

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL
ESFÉRICO PARA MONITOREO DE CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE**

Autor:

FRANCISCO ARTURO ALVARADO ÁLVAREZ

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BUCARAMANGA

2020

**PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO
MECATRÓNICO**

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL
ESFÉRICO PARA MONITOREO DE CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE**

Autor:

FRANCISCO ARTURO ALVARADO ÁLVAREZ

Director:

SEBASTIAN ROA PRADA, PhD

Codirector:

HERNANDO GONZÁLEZ ACEVEDO, MSc

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BUCARAMANGA

FACULTAD DE INGENIERÍAS

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BUCARAMANGA

2020

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL ESFÉRICO PARA MONITOREO DE CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE

Nota de aceptación:

Proyecto de grado realizado por **FRANCISCO ARTURO ALVARADO ALVAREZ** bajo la dirección de SEBASTIAN ROA PRADA, aprobada por los jurados OSCAR EDUARDO RUEDA SANCHEZ y CAMILO ENRIQUE MONCADA GUAYAZAN, aceptada como requisito parcial para obtener el título de **Ingeniero Mecatrónico**.

X 

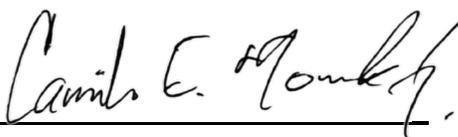
Sebastian Roa Prada
Director

X 

Oscar Eduardo Rueda Sanchez
Jurado

X 

Francisco Arturo Alvarado Alvarez
Estudiante de Ingeniería Mecatrónica

X 

Camilo Enrique Moncada Guayazan
Jurado

Bucaramanga. 10 de nov. de 2020.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1. OBJETIVOS.....	3
1.1. Objetivo general.....	3
1.2. Objetivos específicos.....	3
2. JUSTIFICACIÓN.....	4
3. ANTECEDENTES.....	5
4. ESTADO DEL ARTE.	6
4.1. Robots móviles en la agricultura.....	6
4.2. Robots esféricos.....	7
4.2.1. Proyectos de grado sobre robots esféricos.....	10
5. MARCO TEÓRICO.....	11
5.1. Robótica Móvil.....	11
5.1.1. Clasificación de los robots móviles según su entorno de trabajo.....	11
5.1.1.1. Clasificación de los robots móviles terrestres.....	11
5.1.1.2. Clasificación de los robots móviles acuáticos.....	13
5.1.1.3. Clasificación de los robots móviles aéreos.....	13
5.1.2. Holonomicidad de los robots móviles.....	14
5.2. Robots esféricos.....	14
5.3. Principios de locomoción de un robot esférico.....	15
5.3.1. Desplazamiento del centro de masa.....	15
5.3.1.1. Mecanismo de unidad de conducción interna (IDU).....	16
5.3.1.2. Mecanismo de conducción por péndulo de eje fijo.....	18
5.3.1.3. Mecanismo de conducción por cambios múltiples de masa.....	19
5.3.2. Diseño con cuerpo deformable.....	19
5.3.2.1. Diseño con secciones deformables.....	19
5.3.2.2. Diseño con aleaciones con memoria de forma.....	20
5.3.2.3. Mecanismo basado en la conservación del momento angular.....	21
5.4. Limitaciones prácticas del Torque.....	22
5.5. Impresión 3D por Deposición Fundida.....	24
5.5.1. ¿Qué es la Impresión 3D?.....	24
5.5.2. Métodos comunes de impresión 3D.....	25

5.5.3.	Materiales compatibles con el modelado por deposición fundida.	25
5.5.3.1.	Ácido poliláctico (PLA).....	26
5.5.3.2.	Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).....	27
5.5.3.3.	Poliestirenos de Alto Impacto (HIPS).....	28
5.5.3.4.	PolyEthylen Terephthalato de Glicol (PETG).....	29
5.5.3.5.	Poliuretano termoplástico (TPU).....	30
5.5.4.	Slicing Software.....	31
5.5.5.	Secciones de la impresión 3D por FDM.	33
5.6.	Selección de parámetros óptimos para aumentar la resistencia de piezas impresas en 3D utilizando Ultimaker CURA.	33
5.6.1.	Cascarón (Shell) – Grosor de la pared.....	33
5.6.2.	Alternar pared extra.....	34
5.6.3.	Densidad del relleno.....	35
5.6.4.	Patrón de relleno.	36
5.6.5.	Reforzar zonas cruciales de una pieza.	37
5.7.	Metodología de diseño de sistemas mecatrónicos.	39
5.8.	Linealización aproximada de sistemas.	41
5.8.1.	Linealización por series de Taylor.	41
5.8.2.	Representación en espacio de estados.	42
6.	METODOLOGÍA.....	44
6.1.	Análisis funcional.....	46
6.1.1.	Análisis de la necesidad.....	46
6.1.2.	Análisis funcional de la necesidad.....	47
6.1.3.	Análisis funcional técnico.	48
6.1.4.	Selección de las soluciones técnicas.	51
7.	MODELADO MATEMÁTICO.	55
7.1.	Profundización teórica del sistema de locomoción seleccionado.	55
7.2.	Suposiciones importantes.....	56
7.3.	Diseño conceptual del prototipo.....	57
7.4.	Modelado cinemático del robot.	57
7.5.	Modelado dinámico del robot.....	60
7.6.	Modelo dinámico de un motor DC.	64

7.7.	Representación en espacio de estados del sistema unificado.....	65
8.	DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO.....	72
8.1.	Diseño de la esfera.....	72
8.1.1.	Diseño del cascarón de la esfera.....	72
8.2.	Diseño de la cabeza del robot.....	75
8.2.1.	Diseño del domo.....	75
8.2.2.	Diseño del “skirt pie”.....	76
8.2.3.	Diseño del “Dome Magnet Mount” o DMM.....	76
8.3.	Diseño de la unidad de conducción interna (IDU).....	77
8.3.1.	Diseño de la llanta cónica.....	79
8.3.2.	Diseño de la base del IDU.....	81
8.3.3.	Diseño de la base para el controlador y la sensórica.....	82
8.3.4.	Diseño del eje y torre principal.....	83
8.4.	Selección de materiales.....	84
8.4.1.	Selección de materiales para la esfera.....	85
8.4.2.	Selección de materiales para el domo.....	85
8.4.3.	Selección de materiales para el sistema IDU.....	87
8.5.	Simulación estática por elementos finitos de la esfera.....	92
8.5.1.	Esfuerzos de von Mises.....	92
8.5.2.	Desplazamientos.....	93
8.5.3.	Deformaciones unitarias.....	94
9.	DISEÑO ELECTRÓNICO DEL PROTOTIPO.....	96
9.1.	Selección de la instrumentación.....	96
9.1.1.	Selección de los actuadores.....	96
9.1.2.	Selección del sensor de ángulo.....	100
9.1.3.	Selección del controlador y el driver para los motores.....	100
9.1.4.	Selección de las baterías.....	101
9.1.5.	Selección del control RC.....	102
9.2.	Conexión de la etapa de potencia.....	103
9.3.	Conexión de la etapa de sensórica y recepción RC.....	104
10.	CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.....	105

10.1.	Construcción de las piezas de la esfera.	105
10.1.1.	Construcción del cascarón de la esfera.	105
10.2.	Construcción de las piezas del domo.	106
10.3.	Construcción de las piezas del robot interno IDU.....	107
10.4.	Post procesado de las piezas impresas.....	108
10.4.1.	Post procesado de la esfera.	108
10.4.2.	Proceso de fijación de imanes.	108
10.5.	Ensamble del domo y el robot interno IDU.	108
10.6.	Ensamble completo del robot.	110
11.	DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL.....	111
11.1.	Modo Manual.....	111
11.2.	Modo automático.	112
11.2.1.	Identificación de los parámetros del sistema.	113
11.2.1.1.	Prueba experimental a lazo abierto.	114
11.2.1.2.	Configuración del modelo de caja gris.....	115
11.2.1.3.	Resultados de la estimación de parámetros.....	116
11.2.2.	Demostración de la calidad del sistema linealizado.....	119
11.2.3.	Técnicas de control.....	121
11.2.3.1.	Control Proporcional.....	121
11.2.3.2.	Control Proporcional Derivativo.....	123
12.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	125
12.1.	Validación experimental en modo manual.	125
12.1.1.	Validación del modo manual en una superficie ideal.	126
12.1.2.	Validación del modo manual en una superficie con pasto	128
12.1.3.	Validación del modo manual en una superficie con tierra.....	130
12.1.4.	Evaluación del desempeño del robot en las tres superficies.....	132
12.2.	Validación experimental en modo automático.	133
12.2.1.	Validación del controlador P en una superficie ideal.....	133
12.2.2.	Validación del controlador PD en una superficie ideal.	136
12.2.3.	Validación del control P en una superficie irregular con pasto.....	139
12.2.4.	Validación del control PD en una superficie irregular con pasto. ...	142

12.2.5.	Validación del control P en una superficie irregular con tierra.	145
12.2.6.	Validación del control PD en una superficie irregular con tierra....	148
13.	CONCLUSIONES	152
14.	BIBLIOGRAFÍA	155
ANEXO A.....		160
ANEXO B.....		176
ANEXO C.....		185

