega_o = 0$, mientras que para realizar rotaciones o movimiento combinados, la velocidad angular del cuerpo debe tener un valor mayor a cero $\omega_o > 0$. Para cálculo de las velocidades angulares, se propone un valor de velocidad angular del cuerpo mínimo $\omega_o = 0.1rad/s$

$$\omega_1 = \frac{\left(-0,33\left(\frac{0,24m}{s}\right) + 0,58\left(\frac{0,24m}{s}\right) + 0,33(0,09m(0,1rad/s))\right)}{0,05m} = 1.25 \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = \frac{\left(-0,33\left(\frac{0,24m}{s}\right) - 0,58\left(\frac{0,24m}{s}\right) + 0,33(0,09m(0,1rad/s))\right)}{0,05m} = -4.3 \text{ rad/s}$$

$$\omega_3 = \frac{0,67\left(\frac{0,24m}{s}\right) + 0,33(0,09m(0,1rad/s))}{0,05m} = 3.27 \text{ rad/s}$$

Entonces, las coordenadas de las velocidades angulares son las siguientes:

$$\omega_1[-1.58i + 2.78j + 0.0594k] \text{ rad/s}$$

$$\omega_2 = [-1.58i - 2.78j + 0.0594k] \text{ rad/s}$$

$$\omega_3 = [3.21i + 0j + 0.0594k] \text{ rad/s}$$

Convirtiendo a RPM

$$\omega_1 = 1.25 \text{ rad/s} = 11.94 \text{ RPM}$$

$$\omega_2 = -4.2 \text{ rad/s} = -40.1 \text{ RPM}$$

$$\omega_3 = 3.27 \text{ rad/s} = 31.23 \text{ RPM}$$

3.4.2 Posición de las ruedas

Para encontrar la posición de las ruedas en coordenadas cartesianas se utiliza el desarrollo de las ecuaciones (Ec2.59)(Ec2.60)(Ec2.61), mostradas en el capítulo II, las cuales dependen de dos ángulos de orientación: γ orientación plano XZ y β orientación en el plano XY, mostradas en la figura 37.

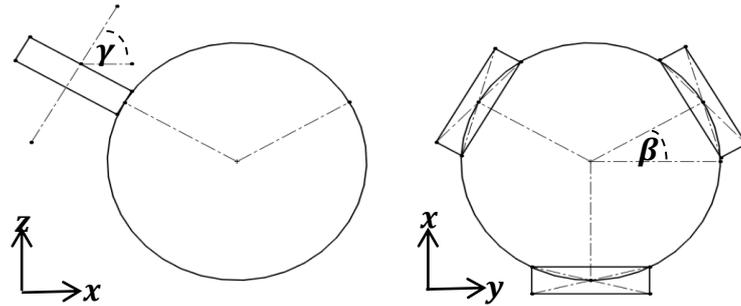


Figura 35. Orientación de las ruedas

Al seleccionar un ángulo $\gamma = 90^\circ$, la rotación alrededor del eje x y eje y es imposible, mientras que la rotación con el eje z es fácilmente posible.

Al seleccionar un ángulo $\gamma = 0^\circ$, el cuerpo rápidamente tiende a caerse debido a que el triángulo de apoyo se vuelve estrecha y la rotación del cuerpo alrededor del eje z se hace difícil.

Basado en este razonamiento, se elige el ángulo $\gamma = 45^\circ$ para el robot rueda esférica por aportar el suficiente soporte para el cuerpo y permitir la rotación alrededor de los ejes x, y, z sea posible. Acorde a la separación de 120° entre ruedas, el ángulo que forma la rueda con el eje Y (figura 35) es $\beta = 30^\circ$.

Sustituyendo para $\gamma = 45^\circ$ y $\beta = 30^\circ$, las posición de las ruedas son:

$$r_{C,1} = 0.11m \begin{bmatrix} \sin(45^\circ) \cos(30^\circ) \\ \sin(45^\circ) \sin(30^\circ) \\ \cos(45^\circ) \end{bmatrix} = [0.067i + 0.038j + 0.077k]m$$

$$r_{C,2} = 0.11m \begin{bmatrix} \sin(45^\circ) \cos(30^\circ + 120^\circ) \\ \sin(45^\circ) \sin(30^\circ + 120^\circ) \\ \cos(45^\circ) \end{bmatrix} = [-0.067i + 0.038j + 0.077k]m$$

$$r_{C,3} = 0.11m \begin{bmatrix} \sin(45^\circ) \cos(30^\circ - 120^\circ) \\ \sin(45^\circ) \sin(30^\circ - 120^\circ) \\ \cos(45^\circ) \end{bmatrix} = [0i - 0.077j + 0.077k]m$$

3.4.3 Velocidades lineales de la rueda

Para el cálculo de las velocidades lineales de la rueda se utiliza la Ec. 2.34, se realiza un análisis desde el caso de rotación alrededor del eje vertical, en donde ω_i fue anteriormente calculado en la sección 3.4.1.

$$V_1 = r_{C,1} * \omega_1 = [0.067i + 0.038j + 0.077k] * [-1.58i + 2.78j + 0.0594k]$$

$$V_2 = r_{C,2} * \omega_2 = [-0.067i + 0.038j + 0.077k] * [-1.58i - 2.48j + 0.0594k]$$

$$V_3 = r_{C,3} * \omega_3 = [0i - 0.077j + 0.077k] * [3.21i + 0j + 0.0594k]$$

Entonces:

$$V_1 = [0.2657i + 0.1484j + 0.3084k]m/s$$

$$V_2 = [0.2657i + 0.1484j + 0.1579k]m/s$$

$$V_3 = [-0.0046i + 0.3095j - 0.3095k]m/s$$

3.4.4 Fuerzas del Sistema

Para analizar las fuerzas que actúan dentro del sistema, es necesario realizar el diagrama del cuerpo libre mostrado en la figura 28 del capítulo 2 y adaptarlo a nuestro sistema, el cual se muestra en la figura 36.

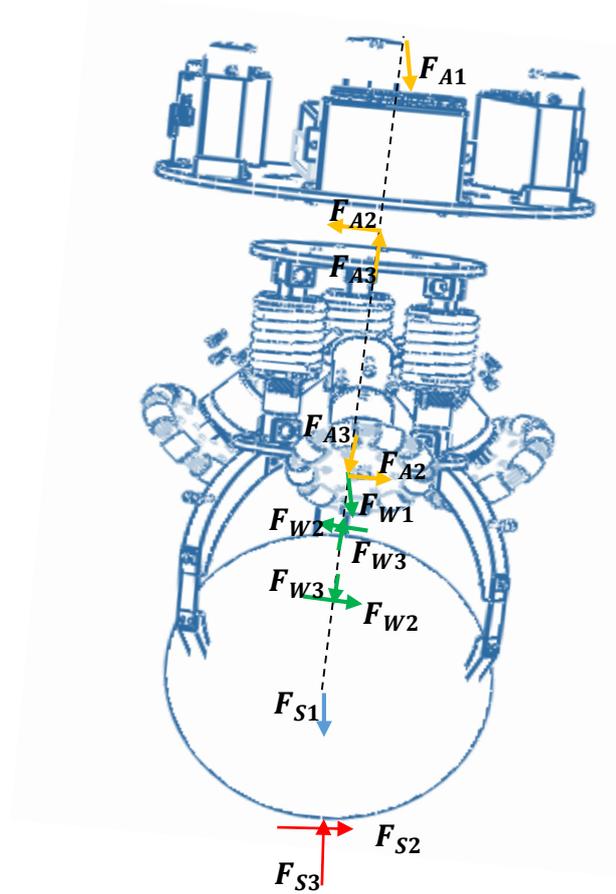


Figura 36. Diagrama cuerpo libre prototipo robot rueda esférica

Para el cálculo de las fuerzas de la figura 36, se utilizan las ecuaciones desde la 2.15 hasta la ecuación 2.25 y los valores numéricos mostrados en la tabla 4.

La velocidad angular de la esfera ω_s se obtienen de la siguiente manera:

$$\omega_s = \frac{V}{r_s} = \frac{0.35m/s}{0.11m} = 3.18 \text{ rad/s} \quad \text{Ec 2. 55}$$

La velocidad angular de la rueda ω_w se obtiene de la siguiente manera:

$$\omega_w = \frac{\omega_s}{i_{sw}}$$

Donde:

$$i_{sw} = \frac{r_w}{r_s} = \frac{0.05m}{0.11m} = 0.45; \text{ relación de transmisión esfera rueda}$$

$$\omega_w = \frac{3.18\text{rad/s}}{0.45} = 7\text{rad/s} \quad \text{Ec 2. 56}$$

La velocidad angular del cuerpo $\dot{\psi}_x$ depende de las velocidades angulares de las ruedas. Se obtiene de la siguiente manera:

$$\dot{\psi}_x = \frac{\omega_w}{i_{wc}}$$

Donde:

$$i_{wc} = \frac{r}{r_w} = \frac{0.09m}{0.05m} = 1.8 \text{ ;relación de transmisión rueda y radio de giro del cuerpo}$$

$$\dot{\psi}_x = \frac{7rad/s}{1.8} = 3.89rad/s \quad \text{Ec 2. 57}$$

En el plano x, la aceleración angular $\ddot{\psi}_x = 0$ y la aceleración angular de la esfera alrededor eje x, $\ddot{\theta}_x = 0$ son cero debido a que la velocidad angular $\dot{\psi}_x = 3.89rad/s$ es constante.

$\psi_x = 20^\circ$ porque representa el ángulo máximo de inclinación del prototipo.

Tabla 4
Parámetros de fuerzas del sistema

Parámetro	Descripción	Valor
m_s	Masa de la esfera	3kg
m_w	Masa de las 3 ruedas(incluido motor, reductor y acople)	3.3kg
$m_A = m_C$	Masa del cuerpo	5.7kg
r_s	Radio esfera	0.11m
r_w	Radio de la rueda	0.05m
l	Distancia al centro de la esfera al centro de gravedad(figura 37)	0.25m
ψ_x	Ángulo orientación cuerpo con plano x	20°
$\dot{\psi}_x$	Velocidad angular cuerpo alrededor plano x(Ec.2.60)	3.89rad/s
$\ddot{\psi}_x$	Aceleración angular rueda alrededor plano x	0
$\ddot{\theta}_x$	Aceleración angular esfera alrededor plano x	0
g	Gravedad	9.8m/s ²
m_{tot}	Masa total del prototipo incluido la esfera	12kg
ζ	$l * m_A + (r_s + r_w)m_w$	1.95 kg*m

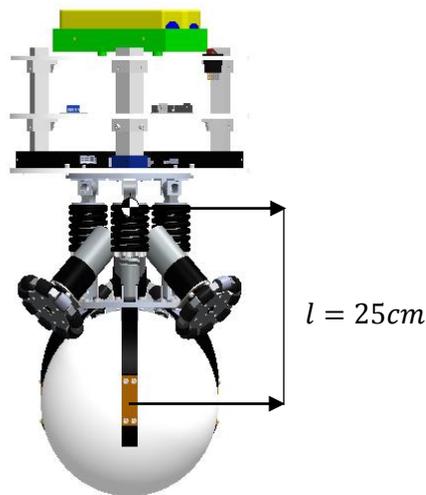


Figura 37. Distancia centro de esfera a centro de gravedad

Sustituyendo los valores mostrados en la tabla 4, en las ecuaciones se obtiene:

$$F_{S1} = 3kg * 9.8m/s^2 = 29.4N$$

$$F_{W1} = 3.3kg * 9.8m/s^2 = 32.34N$$

$$F_{A1} = 5.7kg * 9.8m/s^2 = 55.86N$$

$$F_{A2} = 5.7kg(9.8m/s^2 * \sin 20^\circ) = 19.11N$$

$$F_{A3} = 5.7kg(9.8m/s^2 * \cos 20^\circ) = 52.49N$$

$$F_{W2} = (5.7kg + 3.3kg)(9.8m/s^2 * \sin 20^\circ) = 30.17N$$

$$F_{W3} = (5.7kg + 3.3kg)(9.8m/s^2 * \cos 20^\circ) - 1.95kgm(3.89rad/s)^2 = 53.37N$$

$$F_{S2} = 1.95kgm((3.89rad/s)^2 \sin 20^\circ) = 10.09N$$

$$F_{S3} = -1.95kgm((3.89rad/s)^2 \cos 20^\circ) + 9.8m/s^2 * 12kg = 89.87N$$

3.4.5 Fuerza de rozamiento estático y dinámico

El prototipo tiene 3 ruedas sobre la superficie de la esfera, por lo que cada punto de apoyo ejerce una fuerza equivalente al 1/3 del peso total del prototipo, figura 38.

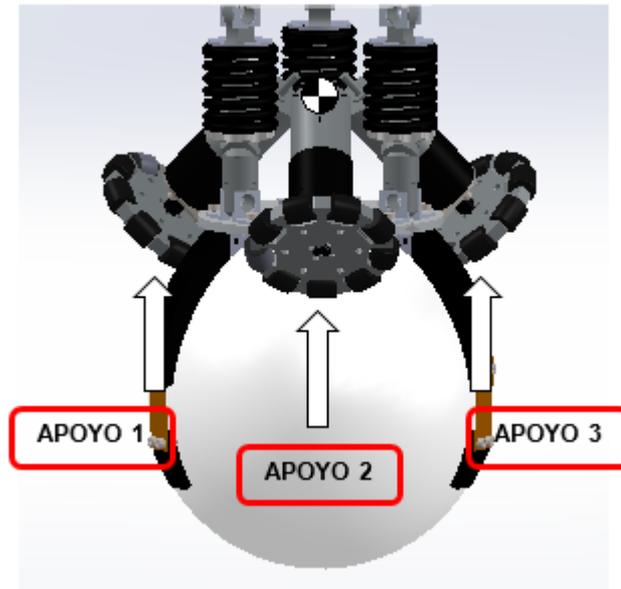


Figura 38. Distribución apoyos del prototipo

Fuerza de rozamiento esfera y superficie

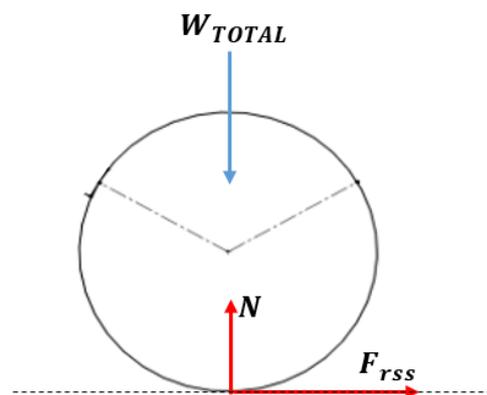


Figura 39. Diagrama cuerpo libre esfera y superficie

$$F_{r_{ss}} = \mu * N$$

Donde:

$\mu = 0.75$ coeficiente rozamiento caucho y concreto (Anexo A)

$$N = W_{TOTAL} = 88.2N$$

$$F_{r_{ss}} = 0.75 * 88.2N = 66.15N$$

Fuerza de rozamiento entre rueda y esfera

Para calcular de la fuerza de rozamiento, se realiza el diagrama de cuerpo libre entre la rueda y la esfera, como se muestra en la figura 40.

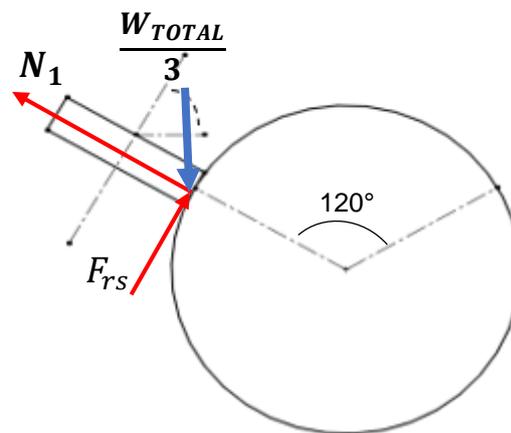


Figura 40. Diagrama cuerpo libre rueda y esfera

Donde:

N_1 = normal entre rueda y esfera

F_{rs} = fuerza de rozamiento rueda y esfera

W_{TOTAL} = peso del prototipo(88.2N)

$$N_1 = \frac{W_{TOTAL}}{3} * \sin 30^\circ = 29.4N * \sin 30^\circ = 14.7N$$

$$F_{rs} = \mu_1 * N_1$$

Donde:

μ_1 : Coeficiente de fricción estático caucho-caucho = 1.6 (Anexo A)

$$F_{rs} = 1.6 * 14.7N = 23.52N$$

3.4.6 Torques del prototipo

Para analizar los torques presentes en el prototipo es necesario utilizar las ecuaciones de conversión de torques desarrollada en la sección 2.8.8 del capítulo II. Se calcula el torque de la siguiente manera:

$$T = F_{rs} * r_s$$

Donde:

F_{rs} = fuerza de rozamiento estático, calculado sección 3.4.5

r_s = radio de la esfera

$$T = 23.52N * 0.11m = 2.58Nm$$

Los torques que actúan en el cuerpo se encuentran a través de las fuerzas generadas por las ruedas y las posiciones, y se expresan mediante las fórmulas descritas en la sección 2.8.8 del capítulo II.

Reemplazando para $\beta = 30^\circ, \gamma = 45^\circ$ (Figura 35) y $r_w = 0.05m, r_s = 0.11m, T_1 = T_2 = T_3 = T = 2.58Nm$ en las ecuaciones Ec2.62, Ec2.63 y Ec2.64

$$T_{C,1} = \begin{bmatrix} 3.47 \\ -2 \\ -4.01 \end{bmatrix} Nm = \|5.67Nm\|$$

$$T_{C,2} = \begin{bmatrix} -3.47 \\ 2 \\ -4.01 \end{bmatrix} Nm = \|5.67Nm\|$$

$$T_{C,3} = \begin{bmatrix} 0 \\ -4.01 \\ -4.09 \end{bmatrix} Nm = \|5.67Nm\|$$

3.4.7 Fuerza en la garra de sujeción

La fuerza de rozamiento entre la esfera y la rueda loca de la garra de sujeción, se encuentra de la siguiente manera:

$$F_{eys} = \mu_2 * m_s * \omega_s^2 * r_s$$

Donde:

F_{eys} =Fuerza de rozamiento entre la garra y esfera

r_s =radio de la esfera

ω_s =velocidad angular de la esfera Ec 2.58

μ_2 =coeficiente rozamiento caucho 0.56 Anexo A

$$F_{eys} = 0.56 * 3kg * \left(\frac{3.18rad}{s}\right)^2 * 0.11m = 1.87N$$

3.4.8 Cálculo de las inercias del prototipo

Los momentos de inercia del prototipo se calculan mediante el uso del software CAD, y los valores se muestran a continuación:

Esfera

$$I_S = 2.43e - 2 \text{ kg} * \text{m}^2$$

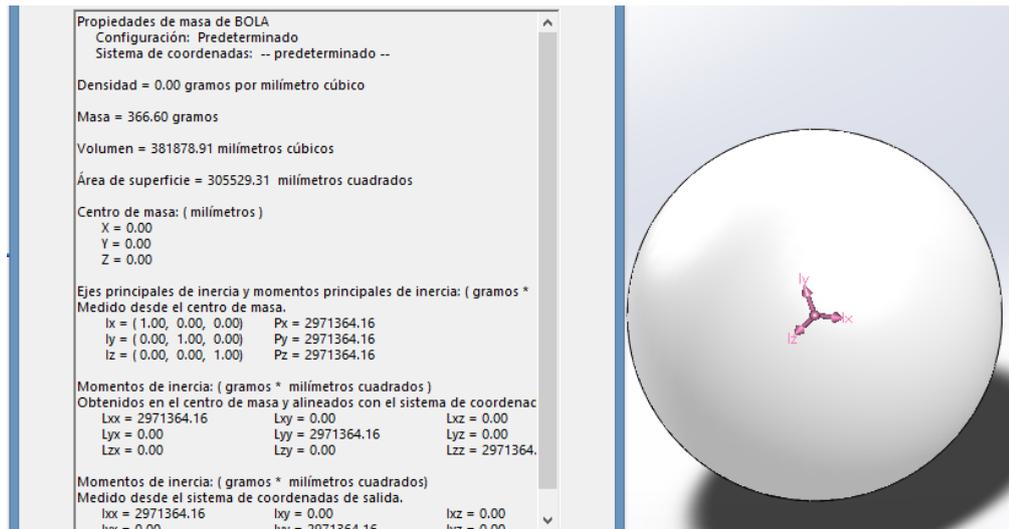


Figura 41. Inercia en la esfera

Cuerpo

$$I_C = 0.157 \text{ kg} \text{ m}^2$$

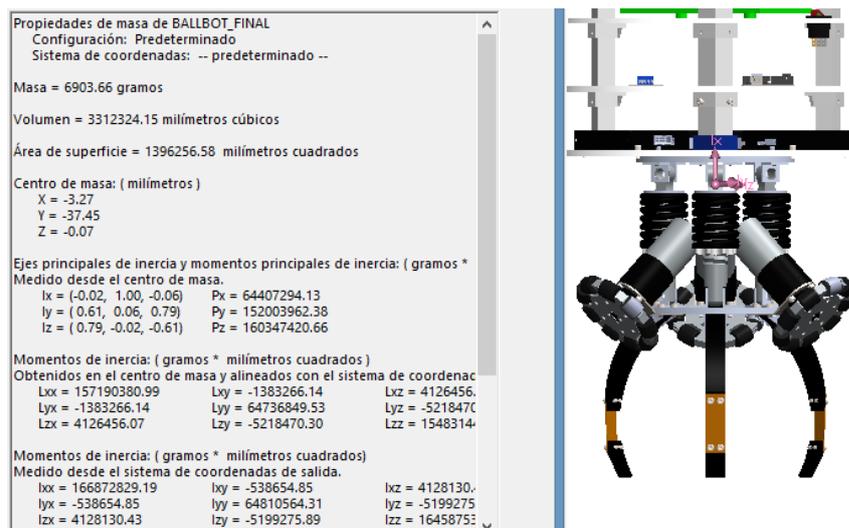


Figura 42. Inercia en el cuerpo

Rueda

$$I_W = 1.685 * 10^{-4} \text{ kg m}^2$$

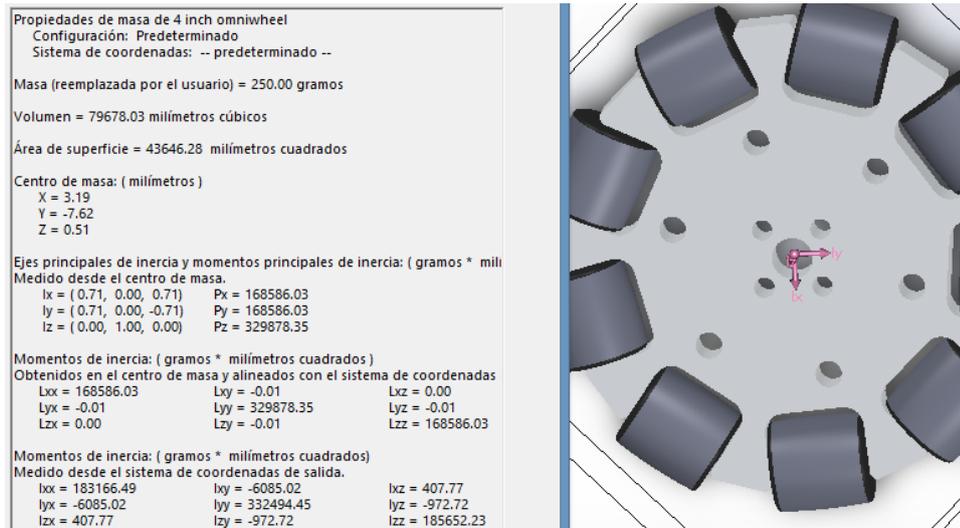


Figura 43. Inercia de la rueda

3.4.9 Cálculo ecuación de movimiento para el plano yz/xz.

Esfera

La esfera tiene energía cinética de traslación y rotación, definida en la ecuación (Ec2.35) de la sección 2.9.6 del capítulo II.