Lista de Figuras

Figura 1. AgriRobot Summit XL.	6
Figura 2. VinBot.	6
Figura 3. AgBot y su equipo de ingenieros de la Universidad Estatal de Luisiana	7
Figura 4. Mecanismo interno del Sphero.	7
Figura 5. LG Rolling Bot.....	8
Figura 6. GuardBot/GroundBot.	8
Figura 7. Robots esféricos propulsados por viento, ideados por la NASA.	9
Figura 8. BB-8 en la alfombra roja del panel de “Star Wars: The Force Awakens”.	9
Figura 9. Clasificación de los robots móviles según su sistema de locomoción.....	12
Figura 10. AUV Mako.....	13
Figura 11. Clasificación de los robots móviles aéreos según su sistema de vuelo	13
Figura 12. Robots esféricos en diferentes entornos.....	14
Figura 13. Principio básico de locomoción de un robot esférico.	15
Figura 14. Sistemas de unidad de conducción interna (IDU).	16
Figura 15. Mecanismo de conducción por rueda universal.	17
Figura 16. Sistemas de conducción por péndulo de eje fijo.	18
Figura 17. Mecanismo de conducción por cambios múltiples de masa.....	19
Figura 18. Mecanismo con secciones deformables utilizando cámaras de aire	20
Figura 19. Robot esférico deformable sobre una pendiente.....	20
Figura 20. Diseño basado en la conservación del momento angular.	21
Figura 21. Ejemplo que ilustra la compensación de masa en el diseño.	22
Figura 22. Límites de movilidad para una esfera con un desplazamiento de CM	23
Figura 23. Gráfico de las Limitaciones de la movilidad vs el desplazamiento del CM	24
Figura 24. Figura impresa 3D con su respectivo diseño CAD.....	24
Figura 25. Métodos comunes de impresión 3D.....	25
Figura 26. Bobina de filamento en la parte trasera de una impresora Ultimaker	25
Figura 27. Perfil Rápido del PLA+.....	26
Figura 28. Perfil rápido del ABS.....	27
Figura 29. Perfil rápido del HIPS.....	28
Figura 30. Perfil rápido del PETG.	29
Figura 31. Perfil rápido del TPU.....	30
Figura 32. Diagrama de bloques del proceso de obtención del G-CODE.	31
Figura 33. Proceso de diseño de una pieza para imprimirla en 3D.	31
Figura 34. Slicing Software: Ultimaker Cura.	32
Figura 35. Slicing Software: Simplify3D.	32
Figura 36. Las cuatro secciones de la impresión 3D por FDM.....	33
Figura 37. Vista de capas de una pieza con diferente grosor de la pared.....	34
Figura 38. Proceso de alternar una pared extra en Ultimaker CURA.....	34
Figura 39. Tres piezas con diferente densidad del relleno..	35
Figura 40. Prueba de resistencia de piezas en PLA con diferente densidad.	35
Figura 41. Patrones de relleno disponibles en CURA.	36
Figura 42. Reforzar zonas cruciales de una pieza.	37
Figura 43. Pasos para reforzar zonas cruciales.....	38
Figura 44. Metodología de Diseño Mecatrónico creado por Kevin Craig.	40
Figura 45. Explicación grafica de la linealización por series de Taylor.....	42

Figura 46.	Diagrama de Flujo de la metodología planteada.....	45
Figura 47.	Diagrama del Toro del proyecto.....	46
Figura 48.	Diagrama del pulpo del proyecto.....	47
Figura 49.	Diagrama FAST de la función principal 1.....	49
Figura 50.	Diagrama FAST de la función principal 2.....	50
Figura 51.	Diagrama FAST de la función principal 3.....	51
Figura 52.	Diagrama FAST de la función principal 4.....	51
Figura 53.	Fundamento del diseño basado en el desplazamiento del CM.....	55
Figura 54.	Sistema de fuerzas básicas en un robot esférico.....	55
Figura 55.	BB-8 con diseño tipo hámster.....	56
Figura 56.	Diseño conceptual del prototipo tipo hámster.....	57
Figura 57.	Modelado y parámetros del sistema tipo hámster.....	57
Figura 58.	Distancia a los centroides “s” y “b”.....	58
Figura 59.	Distancia a los centroides “s” y “w”.....	59
Figura 60.	Esquema de funcionamiento de un motor DC controlado por inducción... 64	64
Figura 61.	Diagrama de bloques de un robot móvil esférico SISO.....	65
Figura 62.	Dimensiones base de BB-8.....	72
Figura 63.	Diseño del armazón de la esfera.....	72
Figura 64.	Diseño del sistema de ensamble labio - ranura.....	73
Figura 65.	Diseño del sistema de ensamble riel – pasador.....	73
Figura 66.	Diseño de la media esfera que tiene el sistema de riel.....	74
Figura 67.	Diseño de la media esfera que tiene el sistema de pasador.....	74
Figura 68.	Vista explosionada del diseño de la cabeza.....	75
Figura 69.	Diseño del domo.....	75
Figura 70.	Vista isométrica superior del domo.....	76
Figura 71.	Diseño del skirt ring.....	76
Figura 72.	Diseño del DMM V1.....	77
Figura 73.	Diseño del DMM V2.....	77
Figura 74.	Diseño de la unidad de conducción interna (IDU).....	77
Figura 75.	Vista explosionada de la unidad de conducción interna (IDU).....	78
Figura 76.	Diseño de la llanta cónica.....	79
Figura 77.	Acople de la llanta al actuador.....	80
Figura 78.	Distancia óptima en donde estará ubicada la rueda.....	80
Figura 79.	Diseño de la base del IDU.....	81
Figura 80.	Partes del piso base del IDU.....	81
Figura 81.	Diseño de la base para el controlador y la sensórica.....	82
Figura 82.	Partes del segundo piso y la estructura de soporte principal.....	82
Figura 83.	Diseño del eje y torre principal.....	83
Figura 84.	Partes del eje y la torre principal.....	83
Figura 85.	Simulación estática por elementos finitos de la esfera.....	92
Figura 86.	Esfuerzos externos de von Mises.....	92
Figura 87.	Esfuerzos internos de von Mises.....	93
Figura 88.	Desplazamientos externos.....	93
Figura 89.	Desplazamientos internos.....	94
Figura 90.	Deformaciones unitarias externas.....	94
Figura 91.	Deformaciones unitarias internas.....	95

Figura 92.	Diagrama de bloques del sistema para la selección de motores.	96
Figura 93.	Respuesta transitoria de la inclinación Theta B ante un impulso inicial	97
Figura 94.	Acción de control proporcional ante un impulso inicial de 0.5 rad.	97
Figura 95.	Ensamble en Simulink del modelo matemático NO Lineal.	98
Figura 96.	Respuesta transitoria del torque ante una entrada impulso de 0.5 rad.	99
Figura 97.	Motorreductor 16 kg*cm.....	99
Figura 98.	Acelerómetro y Giroscopio MPU6050	100
Figura 99.	Arduino MEGA 2560	100
Figura 100.	Driver para motores DC Pololu Dual VNH5019.....	101
Figura 101.	Batería LiPo 4000mAh 7.4V HardCase.....	102
Figura 102.	Radiocontrol RC Turnigy 5X – 5 Canales	102
Figura 103.	Pines del driver VHN5019.....	103
Figura 104.	Diagrama de conexiones de la etapa de potencia.	103
Figura 105.	Diagrama de conexión de la etapa de sensórica y recepción RC.	104
Figura 106.	Orientación del cascarón de la esfera.....	105
Figura 107.	Diferencias en la utilización del material.	105
Figura 108.	Construcción de las piezas del domo.....	106
Figura 109.	Construcción de las piezas del IDU.	107
Figura 110.	Post procesado de la esfera.	108
Figura 111.	Proceso de fijación de imanes.	108
Figura 112.	Ensamble del domo.	109
Figura 113.	Ensamble de las ruedas.	109
Figura 114.	Ensamble del sistema tipo IDU.	109
Figura 115.	Ensamble completo del robot.....	110
Figura 116.	Diagrama de división de la etapa de control.	111
Figura 117.	Comandos del modo manual por medio del radiocontrol.	111
Figura 118.	Sistema de movimiento diferencial.	112
Figura 119.	Diagrama de bloques del sistema de control del modo automático.	113
Figura 120.	Modelo de caja gris.....	113
Figura 121.	Señal de entrada tipo impulso: voltaje vs tiempo.	114
Figura 122.	Respuesta transitoria del modelo experimental: ángulo vs tiempo.....	114
Figura 123.	Comparación de los resultados obtenidos vs data experimental.	116
Figura 124.	Diagrama de Polos y Ceros del sistema continuo.....	118
Figura 125.	Diagrama de Polos y Ceros del sistema discreto.....	119
Figura 126.	Diagrama de bloques del sistema lineal continuo en Simulink®.	119
Figura 127.	Diagrama de bloques del sistema no lineal continuo en Simulink®.	120
Figura 128.	Demostración de la calidad del sistema linealizado.	120
Figura 129.	Demostración de la calidad del sistema linealizado (Zoom).....	121
Figura 130.	Diagrama de bloques del sistema de control proporcional continuo.	121
Figura 131.	Respuesta transitoria con control P ante un impulso de -0.33 rad.	122
Figura 132.	Acción de control proporcional ante un impulso de -0.33 rad.....	122
Figura 135.	Diagrama de bloques del sistema de control proporcional discreto.	123
Figura 137.	Respuesta transitoria con control PD ante un impulso de -0.33 rad.....	124
Figura 138.	Acción de control PD ante un impulso de -0.33 rad.	124
Figura 139.	Superficies para la validación del prototipo.	125
Figura 140.	Validación experimental en modo manual.	125