$$E_{C_{S,yz}} = \frac{1}{2} m_S r_S^2 \omega_S^2 + \frac{1}{2} I_S \omega_S^2 \quad \text{Ec 2. 35}$$

$$E_{C_{S,yz}} = \frac{1}{2} (3kg)(0.11m)^2 \left(\frac{3.18rad}{s} \right)^2 + \frac{1}{2} (2.43 * 10^{-2} \text{ kgm}^2) \left(\frac{3.18rad}{s} \right)^2$$

$$= 0.367J$$

Cuerpo

La energía cinética presente en el cuerpo viene definida por la ecuación(Ec2.37) desarrollada en la sección 2.9.6 del capítulo II.

$$E_{C_{C,yz}} = \frac{1}{2} m_A (r_S^2 \omega_S^2 + 2r_S * l * \omega_S \psi_X \cos \psi_X) + \frac{1}{2} (I_C + m_A l^2) \psi_x^2 \quad \text{Ec 2. 37}$$

Sustituyendo para los valores mostrados en la tabla 4 se obtiene:

$$\begin{aligned}
E_{C_{C,yz}} &= \frac{1}{2}(5.7kg) \left((0.11m)^2 \left(\frac{3.18rad}{s} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. + 2(0.11m)(0.25m) \left(\frac{3.18rad}{s} \right) \left(\frac{3.89rad}{s} \right) \cos 20^\circ \right) \\
&\quad + \frac{1}{2}(0.157kg m^2 + 5.7kg(0.25m)^2) \left(\frac{3.89rad}{s} \right)^2 = 4.31J
\end{aligned}$$

La energía potencial está definida por:

$$\begin{aligned}
E_{p_{C,yz}} &= m_A g l \cos \psi_X && \text{Ec 2. 38} \\
E_{p_{C,yz}} &= 5.7kg \left(\frac{9.8m}{s^2} \right) * (0.25m) \cos 20^\circ = 13.22J
\end{aligned}$$

Rueda

La energía cinética de la rueda está definida por la ecuación(Ec2.39) de la sección 2.9.6 del capítulo II.

$$\begin{aligned}
E_{C_{W,yz}} &= \frac{1}{2} m_W (r_S^2 \omega_s^2 + 2r_S(r_S + r_W) \omega_s \dot{\psi}_X \cos \psi_X + (r_S + r_W)^2 \dot{\psi}_X^2) \\
&\quad + \frac{1}{2} I_W \left(\frac{r_S}{r_W} (\omega_s - \dot{\psi}_X) \right)^2 && \text{Ec 2. 39}
\end{aligned}$$

Reemplazando para los valores de la tabla se obtiene:

$$\begin{aligned}
E_{C_{W,yz}} &= \frac{1}{2}(3.3kg) \left((0.11m)^2 \left(\frac{3.18rad}{s} \right)^2 \right. \\
&\quad \left. + 2(0.11m)(0.16m) \left(\frac{3.18rad}{s} \right) \left(\frac{3.89rad}{s} \right) \cos 20^\circ \right. \\
&\quad \left. + (0.16m)^2 \left(\frac{3.89rad}{s} \right)^2 \right) \\
&\quad + \frac{1}{2}(1.685 * 10^{-4} kg m^2) \left(\left(\frac{0.11m}{0.05m} \right) \left(\frac{3.18rad}{s} - \frac{3.89rad}{s} \right) \right)^2 \\
&= 1.5164J
\end{aligned}$$

La energía potencial de la rueda está definida por la ecuación(Ec2.40) de la sección 2.9.6 del capítulo II.

$$\begin{aligned}
E_{p_{W,yz}} &= m_w g (r_S + r_W) \cos \psi_X && \text{Ec 2. 40} \\
E_{p_{W,yz}} &= 3.3kg \left(\frac{9.8m}{s^2} \right) (0.16m) \cos 20^\circ = 4.86J
\end{aligned}$$

3.5 Análisis de fuerzas y momentos flectores

Garra de sujeción

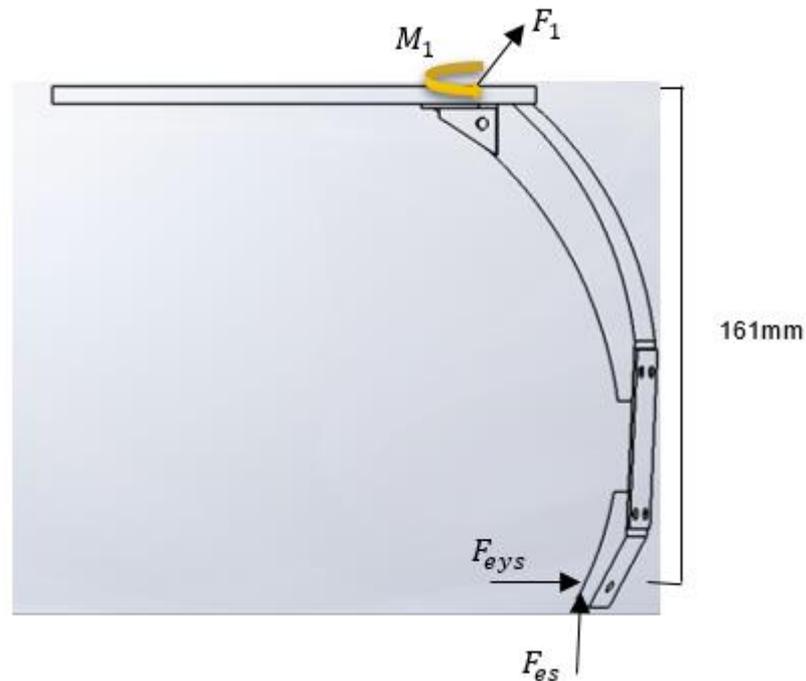


Figura 44. Análisis de cargas en garra

Donde:

Donde:

F_{eys} = fuerza de contacto garra con la esfera (sección 3.4.7)

$F_{es} = F_{eys}$ = fuerza contacto garra esfera en desplazamiento

Traslación de fuerzas a punto en base inferior 2

$$F_{1x} = F_{eys} = 1.87N$$

$$F_{1y} = F_{eys} = 1.87N$$

$$\theta_1 = \arctg\left(\frac{1.87N}{1.87N}\right) = 45^\circ$$

$$F_1 = \sqrt{1.87^2 + 1.87^2} = 2.64N$$

$$M_1 = F_{eys} * 0.161m + F_{es} * 0.161m$$

$$M_1 = 1.87N * 0.161m + 1.87N * 0.161m = 0.6Nm$$

Acople motor

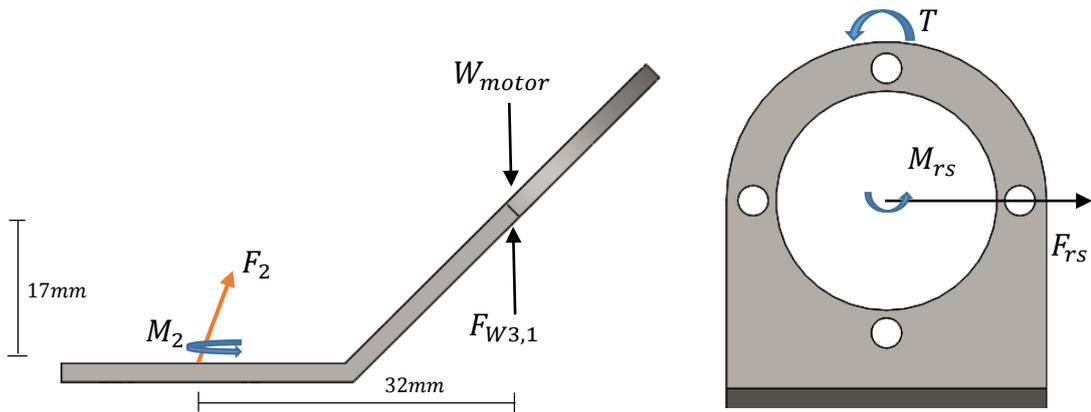


Figura 45. Análisis de carga acople de motor

Donde:

W_{motor} = peso del motor, reductor y rueda

$F_{rs} = 23.52N$ sección 3.4.5

$$W_{motor} = m_{motor} * \frac{9.8m}{s^2} = 1.1kg * \frac{9.8m}{s^2} = 10.78N$$

$F_{W3,1}$ = reacción punto de contacto de la rueda (sección 3.4.4)

$$F_{W3,1} = \frac{F_{W3}}{3} = \frac{53.37N}{3} = 17.79N$$

$T = 2.58Nm$ = torque de la rueda (3.4.6)

M_{rs} = momento correspondiente fuerza rozamiento por traslación

$$M_{rs} = F_{rs} * 0.05m = 23.52N * 0.05m = 1.76Nm$$

Traslación de fuerzas a punto en base inferior 2

$$F_{2x} = F_{rs} = 23.52N$$

$$F_{2y} = F_{W3,1} - W_{motor} = 17.79N - 10.78N = 7.01N$$

$$\theta_2 = \arctg\left(\frac{7.01N}{23.52N}\right) = 16.59^\circ$$

$$F_2 = \sqrt{23.52^2 + 7.01^2} = 24.54N$$

$$M_2 = F_{W3,1} * 0.17m + F_{rs} * 0.32m + T_{rs} + T - W_{motor} * 0.17m$$

$$M_2 = (17.79N * 0.17m) + (23.52N * 0.32m) + (23.52N * 0.05m) + 2.54Nm - (10.78N * 0.17m)$$

$$M_2 = 12.43Nm$$

Base inferior 2

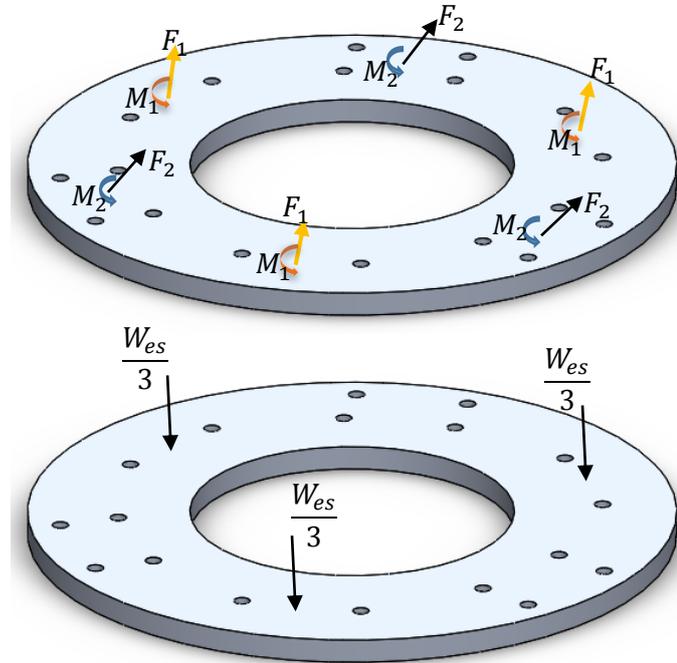


Figura 46. Análisis de carga de base inferior 2

Tabla 5

Detalle de peso estructura superior sobre base inferior 2

N.-	Componente	Peso
3	Amortiguadores	1200g
3	Bases de acrílico	1500g
1	Componentes electrónicos	675g
2	baterías	1400g
1	Base aluminio	325g
9	Acoples abs	180g
	Masa estructura superior(m_{es})	5280g

$$W_{es} = m_{es} * \frac{9.8m}{s^2} = 5.28kg * \frac{9.8m}{s^2} = 51.75N$$

Donde:

W_{es} = peso estructura superior

F_1 = fuerza 1 resultante (figura 44)

M_1 = momento 1 resultante (figura 44)

F_2 = fuerza 2 resultante (figura 45)

M_2 = momento 2 resultante (figura 45)

Base inferior 1

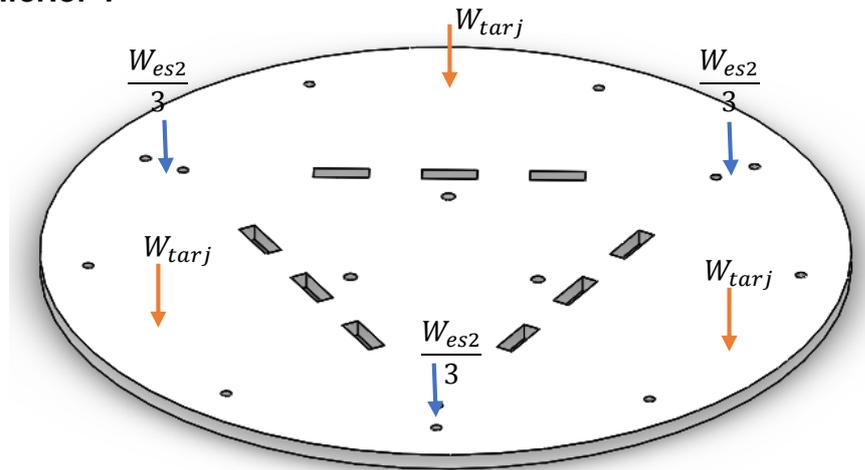


Figura 47. Fuerzas, torques de la base inferior

Donde:

$$W_{tarj} = m_{tarj} * g = 0.2kg * 9.8 \frac{m}{s^2} = 1.96N = \text{peso de las tarjetas (Anexo F)}$$

W_{es2} = peso de la estructura superior 2 sobre base inferior 1 (tabla 6)

Tabla 6

Detalle estructura superior 2

N.-	Componente	Peso
3	Bases de acrílico	1500g
1	Componentes electrónicos	675g
2	Baterías	1400g
9	Acoples abs	180g
	Masa estructura superior 2 (m_{es2})	3755g

$$W_{es2} = m_{es2} * g = 3.75kg * \frac{9.8m}{s^2} = 36.8N$$

Acople perfil base

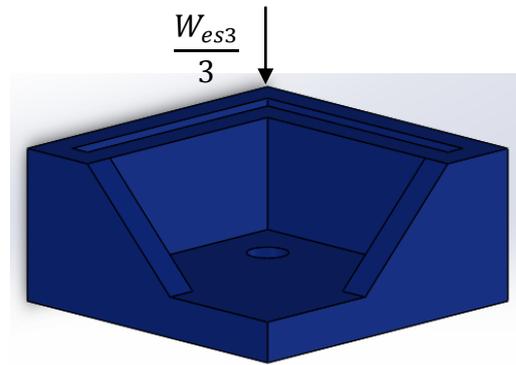


Figura 48. Peso en el acople perfil base

Donde:

W_{es3} = peso estructura superior3

Tabla 7

Detalle estructura superior 3

N.-	Componente	Peso
2	Bases de acrílico	1000g
1	Componentes electrónicos	675g
2	Baterías	1400g
6	Acoples abs	120g
	Masa estructura superior3(m_{es3})	3195g

$$W_{es3} = m_{es3} * g = 3.19kg * \frac{9.8m}{s^2} = 31.26N$$

Prototipo

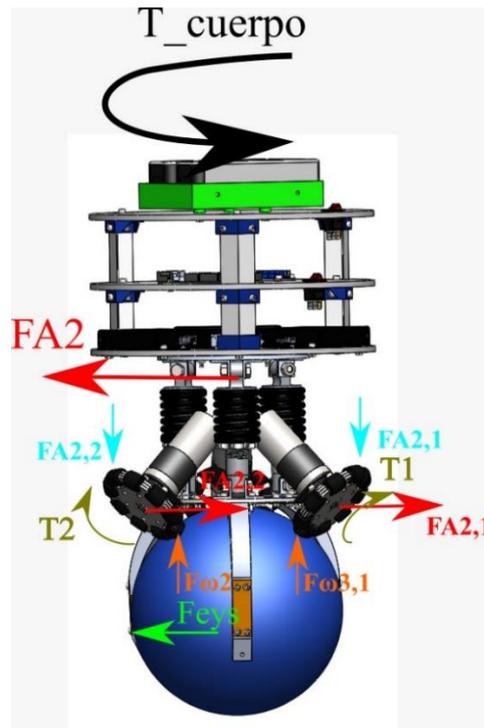


Figura 49. Fuerzas, torques y pesos en el prototipo

3.6 Selección componentes mecánicos

3.6.1 Selección de motor

Potencia Requerida

Para el cálculo de la potencia requerida de los motores, se analiza la energía de todo el sistema del análisis de la sección 3.4.9, obteniéndose:

$$\sum E = E_{C_{S,yz}} + E_{C_{C,yz}} + E_{p_{C,yz}} + E_{C_{W,yz}} + E_{p_{W,yz}}$$

$$\sum E = 0.367J + 4.31J + 13.22J + 1.5164J + 4.86J$$

$$\sum E = 24.27J$$

Donde:

E = sumatoria de toda la energía del sistema

$$P = \frac{E}{t}$$

Donde:

t = tiempo respuesta actuadores respecto a la salidas de control(0.1seg)

Anexo G

$$P = \frac{24.27J}{0.1seg} = 229.71W$$

La potencia requerida se obtiene mediante la siguiente expresión, que vincula al factor de carga y la eficiencia del motor; para estimar un valor mayor como seguridad para cargas imprevistas.

$$P_r = \frac{P * fc}{n}$$

Ec 2. 67

fc : Factor de Carga = 1.1 (Anexo B)

n : Eficiencia Motores = 0.87 (Anexo C)

$$P_r = \frac{229.71W * 1.1}{0.87} = 290.44 W$$

La potencia requerida es de 290.44 W, la cual se distribuye para los tres motores que se utiliza en el prototipo, de donde se tiene que:

$$P_{MOTOR} = \frac{P_r}{3} = \frac{290.44W}{3}$$

$$P_{MOTOR} = 96.81 W$$

Con el valor de potencia teórica calculado, se procede a elegir un motor que cumpla con estas características de diseño, por lo que se realiza una matriz de selección de motor que permita elegir al componente más indicado.

Tabla 8

Matriz de comparación de motores

Ponderación	
Excelente	
Aceptable	
Deficiente	

Correlación	
Mejor Opción (Fuertemente Positiva)	
Posible Opción (Positiva)	
Opción sin alcance (Negativa)	

Ruedas	Maxon Eci-40			Banebots RS775 18V			Ampflow P40-350			Ampflow M27-150		
												
Potencia 100w	x			x			x			x		

CONTINÚA



Sensores incluidos	x					x			x			X
Espacio requerido de implementación	x					x			x			X
Capacidad de carga 10kg	x			x				x			x	
Peso	x				x				x			X
Total	5	0	1	2	1	2	2	0	3	2	0	3
	+		○			✘			✘			

En base a los datos de la tabla 8, la mejor opción es el motor maxon eci-40 (figura 50) por la potencia requerida de 100w, adaptabilidad en el espacio de implementación y la inclusión de sensores hall de posición dentro del mismo, necesarios para la parte del controlador del sistema.



Figura 50. Motor maxon Ec-i40

Fuente: (maxonmotor, 2018)

Tabla 9

Características maxon eci-40

Característica	Valor
Potencia	100w
Voltaje	18v
Corriente pico(rotor parado)	5.46 A
Eficiencia	87
Velocidad sin carga	4540 rpm
Peso	0.39kg
Reducción mecánica	No
Tarjeta de control	Si
Sensores incluidos	Si
Precio(AI 2017)	270\$

Cada motor cuenta con un controlador de posicionamiento digital y modular EPOS2 50/5, el cual provee de modos flexibles de operación para un control exacto de posición, velocidad para aplicaciones de automatización y

control. Por todas estas razones el motor maxon ec-i 40 de 100watts es la mejor alternativa de selección para el diseño del prototipo de robot rueda esférica.

3.6.2 Selección del Reductor

Reductor

$W_{MOTOR} = Velocidad Motor = 1000 RPM$ (figura 99)

En la figura 99 del capítulo 4, se muestra las salidas de las velocidades de los motores en una configuración de la tarjeta de control de los motores a 1000 rpm, presentando un tiempo de respuesta de todo el ciclo de control de 0,1seg Anexo G, lo que permite una reacción adecuada de los motores al envío de señal, siendo así la velocidad adecuada neta del motor para mantener el equilibrio del prototipo.

$$Reductor = \frac{RPM_{MOTOR}}{RPM_{requerida}} \quad \text{Ec 2. 68}$$

Donde:

$$RPM_{requerida} = RPM_w = \omega_w * \frac{60seg}{2\pi} = \frac{7rad}{s} * \frac{60seg}{2\pi} = 66.84RPM$$

Reemplazando dicho valor en Ec 2.68:

$$Reductor = \frac{1000 RPM}{66.84 RPM} = 14.95$$

El reductor que se requiere debe tener una reducción de 15 a 1, el cual no existe en el mercado, por lo que se selecciona el más cercano, siendo el de 12:1, reductor con engranajes planetarios GP42c Ø42mm figura 51, el cual ventajosamente se adapta al motor maxon Ec-i40 anteriormente seleccionado y tiene las características que se muestran en la tabla 10.