Figura 141.	Secuencia de movimiento en una superficie ideal.	126
Figura 142.	Prueba experimental en modo manual en una superficie ideal.	127
Figura 143.	Secuencia de movimiento en una superficie irregular con pasto.	128
Figura 144.	Niveles de pasto encontrados en el terreno irregular pastoso probado.	129
Figura 145.	Prueba experimental en modo manual en una superficie con pasto.	129
Figura 146.	Secuencia de movimiento en una superficie con tierra húmeda.	130
Figura 147.	Prueba experimental en modo manual en una superficie con tierra.	131
Figura 148.	Control P: Respuesta teórica vs experimental en una superficie ideal.	133
Figura 149.	Control P: Acción de control teórica vs experimental.	134
Figura 150.	Control P: Respuesta transitoria experimental ante múltiples impulsos.	135
Figura 151.	Control P: Acción de control experimental ante múltiples impulsos.	135
Figura 152.	Control PD: Respuesta teórica vs experimental en una superficie ideal.	136
Figura 153.	Control PD: Acción de control teórica vs experimental.	137
Figura 154.	Control PD: Respuesta experimental ante múltiples impulsos.	138
Figura 155.	Control PD: Acción de control experimental ante múltiples impulsos.	138
Figura 156.	Control P: Respuesta experimental en una superficie con pasto.	139
Figura 157.	Control P: Acción de control experimental en una superficie con pasto.	140
Figura 158.	Control P: Respuesta transitoria experimental ante múltiples impulsos.	141
Figura 159.	Control P: Acción de control experimental ante múltiples impulsos.	141
Figura 160.	Control PD: Respuesta experimental en una superficie con pasto.	142
Figura 161.	Control PD: Acción de control en una superficie con pasto.	143
Figura 162.	Control PD: Respuesta transitoria ante múltiples impulsos.	144
Figura 163.	Control PD: Acción de control experimental ante múltiples impulsos.	144
Figura 164.	Control P: Respuesta experimental en una superficie con tierra.	145
Figura 165.	Control P: Acción de control experimental en una superficie con tierra.	146
Figura 166.	Control P: Respuesta experimental ante múltiples impulsos.	147
Figura 167.	Control P: Acción de control experimental en una superficie con tierra.	147
Figura 168.	Control PD: Respuesta experimental en una superficie con tierra.	148
Figura 169.	Control PD: Acción de control en una superficie con tierra.	149
Figura 167.	Control PD: Respuesta transitoria en una superficie con tierra.	150
Figura 171.	Control PD: Acción de control en una superficie irregular con tierra.	150

Lista de Tablas

Tabla 1.	Matriz QFD, sistemas de locomoción basados en el desplazamiento del CM.	52
Tabla 2.	Matriz QFD, sistemas de locomoción basados en la transformación de la esfera.	52
Tabla 3.	Matriz QFD, monitoreo remoto.	53
Tabla 4.	Matriz QFD, control remoto.	53
Tabla 5.	Matriz QFD, Cascarón esférico.	54
Tabla 6.	Selección de materiales para el cascarón esférico.	85
Tabla 7.	Selección de materiales para el domo.	85
Tabla 8.	Selección de materiales para el skirt pie.	86
Tabla 9.	Selección de materiales para el DMM V2.	86
Tabla 10.	Selección de materiales para la base de los motores.	87
Tabla 11.	Selección de materiales para la base T y la base de control.	87
Tabla 12.	Selección de materiales para el DMM V1.	88
Tabla 13.	Selección de materiales para el L Pizza.	88

Tabla 14. Selección de materiales para el Hold T.	89
Tabla 15. Selección de materiales para el Hold Lipo 1.	89
Tabla 16. Selección de materiales para el Hold Lipo 2.	90
Tabla 17. Selección de materiales para el Hold eje.	90
Tabla 18. Selección de materiales para el Hold BallCaster.	91
Tabla 19. Selección de materiales para el rin rueda.	91
Tabla 20. Parámetros de diseño asignados para la selección del motor DC.....	98
Tabla 21. Características básicas de los actuadores.	100
Tabla 22. Especificaciones técnicas de la batería.....	102
Tabla 23. Constantes del sistema.....	115
Tabla 24. Tabla de parámetros a estimar.....	115
Tabla 25. Parámetros estimados en el proceso de identificación.	117
Tabla 26. Tabla de evaluación de desempeño del robot en modo manual.....	132
Tabla 27. Tabla de evaluación de desempeño de los controladores en modo automático.	151
Tabla 28. Tabla de evaluación del margen de error de los controladores en modo automático. ..	151

1. INTRODUCCIÓN

La robótica ha llegado a ocupar un papel fundamental en el avance y desarrollo de diversos sectores de la sociedad actuales tales como el industrial, la exploración espacial, entre otros. Los robots se pueden clasificar en dos tipos: Los manipuladores robóticos y los robots móviles. Los manipuladores son brazos robóticos de base fija capaces de realizar tareas repetitivas de forma rápida y precisa, superando en estos campos a las habilidades humanas, por lo que entraron a jugar un papel importante en el sector de la manufactura. Sin embargo, este tipo de robot cuenta con una limitada movilidad, reducida a su espacio de trabajo y limitando las tareas que pueden hacer. [1]

Por su parte, la robótica móvil parte de la necesidad de extender el campo de aplicación de la robótica incrementando la autonomía al aplicar la capacidad de trasladarse a lo largo de su entorno, de esta forma aumentar el rango del espacio de trabajo y aumentando el número de tareas que el robot puede realizar [1]. Los campos de aplicación de los robots móviles están desde el sector industrial, como los AGV's (vehículos de guiado automático, por sus siglas en inglés) hasta la exploración espacial, como los ROVER's.

En la actualidad, el desarrollo de la robótica móvil se ha orientado en encontrar nuevas y diversas técnicas de locomoción, que suplan ciertos requerimientos o que presenten diversas ventajas en comparación con los sistemas tradicionales [3]. Los robots móviles terrestres pueden ser clasificados en tres grupos de acuerdo a su sistema de locomoción: patas, ruedas y orugas, pero, igualmente existen alternativas a estos sistemas de locomoción tradicionales, como el robot móvil tipo esfera, los cuales, como su nombre lo indica, son robots de forma esférica externa y cuyo movimiento se genera al hacer rotar dicho cuerpo esférico. Estos robots cuentan con ciertas ventajas que han impulsado su desarrollo, tales como su alta maniobrabilidad, mayor resistencia a impactos y mejor rendimiento en superficies como la nieve, área o agua [4]. Estas ventajas indican que un robot esférico sería apropiado en aplicaciones como la exploración de diversos entornos hostiles, la vigilancia y el monitoreo ambiental, especialmente útil en terrenos de plantaciones y zonas rurales donde incluso el agua, como viaductos de riego, no representaría dificultad alguna.

Inspirados en lo anterior, este proyecto propone el estudio, diseño y construcción de un robot esférico orientando su uso al monitoreo remoto de cultivos de palma de aceite, pues estas plantaciones están expuestas a varias enfermedades, incluyendo la "pudrición del cogollo", que afecta el punto de crecimiento de la planta hasta llevarla a la muerte. Por eso los expertos indican que cuando se hace la detección de la enfermedad a tiempo, una simple poda del área afectada junto a con un control químico puede ser suficiente para controlar la enfermedad. Por lo tanto, se plantea un diseño de robot esférico capaz de monitorear remotamente las plantaciones, de

forma que un operario este constantemente vigilando el cultivo en búsqueda de alguna irregularidad que pueda afectar la vida útil de la planta.

El proyecto se desarrollará en 4 etapas, la primera será la selección de una arquitectura de locomoción que se adapte a las condiciones de diseño planteadas y con base a ella proponer el diseño a utilizar en el robot. Luego se procede a obtener el modelo matemático que permita simular el comportamiento del robot y así diseñar un sistema de control que garantice la estabilidad y el movimiento guiado del robot. Por último, se procede a la construcción y validación del prototipo.

1. OBJETIVOS

1.1. Objetivo general

Desarrollar un prototipo de robot móvil esférico controlado a distancia que pueda desplazarse en cultivos de palma de aceite.

1.2. Objetivos específicos

- Seleccionar la configuración del sistema de locomoción del robot esférico.
- Diseñar la arquitectura física y el sistema de locomoción del robot esférico.
- Desarrollar el modelo matemático del robot esférico.
- Simular la respuesta dinámica del robot esférico a partir del modelo matemático obtenido.
- Diseñar un sistema de control para atenuar el cabeceo del robot en respuesta a comandos de movimiento.
- Desarrollar un sistema para controlar el movimiento del robot de forma remota.
- Construir el prototipo del robot móvil esférico.
- Validar experimentalmente el funcionamiento del prototipo.

2. JUSTIFICACIÓN

La industria palmera de Colombia posee un gran impacto económico en el panorama internacional, de tal forma que ocupa el primer puesto a nivel latinoamericano, y el cuarto a nivel global, en la producción de aceite [5]. Dicha industria agrícola genera anualmente 1.272.522 toneladas de aceite en cultivos que alcanzan las 466 mil hectáreas y generando ganancias de \$800 millones de dólares. Esta actividad es responsable del 6% del PIB agropecuario y genera alrededor de 110.000 empleos directos, según Fedepalma [6], por lo que representa una de las actividades económicas más importantes de la economía agrónoma colombiana, la cual está distribuida en varios departamentos como el Cesar, Bolívar, Santander, entre otros.

Pero tal negocio lucrativo viene acompañado de grandes riesgos a superar debido al comportamiento natural de la palma de aceite, la cual empieza a producir fruto a partir del tercer año de madurez, por lo que su producción es gradual y puede empezar con 4 a 6 toneladas por hectárea al año, y si la plantación tiene un cuidado óptimo, puede llegar a producir hasta las 20 toneladas por hectárea [7]. Tal demora en la producción del fruto de la palma la vuelve vulnerable a ciertas enfermedades que pueden afectar tanto el producto como la misma integridad de la planta. La enfermedad más devastadora es la “pudrición del cogollo” o “PC”, que cuando llega a afectar el área meristemática (el punto de crecimiento de la planta), la planta muere, por eso los expertos indican que cuando se hace la detección de la enfermedad a tiempo, una simple poda del área afectada junto a un control químico puede ser suficiente para controlar la enfermedad. [9]

Por lo anterior, se puede notar en clara necesidad de mantener monitoreadas constantemente las plantaciones de la palma en su etapa de crecimiento, lo que puede representar un reto considerable debido a la gran cantidad de terreno cultivado y las condiciones ambientales de los mismos, siendo ineficiente utilizar solo la mano de obra humana. Atendiendo al problema anteriormente descrito, se plantea utilizar un robot móvil esférico controlado remotamente que sea capaz de patrullar en dicho terreno y permita monitorear las plantaciones de palma de aceite en un futuro desarrollo.

En el campo de la mecatrónica, los robots esféricos proponen un área de desarrollo prometedor, debido a que no ha surgido un modelo de locomoción predeterminante, por lo cual, la investigación de los robots esféricos se centra fuertemente en la mecánica interna [3], esto plantea un desafío mecánico que se puede resolver de múltiples formas, pero cada método tiene su propio conjunto de obstáculos. Por lo tanto, el desarrollo de robots esféricos presenta problemas de diseños elementales que pueden ser abordados por medio de las metodologías de diseño de sistemas mecatrónico, con el propósito de satisfacer las necesidades de alguna aplicación específica.

3. ANTECEDENTES

En el programa de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Autónoma de Bucaramanga existen algunas propuestas sobre robots móviles, las cuales han tenido antecedentes en otros trabajos y proyectos de grado. En el año 2006, los estudiantes Fabio Andrés Plata Torres y Raúl Fernando Serrano Rojas presentaron el proyecto: “Diseño y construcción de un prototipo de robot móvil teleoperado para inspección visual”. Su objetivo se orientó en la construcción de un prototipo de robot móvil que sea capaz de acceder a sitios remotos y siendo controlado por un operador en un sitio más seguro. Luego en el año 2007, los estudiantes Carlos Andrés Jaramillo Bedoya y Heriberto Ardila Vargas presentaron una idea similar pero orientada a la extinción de incendios; el proyecto se tituló: “Diseño y construcción de un prototipo de robot móvil controlado de forma remota para dar asistencia al inicio de un incendio”, el cual plantea un prototipo de robot móvil de cuatro ruedas con tracción diferencial que fuera capaz de disminuir o retardar la propagación de fuego en los inicios de un incendio y se comportaría como un carro auxiliar de bomberos a pequeña escala.

En la actualidad, el estudiante Brajan Nicolás Ruiz Romero está trabajando en su proyecto de grado titulado: “Diseño y construcción de un robot móvil como plataforma para el apoyo a las labores en los cultivos de café”, con el cual plantea el uso de un robot móvil con orugas en el sector agropecuario, específicamente el sector cafetero. El robot móvil debe ser capaz de recorrer los cultivos de café, además de transportar diversas herramientas que permita cosechar dichos frutos.

Hasta la fecha, en la universidad no se conoce ninguna referencia de un proyecto sobre robots esféricos.

4. ESTADO DEL ARTE.

4.1. Robots móviles en la agricultura.

La robótica móvil está empezando a cubrir nuevos campos de aplicación, como la agricultura de precisión, donde ha surgido la necesidad de aumentar la productividad a un menor costo relativo. Algunos ejemplos de estos robots móviles empleados en este campo son:

AgriRobot Summit XL.



Figura 1. AgriRobot Summit XL. [10]

El Summit XL es un robot de alta movilidad cuenta con un desplazamiento de dirección basado en 4 ruedas de alta potencia, un pulverizador eléctrico con capacidad de 10 litros, un sistema de visión, navegación y localización. Este robot es usado para la fumigación de cultivos. [10]

VinBot.



Figura 2. VinBot. [10]

El VinBot es un robot autónomo que cuenta con un sistema de locomoción todo terreno dotado con un conjunto de sensores capaces de captar y analizar imágenes de viñedos, cuya finalidad es determinar el rendimiento de los viñedos y compartir esta información con los viticultores. [10]

AgBot



Figura 3. AgBot y su equipo de ingenieros de la Universidad Estatal de Luisiana. [11]

El AgBot es un robot móvil enfocado en el cuidado del césped que contiene un dispensador de semillas y un tanque de fertilizante, cuya labor es el sembrado y fertilización de césped. Es alimentado a energía solar, cuenta con sistema de inteligencia artificial, control por Bluetooth y un sistema avanzado de GPS. [11]

4.2. Robots esféricos.

El uso de los robots esféricos es relativamente reciente, dado que sus capacidades y aplicaciones aún están en pleno desarrollo, siendo un tópico interesante de investigación. Algunos ejemplos de robot esféricos son:

SPHERO



Figura 4. Mecanismo interno del Sphero. [12]

Sphero es un robot móvil orientado al sector de entretenimiento como un juguete interactivo. Se controla mediante Bluetooth con un alcance de hasta 1000 pies, logra velocidades de hasta 4.5 mph y es resistente al agua. [12]

LG Rolling Bot



Figura 5. LG Rolling Bot. [13]

LG lanza un robot móvil esférico orientado al hogar que cuenta con una cámara, micrófono y altavoz, además de poder controlar otros dispositivos como luces, televisores u otros dispositivos de LG por medio de Bluetooth o Wifi. [13]

GuardBot

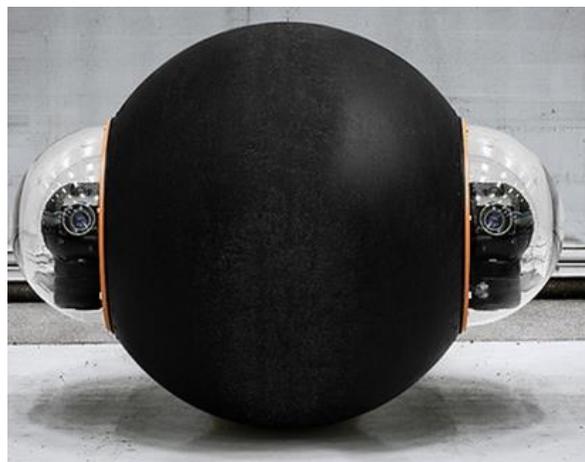


Figura 6. GuardBot/GroundBot. [14]

Desarrollado por un equipo de Investigación de Stamford, Connecticut, GuardBot es un robot móvil esférico orientado a la vigilancia y a la inspección de objetos. Es capaz de girar 360 grados, se controla remotamente y es capaz de nadar sobre el agua a 4 mph y luego volver a tierra sin ningún problema [14]. Actualmente el proyecto está siendo producido por la empresa Rotundus bajo el nombre de GroundBot, siendo esta una versión mejorada del mismo GuardBot.

The Mars Tumbleweed

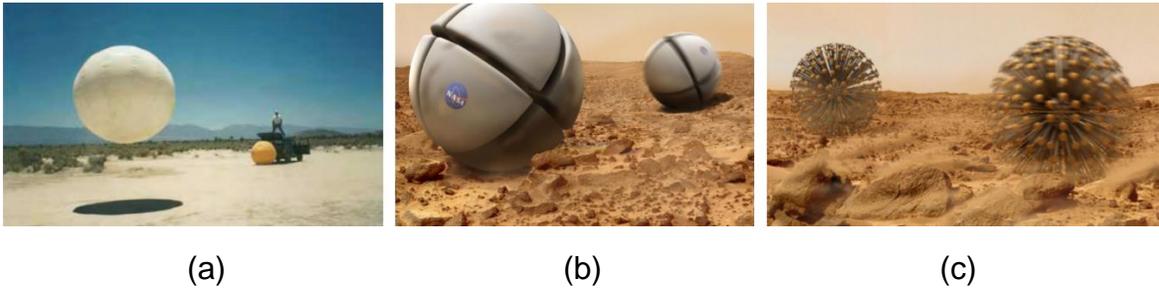


Figura 7. Robots esféricos propulsados por viento, ideados por la NASA [15]. (a) Pruebas del concepto del “Tumbleweed”. (b) Modelo conceptual de “Wedges” en la superficie de Marte. (c) Modelo conceptual de “Dandelion” en la superficie de Marte.