Figura 51. Reductor GP42c

Tabla 10
Características del reductor GP42c

Reductor GP42c	
Parámetro	Característica
Engranaje planetario	Diente derecho
Eje salida	Acero inoxidable
Cojinete salida	Rodamiento de bolas
Reducción	12:1
Diámetro eje salida	12mm
Diámetro máx. eje motor	10mm
Máxima carga axial	150N
Temperatura	-40°...+100°C

3.6.3 Selección del sistema de amortiguamiento

Para la selección del amortiguador, se analiza la carga que va a soportar y el desplazamiento lineal que se requiere, la cual se muestra en la figura 52.

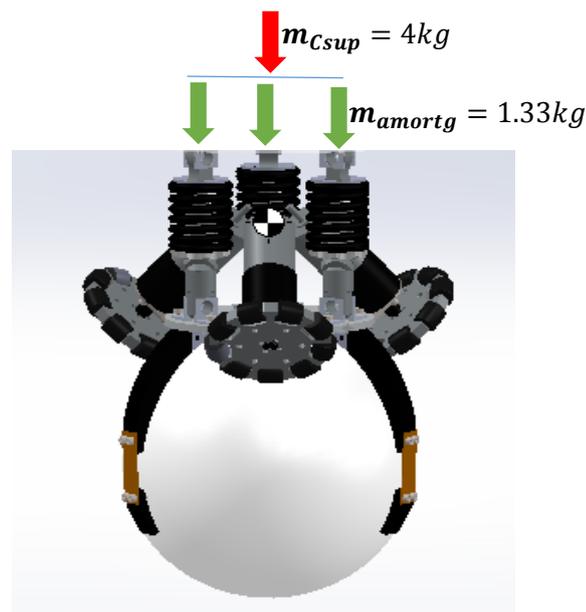


Figura 52. Peso de soporte para amortiguadores

Donde:

m_{Csup} = masa cuerpo superior del robot(tabla)

m_{amortg} =masa soporta cada amortiguador

$$m_{amortg} = \frac{4kg}{3} = 1.33kg$$

Desplazamiento $x = 2mm$ (mínimo para controlar perturbaciones)

$$k = \frac{F}{x}$$

$$F = m_{amortg} * 9.8m/s^2$$

Ec 2. 69

$$F = 1.33kg * 9.8m/s^2 = 13.06N$$

Sustituyendo el valor de $F = 13.06N$ y $x = 2mm$ en la Ec 2.69 se obtiene:

$$k = \frac{13.06N}{2mm} = 6.53N/mm \approx 37.29lb/plg$$

La operación del robot necesita de un sistema que minimice la transmisión de vibraciones desde el suelo hasta la plataforma que contiene los elementos de control, para ello se presenta la tabla 10 de selección del amortiguador.

Tabla 11

Matriz de selección de un amortiguador

	Ke Zhen 50	DNM 750	Cane Double	Creek
Figura				
Distancia entre centros	150mm	150mm	186mm	
Tipo de suspensión	Resorte	Resorte	Pistón Aire	
Peso	400g	449g	397g	
Eje	Incluido	No incluido	No incluido	
Precarga	Ajustable por rosca	Ajustable por rosca	Ajustable por rosca	
Constante de resorte incluido	50Lbs	750Lbs	-	
Precio(AI 2018)	10\$	30\$	400\$	

Según los datos de la tabla 11, se selecciona el amortiguador ke zhen 50 (figura 53), por la constante de resorte de 50lb/in que es la más cercana a la constante calculada de 37lb/in.



Figura 53. Suspensión Ke Zhen 250

Tabla 12.

Características suspensión Ke Zhen 250

Suspensión Ke Zhen 50	
Parámetro	Característica
Distancia entre centros	150mm
Tipo de suspensión	Resorte
Peso	400g
Eje	Incluido
Precarga	Ajustable por rosca
Constante de resorte incluido	50lb/in

3.6.4 Selección de la rueda

Para seleccionar el tipo de rueda a utilizar se realiza un análisis enfocándose a la dinámica que debe realizar el robot, el cual está relacionado a la rueda esférica motriz que permite realizar movimientos en cualquier dirección debido a su geometría esférica y a su único punto de contacto con el suelo. Otra de los puntos de selección es la adaptabilidad al eje de salida del reductor y al espacio de implementación en la estructura; para lo cual se procede a realizar una tabla de selección del tipo de rueda a utilizar.

Tabla 13

Matriz comparativa de selección del tipo de rueda

Ponderación		Correlación	
Excelente		Mejor Opción (Fuertemente Positiva)	+
Aceptable		Posible Opción (Positiva)	○
Deficiente		Opción sin alcance (Negativa)	✘

Ruedas	Fija			Orientable centrada			Orientable no centrada			Omnidireccional		
Movimientos omnidireccionales			x		x		x			x		

CONTINÚA



Adaptabilidad eje reductor		x			x			x		x		
Espacio de implementación		x			x			x		x		
Capacidad de carga		x			x			x			x	

Total	0	3	1	0	4	0	1	3	0	3	1	0
		○			⊗			⊗			⊕	

En base a los datos de la tabla 13, la opción adecuada son las ruedas omnidireccionales por capacidad para ejecutar movimientos en cualquier dirección, que es el enfoque de este proyecto; y además por su gran adaptabilidad al eje del reductor que provee de movimiento y a la factibilidad de implementación y anclaje a la estructura del prototipo a proponer.



Figura 54. Rueda omnidireccional 100mm

La rueda omnidireccional seleccionada figura 54, presenta las siguientes características presentadas en la tabla 14.

Tabla 14

Especificaciones rueda omnidireccional

Rueda omnidireccional	
Parámetro	Característica
Marca	SZDLT
Diámetro	100mm
Diámetro del rodillo	18mm
Conexión del rodillo	Cojinete de acero
Material del cuerpo	Nylon
Material rollers	Caucho
Capacidad de carga	20kg
Peso	290g

3.7 Diseño de base inferior 2

La base inferior 2 o chasis de un robot móvil se presenta como una masa suspendida que no tiene contacto directo con la superficie de movimiento y es

en él que se montan los principales componentes del prototipo, por lo que el chasis debe ser completamente rígido para soportar las cargas que se describen en el análisis de cargas en la figura 46.

3.7.1 Selección del material para base inferior 2

Para la selección del material de la base inferior 2, se realiza un análisis de las propiedades de cada material propuesto mostrado en la tabla 15, en función de los límites de los esfuerzos que soportan cada uno de ellos.

Tabla 15

Características de materiales para chasis

	Aluminio 6061	Acrílico	Madera 5.5mm
Límite elástico(MPa)	250	45	40
Límite tracción(MPa)	400	73	1
Módulo elástico(MPa)	200000	3000	NA
Densidad(kg/m ³)	2700	1180	730

Según las características mostradas en la tabla 15, se selecciona para construcción del chasis el material Aluminio 6061, debido a su alto límite de elástico 250MPa con respecto a los demás materiales y al límite de tracción 400MPa, lo cual favorece a la resistencia a esfuerzos de torsión, tensión y compresión, ocasionados por las cargas que se ubicarán en el material.

3.7.2 Criterios sobre el espacio y ubicación

En el diseño de la pieza denominada chasis, representa la parte central del prototipo en donde se ubicarán los componentes encargados del movimiento, para lo cual es necesario tener en consideración los aspectos de espacio y ubicación para los componentes en los siguientes puntos:

- En el chasis se ubicarán los 3 motores con sus reductores, acoples y ruedas omnidireccionales.
- En el chasis se ubicarán los 3 amortiguadores para el prototipo.
- En el chasis se ubicarán las 3 garras de sujeción para la esfera.
- Debe considerarse una ubicación simétrica para los componentes, así como, eficiente uso del espacio de la pieza.

El diseño del chasis se muestra en la figura 55, con las siguientes características:

- La forma del chasis será redonda con un diámetro de circunferencia de 320mm para facilitar la simetría de ubicación de componentes y el criterio de espacio para reducir el peso.
- Una separación de 120° para ubicar simétricamente a los 3 motores.
- Una separación de 120° entre los amortiguadores y 60° de separación entre motor y amortiguador.
- El medio del chasis será hueco con un diámetro de 100mm de circunferencia para reducir el peso del componente.

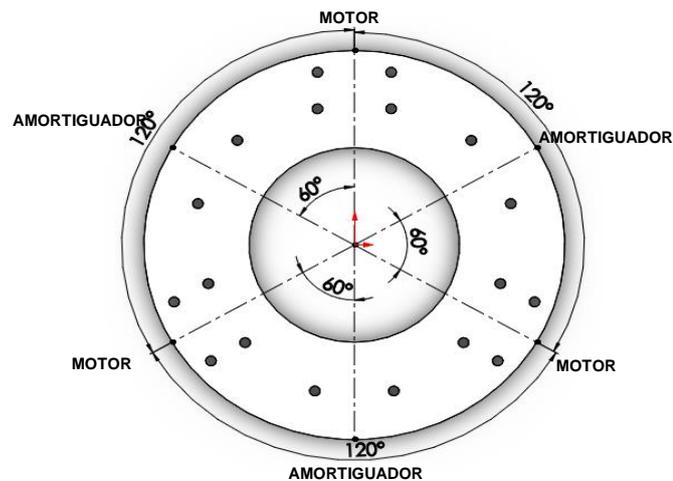
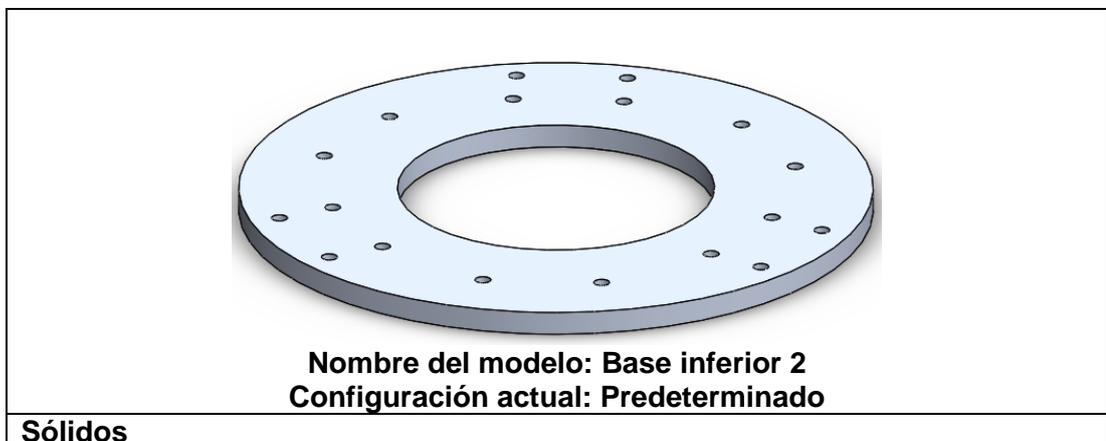


Figura 55. Bosquejo de diseño del chasis

3.7.3 Información del modelo

El análisis de esfuerzos en el chasis se realiza con ayuda del software CAE.



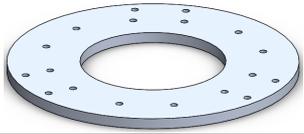
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición 2 	Sólido	Masa: 240.63g Volumen: 89120.7mm ³ Densidad: 2.69g/cm ³ Peso: 2358.17N	
Unidades			
Sistema de unidades		Métrico(MKS)	
Longitud/Desplazamiento		Mm	
Temperatura		Kelvin	
Velocidad angular		Rad/seg	
Presión/Tensión		N/m ²	

Figura 56. Información del modelado chasis

En la figura 57, se presenta las propiedades del material utilizado para la construcción de la base inferior 2.

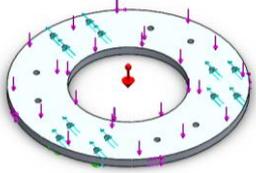
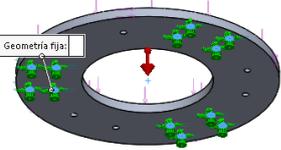
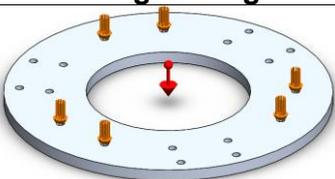
Referencia de modelo	Propiedades		Componente
	Nombre: Tipo de modelo: Criterio de error: Límite elástico: Límite tracción: Coeficiente de Poisson: Densidad:	Aluminio 6063 Plasticidad-Von Mises Desconocido 41.36N/mm ² 89.99N/mm ² 0.33 2700kg/m ³	Sólido

Figura 57. Información del material para chasis

3.7.4 Cargas y sujeciones en el chasis

Las cargas que actúan en el chasis se presenta con detalle en la figura 595.

Sujeción	Imagen Sujeción	Detalle de sujeción	
Fijo-6		Entidades: Tipo:	6 aristas Geometría fija

Carga	Imagen Carga	Detalle de carga	
$\frac{W_{es}}{3}$		Entidades: Tipo: Referencia: Valor: Unidades:	6 aristas Aplicar fuerza Planta 51.75N(total) SI
Carga	Imagen Carga	Detalle de carga	

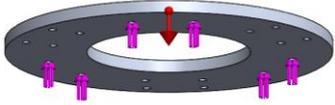
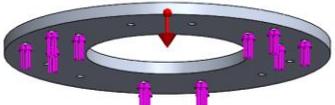
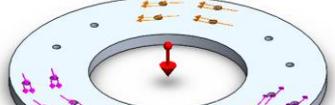
F_1		Entidades: 6 aristas Tipo: Aplicar fuerza Referencia: Planta Valor: 2.64N Unidades: SI
F_2		Entidades: 12 aristas Tipo: Aplicar fuerza Referencia: Planta Valor: 24.54N(4aristas) Unidades: SI
Torque	Imagen torque	Detalle Torque
M_1		Entidades: 6 aristas Tipo: Aplicar torsión Referencia: Planta Valor: 0.6Nm(2aristas) Unidades: SI
M_2		Entidades: 12 aristas Tipo: Aplicar torsión Referencia: Planta Valor: 12.43Nm(4aristas) Unidades: SI

Figura 58. Cargas y sujeciones en el chasis

3.7.5 Resultados de los esfuerzos en el chasis

TENSIÓN DE VON MISES

Nombre	Tipo	Min	Máx
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	2.925e+003 N/m ² Nodo 134846	2.089e+007 N/m ² Nodo 191657

Nombre del modelo: BASE_MOTOR
Nombre de estudio: Análisis estático base motor (Predeterminado)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 4703.43

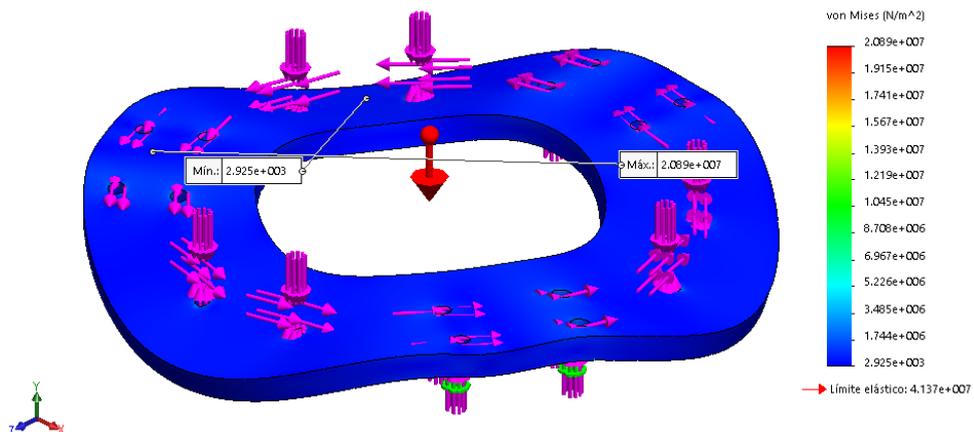


Figura 59. Análisis de tensiones base del chasis

La mayor tensión se encuentra en los agujeros de sujeción de la base con el acople. La máxima tensión se localiza en los agujeros para el acople del motor con un valor de 2.089e+007 N/m². La tensión máxima es inferior al límite

elástico del material con un valor de $4.137e+07$ N/m², por lo que se considera un diseño seguro.

DESPLAZAMIENTO

Nombre	Tipo	Min	Máx
Desplazamientos	URES: Desplazamientos resultantes	1e-003 mm Nodo 680	3.423e-003 mm Nodo 1576

Nombre del modelo: BASE_MOTOR
Nombre de estudio: Análisis estático base motor-(Predeterminado)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
Escala de deformación: 4703.43

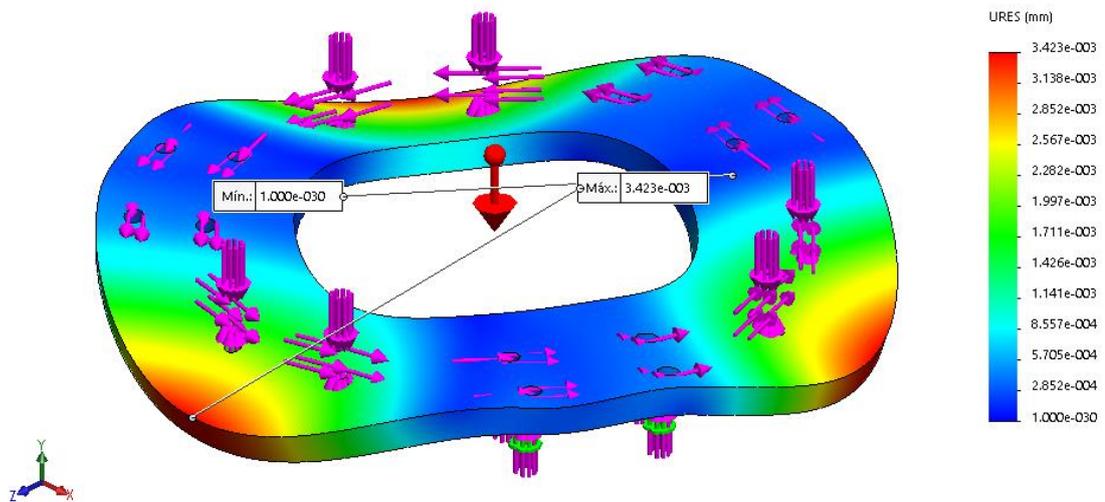


Figura 60. Análisis de desplazamientos base del chasis

El mayor desplazamiento ocurre en los agujeros que soportan el peso de la estructura superior con un valor máximo de desplazamiento de 0.003423 mm.

FACTOR DE SEGURIDAD

Nombre	Tipo	Min	Máx
Factor de seguridad	Tensiones von Mises máx	2 Nodo 191657	1.41e+004 Nodo 134846

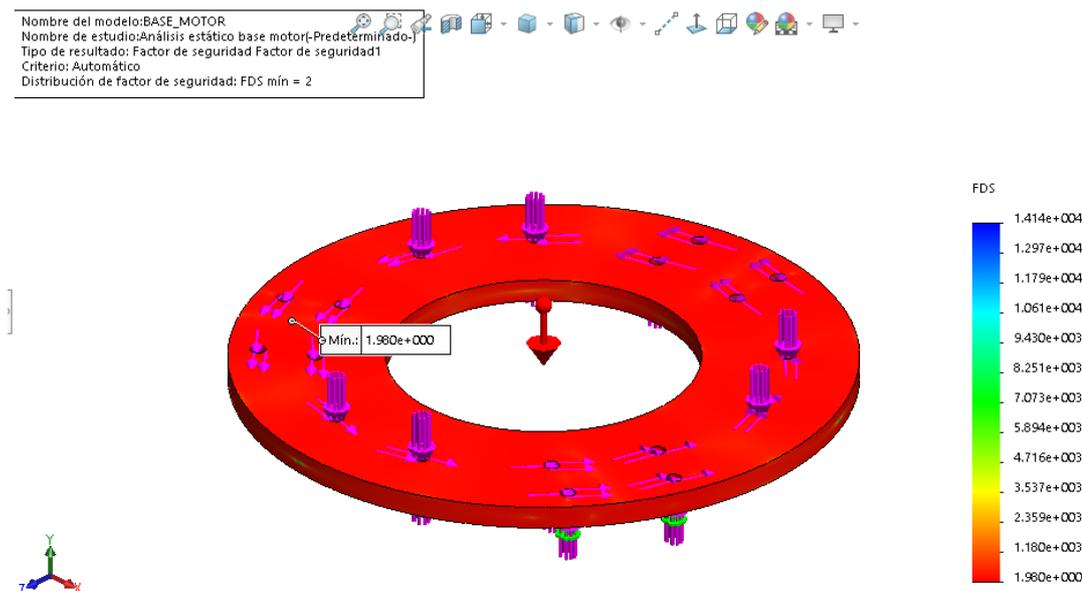


Figura 61. Análisis factor de seguridad base del chasis

El valor mínimo del factor de seguridad calculado es de 2, encontrándose igual al establecido de 2 (ANEXO D), considerándose el diseño como seguro.

3.8 Diseño del soporte para motores

Los soportes para motores permiten acoplar los motores en la dirección establecida y fijarlos al chasis para formar un solo cuerpo. El soporte se encuentra sometido a las cargas que se describen en la figura 45 de la sección 3.5.

3.8.1 Selección del material para el soporte

Para la selección del material del soporte, se consideran las características mecánicas de los siguientes materiales y se analiza la factibilidad del material para ser sometido al proceso de soldadura.

Tabla 16 Materiales para soporte

	Aluminio 6063	Acero ASTM36	Madera 5.5mm
Límite elástico(MPa)	41	250	40
Límite tracción(MPa)	90	400	1
Módulo elástico(MPa)	69000	200000	NA
Densidad(kg/m ³)	2700	7860	730
Soldabilidad	Si	Si	NA

Se selecciona el acero ASTM36 como material para construcción del soporte para motor, por su límite elástico de 250MPa y la factibilidad de soldabilidad del material, así como la existencia del material en el mercado.

3.8.2 Criterios de espacio y ubicación

Para el diseño del soporte para los motores se toma en cuenta los siguientes criterios de espacio y ubicación que dependen de las medidas del motor y reductor seleccionado.

- En el análisis cinemático y cinético desarrollado en el capítulo anterior, se determinó que el ángulo de inclinación que tendrán las ruedas omnidireccionales con respecto a la vertical será de 45° para aportar el suficiente apoyo para el cuerpo y permitir sea posible la rotación del prototipo. Este valor es importante debido a que el motor y reductor se encuentran conectados con las ruedas.
- El soporte tiene que anclarse a la cara del eje del reductor, para lo cual se tiene que tener en cuenta las medidas de ubicación de los pernos de fijación y el diámetro de la circunferencia entorno al eje del reductor.
- El soporte tiene que anclarse al chasis del prototipo en la ubicación anteriormente diseñada, que es 120° de separación entre cada soporte.

El diseño para el soporte de se muestra en la figura 62 con las siguientes características:

- El soporte para el motor consta de dos caras: una cara es para acoplarse al chasis del prototipo y la otra cara está a 45° de inclinación para anclaje del motor.
- La cara de acople entre el chasis del prototipo y la pieza consta de 4 agujeros de sujeción.
- La cara de acople para el reductor consta de 4 agujeros de acople y una perforación central para que atravesase el eje del reductor.

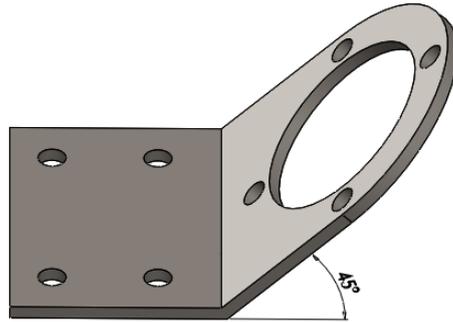
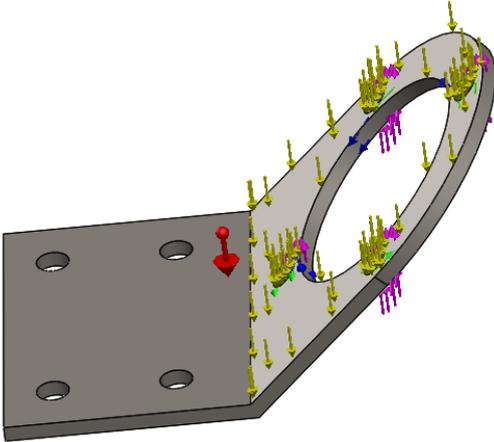
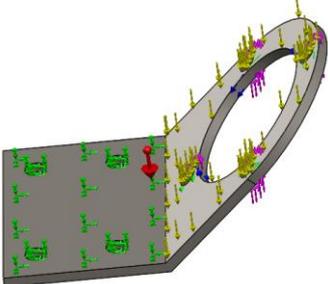


Figura 62. Soporte para motores

3.8.3 Información del modelo

Los esfuerzos analizados en el acople de motores se obtuvieron mediante la ayuda del software CAE, en donde se observa las fuerzas que actúan en la pieza.

			
Nombre del modelo: Acople de motor Configuración actual: Predeterminado			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición 2 	Sólido	Masa: 35.08g Volumen: 4468.93mm ³ Densidad: 7850kg/m ³ Peso: 0.343N	
Unidades			
Sistema de unidades		Métrico(MKS)	
Longitud/Desplazamiento		Mm	

Temperatura	Kelvin
Velocidad angular	Rad/seg
Presión/Tensión	N/m ²

Figura 63. Información modelado acople de motor

En la figura 64 se presenta las propiedades del material utilizado para la construcción del acople de motores.

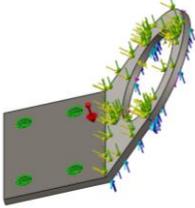
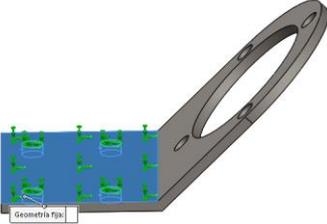
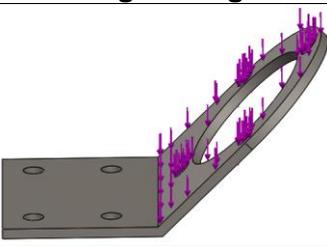
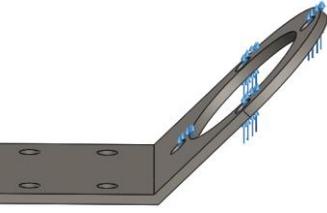
Referencia de modelo	Propiedades	Componente
	Nombre: ASTM A36 acero Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error: Tensión de von Mises Límite elástico: 250N/mm ² Límite tracción: 400N/mm ² Módulo cortante: 79300N/mm ² Coef de Poisson: 0.26 Densidad: 7850kg/m ³	Sólido

Figura 64. Información material para acople motor

3.8.4 Cargas y sujeciones en el acople

Las cargas que actúan en el soporte de motor se presenta con detalle en la siguiente figura 65.

Sujeción	Imagen Sujeción	Detalle de sujeción
Fijo-2		Entidades: 4 aristas 1 cara Tipo: Geometría fija

Carga	Imagen Carga	Detalle de carga
W_{motor}		Entidades: 2 Caras Tipo: Aplicar fuerza Referencia: Planta Valor: 10.78N Unidades: SI
$F_{W3,1}$		Entidades: 4 Caras Tipo: Aplicar fuerza Referencia: Planta Valor: 17.79N(total) Unidades: SI

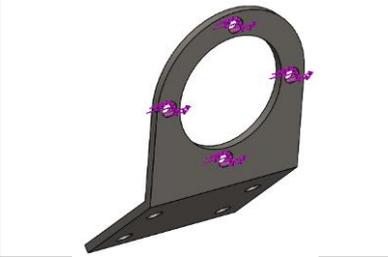
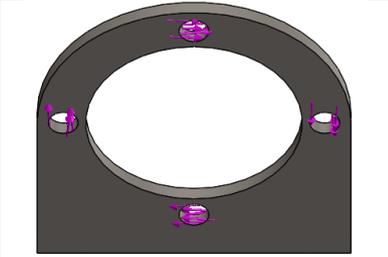
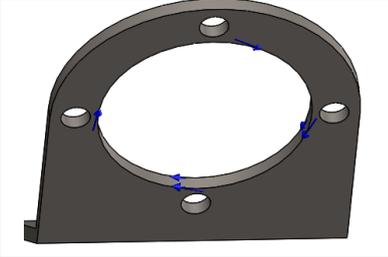
F_{rs}		Entidades: Tipo: Referencia: Valor: Unidades:	6 arista Aplicar fuerza Planta 23.52N(total) SI
Torque	Imagen torque	Detalle Torque	
M_{rs}		Entidades: Tipo: Referencia: Valor: Unidades:	4 Caras Aplicar torsión Planta 1.76Nm SI
T		Entidades: Tipo: Referencia: Valor: Unidades:	1 Cara Aplicar torsión Planta 2.58Nm SI

Figura 65. Cargas y sujeciones en acople motor

3.8.5 Resultados de los esfuerzos en el acople

TENSIÓN DE VON MISES

Nombre	Tipo	Min	Máx
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	6.384e-001 N/m ² Nodo 67918	9.969e+007 N/m ² Nodo 68469

Nombre del modelo:ACOPLE_MOTOR_BASE
Nombre de estudio:Análisis estático 1[Predefinido]
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1

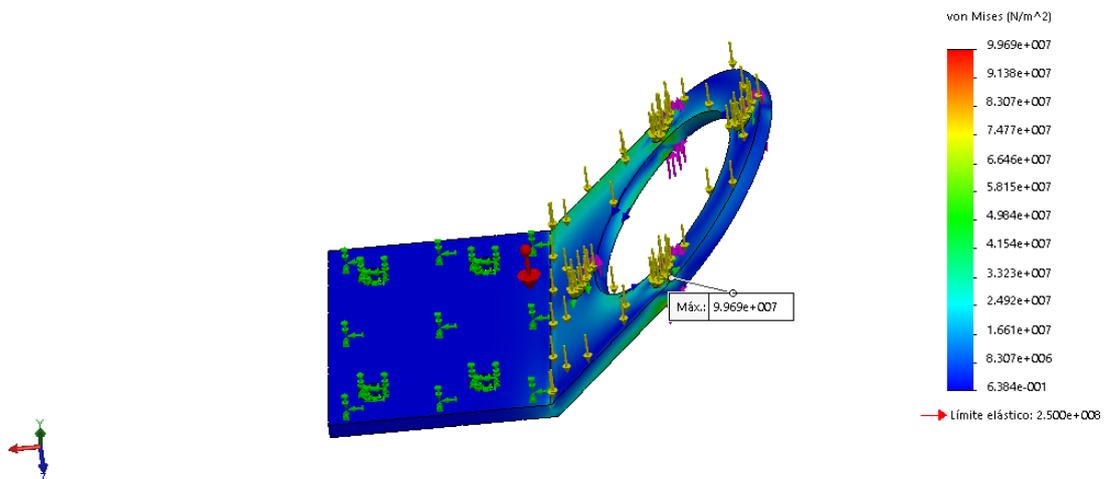


Figura 66. Análisis de tensiones acople de motor

La mayor tensión se encuentra en los agujeros de sujeción del acople con la base del chasis con un valor de $9.969e+07 \text{ N/m}^2$. La tensión máxima es inferior al límite elástico del material con un valor de $250e+08 \text{ N/m}^2$, por lo que se considera un diseño seguro.

DESPLAZAMIENTO

Nombre	Tipo	Min	Máx
Desplazamientos	URES: Desplazamientos resultantes	1e-003 mm Nodo 522	8.972e02 mm Nodo 2289

Nombre del modelo: ACOPLA_MOTOR_BASE
Nombre de estudio: Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos:1
Escala de deformación: 96.4649

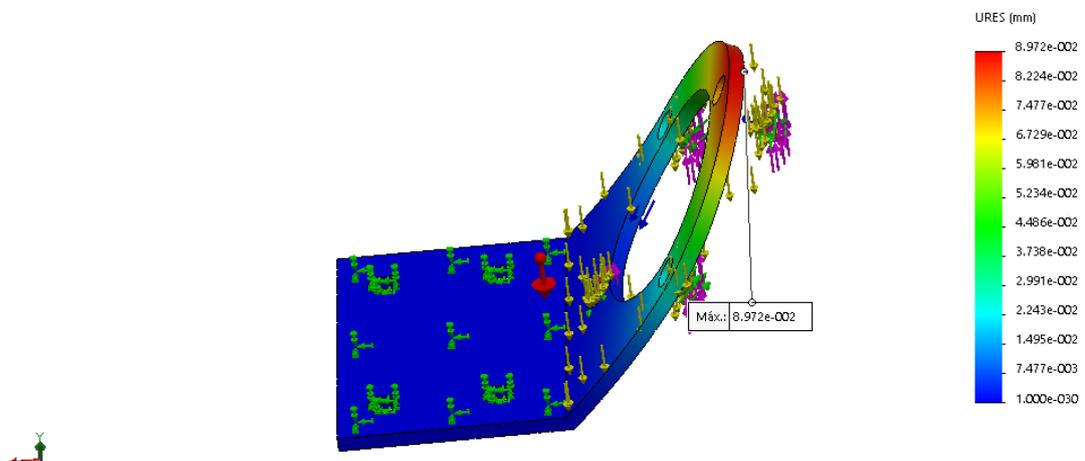


Figura 67. Análisis de desplazamientos de acople de motor

El mayor desplazamiento ocurre en la parte redondeada superior del acople. El valor máximo de desplazamiento es de 0.089 mm.

FACTOR DE SEGURIDAD

Nombre	Tipo	Min	Máx
Factor de seguridad	Tensiones von Mises máx	2.5 Nodo 68469	3.916e+08 Nodo 67918

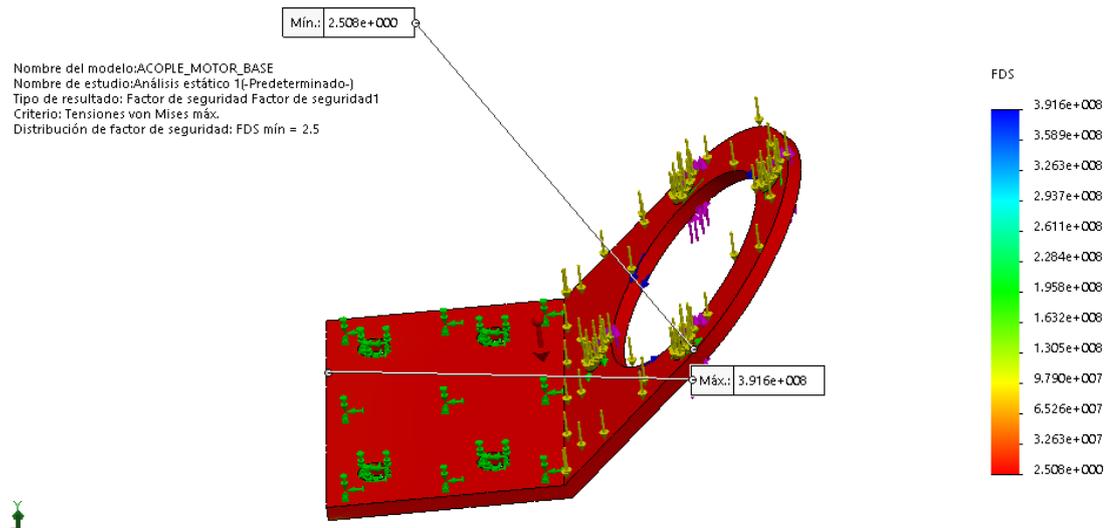


Figura 68. Análisis factor de seguridad acople de motor

El valor mínimo del factor de seguridad calculado se encuentra en los agujeros de sujeción del motor con el acople con un valor de 2.5, encontrándose superior al establecido de 2 (ANEXO D), considerándose el diseño como seguro.

3.9 Diseño de las garras de sujeción

La garra de sujeción permite el anclaje de la estructura con la esfera mediante ruedas locas esféricas localizadas en la parte final de la misma. El análisis de cargas se presenta en la figura 44.

3.9.1 Selección del material para garras de sujeción

Para la selección del material para las garras, se realiza un análisis de las principales características mecánicas de materiales a seleccionar, mostrados en la tabla 15. En la cual, se selecciona el Aluminio 6063 como material de construcción para las garras de sujeción debido a su densidad de 2700kg/m^3 que contribuye a aligerar el peso en si del componente y a su límite de elasticidad de 41Mpa que es el indicado para soportar los esfuerzos que actúan en el componente.

3.9.2 Criterios de espacio y ubicación

Para el diseño de las garras de sujeción entre la estructura del prototipo y la esfera, se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- La garra debe permitir la sujeción entre la estructura del prototipo y la esfera.
- Las garras deben ubicarse y separarse simétricamente en el chasis.

El diseño de la garra de sujeción tiene las siguientes características y se muestra en la figura 69:

- La forma de la garra es arqueada para acoplarse al contorno de la esfera.
- Un extremo se encuentra fijo con el chasis mientras que el otro extremo permite la movilidad de la esfera por medio de una rueda loca acoplada en dicho extremo.

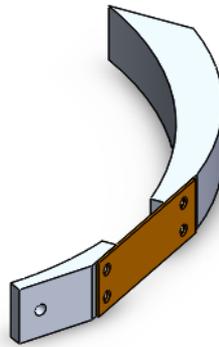
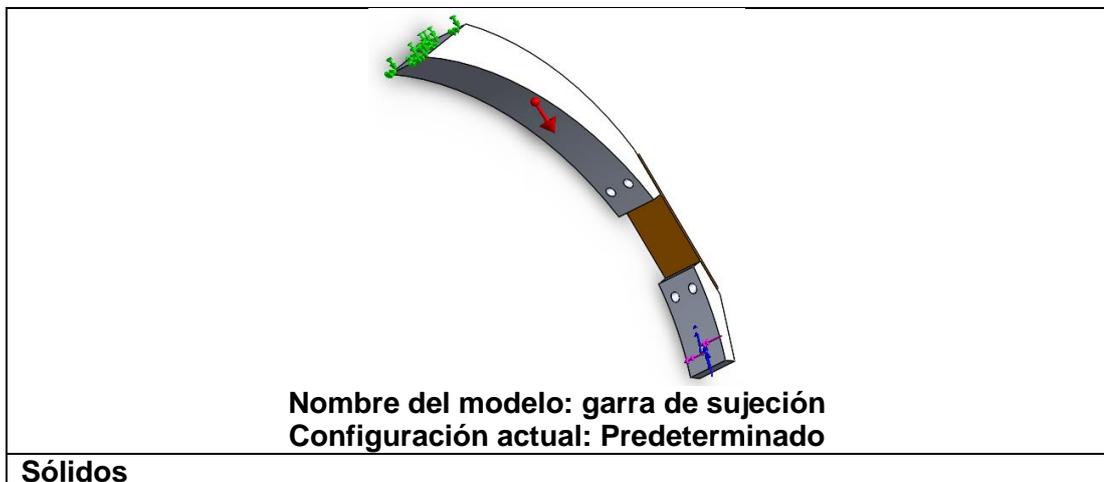


Figura 69. Garra de sujeción

3.9.3 Información del modelado

El análisis de esfuerzos de la garra de sujeción se realiza con ayuda del software CAE.



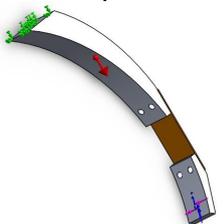
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición 2 	Sólido	Masa: 107.8g Volumen: 37724.45mm ³ Densidad:2.69g/cm ³ Peso: 1.04N	
Unidades			
Sistema de unidades		Métrico(MKS)	
Longitud/Desplazamiento		Mm	
Temperatura		Kelvin	
Velocidad angular		Rad/seg	
Presión/Tensión		N/m ²	

Figura 70. Información modelado de garra de sujeción

En la figura 71, se presenta las propiedades del material utilizado para la construcción de la garra de sujeción.

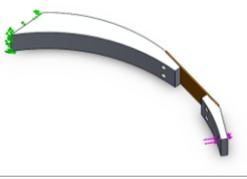
Referencia de modelo	Propiedades		Componente
	Nombre: Tipo de modelo: Criterio de error: Límite elástico: Límite tracción: Coef de Poisson: Densidad:	Aluminio 6063 Plasticidad-Von Mises Desconocido 41.36N/mm ² 89.99N/mm ² 0.33 2700kg/m ³	Sólido

Figura 71. Información material para la garra de sujeción

3.9.4 Cargas y sujeciones en la garra de sujeción

Las cargas y sujeciones que actúan en la garra de sujeción se presenta con detalle en la figura 72.

Sujeción	Imagen Sujeción	Detalle de sujeción	
Fijo-6		Entidades: Tipo:	1 cara Geometría fija

Carga	Imagen Carga	Detalle de carga
-------	--------------	------------------

F_{eys}		Entidades: 1 arista Tipo: Aplicar fuerza Referencia: Planta Valor: 1.87N Unidades: SI
F_{es}		Entidades: 1 arista Tipo: Aplicar fuerza Referencia: Planta Valor: 1.87N Unidades: SI

Figura 72. Cargas y sujeciones en la garra de sujeción

3.9.5 Resultados de los esfuerzos en la garra de sujeción

TENSIÓN DE VON MISES

Nombre	Tipo	Min	Máx
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	1.118e+003 N/m ² Nodo 10317	1.207e+007 N/m ² Nodo 13104

Nombre del modelo:EnsambleGarra
Nombre de estudio:Análisis estático 1(-Predeterminado-)
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
Escala de deformación: 183.731

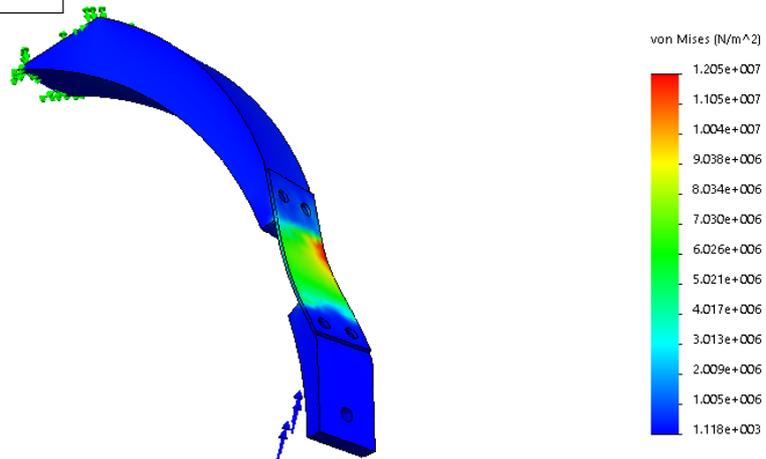


Figura 73. Análisis de tensión de la garra

La mayor tensión se encuentra en la placa de unión de las dos partes de la garra con un valor de $1.205e+07$ N/m². La tensión máxima es inferior al límite elástico del material con un valor de $250e+08$ N/m², por lo que se considera un diseño seguro.

DESPLAZAMIENTO

Nombre	Tipo	Min	Máx
Desplazamientos	URES: Desplazamientos resultantes	1e-003 mm Nodo 92	9.557e-002 mm Nodo 10238

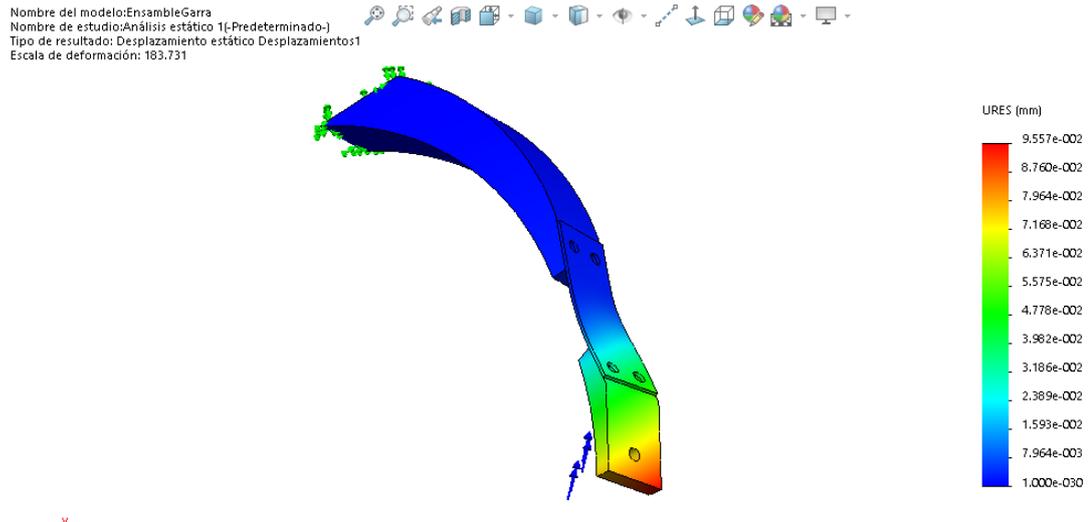


Figura 74. Análisis de desplazamiento de la garra

El mayor desplazamiento ocurre en la parte final de la garra. El valor máximo de desplazamiento es de 0.095 mm.