Varios investigadores han trabajado en algunos diseños de robots esféricos accionados por viento, también conocidos como “Tumbleweed”, nombre derivado de los arbustos artemisas que comúnmente se ven rodando en los desiertos del suroeste de los estados unidos. La NASA ha estado interesado en estos diseños para ser utilizados como rovers de exploración en misiones a Marte, aprovechando la potencia de los vientos que allí se establecen, por lo que han planteado algunos diseños tales como: [15]

- **El concepto del TTU:** (ver Figura 7a) diseñado por los estudiantes de la Texas Technical University, siendo una alternativa a los diseños de la NASA.
- **El concepto de “Wedges”:** (ver Figura 7b) usa secciones esféricas inflables para aumentar el diámetro aparente del sistema. [15]
- **El concepto de “Dandelion” o “diente de león”:** (ver Figura 7c) utiliza una matriz esféricamente simétrica de puntales, patas y espinas para aumentar el diámetro aparente de la capsula del instrumento. [15]

BB-8



Figura 8. BB-8 en la alfombra roja del panel de “Star Wars: The Force Awakens”. [16]

BB-8 es un robot esférico diseñado como personaje en la película “Star Wars: The Force Awakens”, ideado conceptualmente por J.J. Abrams para el film. Durante el rodaje de la película no fue posible concebir un droide funcional, por lo que se procedió a usar diferentes marionetas para grabar las escenas, sin embargo, una versión funcional fue creada meses después por el diseñador animatrónico Joshua Lee y Matt Denton para Disney Research, quienes lo presentaron al mundo en el “Star Wars Celebration Anaheim”, donde BB-8 rodó por el escenario, convirtiéndose en el primer robot esférico con cabeza movable [16]. Tiempo después, empresas como Sphero, Hasbro o Hero Droid, crearon sus versiones funcionales de BB-8 y actualmente están a la venta como juguetes interactivos basados en el icónico personaje.

4.2.1. Proyectos de grado sobre robots esféricos

En la Universidad Politécnica de Madrid, en el año 2012, el estudiante Juan David Hernández Vega, presenta el proyecto: “ROSPHERE: Diseño, Construcción y Aplicación de una Esfera Robótica”, el cual plantea el diseño de una esfera robótica que tenga las capacidades necesarias para formar parte de un Sistema Multi-Robot (SMR) y cuyo resultado final fue un robot esférico funcional, con diferentes pruebas de funcionamiento y posibles aplicaciones. El proyecto fue presentado como requisito para optar el título de “Master en Automática y Robótica”.

En ese mismo año, en la Escuela Politécnica Nacional en Quito, los estudiantes Ramito Sebastián Cañadas Bentacourt y Paola Jeannette Nazate Burgos, presentaron el proyecto: “Diseño y Construcción de un robot móvil esférico con visión en tiempo real”, el cual plantea un robot esférico que sea capaz de llevar en su estructura interna una cámara con la cual poder grabar y enviar en tiempo real la imagen transmitida por el robot.

5. MARCO TEÓRICO.

5.1. Robótica Móvil.

Los robots móviles son plataformas electromecánicas dotadas de un sistema de locomoción que le brinda la capacidad de navegar a lo largo de un determinado espacio de trabajo, de esta forma se le dota al robot de un nivel considerable de autonomía a la hora realizar diversos trabajos. La robótica móvil parte de la necesidad de extender el campo de aplicación de la robótica incrementando la autonomía al aplicar la capacidad de trasladarse a lo largo de su entorno, de esta forma aumentar el rango del espacio de trabajo y aumentando el número de tareas que el robot puede realizar [1].

La autonomía de un robot móvil se basa en el sistema de navegación automática, en los cuales se incluyen actividades como:

- **La planificación:** en el caso más general, puede descomponerse en planificación global de una misión, una ruta, una trayectoria y la evasión de obstáculos inesperados. [1]
- **La percepción:** La capacidad de percepción del robot es la síntesis de toda la información provisionada por los sensores, con el objetivo de determinar una relación con su entorno. [17]
- **El Razonamiento y el control:** capacidad de decidir qué acciones son requeridas en cada movimiento, basándose en el estado del robot y el de su entorno, con el fin de alcanzar su objetivo. [17]

5.1.1. Clasificación de los robots móviles según su entorno de trabajo.

El campo de la robótica móvil ha evolucionado tanto que han roto los límites tradicionales de su entorno de trabajo, explorando nuevos ambientes donde la robótica puede llegar ser muy útil, Los robots móviles se pueden clasificar tres categorías según su entorno de trabajo, las cuales son:

- **Terrestres:** Capaz de navegar en diversos terrenos terrestres.
- **Acuáticos:** Capaz de navegar en ambientes acuáticos, ya sea flotando o sumergiéndose.
- **Aéreos:** Capaz de navegar en el aire o el espacio.

5.1.1.1. Clasificación de los robots móviles terrestres.

Los robots móviles terrestres pueden ser clasificados en tres grupos de acuerdo a su sistema de locomoción: con piernas, orugas y ruedas.

5.1.1.2. Clasificación de los robots móviles acuáticos.

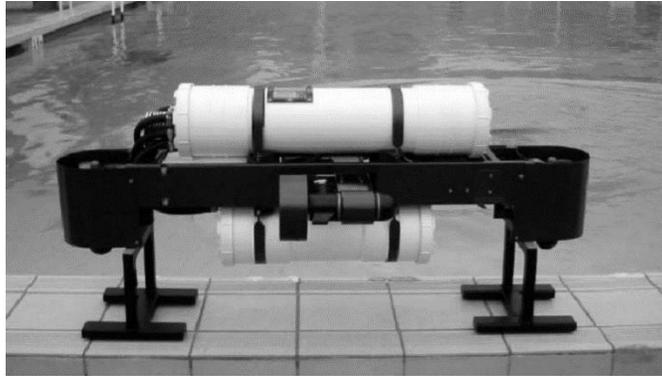


Figura 10. AUV Mako. [18]

Los robots móviles acuáticos pueden ser clasificados en dos grupos de acuerdo a su aplicación:

- **Flotantes:** Diseñados para recorrer el agua sin sumergirse. En esta categoría entra los barcos operados remotamente, entre otros.
- **Submarinos o sumergibles:** (ver Figura 10) Diseñados para recorrer el terreno acuático sumergiéndose directamente en él y alcanzando distancias considerables. En esta categoría entran los A.U.V's (vehículo autónomo acuático, por sus siglas en ingles).

5.1.1.3. Clasificación de los robots móviles aéreos.



(a)



(b)

Figura 11. Clasificación de los robots móviles aéreos según su sistema de vuelo. (a) Dron de ala fija ultraliviano de la NASA. (b) Dron multi-rotor en plataforma de aterrizaje. [19]

Los robots móviles aéreos, también conocidos como vehículos aéreos no tripulados pueden ser clasificados en dos grupos de acuerdo a su sistema de vuelo, tales como:

- **Dron de ala fija:** (ver Figura 11a) son aeronaves no tripuladas que vuelan debido a la sustentación generada por la velocidad de la corriente de aire que incide en su perfil alar fijo.
- **Dron multi-rotor:** (ver Figura 11b) son aeronaves no tripuladas que vuelan debido a que la fuerza de la gravedad se contrarresta con una fuerza de empuje contraria generada por unas hélices de sus múltiples rotores.

5.1.2. Holonomicidad de los robots móviles.

La holonomicidad es una característica que define las propiedades de locomoción de un vehículo respecto a su espacio de Trabajo. Un vehículo es holonómico, si el número de grados de libertad (GDL) controlables es igual al número de GDL de su espacio de trabajo. Cuando esto no se cumple se dice que el robot es no-holonómico. En general, el espacio de trabajo de un robot móvil terrestre es de 3 GDL, los referentes al desplazamiento en el plano X-Y y el ángulo de guiño o Yaw. [20]

5.2. Robots esféricos.

Los robots esféricos son un campo emergente de investigación de la robótica móvil terrestre, el cual ha surgido de la necesidad de explorar nuevos tipos de locomoción brindándole las ventajas de la forma esférica, tales como:

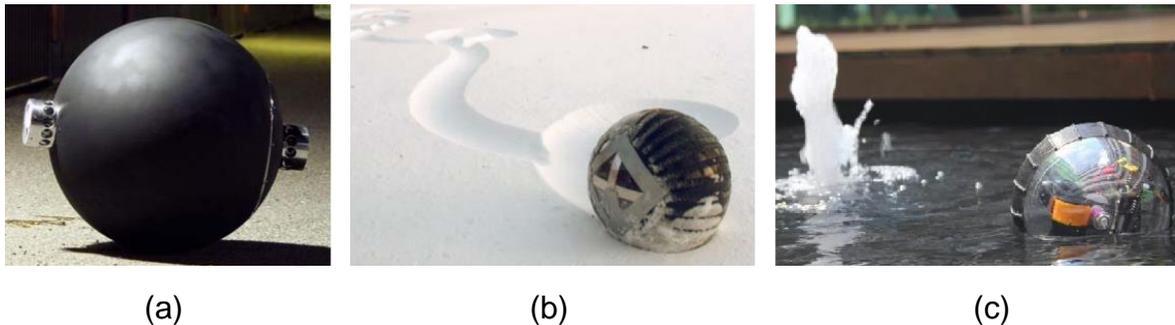


Figura 12. Robots esféricos en diferentes entornos. (a) Robot esférico de vigilancia diseñado para terrenos planos. (b) Robot esférico diseñado para la exploración de terrenos nevados [3]. (c) Robot esférico anfíbio. [8]

- Su alta maniobrabilidad, permitiéndole una facilidad a la hora de navegar alrededor de un objeto específico sin la posibilidad de perder su movilidad, además que seguirá el camino de menor resistencia [3].
- En superficies rígidas y compactas, los robots esféricos presentan pérdidas mínimas de energías por fricción, ya que en dichas superficies se presenta un único punto de contacto, brindándole así eficiencia energética.
- Dado a su diseño esférico, se reduce la posibilidad de que el robot se quede atascado en alguna esquina, además de darle una mayor resistencia a los

impactos y han tenido un mejor rendimiento en superficies como la nieve, la arena o incluso el agua (ver Figura 12). [4]

5.3. Principios de locomoción de un robot esférico

Los mecanismos de locomoción de los robots esféricos son un campo de investigación relativamente nuevo y amplio, debido a que no hay un único principio de locomoción existente, por lo tanto, el desarrollo se ha enfocado en aprovechar estos diferentes principios para crear nuevos sistemas de locomoción. Básicamente, existen tres principios que permite impulsar un robot esférico:

- Desplazamiento del centro de masa.
- Transformación de la carcasa esférica.
- Conservación del momento angular.

Con base a estos principios, se han desarrollado varias formas de implementarlo dentro del mecanismo interno de la esfera.

5.3.1. Desplazamiento del centro de masa.

A diferencia de los robots móviles tradicionales, el principio de locomoción por desplazamiento del centro masa basa en la inducción del movimiento por inestabilidad. Para entender este principio, consideremos una esfera de masa uniformemente distribuida, en donde su centro de masa (CM) coincide con el centro geométrico (CG), por lo que, si la esfera se encuentra en contacto con una superficie plana, la proyección del centro de masa sobre la superficie se producirá en dicho punto de contacto. Bajo estas condiciones, la esfera se encuentra en total equilibrio, por lo que no tendrá velocidad, no aceleración en ninguna dirección. (Ver Figura 13a) [20]

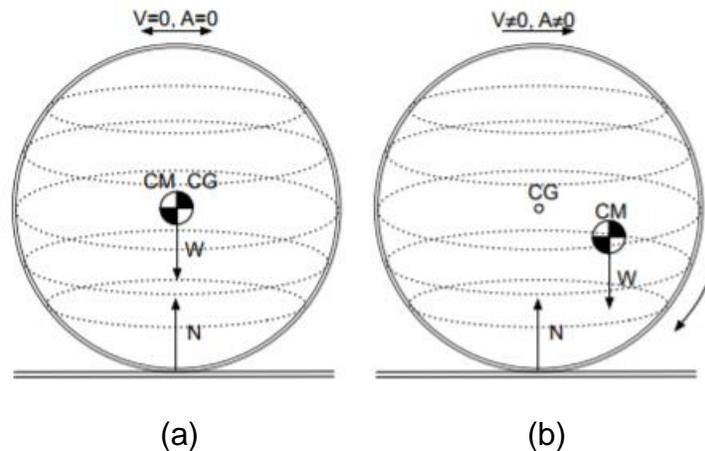


Figura 13. Principio básico de locomoción de un robot esférico. (a) Configuración estática de una esfera uniformemente distribuida. (b) Configuración dinámica de una esfera, cuyo CM no coincide con el CG. [20]

Ahora, consideremos una esfera no uniforme, donde su CM no coincide con su CG, por lo que, al ser ubicada en una superficie plana, la proyección de su CM no coincidiría con el punto de contacto, entrando en un estado de inestabilidad o desequilibrio donde la esfera se encontraría en movimiento (ver Figura 13b) [20].

Basándose en este principio básico, un robot esférico que incluya un sistema de locomoción capaz de modificar la posición de su CM podrá autoinducir su propio movimiento. Sin embargo, la principal limitación de este método es que el torque máximo de salida estará restringido, pues el centro de gravedad no se puede desplazar fuera de la carcasa de la esfera.

Implementando este principio se han diseñado los siguientes sistemas mecánicos de locomoción:

5.3.1.1. Mecanismo de unidad de conducción interna (IDU).

El mecanismo de unidad de conducción interna (Inside Driving Unit o IDU) transfiere directamente la potencia a la superficie interior de la carcasa esférica hueca. Este sistema de locomoción tiene tres diseños principales, los cuales son: el diseño tipo Hámster, el diseño tipo cuerpo central con muelle y el diseño tipo rueda universal.

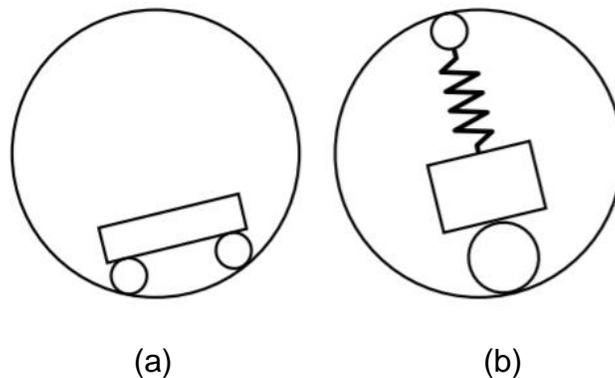


Figura 14. Sistemas de unidad de conducción interna (IDU). (a) Diseño tipo Hámster. (b) Diseño tipo Cuerpo Central con Muelle. [21]

Diseño tipo Hámster.

Uno de los primeros diseños de robots esféricos que utilizaron el principio del desplazamiento del centro de masa fue el diseño tipo Hámster (ver Figura 14a), nombrado así por la semejanza con un hámster en una esfera de juguete. Este diseño consiste de un pequeño robot móvil con ruedas el cual está dentro de la esfera y el peso de dicho robot proporciona la fuerza necesaria para impulsar la esfera cuando el robot se mueva. Este diseño cuenta con la ventaja de ser relativamente fácil de modelar, fabricar y controlar (siempre y cuando no requiera un seguimiento extremadamente preciso [3]). Por su parte, una de las mayores desventajas se presenta cuando el vehículo interno pueda llegar a desprenderse de la superficie de la esfera y termine volcándose, sin embargo, un buen sistema de

control en lazo cerrado puede mitigar este problema [22]. De igual forma es común encontrar pérdidas de energía y complicaciones en el control dados por la fricción.

Diseño tipo Cuerpo central con muelle.

Para evitar el caso de que el vehículo interno se desprenda de la superficie de la esfera, algunos mecanismos utilizan un sistema que le permita al vehículo interno estar en constante contacto con la superficie de la esfera, para lo cual se utiliza en uno de sus extremos una rueda actuada, mientras que el otro se encuentra una rueda pasiva conectada a un resorte, permitiéndole al vehículo mantenerse siempre en contacto con la esfera y disminuyendo la fricción entre ambos, además de que permite que la velocidad de la esfera sea controlada por la velocidad del motor de la rueda principal, mientras que a bajas velocidades, el control de dirección del robot es moderadamente exacto [3]. Pero para altas velocidades, el sistema de dirección es difícil de controlar. También puede haber deslizamiento entre las ruedas y la carcasa, lo cual se puede minimizar ajustando la tensión entre el sistema de accionamiento por resorte y el robot, pero esto aumenta la fricción en todo el robot. Además, este sistema no puede hacer uso del impulso almacenado del robot, es decir, si las ruedas se detienen, el robot se comportará de forma errática, por lo que requiere que el sistema de locomoción este extremadamente bien equilibrado, pues un centro de masa fuera del eje puede causar un desplazamiento en un patrón no deseado.

Diseño tipo rueda universal.

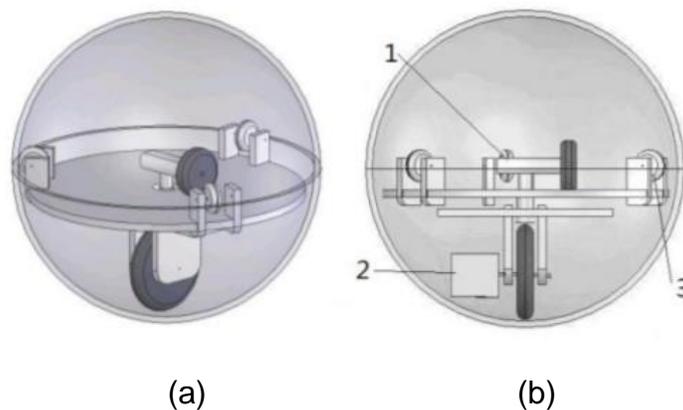


Figura 15. Mecanismo de conducción por rueda universal: (a) Vista del diseño. (b) Vista detallada del diseño: 1 -Motor, 2 -Motor, 3 -Rueda de esponja [3].

El mecanismo de conducción por rueda universal, o también conocido como BHQ, llamado así para dar a luz a su modelo dinámico, el cual se estableció por la ecuación de Boltzmann-Hamel [3]. Básicamente el robot puede ser conceptualizado como un sistema de rueda universal ya que el mecanismo interior puede rotar libremente en el interior del robot debido a la combinación de ruedas unidas a él. El diseño cuenta con dos motores que controlan el robot. El primer motor controla la orientación del IDU y el segundo motor controla la velocidad de la rueda de accionamiento, eso permite que la esfera se mueva con un radio de giro cero,

creando un mayor grado de holonomía. La velocidad del robot es controlada por la velocidad angular del mismo, por lo que a medida que la rueda gire más rápido, la velocidad de translación del robot también aumentará. Sin embargo, puede tener una gran pérdida de energía debido a la fricción de las ruedas de esponja, así como la incapacidad de rodar sin potencia por una pendiente.

5.3.1.2. Mecanismo de conducción por péndulo de eje fijo.

Una de los diseños más simples para desplazar el centro de masa se consigue usando un mecanismo de conducción por péndulo, pues al hacer girar el péndulo, su centro de masa se desplaza afuera del centroide y la carcasa empezara a rodar.