FACTOR DE SEGURIDAD

Nombre	Tipo	Min	Máx
Factor de seguridad	Tensiones von Mises máx	16 Nodo 13104	2.461e+005 Nodo 11435

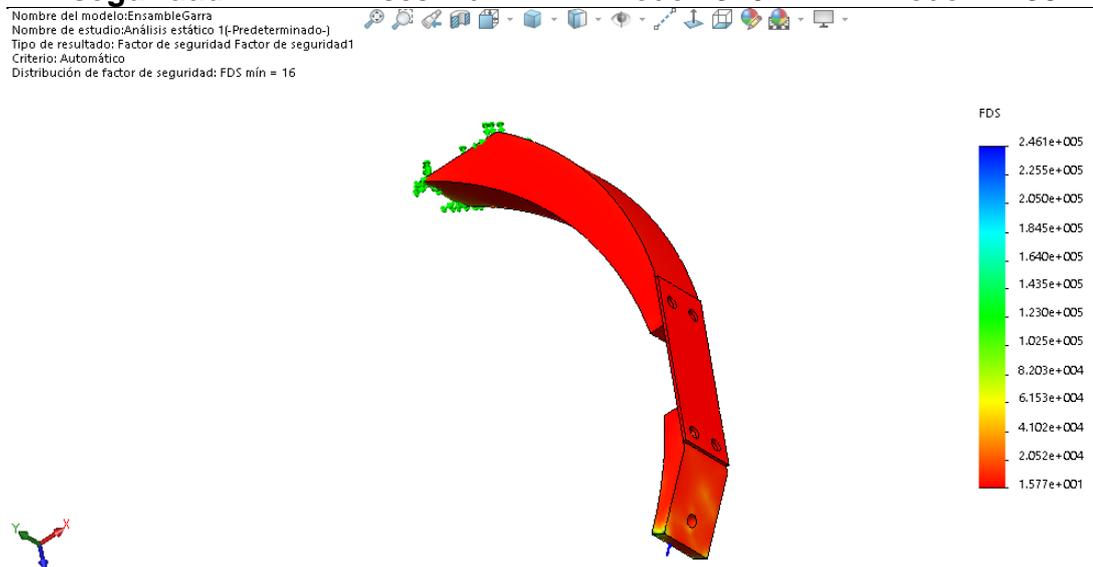


Figura 75. Análisis de factor de seguridad de la garra

El valor mínimo del factor de seguridad calculado es de 16, encontrándose superior al establecido de 2 (ANEXO D), considerándose el diseño como seguro.

3.10 Diseño de los acoples para perfil-base

Los acoples para perfil permiten el anclaje de las bases de acrílico con los perfiles de soporte para formar pisos en donde se localizan los diferentes componentes. El análisis de carga se presenta en la figura 46.

3.10.1 Criterios de diseño

Para el diseño de los acoples que permitirán ensamblar los perfiles con las dos bases redondas de componentes electrónicos, que conforman el cuerpo superior del prototipo, se analizan bajo los siguientes requerimientos:

- El acople debé permitir el anclaje de los perfiles con las bases redondas.
- El acople tiene que permitir la entrada del perfil al acople.

El diseño del acople de perfil presenta las siguientes especificaciones y se muestra en la figura 76.

- El acople posee una entrada hueca de acuerdo al contorno del perfil.
- El acople posee una cara horizontal con agujeros equidistantes para sujeción con las bases redondas de componentes.

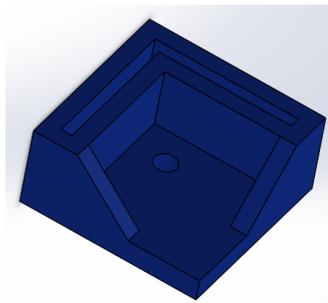


Figura 76. Acople perfil-base

3.10.2 Información del modelo

Los esfuerzos analizados en el acople perfil base se obtuvieron mediante la ayuda del software CAE en donde se observa la fuerza que actúa en la pieza.

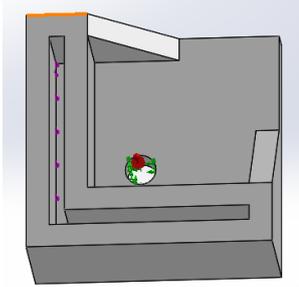
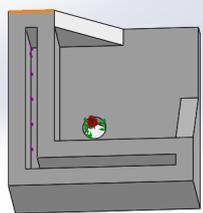
			
Nombre del modelo: Acople perfil base Configuración actual: Predeterminado			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición 2 	Sólido	Masa: 7.78g Volumen: 7622.94mm ³ Densidad: 1020kg/m ³ Peso: 0.07N	
Unidades			
Sistema de unidades		Métrico(MKS)	
Longitud/Desplazamiento		Mm	
Temperatura		Kelvin	
Velocidad angular		Rad/seg	
Presión/Tensión		N/m ²	

Figura 77. Información del modelado acople perfil base

En la figura 78, se presenta las propiedades del material utilizado para la construcción del acople perfil base.

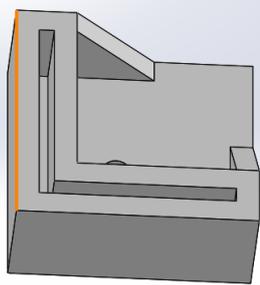
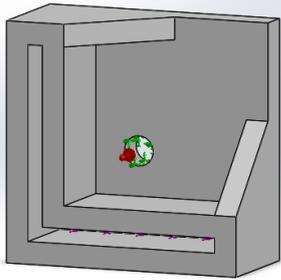
Referencia de modelo	Propiedades		Componente
	Nombre: Tipo de modelo: Criterio de error: Límite elástico: Límite tracción: Módulo cortante: Coeficiente de Poisson: Densidad:	ABS Isotrópico elástico Tensión de von Mises 2000N/mm ² 30N/mm ² 318.9N/mm ² 0.394 1020kg/m ³	Sólido

Figura 78. Información material acople perfil base

3.10.3 Cargas y sujeciones en el acople perfil base

Las cargas que actúan en el acople perfil base se presenta con detalle en la figura 79.

Sujeción	Imagen Sujeción	Detalle de sujeción
----------	-----------------	---------------------

Fijo-1		Entidades: Tipo:	1 cara Geometría fija
--------	---	---------------------	--------------------------

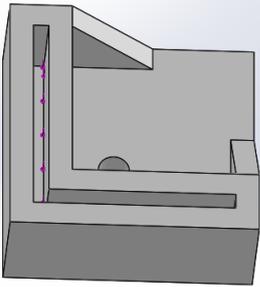
Carga	Imagen Carga	Detalle de carga	
$\frac{W_{es3}}{3}$		Entidades: Tipo: Referencia: Valor: Unidades:	1 Caras Aplicar fuerza Planta 10.42N SI

Figura 79. Cargas y sujeciones acople perfil base

3.10.4 Resultados de los esfuerzos en el acople perfil base

TENSIÓN DE VON MISES

Nombre	Tipo	Min	Máx
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	3.292e+002 N/m ² Nodo 370	1.574e+006 N/m ² Nodo 14440

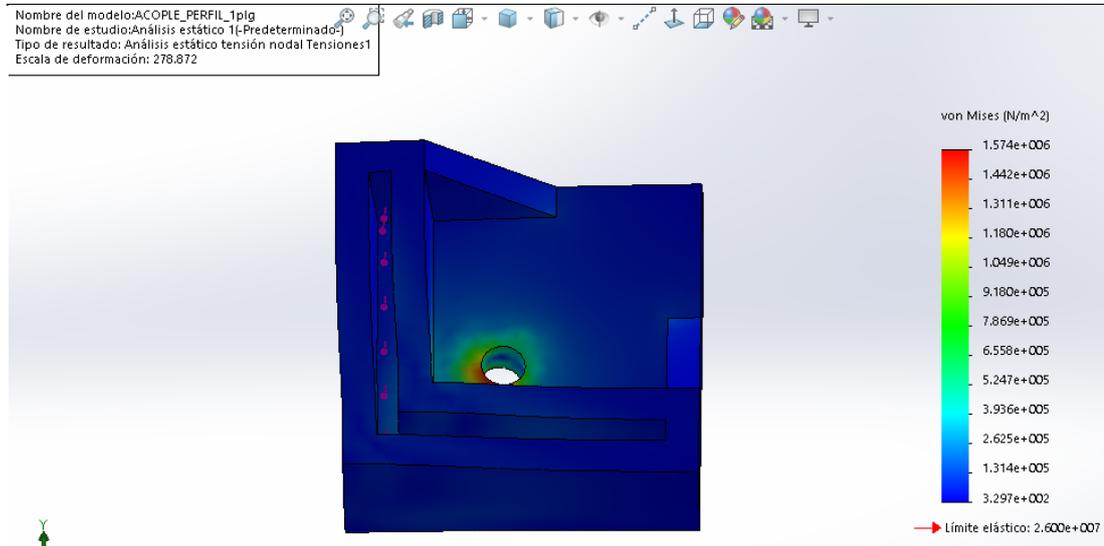


Figura 80. Análisis de tensiones acople perfil base

La mayor tensión se encuentra en los agujeros de sujeción del acople perfil base con un valor de 1.574e+006 N/m². La tensión máxima es inferior al límite

elástico del material con un valor de $2.6e+07 \text{ N/m}^2$, por lo que se considera un diseño seguro.

DESPLAZAMIENTO

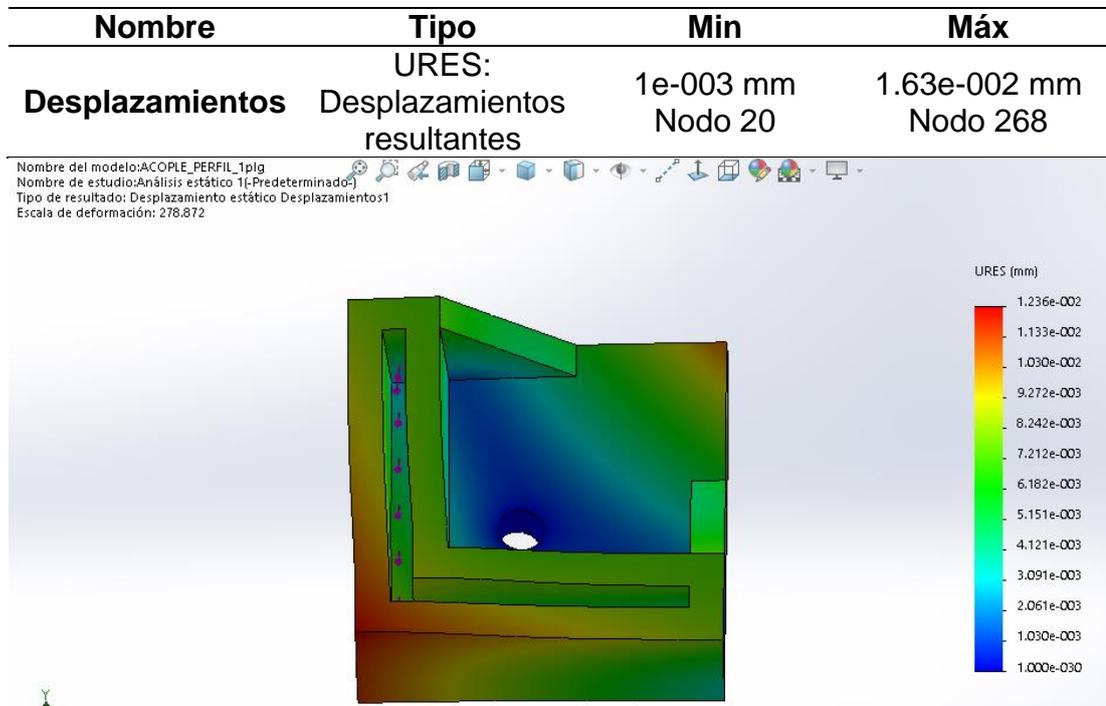


Figura 81. Análisis de desplazamiento acople perfil base

El mayor desplazamiento ocurre en la esquina diagonal en el agujero de anclaje con el acrílico. El valor máximo de desplazamiento es de 0.012mm.

FACTOR DE SEGURIDAD

Nombre	Tipo	Min	Máx
Factor de seguridad	Tensiones von Mises máx	17 Nodo 14440	7.886e+04 Nodo 370

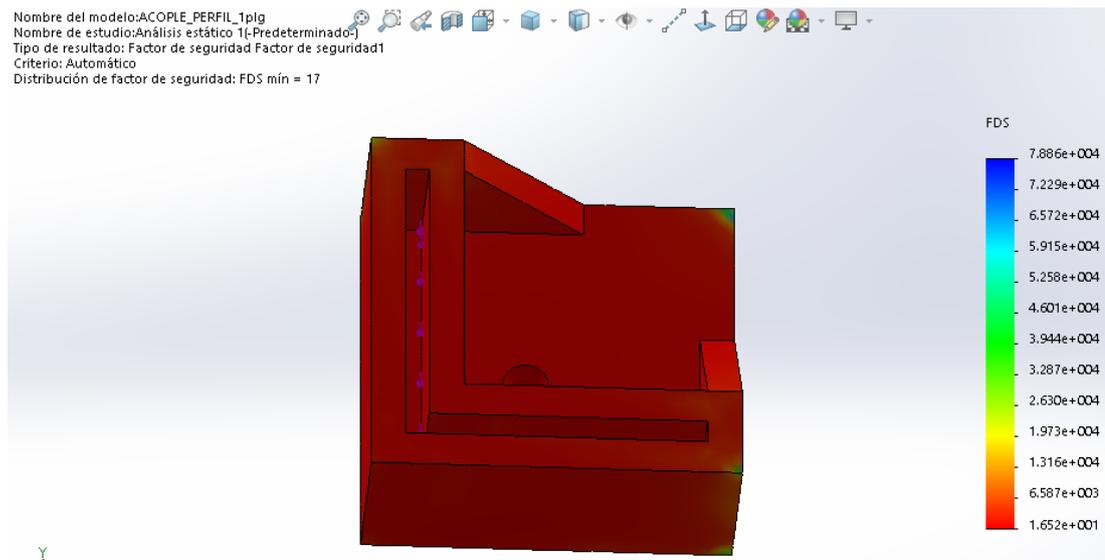


Figura 82. Análisis factor de seguridad acople perfil base

El valor mínimo de factor de seguridad calculado es de 17, encontrándose superior al establecido de 2, considerándose el diseño como seguro.

3.11 Diseño de la base inferior redonda de componentes electrónicos

La base inferior redonda permite servir de soporte para la ubicación de las tarjetas de control de los motores y se encuentra sometida a las cargas descritas a continuación y se muestra en la figura 47:

3.11.1 Requerimientos de diseño

Para el diseño de la base que contendrá a los componentes electrónicos, se toma en cuenta los siguientes aspectos:

- La base deberá servir de soporte para todos los componentes electrónicos. Esto con la finalidad de reducir el centro de gravedad del prototipo.
- La forma de la base deberá ser la adecuada para para ubicar a los componentes simétricamente.
- La base deberá permitir la fácil accesibilidad de conexiones entre componentes y peso reducido.

3.11.2 Especificaciones del diseño de la base

- La forma de la base será redonda ya que permite ubicar simétricamente a todos los componentes en ella. Tendrá un diámetro de 300mm.

- La base tendrá 3 perforaciones en forma triangular acorde a los agujeros del chasis para permitir el anclaje y unión con la base.
- La base tendrá agujeros para las 3 tarjetas de control para los motores y los 3 perfiles para columnas.

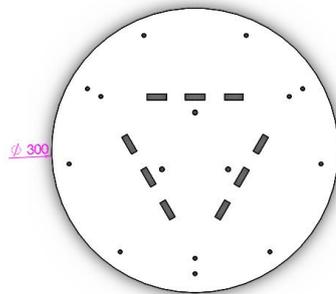


Figura 83. Base inferior para componentes electrónicos

3.11.3 Ubicación de componentes

Los componentes: baterías, tarjetas de control para los motores y acoples para los perfiles de anclaje serán ubicados de la siguiente forma:

- Tarjetas de control de motores: a 120° separación y en los extremos.
- Baterías: centro de la base redonda.
- Acoples de perfil: a 120° de separación entre ellos y en los extremos.

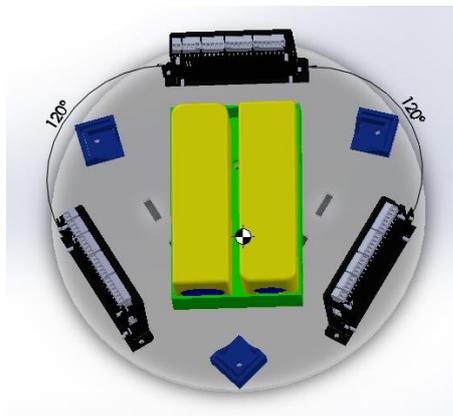


Figura 84. Ubicación componentes sobre base inferior redonda

3.11.4 Información del modelado

Los esfuerzos analizados en la base inferior se obtuvieron mediante la ayuda del software CAE

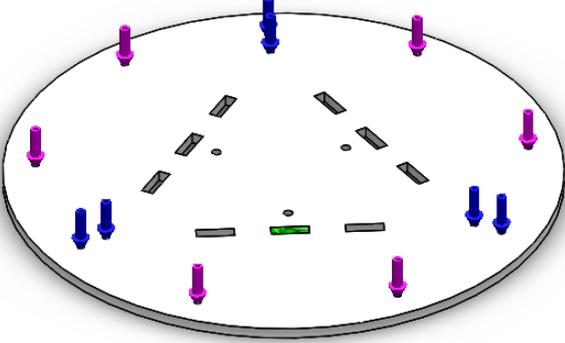
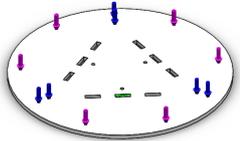
			
Nombre del modelo: base inferior Configuración actual: Predeterminado			
Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
Línea de partición 2 	Sólido	Masa: 498.67g Volumen: 415562.48 mm ³ Densidad: 1200g/cm ³ Peso: 4.88 N	
Unidades			
Sistema de unidades		Métrico(MKS)	
Longitud/Desplazamiento		Mm	
Temperatura		Kelvin	
Velocidad angular		Rad/seg	
Presión/Tensión		N/m ²	

Figura 85. Información del modelado base inferior

En la figura 86, se presenta las propiedades del material utilizado para la construcción de la base.

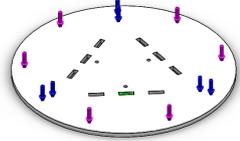
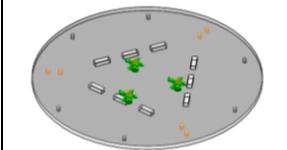
Referencia de modelo	Propiedades		Componente
	Nombre: Tipo de modelo: Criterio de error: Límite elástico: Límite tracción: Coef de Poisson: Densidad:	Acrílico Isotrópico elástico Von Mises 45 N/mm ² 73 N/mm ² 0.35 1200kg/m ³	Sólido

Figura 86. Información material base inferior

3.11.5 Cargas y sujeciones en la base inferior

Las cargas que actúan en la base inferior se presenta con detalle en la figura 88.

Sujeción	Imagen Sujeción	Detalle de sujeción
----------	-----------------	---------------------

Fijo-1		Entidades: Tipo:	3 aristas Geometría fija
--------	---	---------------------	-----------------------------

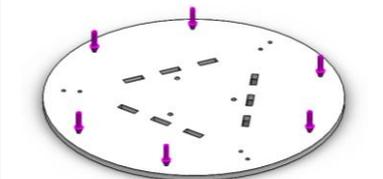
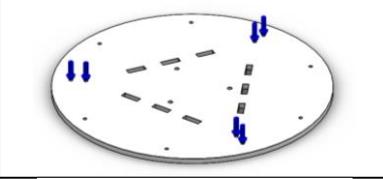
Carga	Imagen Carga	Detalle de carga	
W_{tarj}		Entidades: Tipo: Referencia: Valor: Unidades:	6 aristas Aplicar fuerza Planta 5.88 N(total) SI
F_{es2}		Entidades: Tipo: Referencia: Valor: Unidades:	6 aristas Aplicar fuerza Planta 36.78N(total) SI
<i>gravedad</i>		Referencia: Valor: Unidades:	Planta -9.81m/s^2 SI

Figura 87. Cargas y sujeciones base inferior

3.11.6 Resultados de los esfuerzos en la base inferior

TENSIÓN DE VON MISES

Nombre	Tipo	Min	Máx
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	1.397e+03 N/m ² Nodo 6874	2.916e+06 N/m ² Nodo 99

Nombre del modelo: B_C_INFERIOR
 Nombre de estudio: Análisis estático 1{-Predeterminado}
 Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1
 Escala de deformación: 110.962

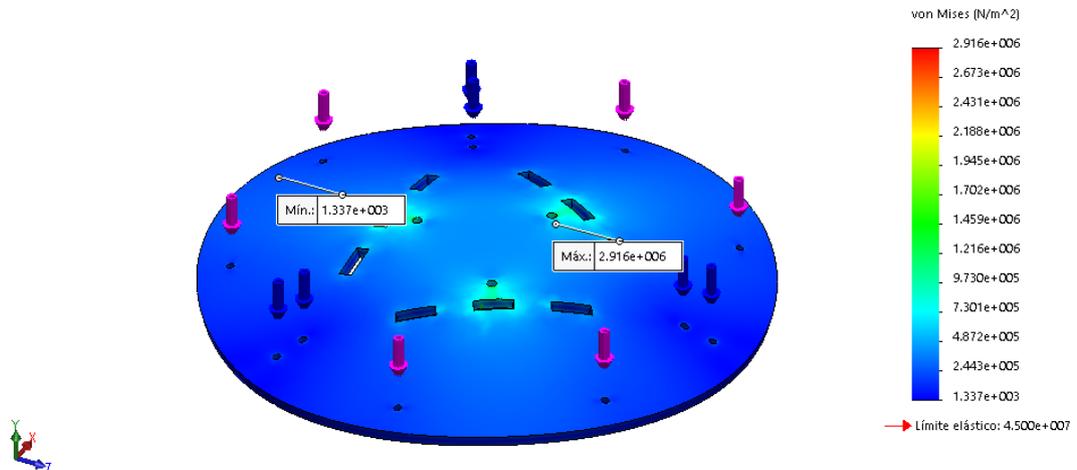


Figura 88. Análisis de tensiones base inferior

La mayor tensión se encuentra en los 3 agujeros de sujeción de la base con el chasis con un valor de $2.916e+006 \text{ N/m}^2$. La tensión máxima es inferior al límite elástico del material con un valor de $4.5e+07 \text{ N/m}^2$, por lo que se considera un diseño seguro.