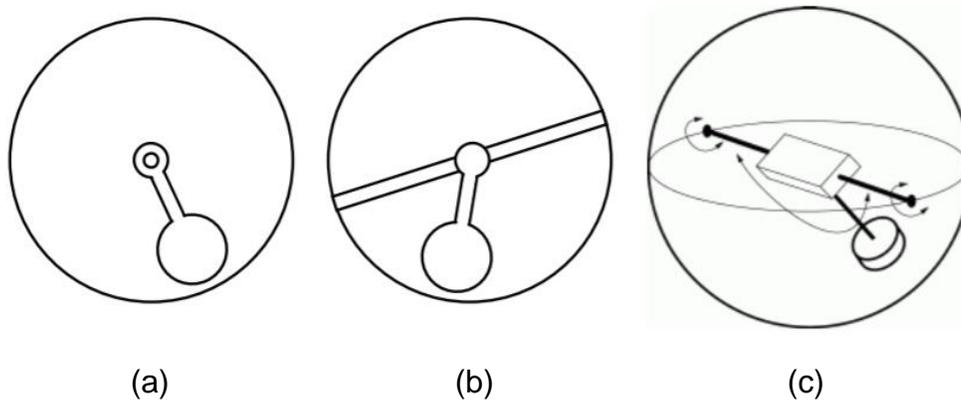


Figura 16. Sistemas de conducción por péndulo de eje fijo. (a) Vista lateral con el péndulo rotado lateralmente para avanzar. (b) Vista frontal con péndulo inclinado hacia un lado. Como resultado, el eje de transmisión es inclinado [21]. (c) Grados de Libertad que maneja este diseño [23].

Como su nombre lo indica, este sistema está compuesto por un eje que se encuentra fijo al cuerpo de la esfera y sirve como base de un péndulo de dos grados de libertad, donde el primer grado se encuentra cuando se gira alrededor del eje transversal (ver Figura 16a), permitiéndole al robot avanzar hacia delante o hacia atrás. El segundo grado se encuentra al girar el eje longitudinal, lo que le permite al robot inclinarse hacia un lado específico y así poder girar en ese sentido (ver Figura 16b). A medida que se aumenta la masa del péndulo, también aumenta la cantidad de torque necesaria para moverlo, lo cual limita su capacidad al subir pendientes pronunciadas.

5.3.1.3. Mecanismo de conducción por cambios múltiples de masa.

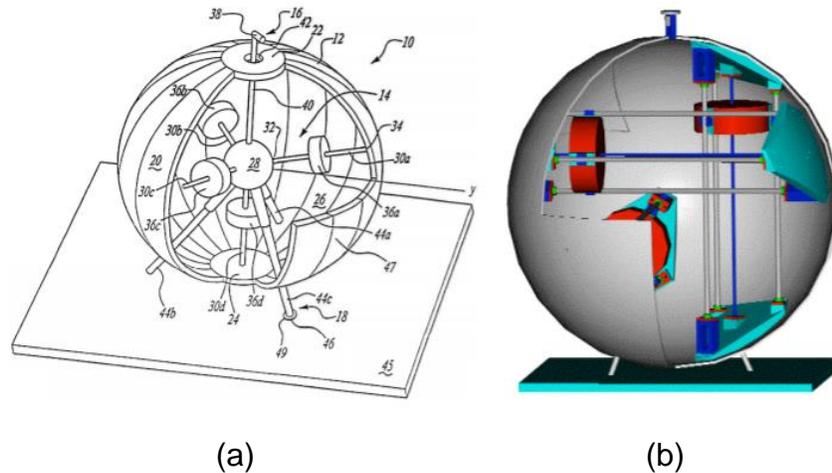


Figura 17. Mecanismo de conducción por cambios múltiples de masa. (a) Diseño con patas retráctiles y cámara. (b) Diseño perpendicular sin intersección. [23]

El mecanismo de conducción por cambios de masa múltiples incorpora 3 o 4 masas que se pueden mover de forma independiente a lo largo de unas guías lineales ubicadas dentro de la esfera. Al hacer coordinar el movimiento de las masas, se puede controlar la ubicación del centro de masa de la esfera, permitiéndole que se mueva en la dirección deseada. La principal ventaja de este diseño es su completa omnidireccionalidad, ya que puede comenzar instantáneamente a moverse en cualquier dirección desde un punto muerto, por lo que es un diseño completamente holonómico. Sin embargo, este diseño presenta varios inconvenientes en el diseño. El diseño mecánico y su respectivo control son muy complejos, además que el diseño es muy sensible a los impactos, por lo que requiere que la superficie de la esfera amortigüe la mayoría de ellos. El movimiento de este robot resulta lento en comparación de los otros mecanismos de locomoción.

5.3.2. Diseño con cuerpo deformable.

En este nuevo diseño, en lugar de un complicado sistema mecatrónico interno para impulsar la esfera, el robot transforma su cuerpo externo mediante la deformación de la envoltura circundante de la esfera o utilizando elementos ambientales, como el viento o el agua.

5.3.2.1. Diseño con secciones deformables.

El primer diseño fue planteado por M. Artusi [3], en donde la carcasa exterior consta de cuatro secciones de actuadores de elastómero dieléctrico, que se pueden deformar ante la aplicación de un campo eléctrico. Las deformaciones secuenciales de las cuatro secciones proveen movimiento al robot.

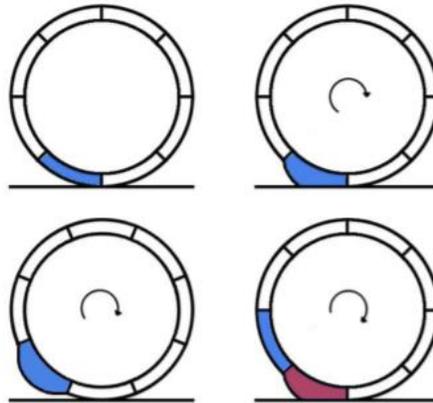


Figura 18. Mecanismo con secciones deformables utilizando cámaras de aire presurizado. [3]

Una propuesta similar fue dada por K. Wait [3]. Esta idea era más avanzada, donde la esfera del robot está compuesta de varias secciones pentagonales, las cuales pueden inflarse y desinflarse usando cámaras de aire presurizado, dependiendo de las secciones que se inflen, la esfera puede empujarse así misma por un camino. Este sistema en particular puede proporcionar movimientos holonómicos.

5.3.2.2. Diseño con aleaciones con memoria de forma.

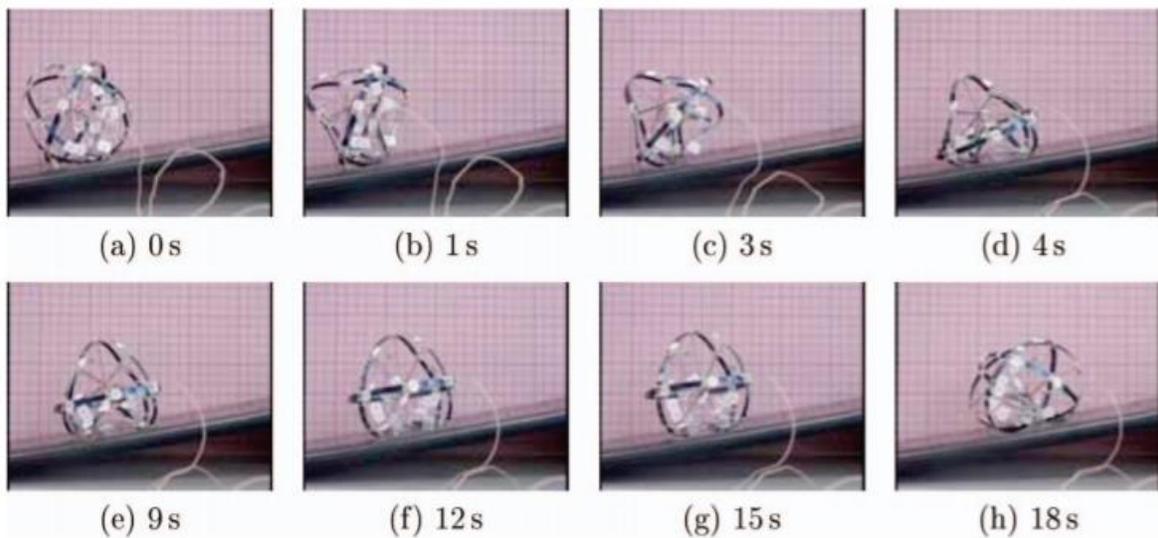


Figura 19. Robot esférico deformable sobre una pendiente [21].

Las aleaciones con memoria de forma (o SMA, “Shape Memory Alloy” por sus siglas en inglés) son aleaciones metálicas que vuelven a su forma después de una deformación aparentemente plástica. La universidad Ritsumeikan en Japón desarrolló su propio robot esférico basado en el principio de funcionamiento de estas aleaciones. Al contraer y expandir los cables SMA coordinadamente, la estructura externa puede ser deformada, lo cual hace que ruede. Estos robots cuentan con la

habilidad única del salto, pues los cables SMA al deformarse pueden almacenar una cantidad significativa de energía potencial en su estructura externa, que al liberarse logra impulsar el salto de la esfera. La principal desventaja de estos sistemas es su movimiento, el cual es muy lento en comparación.