DESPLAZAMIENTO

Nombre	Tipo	Min	Máx
Desplazamientos	URES: Desplazamientos resultantes	1e-03 mm Nodo 113	2.705e-01 mm Nodo 282

Nombre del modelo: B_C_INFERIOR
 Nombre de estudio: Análisis estático 1-Predeterminado
 Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1
 Escala de deformación: 110.962

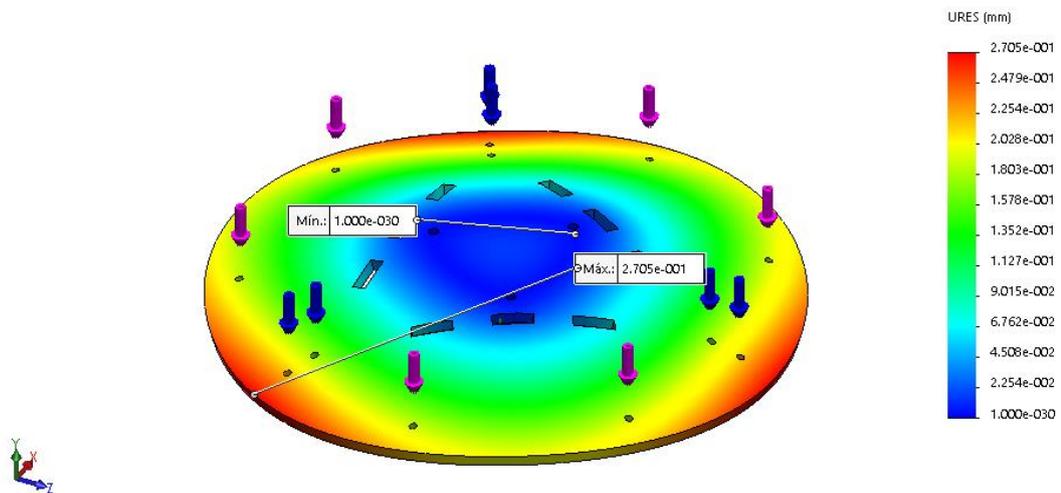


Figura 89. Análisis de desplazamiento base inferior

El mayor desplazamiento ocurre en los agujeros que soportan el peso de los componentes electrónicos y la base redonda superior. El valor máximo de desplazamiento es de 0.27 mm.

FACTOR DE SEGURIDAD

Nombre	Tipo	Min	Máx
Factor de seguridad	Tensiones von Mises máx	15 Nodo 99	3.367e+04 Nodo 6874

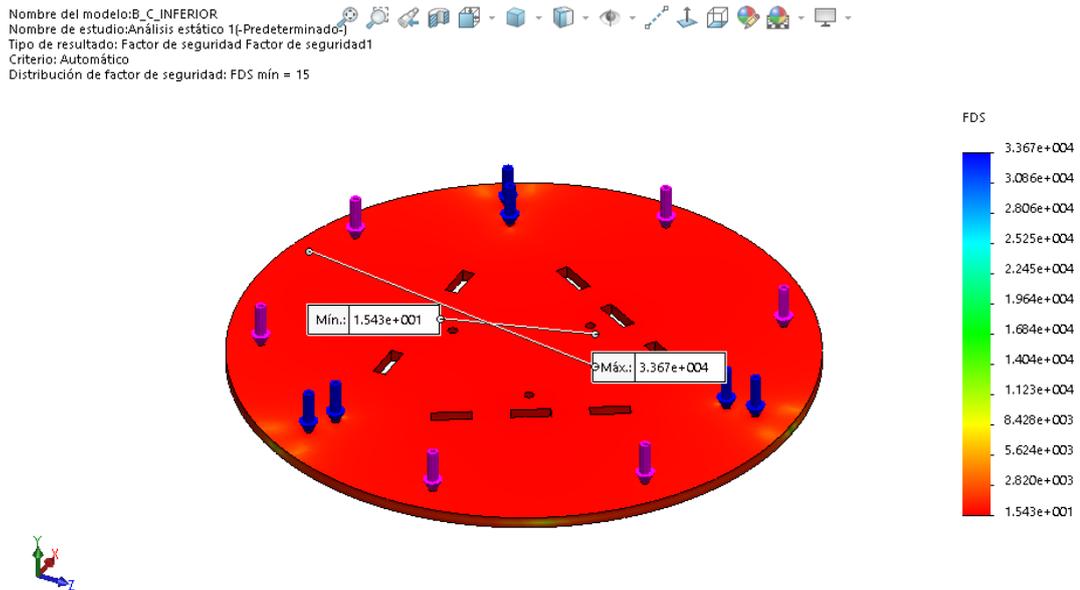


Figura 90. Análisis factor de seguridad base inferior

El valor mínimo del factor de seguridad es de 15, encontrándose superior al establecido de 2, considerándose el diseño como seguro.

3.12 Diseño sistema de control

Una vez finalizado el proceso de diseño mecánico, se procede al desarrollo del sistema de control analizando las entradas y salidas a obtener.

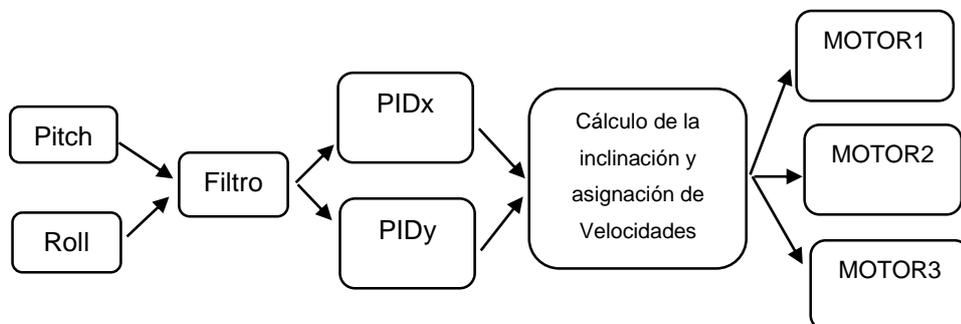


Figura 91. Sistema de control del prototipo

3.12.1 Descripción de requerimientos

Entre las funciones que debe cumplir el robot para lograr el equilibrio, se encuentran las siguientes:

- Controlar los periféricos añadidos al robot
- Obtener la posición angular del robot
- Controlar precisamente las posiciones de los motores
- Obtener las posiciones de los motores

- Proveer la suficiente energía para la operación autónoma

Para cumplir estas especificaciones en lenguaje coloquial, se establece los elementos técnicos que se requiere para tabla 17.

Tabla 17

Elementos técnicos para el robot

Cantidad	Elemento	Función
1	Microcontrolador	Adquirir y procesar las señales de los periféricos del robot
1	Sensor IMU	Obtener la posición angular del conjunto del robot
3	Encoders	Obtener la posición angular de cada motor
3	Drivers	Controlar precisamente el movimientos de los motores
1	Batería	Proveer de energía suficiente alrobot

3.12.2 Selección de componentes

a. Encoders

El motor maxon ec-i 40 integra internamente encoders para su etapa de control, por lo que no es necesario hacer otra compra adicional, dichos encoders son de tipo hall.

b. Tarjetas de control de velocidad

El motor eci- 40 cuenta con una controladora propia para dicho motor ESCON 50/5, que provee modos de operación flexibles y permite la integración, envío y recepción de datos con los microcontroladores más comunes.

Tabla 18

Hoja técnica driver ESCON 50/5

Características eléctricas ESCON 50/5	
Voltaje nominal	10 – 50V
Voltaje de trabajo absoluta	8 – 56 VDC
Corriente de salida	5/15A
Frecuencia PWM	53.6kHz
Eficiencia máxima	98%
Señales sensor hall	H1, H2, H3
Entradas digitales	+2.4 - +36 VDC
Salidas digitales	+2.4 - +36 VDC

CONTINÚA



Peso	120g
Dimensiones	43.2 x 31.8 x 12.7 mm

Fuente: (Maxon Motor, 2015)



Figura 92. Detalle del driver ESCON 50/5

Fuente: (Maxon Motor, 2015)

c. IMU (Unidad de medición inercial)

Para obtener los valores de pitch y roll, que son las entradas del sistema de control, se selecciona el MPU 6050 que cuenta con acelerómetro y giroscopio que censan valores en los tres ejes.

Tabla 19 D

atos técnicos del sensor IMU MPU6050

MPU6050	
Voltaje de alimentación	2.375 – 3.46V
Interfaces serial	I ² C
Corriente de operación acelerómetro - giroscopio	3.9mA
Temperatura de operación	-40°C a +105°C

Fuente: (InvenSense, 2013)



Figura 93 Detalle IMU MPU6050

Fuente: (InvenSense, 2013)

d. Baterías

Las baterías son las partes fundamentales en la operación de un robot móvil, proveen de la energía necesaria para la operación del mecanismo en un tiempo predeterminado, para elegir una adecuada batería, se hace un análisis de las cargas eléctricas que incluyen el prototipo. Se incluye unas pérdidas del 25% para efectos de cálculo y que un tiempo de autonomía de 30 minutos. Las características de la batería se presentan en la tabla 19:

Tabla 20

Cargas eléctricas del prototipo

Cargas eléctricas del Prototipo			
Cantidad	Descripción	Potencia	Total
3	Motores Maxon	100W	300W
3	Drivers ESCON	5W	15W
1	MPU6050	~1W	1W
1	Microcontrolador	~5W	5W
		Total	321W
		Añadido el 25% de pérdidas	401.25W

Se analiza un tipo de batería comercial, las HRB RC Lipo 5S, 18V y 6000mAh, se calcula la corriente necesaria del prototipo con 18V de alimentación estándar.

$$P = V * I$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{400W}{18V} = 22.27A$$

Se considera la capacidad de la batería, para obtener un tiempo medio de funcionamiento:

$$6000mAh = I * t$$

$$t = \frac{6000mAh}{I} = \frac{6Ah}{22.27A} = 0.26h = 26 \text{ minutos}$$

Para aumentar el tiempo de operación, se opta por poner otra batería en paralelo para tener 26 minutos de autonomía adicional que es aceptable para el prototipo.



Figura 94 Detalle Batería HRB 5S 6000mAh

e. Microcontrolador

El microcontrolador es la parte central del robot, permite obtener las señales de los sensores, así como controlar la posición de los motores, a la vez permite realizar cálculos matemáticos con los cuales se puede implementar algoritmos de control para lograr equilibrar el conjunto del robot. Para la selección del controlador se realiza la tabla 20 de selección.

Tabla 21

Selección del microcontrolador

Características	Arduino Mega 2560	Raspberry Pi 3	Beagle Bone Black
Procesador	ATMega2560	Broadcom BCM2837	Sitara AM3358BZCZ100
Velocidad	16 Mhz	1.2Ghz	1GHz
Voltaje de alimentación	7-12 V	5V	5V
Voltaje de operación	5 – 3.3 V	3.3V	5 – 3.3V
Entradas/Salidas Digitales	54	40	59
Entradas Analógicas	16	0	7
Salidas PWM	15	2	7
SRAM	8 Kb	1Gb	512Mb
Memoria EEPROM	4 Kb	-	-
Corriente continua por Pin	50mA(3.3V)	50mA(3.3V)	50mA(3.3V)
Protecciones cortocircuitos	Si	Si(Parcial)	No
Costo	\$38.50	\$35	\$70

3.12.3 Algoritmo de control

Una vez elegidos los componentes de control y contando con la estructura física, es necesario establecer un programa o algoritmo que sea capaz de lograr la estabilidad del prototipo en su tiempo de funcionamiento, dicho algoritmo contará de varias etapas que se presentan el siguiente diagrama de flujo, figura 97:

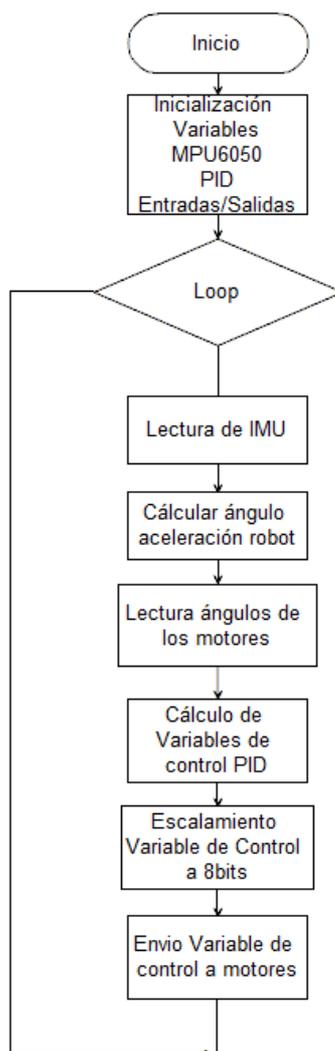


Figura 95. Diagrama de control del prototipo

3.12.4 Diagrama de conexión entre componentes electrónicos

A continuación, en la figura 96 se presenta el diagrama de conexiones de componentes electrónicos del prototipo.

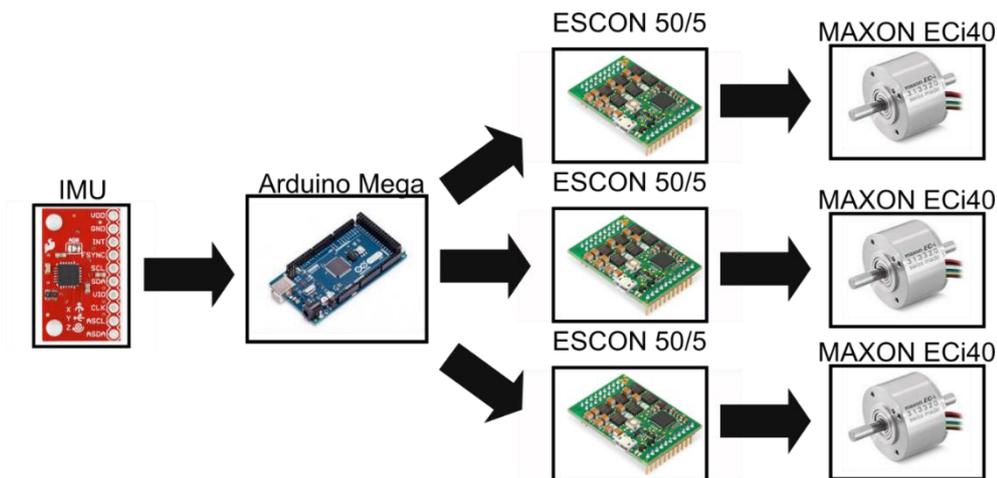


Figura 96 Conexión de componentes del prototipo

3.12.5 Diagrama del circuito de alimentación

En la figura 97, se detalla el circuito de alimentación que permite energizar con el voltaje adecuado a los diferentes componentes electrónicos del prototipo.

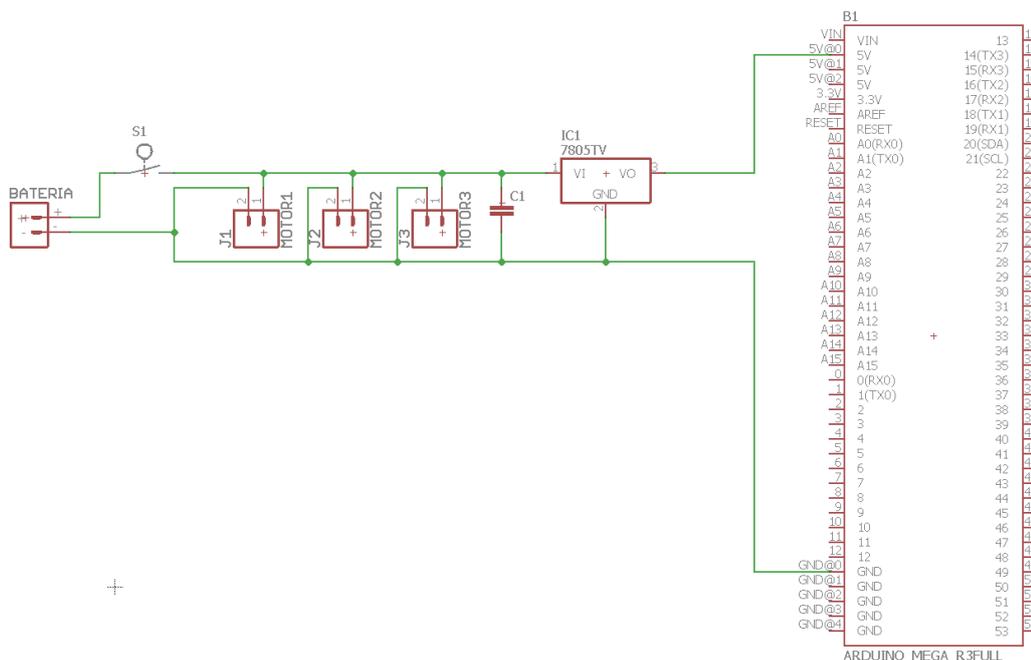


Figura 97. Circuito de alimentación

3.13 Prototipo final

El prototipo final, después de toda la parte de diseño mecánico, diseño de control y selección de componentes, se presenta a continuación en la figura 98:

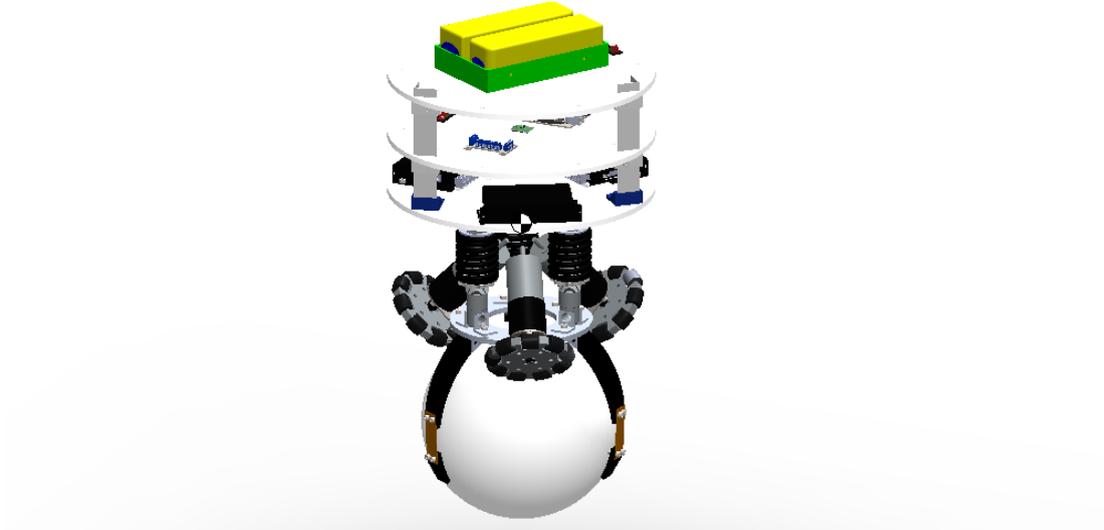


Figura 98. Prototipo final

3.14 Lectura y pruebas del control

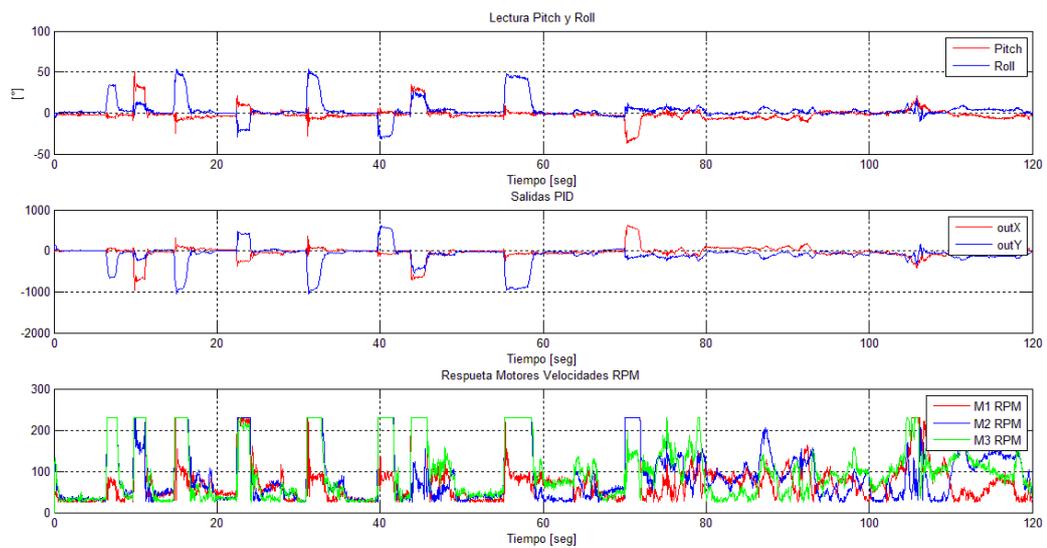


Figura 99 Lectura de entradas y salidas

La figura 99, presenta las lecturas de pitch y roll del sensor IMU 6050, las salidas de los PID en x y y, así como las salidas en PWM para los tres motores.

CAPÍTULO IV

4 CONSTRUCCIÓN

En el presente capítulo se procede a detallar el procedimiento de construcción del prototipo, tomando a consideración los parámetros de diseño definidos anteriormente.

4.1 Procesos de construcción

Los procesos de construcción que se utilizaron para la elaboración, se mencionan a continuación:

- Corte a chorro de agua
- Corte láser
- Soldadura
- Impresión 3D

4.2 Maquinaria

- Tronzadora de perfiles
- Soldadora MIG 300^a
- Taladro de pedestal
- Taladro de mano
- Mesa de trabajo

4.3 Instrumentos de medición

- Flexómetro
- Calibrador pie de rey
- Escuadra

4.4 Construcción del chasis

Para la construcción del chasis, se utilizó el proceso de corte a chorro de agua, el cual requiere del diseño de la pieza en software CAD en 2D figura 100, el cual muestra a la máquina que realiza el corte la trayectoria de corte a seguir para obtener el componente. El material seleccionado para la construcción del chasis se indica en la sección, el cual es un Aluminio 6063 de 6mm de espesor.

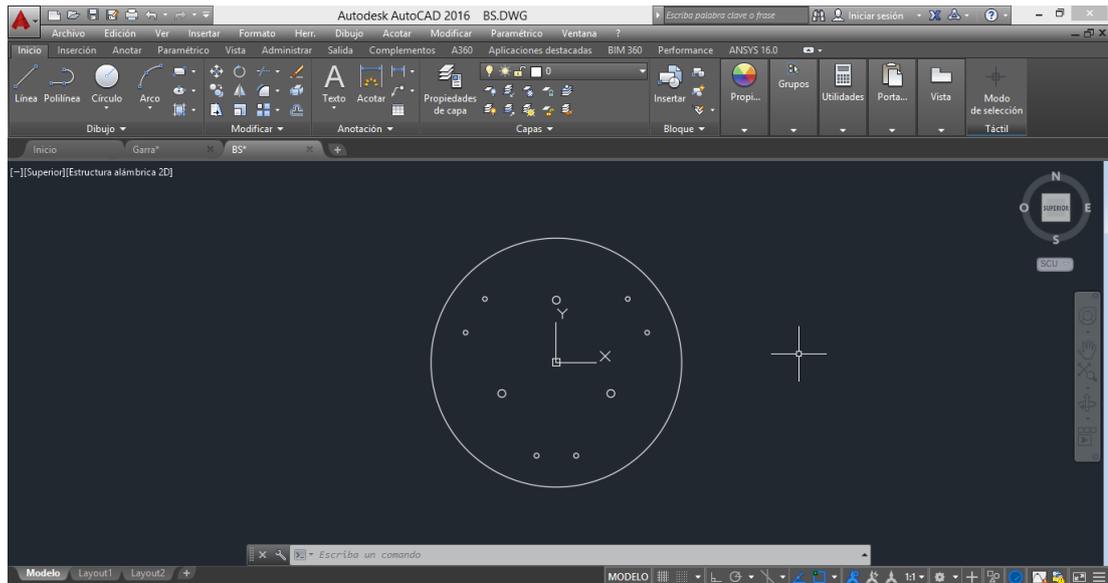


Figura 100. Diseño 2D del chasis

Una vez finalizado el diseño de la pieza, esta se vincula y se referencia al programa de la máquina de corte por chorro de agua, en la cual se añaden algunos datos respecto a características del material y se procede al corte como se muestra en la figura 101.



Figura 101. Corte chorro de agua del chasis

4.4.1 Construcción de las garras de sujeción

Para la construcción de las garras de sujeción, de igual forma se utilizó el proceso de corte a chorro de agua, el cual requiere del diseño de la pieza en 2D figura 102, para asignar la trayectoria de corte a la máquina encargada del proceso.

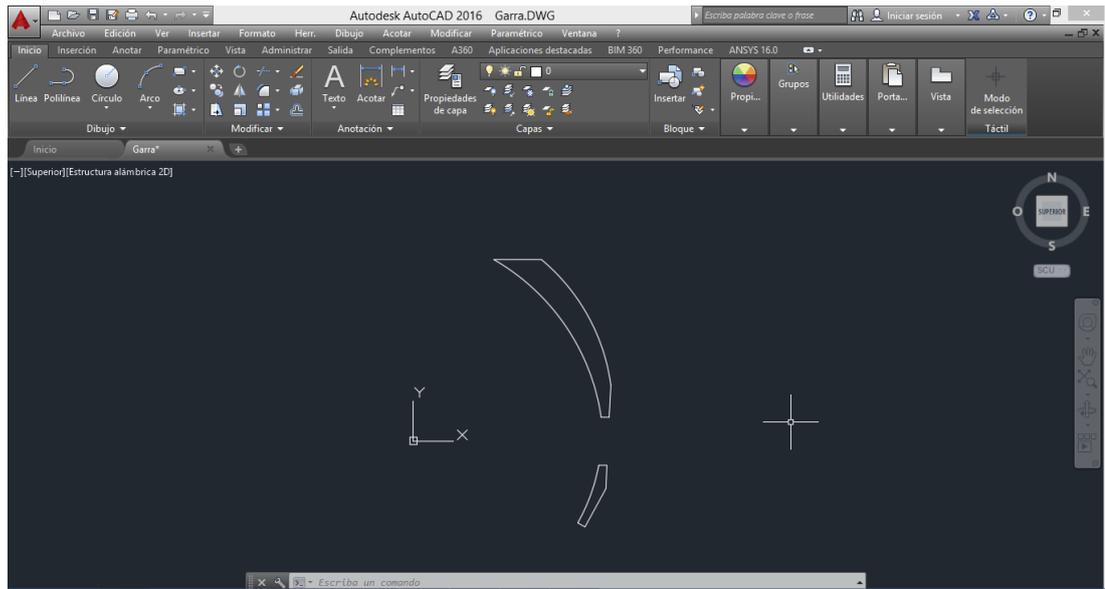


Figura 102. Diseño 2D de la garra

Después se vincula el diseño de las piezas según el CAD mostrado en la figura 102 al programa de la máquina de corte a chorro de agua, la misma que procede a referenciar el área de trabajo en la cual se va a colocar el diseño de las piezas a cortar y se realiza una simulación de como iniciaría el proceso de corte, especificando los lugares por donde se inicia el corte, como se muestra en la figura 103.

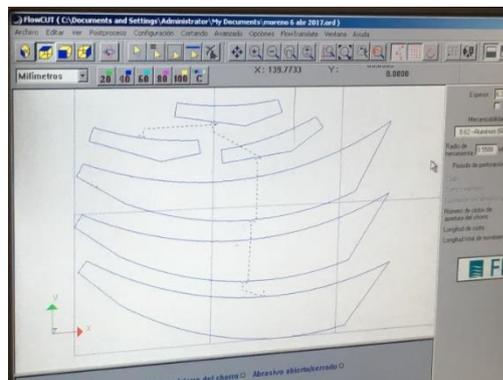


Figura 103. Disposición área de trabajo en máquina de corte

Una vez terminado el proceso de corte se obtienen las piezas tal cual fueron diseñadas en el software CAD, como se muestra en la figura 104.



Figura 104. Corte chorro de agua de la garra

La garra está compuesta por dos partes: el cuerpo y la uña, las cuales se unen mediante una platina de $\frac{3}{4}$ "x3mm espesor y 60mm de longitud, como se muestra en la figura 105.



Figura 105. Garra de sujeción

4.4.2 Sub ensamble garras con el chasis

Para ensamblar las garras con el chasis, se procedió a construir unos acoples con ángulo de aluminio de 1" x 1.5mm que permitan sujetar en los extremos a las garras y acoplarlos al chasis mediante pernos de sujeción M4x10mm. Se realizó perforaciones de 4mm en los extremos de las garras para unir los acoples, la garra y el chasis.



Figura 106. Sub ensamble garras con chasis

4.4.3 Construcción acoples para amortiguadores

Para la construcción de los acoples para los amortiguadores, se utilizó ángulo de aluminio de 1" x 1.5mm en pedazos de 20mm, con dos perforaciones una en cada ala del ángulo. Las perforaciones se realizaron en referencia al diámetro de sujeción final del amortiguador y al diámetro de los pernos M4 que sujetarán al chasis, es decir, se realizaron perforaciones de 15mm y 4mm respectivamente para cada ala del ángulo, como se muestra en la figura 107.

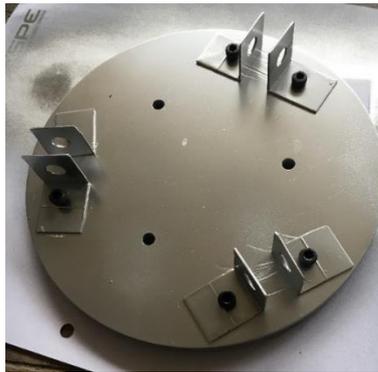


Figura 107. Acoples para amortiguadores

4.4.4 Sub ensamble amortiguadores con el chasis

Para ensamblar los amortiguadores con el chasis, se procede a encajar los agujeros de sujeción del chasis, lugar en donde se diseñó la localización del amortiguador dentro del espacio del chasis, con los agujeros de los acoples del amortiguador, como se muestra en la figura 108.



Figura 108. Sub ensamble amortiguador con el chasis

4.4.5 Sub ensamble del motor con el reductor

Los motores con el reductor fueron seleccionados anteriormente de tal manera que los mismos puedan ser ensamblados sin ningún inconveniente y

los cuales ya vienen ensamblados por defecto desde la fábrica, como se muestra en la figura 109.



Figura 109. Sub ensamble motor con reductor

4.4.6 Construcción de los acoples para motores

Para realizar la construcción de los acoples que permitirán acoplar tanto a los motores con la estructura, se identificó las medidas de la cara por donde sobresale el eje de salida del reductor según la hoja de datos del mismo mostrado en el ANEXO D, en el cual se aprecia las dimensiones en donde deben ir los tornillos de acople del motor, así como el diámetro de las circunferencias principales del mismo, como se muestra en la figura 110.

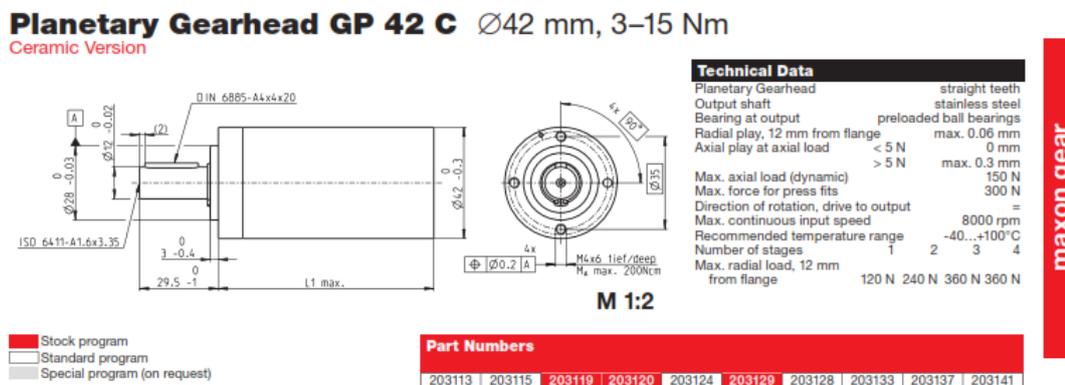


Figura 110. Medidas del reductor

Una vez identificado las dimensiones de salida de la cara del eje del reductor, se procede a realizar el diseño para el acople, el cual debe tener una inclinación de 45° y permita el acople con la estructura.

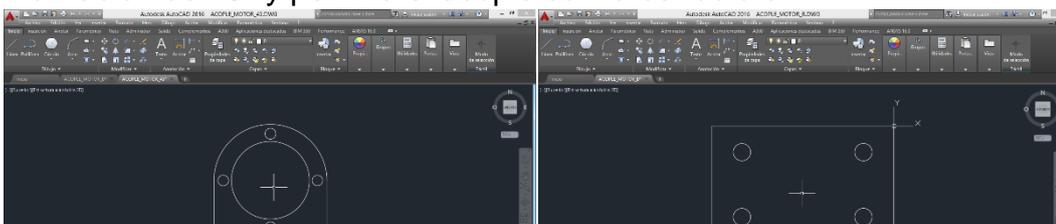


Figura 111. Diseño 2D del acople para motor

Con el diseño CAD del acople del motor indicado en la figura 111, se realiza un análisis del dimensionamiento del material requerido y se procede a realizar la construcción del mismo mediante el proceso de corte a chorro de agua para la plancha de material ASTM 36, obteniéndose como resultado figura 112.



Figura 112. Corte chorro de agua del acople del motor

Para unir las dos partes del acople para motor, se procede a realizar el proceso de soldadura con electrodo de tungsteno y para formar la inclinación de 45° del acople se utiliza un ángulo de 2" como soporte, figura 113.



Figura 113. Proceso de soldadura de acople de motor

Una vez terminado el proceso de soldadura de las dos partes del acople del motor, se procede a limar los excesos de suelda para obtener una unión estética del acople, figura 114.



Figura 114. Limado de exceso de suelda

4.4.7 Sub ensamble acople de motor con el chasis

Para ensamblar el acople de motor con la estructura, se utilizan tornillos de sujeción cabeza avellana M4x12mm.



Figura 115. Sub ensamble acople de motor con el chasis

4.4.8 Sub ensamble motor, reductor, acople y rueda omnidireccional

Para ensamblar el reductor y motor con el acople de motor, se utilizan tornillos de sujeción cabeza avellanada M4x10mm, los cuales se localizan exactamente en los agujeros del acople y del reductor, como se muestra en la figura 116.

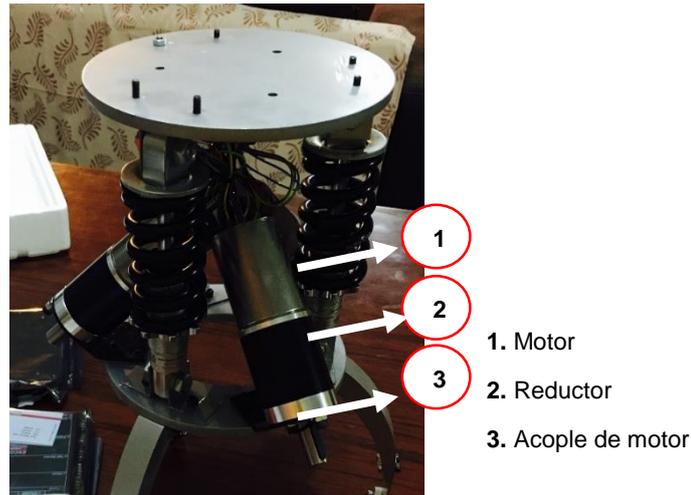


Figura 116. Sub ensamble motor, reductor y acople

Para el ensamble final de los motores con las ruedas omnidireccionales, es necesario el uso del acople, el cual posee una chaveta para acoplarse al eje del reductor y un tornillo de sujeción desde la parte superior, como se muestra en la figura 117.

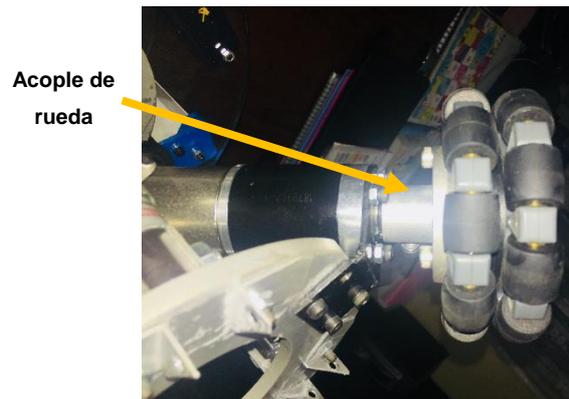


Figura 117. Sub ensamble motor, reductor, acople y rueda

4.4.9 Construcción de acople perfil para bases redondas

Para la construcción de las piezas de acople para el perfil con las bases redondas, se utilizó el proceso de impresión 3D el cual requiere del diseño de las piezas en CAD, obteniendo como resultado como se indica en la figura 118.

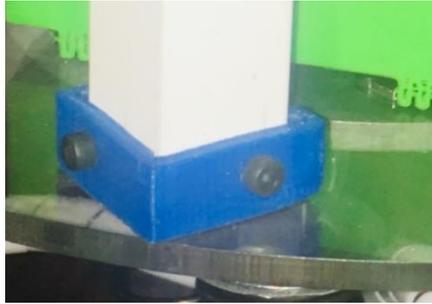


Figura 118. Acople perfil

4.4.10 Sub ensamble acoples con el perfil

Los acoples de perfil se sujetan al perfil mediante pernos de sujeción cabeza avellanada M4x10mm, como se muestra en la figura 119.



Figura 119. Sub ensamble acople con el perfil

4.4.11 Construcción de las bases redondas de la parte superior

Para la construcción de las bases redondas de la parte superior, se utilizó el proceso de corte láser en acrílico según el diseño CAD de las mismas, como se muestra en figura 120.



Figura 120. Bases redondas de acrílico

4.4.12 Sub ensamble del perfil con las bases redondas

Para acoplar los ensambles de perfil con las bases redondas, se procede a utilizar tornillos de sujeción cabeza avellanada M4x10mm en los lugares indicados.

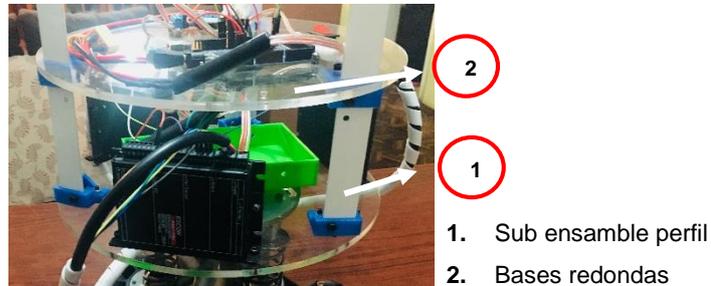


Figura 121. Sub ensamble perfil con base redonda

4.4.13 Ensamble final

Para ensamblar parte inferior y superior, se monta las bases redondas sobre el chasis y se coloca los tornillos de sujeción cabeza avellanada M5x20mm en la parte central.

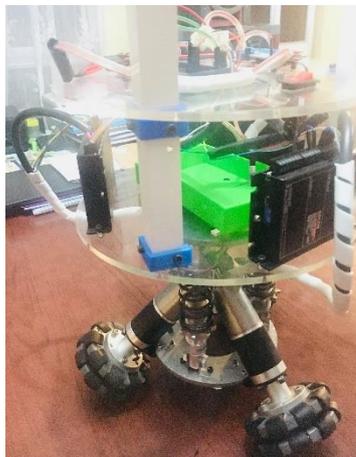


Figura 122. Ensamble final del prototipo

CAPÍTULO V

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Pruebas a realizar

Para comprobar el funcionamiento del prototipo robot rueda esférica se va a realizar las siguientes pruebas:

5.1.1 Pruebas de estabilidad

En las pruebas de estabilidad, se va tomar en cuenta el tiempo de estabilización para grados de inclinación desde 4° a 20° y en diferentes suelos.

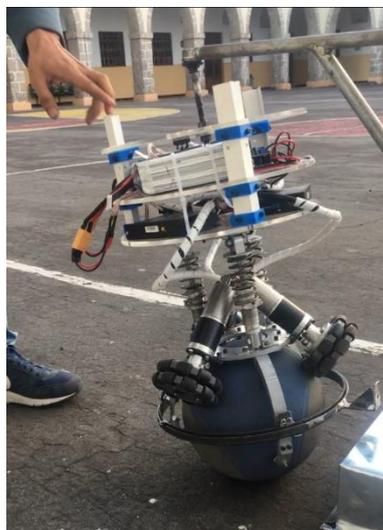


Figura 123. Prueba estabilidad en asfalto

Tabla 22

Prueba estabilidad en piso de asfalto

Suelo	Piso de asfalto								
°inclinación	Tiempo(seg)								Tiempo Promedio(seg)
4°	1.04	1.27	1.09	1.15	1.39	1.18	1.30	0.85	1.15
6°	1.28	1.12	1.15	1.52	1.49	1.43	1.48	1.30	1.34
10°	1.22	1.52	1.19	1.11	1.16	1.48	1.17	1.21	1.25
15°	1.02	1.21	1.24	1.09	1.17	1.33	1.32	1.09	1.18
20°	1.74	1.82	1.59	1.51	1.13	1.46	1.12	1.24	1.45
	Tiempo promedio total(seg)								1.27

En la tabla 22, se muestra el tiempo que tarda el robot rueda esférica en estabilizarse sobre una superficie de contacto horizontal de asfalto.



Figura 124. Prueba estabilidad en mármol

Tabla 23

Prueba estabilidad en piso de mármol

Suelo °inclinación	Piso de mármol									
	Tiempo(seg)									Tiempo Promedio(seg)
4°	1.35	1.50	1.55	1.45	1.22	1.47	1.48	1.31	1.41	
6°	1.38	1.21	0.95	0.92	0.61	0.96	0.67	0.93	0.95	
10°	0.91	0.99	0.83	0.84	0.80	0.98	0.96	0.84	0.89	
15°	1.16	1.12	1.07	1.18	1.26	0.90	1.08	0.95	1.09	
20°	1.34	1.37	1.58	1.13	1.19	1.42	1.39	1.32	1.34	
	Tiempo promedio total(seg)									1.13

En la tabla 23, observamos los datos obtenidos del tiempo de reacción para alcanzar la estabilidad del robot rueda esférica en un piso horizontal de mármol.



Figura 125 Prueba estabilidad en adoquín

Tabla 24

Prueba estabilidad en piso de adoquín

Suelo °inclinación	Piso adoquinado									
	Tiempo(seg)									Tiempo Promedio(seg)
4°	No se estabilizó el robot									
6°	4.92	1.68	1.52	1.40	1.44	4.85	3.05	2.26		2,46
10°	1.65	1.68	1.45	1.29	1.59	2.50	2.27	2.15		1,82
15°	1.75	2.18	1.75	2.03	2.29	1.93	2.65	1.80		2,04
20°	2.21	2.09	2.06	1.89	2.08	2.15	2.09	2.88		2,18
	Tiempo promedio total(seg)									2.12

En la tabla 24, se muestra el tiempo que tarda el robot rueda esférica en estabilizarse sobre una superficie de contacto horizontal de adoquín.

5.1.2 Pruebas de rotación en el mismo eje

En las pruebas de rotación, se toma en cuenta el tiempo de ejecución del giro para 360°, 180° y 90° en sentido horario y anti horario.

Tabla 25

Prueba de rotación mismo eje sentido horario

Sentido horario												
Grados		Tiempo(seg)									T_promedio(seg)	% mejora
		360°	Robot rueda esférica	2.34	2.71	2.58	2.31	2.28	2.29	2.61		
	Plataforma omnidireccional	18.01	17.97	18.3	17.98	18	18.21	18.02	18	18.06	743.2%	
180°	Robot rueda esférica	1.99	1.62	1.78	1.75	1.83	1.67	1.90	1.88	1.8	479.25%	

CONTINÚA



	Plataforma omnidireccional	9.02	8.96	9.01	9	9.03	9.16	9.02	9.01	9.02	
	Robot rueda esférica	1.55	1.44	1.31	1.29	1.32	1.28	1.25	1.27	1.33	
90°	Plataforma omnidireccional	4.5	4.52	4.49	4.52	4.51	4.48	4.47	4.49	4.49	337.59%
% Mejora Total											520.01%

En la tabla 25, se muestra los datos del tiempo en ejecutar rotaciones a 360°, 180° y 90°, en sentido horario en el mismo eje sobre una superficie de mármol.

Tabla 26

Prueba de rotación sentido anti horario

Sentido anti horario												
Grados		Tiempo(seg)									T_promedio(seg)	% Mejora
			Robot rueda esférica	2.38	2.45	2.65	2.41	2.38	2.48	2.45		
360°	Plataforma omnidireccional	18.02	17.95	18.31	17.96	18.01	18.05	18.02	18	18.04	733.33%	
180°	Robot rueda esférica	1.80	1.86	1.64	1.69	1.73	1.71	1.76	1.92	1.55	581.29%	

CONTINÚA



	Plataforma omnidireccional	9.01	8.93	9.02	9.04	9.01	9.11	9.02	9.01	9.01	
	Robot rueda esférica	1.56	1.16	1.24	1.31	1.22	1.36	1.39	1.37	1.32	
90°	Plataforma omnidireccional	4.48	4.51	4.47	4.52	4.51	4.48	4.49	4.53	4.49	340.15%
											% Mejora Total 551.59%

En la tabla 26, se muestra los datos del tiempo en ejecutar rotaciones a 360°, 180° y 90°, en sentido anti horario sobre una superficie de mármol.

5.1.3 Pruebas de desplazamiento

En las pruebas de desplazamiento, se toma en cuenta el tiempo que tarda en llegar a desplazamientos de 2m, 4m y 5m.



Figura 126 Prueba de desplazamiento lineal

Tabla 27

Prueba de desplazamiento lineal

Lineal

CONTINÚA



Desplazamiento		Tiempo(seg)								Tiempo promedio(seg)	Velocidad (m/s)	%porcentaje mejora
5 m	Robot rueda	16.35	15.19	15.47	16.47	15.61	15.29	16.21	17.07	15.95	0.31	
	Plataforma omnidirecc	16.01	15.92	15.5	15.7	16	16	15.9	15.91	15.86	0.33	-0.56%
4 m	Robot rueda	11.80	11.82	12.24	13.20	12.86	12.70	11.97	13.10	12.46	0.32	
	Plataforma omnidirecc	11.5	11.8	12.3	12.6	12.54	12.56	12.01	12.1	12.17	0.33	-2.32%
2 m	Robot rueda	6.70	5.74	5.57	5.30	5.32	6.46	6.60	6.20	5.98	0.33	
	Plataforma omnidirecc	6.6	5.7	6.3	6	6.2	5.91	5.95	5.8	6.05	0.33	1.17%
											% mejora total	-0.57%

La tabla 27, presenta los datos del tiempo en realizar desplazamientos a diferentes distancias sobre una superficie de mármol.

5.1.4 Prueba de sorteo de obstáculos



Figura 127. Sorteo de 3 obstáculos

Tabla 28

Prueba de sorteo con 3 obstáculos

	Tiempo(seg)					Tiempo promedio(seg)	Desviación	%Mejora
Robot rueda esférica	27.53	26.59	23.49	24.68	25.02	25.46	1.6	178.98%
Plataforma omnidireccional	45	46.04	45.03	45.7	46.09	45.57	0.5302	

La tabla 28, muestra el tiempo de ejecución del sorteo de 3 obstáculos a 65cm de distancia entre cada uno.



Figura 128. Sorteo periférico de obstáculo

Tabla 29

Prueba de sorteo obstáculo periféricamente

	Tiempo(seg)					Tiempo promedio(seg)	Desviación	%Mejora
Robot rueda esférica	23.96	22.93	24.03	23.54	23.67	23.62	0.4383	153.09%
Plataforma omnidireccional	36.5	37	35.6	35.4	36.31	36.16	0.6586	

La tabla 29, muestra el tiempo de ejecución de cada robot para el sorteo de obstáculo cuadrado periféricamente.

5.2 Análisis de resultados

Para los análisis de resultados se obtendrán márgenes de error en cuanto a velocidad y tiempo; y se compararán con los resultados obtenidos en la plataforma robótica con sistema de tracción omnidireccional.

Estabilidad

Según los datos de las tablas 18,19 y 20, al comparar el tiempo promedio de estabilidad entre un rango de 0° a 20° de inclinación se obtiene que la superficie de mármol es la más adecuada con un tiempo promedio de 1.13 seg.

Desplazamiento

Según los datos de tabla 27, se obtuvo una velocidad lineal promedio de 0.32m/s respecto a la velocidad de desplazamiento lineal de diseño de 0.35m/s. Con respecto al tiempo de en llegar a una distancia lineal establecida no se obtuvo una mejora significativa, siendo la plataforma omnidireccional un 0.57% de tiempo más rápido.

Tiempo ejecución de rotaciones

Según las muestras tomadas de las tablas 25 y 26, de pruebas de rotación en sentido horario y anti horario, se obtuvo una mejora respecto a plataformas omnidireccionales del 520.01% y 551.29% respectivamente, dando así, un porcentaje total de mejora en tiempo de rotación del 535.65%.

Sorteo de obstáculos

Al analizar los datos de las tablas 28 y 29 de pruebas de sorteo de 3 obstáculos y sorteo periférico. Se obtuvo una mejora respecto a plataformas omnidireccionales del 178.98% y 153.09%, dando así, un porcentaje total de mejora en tiempo del 166.03%.

5.3 Costo del proyecto

A continuación, se detalla el precio de los materiales y costos del proyecto:

Tabla 30

Análisis económico del proyecto

CANT	COMPONENTE	PRECIO UNITARIO(\$)	PRECIO TOTAL(\$)
3	Eci 40mm	244	732
3	Reductor GP 42C 12:1	257,8	773,4
3	EPOS2 50/5	300	900
3	Amoritugador 150mm	6	18
3	Base Motores	15	45
3	Acoples de motor con eje	20	60
1	Acrílico 6mm 2m ²	80	80
3	Ruedas	60	180
3	Garras	20	60
2	Baterías LIPO 5C 18.5V	100	200
16	Impresión 3D acoples	4	48
1	Esfera 3kg	50	50
1	Arduino Mega	30	30

CONTINÚA



1	Módulo Bluetooth Hc06	20	20
1	Sensor IMU6050	30	30
1	Placa de alimentación	15	15
1	Ángulo aluminio 1"	15	15
100	Pernos M4x10mm	0.05	5
1	Arco de desplazamiento	40	40
1	Brazo de apoyo	30	30
30	Min corte a chorro de agua	2	60
20	Min corte láser	1	20
300	Impresiones B/N y color	0.05	15
1	Gastos envío materiales exterior	300	300
TOTAL			3726,4\$

La tabla 30, detalla el valor gastado para el desarrollo del proyecto en lo que se refiere a diseño, construcción e implementación del robot rueda esférica.

5.4 Validación de Hipótesis

5.4.1 Planteamiento de la hipótesis

La implementación del prototipo robot rueda esférica tipo omnidireccional permitirá una mejora de la movilidad en espacios reducidos.

5.4.2 Validación de hipótesis

Para la validación de la hipótesis se utiliza el método de la t- student para muestra independientes con un rango de 0.05 de aceptación para proyectos de investigación, siendo el valor de $t_{crítico} = 1.8595$ para 8 grados de libertad y se utiliza los datos de las tablas 28 y 29 de sorteo de obstáculos y sorteo de obstáculos periféricamente.

Planteo de hipótesis

Hipótesis nula H_0 = no mejora tiempos de ejecución de movimientos

Hipótesis alternativa H_i = mejora tiempos de ejecución de movimientos

$$H_i < H_0$$

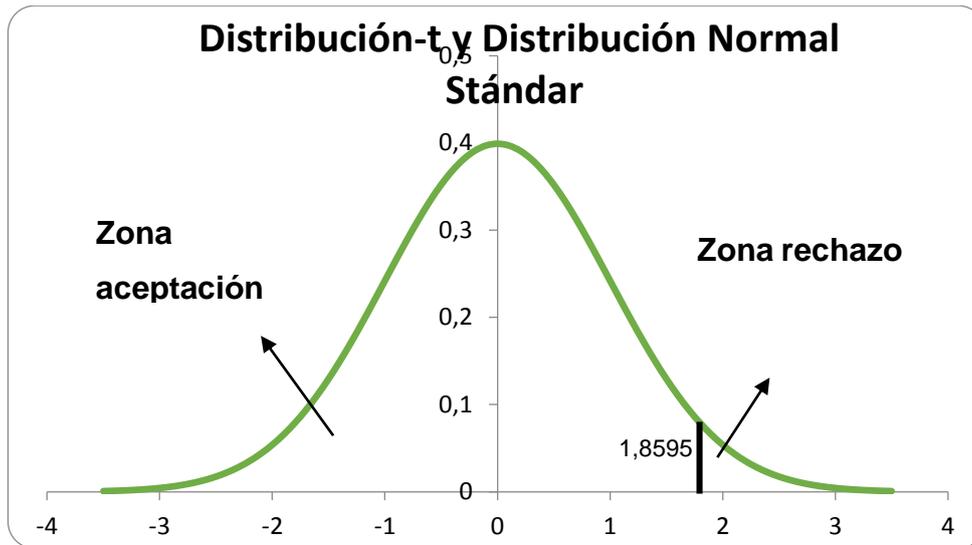


Figura 129. Gráfica de normal en t=1.8595

Para el cálculo de la t y se utiliza la siguiente fórmula:

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_{X_1X_2} \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}}$$

Donde:

\bar{X}_1 = promedio de la primera muestra

\bar{X}_2 = promedio de la segunda muestra

n_1 = tamaño de la primera muestra

n_2 = tamaño de la segunda muestra

$$S_{X_1X_2} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)S_{X_1}^2 + (n_2 - 1)S_{X_2}^2}{n_1 + n_2 - 2}}$$

Donde:

S_{X_1} = desviación estándar muestra 1

S_{X_2} = desviación estándar muestra 2

Cálculo de la t1 para datos de la tabla 28

\bar{X}_1 = 25.46 seg

\bar{X}_2 = 45.57 seg

$$n_1 = 5$$

$$n_2 = 5$$

$$S_{X_1} = 1.6 \text{ seg}$$

$$S_{X_2} = 0.5302 \text{ seg}$$

$$t_1 = \frac{25.46 \text{ seg} - 45.57 \text{ seg}}{1.032 \text{ seg} * 0.6324} = -30.81$$

$$t_1 < t_{\text{crítico}}$$

Al comparar t_1 en figura 129, el valor se encuentra en la zona de aceptación.

Cálculo de la t_2 para datos de la tabla 29

$$\bar{X}_1 = 23.62 \text{ seg}$$

$$\bar{X}_2 = 36.16 \text{ seg}$$

$$n_1 = 5$$

$$n_2 = 5$$

$$S_{X_1} = 0.4383 \text{ seg}$$

$$S_{X_2} = 0.6586 \text{ seg}$$

$$t_2 = \frac{23.62 \text{ seg} - 36.16 \text{ seg}}{0.7405 \text{ seg} * 0.6324} = -26.77$$

$$t_2 < t_{\text{crítico}}$$

Al comparar t_2 en figura 129, el valor se encuentra en la zona de aceptación.

Entonces como tanto t_1 y t_2 son menores que el nivel de significancia $t_{\text{crítico}}$ se rechaza hipótesis nula y se acepta hipótesis alternativa.

CONCLUSIONES

- Las evaluaciones realizadas como maniobrabilidad en espacios reducidos, rotación alrededor de un obstáculo y desplazamientos, del prototipo robot rueda esférica con una plataforma omnidireccional, obteniendo una mejora en el tiempo de ejecución de rotaciones en un 535.65% y el tiempo para sorteo de obstáculos en un 166.03%, en comparación con plataformas omnidireccionales.
- Para desplazamientos lineales el robot rueda esférica fue superado por la plataforma omnidireccional, esto se debe a que la plataforma omnidireccional tiene un mejor agarre a la superficie al poseer cuatro puntos de contacto al suelo lo que lo vuelve estable, en cambio, el robot rueda esférica debe realizar un control constante de estabilidad por ser un sistema netamente inestable.
- Al evaluar el prototipo en diferentes suelos, se obtiene que la superficie de mármol es la más adecuada para realizar desplazamientos y rotaciones del prototipo, con un tiempo para llegar a la estabilidad de 1.13seg para inclinaciones desde 0° a 20°.
- El brazo de soporte permite compensar el retardo del tiempo de ejecución del algoritmo de control de 0,1seg, permitiendo la respuesta adecuada de las velocidades y sentidos de giro de los motores para corregir el error de inclinación y mantener al prototipo en estabilidad.
- La velocidad de 1000rpm en los motores facilita acciones de control para estabilidad del prototipo y la atenuación del cambio de sentido de giro, permitiendo el censado óptimo de inclinación en los ejes por parte del sensor MPU6050.

RECOMENDACIONES

- Para futuros proyectos se recomienda aumentar la velocidad de desplazamiento que le permita al robot rueda esférica superar de manera contundente en todos los aspectos a las plataformas omnidireccionales, también se le puede incorporar un control de trayectorias definidas por parte del operador.
- Se recomienda realizar investigaciones enfocados a técnicas de control estratégico para mejorar el algoritmo de control y así permitir una mejora en la estabilidad del robot rueda esférica.
- Aplicar nuevos filtros para lectura de las señales del sensor IMU para evitar valores no deseados ocasionados por el medio, ruido o eventualidades.
- Mantener el centro de gravedad lo más cercano a los actuadores del prototipo.
- Realizar simulaciones que impliquen la integración de la parte mecánica y de control con parámetros muy apegados al entorno real para identificar falencias antes de la implementación del prototipo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bambino, I. (2008). *Una introducción a los robots móviles*. Lima: Adventure.
- Blonk, K. v. (2014). *Modeling and control of a ball-balancing robot*. Twente: University of Twente.
- Bonci, A., Pirani, M., & Longhi, S. (2016). *Embedded solutions for a class of highly unstable, underactuated and self-balancing robotic systems*. Ancona: Springer Open. Recuperado el 15 de 12 de 2017
- Bravo, F. (23 de Noviembre de 2011). *Robótica, al descubierto*. Recuperado el 15 de 11 de 2017, de Robótica, al descubierto: <http://solorobotica.blogspot.com/2011/11/primer-v2.html>
- Brode, N. (1 de Junio de 2016). *WESA*. Recuperado el 11 de 11 de 2017, de WESA: <http://wesa.fm/post/pa-senate-bill-task-force-would-regulate-self-driving-cars#stream/0>
- Cazorla, C. (14 de Abril de 2011). *Xataka ciencia*. Recuperado el 4 de 10 de 2017, de Xataka ciencia: <https://www.xatakaciencia.com/robotica/robots-moviles-i>
- Civantos, D. (11 de Marzo de 2011). *La informacion.com*. Recuperado el 15 de 10 de 2017, de La informacion.com: <http://blogs.lainformacion.com/futuretech/2011/03/11/5-cosas-a-las-que-podriamos-decir-adios-en-los-coches-en-el-futuro/>
- Dinh Ba, P., & et al. (2016). *Balancing and translation control of a ball segway that a human can ride*. Gyeongju: ICCAS. Recuperado el 20 de 10 de 2017
- Dr. Iacovino, K. (14 de Septiembre de 2012). *kaylaiacovino*. Recuperado el 10 de 09 de 2017, de kaylaiacovino: <http://www.kaylaiacovino.com/tag/roviol/>
- engineeringtoolbox. (04 de 03 de 2018). *engineeringtoolbox*. Recuperado el 05 de 03 de 2018, de engineeringtoolbox: https://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html
- Fankhauser, P., & Gwerder, C. (2010). *Modeling and control of a ballbot*. Zurich: ETH. Recuperado el 05 de 03 de 2018
- FireCloud Cycles. (2016). *Suspension Units*. Obtenido de <https://www.firecloudcycles.co.uk/coil-shock-rear-suspension-unit-750lbsin-ke-zhen-150mm-black-bicycle-new-5401-p.asp>
- Fong, J., & Uppill, S. (2009). *Design and build a ballbot*. Adelaide: MECH ENG 4135.
- Garcia Martinez, J. (06 de Marzo de 2016). *UNOCERO*. Obtenido de UNOCERO: www.unocero.com/2016/03/06/goodyear-y-sus-nuevas-llantas-esfericas/
- González Jiménez, J., & Ollero Baturone, A. (2016). *Estimación de la Posición de un Robot Móvil*. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/267222718>
- Guizzo, E. (2010). *IEEE Spectrum*. Obtenido de <https://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/robotics-software/042910-a-robot-that-balances-on-a-ball>
- Han, H. Y., Han, T. Y., & Jo, H. S. (2014). *Development of Omnidirectional Self-Balancing Robot*. Malaysia: IEEE International Symposium on Robotics and Manufacturing Automation.
- Hernández, M., & et al. (2015). *Robótica: Análisis, modelado, control e implementación*. En M. Hernández, & et al, *Robótica: Análisis,*

- modelado, control e implementación.* (págs. 31-32). Ciudad Victoria, Tamaulipas: Open Access. Recuperado el 05 de 03 de 2018
- Iglesias, A. (5 de Agosto de 2015). *To Drone*. Recuperado el 05 de 03 de 2018, de To Drone: <http://www.todrone.com/erle-robotics-lanza-dron-terrestre/>
- InvenSense. (8 de Agosto de 2013). *MPU6050 Datasheet*. Recuperado el 28 de Enero de 2018, de MPU-6000 and MPU-6050 Product Specification: https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf
- Iza, E., & Taco, L. (2016). *INVESTIGACIÓN DE LA 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” APROBADO POR EL CONSORCIO*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas Espe.
- Lauwers, T. B., Kantor, G. A., & Hollis, R. L. (2006). *A Dynamically Stable Single-Wheeled Mobile Robot with Inverse Mouse-Ball Drive*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University.
- Liszewski, A. (14 de Agosto de 2015). *GIZMODO*. Obtenido de GIZMODO: <https://gizmodo.com/lego-finally-officially-reveals-its-new-wall-e-set-1724185730>
- Martínez Carranza, J. (2017). *Introducción a la robótica mecanismos básicos: locomoción*. Valencia: INAOE. Recuperado el 05 de 03 de 2018
- Martínez, S., & Sisto, R. (2009). *Control y comportamiento de robots omnidireccionales*. Montevideo: Universidad de la República. Recuperado el 05 de 03 de 2018
- Maxon Motor. (12 de Noviembre de 2015). *ESCON Module 50/5 Servo Controller P/N 438725 Hardware Reference*. Recuperado el 28 de Enero de 2018, de https://www.maxonmotor.com/medias/sys_master/root/8818448859166/438725-ESCON-Module-50-5-Hardware-Reference-En.pdf
- maxonmotor. (06 de 02 de 2018). *maxonmotor*. Recuperado el 05 de 03 de 2018, de maxonmotor: <https://www.maxonmotor.com/maxon/view/product/motor/ecmotor/EC-i/496660>
- motortico. (08 de 03 de 2018). *motortico*. Recuperado el 10 de 03 de 2018, de motortico: <http://www.motortico.com/biblioteca/MotorTico/2015%20ENE%20-%20Factor%20de%20Servicio%20en%20Motores%20Electricos.pdf>
- Ollero, A. (2001). *ROBÓTICA Manipuladores y robots móviles*. Barcelona: MARCOMBO. Recuperado el 05 de 03 de 2018
- Pérez Camejo, D. S. (2017). *Construcción de un robot móvil esférico controlado inalámbricamente para la ejecución de proyectos de investigación formativa y generativa de la facultad de ingeniería en sistemas electrónica e industrial*. Ambato: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO. Recuperado el 05 de 03 de 2018
- Pérez, D. (2017). *Construcción de un robot móvil esférico controlado inalámbricamente para la ejecución de proyectos de investigación formativa y generativa de la facultad de ingeniería en sistemas*

- electrónica e industrial*. Ambato: UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO. Recuperado el 05 de 03 de 2018
- Podnar, G. (1 de Febrero de 1985). *CS.CMU*. Recuperado el 05 de 03 de 2018, de CS.CMU: <https://www.cs.cmu.edu/~gwp/robots/Uranus.html>
- Raspberry Pi. (21 de Enero de 2018). *The MagPi Magazine*. Recuperado el 21 de Enero de 2018, de Raspberry Pi 3 is out now! Specs, benchmarks & more: <https://www.raspberrypi.org/magpi/raspberry-pi-3-specs-benchmarks/>
- Ríos G., L., & Bueno L., M. (2008). Modelo Matemático para un Robot Móvil. *Scientia et Technica*, pp.13-18. Recuperado el 10 de 03 de 2018
- Seyfarth, G. (2016). *Design, Construction, and Evaluation of a Ballbot with a Spherical Induction Motor*. Pittsburgh: Carnegie Mellon University. Recuperado el 05 de 03 de 2018
- Silva Ortigoza, R., & et al. (2007). *Una panorámica de los robots móviles*. Zulia: Universidad privada Dr. Rafael Bellosó Chacín. Recuperado el 11 de 03 de 2018
- Song, J. B., & Byun, K. S. (2006). *Desing and control of an omnidirectional mobile robot with steerable omnidirectional wheels*. Alemania: InTech. Recuperado el 05 de 03 de 2018

ANEXOS



DEPARTAMENTO DE ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

CERTIFICACIÓN

Se certifica que el presente trabajo fue desarrollado por los señores: **ADRIAN ALEJANDRO ALAY ROMERO** y **EDWIN FRANCISCO MORENO BALSECA**

En la ciudad de Latacunga, a los **13 días del mes de marzo del 2018.**

Ing. Oscar Arteaga

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Vicente Hallo

DIRECTOR DE LA CARRERA

Aprobado por:



Dr. Rodrigo Vaca

SECRETARIO ACADÉMICO