5.3.3. Mecanismo basado en la conservación del momento angular.

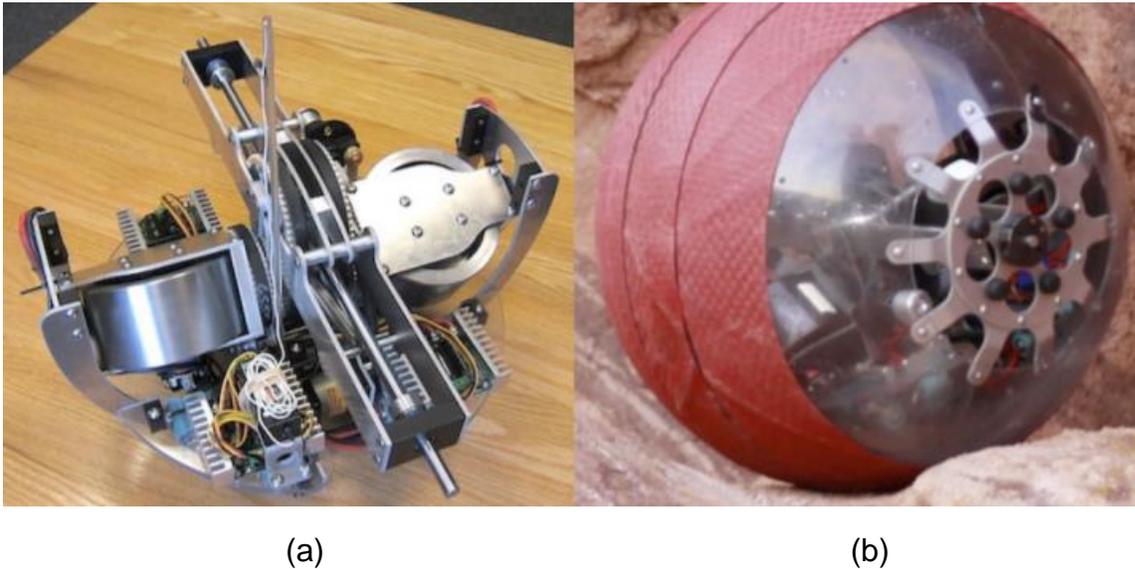


Figura 20. Diseño basado en la conservación del momento angular. (a) Diseño Mecánico. (b) Diseño full armado.

Recientemente, varios grupos de investigación han comenzado a investigar nuevos diseños de locomoción para robots esféricos utilizando giroscopios de control de momento (CMG, por sus siglas en inglés). Al girar rápidamente un volante sobre un eje, el principio de conservación del momento angular (COAM, por sus siglas en inglés) se puede usar para controlar el movimiento de la esfera. A medida que la velocidad angular de los CMG, también lo hace el torque de salida, por lo que usando este diseño se garantiza un mayor torque de salida que el que se ejercería usando el método de variación del centro de masa.

5.4. Limitaciones prácticas del Torque.

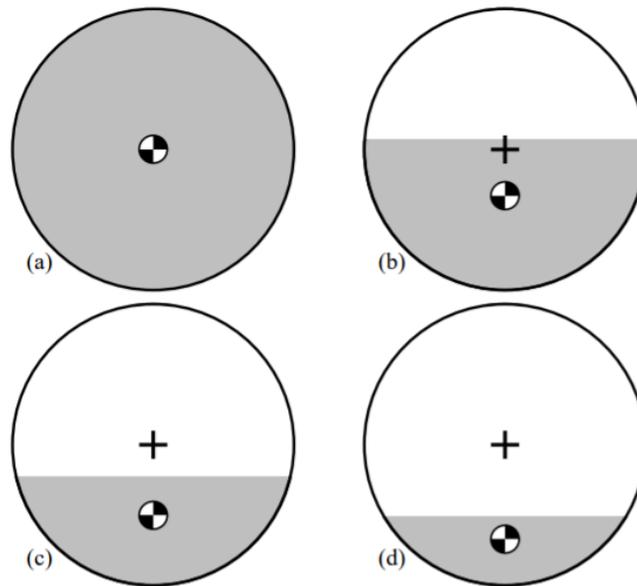


Figura 21. Ejemplo que ilustra la compensación de masa en el diseño. La diferencia entre el centroide y el centro de masa son de: (a) 0, (b) $R/3$, (c) $R/2$, (d) $R/3$, donde R es el radio de la esfera. [21]

Desafortunadamente, hay un límite práctico en el torque que puede generar el robot esférico, especialmente utilizando el método del desplazamiento de centro de masa, para entender este límite, tomemos por ejemplo una carcasa esférica como la ilustrada en la Figura 21. Donde podemos ver una carcasa esférica que tiene masa despreciable y donde la masa de los componentes de su sistema de locomoción se distribuye uniformemente en el área gris. En la Figura 21. se puede ver un diseño en donde su centro de masa coincide con el centroide geométrico de la esfera. Luego vemos que para desplazar el centro de masa a una distancia de $1/3$ del radio de la esfera, la mayoría de la masa interna debe usar el 56% del volumen interno, como podemos ver en la Figura 21. De la misma forma, para desplazar el centro de masa a $R/2$ y $2R/3$, solo se podría usar el 34% y el 16% del volumen interno de la esfera como se puede observar en la Figura 21. [21].

Por lo que esta tendencia indica la compensación entre maximizar el desplazamiento del centro de masa y tener suficiente espacio interior para adaptar los componentes necesarios para desplazar dicha masa. Agregar una masa de alta densidad cerca de la carcasa externa para desplazar la masa requiere una mayor potencia en sus actuadores para mover dicha masa. En la práctica, el máximo desplazamiento que se puede hacer al centro de masa es de $2R/3$ aproximadamente y nunca este podrá salirse de los límites de la esfera, lo cual limita su torque [21]. Utilizando un desplazamiento límite de $R/2$ se puede garantizar un mayor rendimiento por lo que este límite práctico se traduce en un límite en la inclinación continua máxima y el tamaño máximo que puede llegar a tener un obstáculo para que el robot lo pueda atravesar.

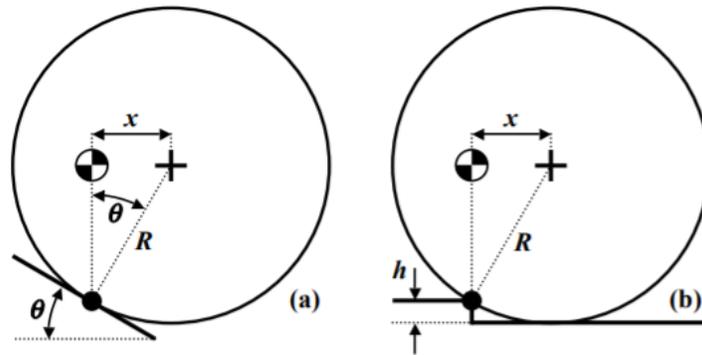


Figura 22. Límites de movilidad para una esfera con un desplazamiento de CM máximo de $x = R/2$. (a) Máxima Inclinación. (b) Altura máxima de un escalón. [21]

La máxima inclinación que se puede dar está dada por la siguiente ecuación:

$$\theta = \text{sen}^{-1}\left(\frac{x}{R}\right) \quad (1)$$

Donde:

- θ es el ángulo de inclinación.
- x es el máximo desplazamiento del centro de masa de la esfera desde el centro de la esfera.
- R es el radio de la esfera.

Entonces, si tenemos un límite máximo del desplazamiento del centro de masa de $x = R/2$; al remplazarlo en la ecuación (1), obtenemos que la inclinación máxima que puede subir un robot esfero es de 30° .

De la misma forma, la altura máxima de un escalón que el robot es capaz de superar desde el reposo, está dada por la siguiente ecuación:

$$h = R - \sqrt{R^2 - x^2} \quad (2)$$

Donde " h " es la altura máxima del escalón. Si tomamos en cuenta el límite máximo del desplazamiento del centro de masa, $x = R/2$, entonces la altura máxima del escalón queda igual a $h \approx 0.14 * R$, por lo que, al usar este método, el robot solo podrá superar escalones pequeños.

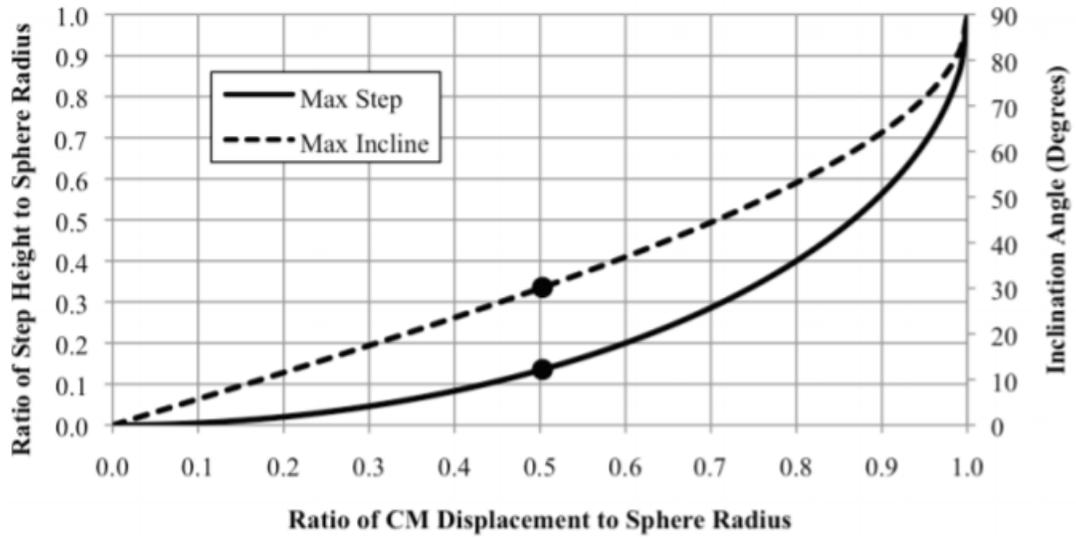


Figura 23. Gráfico de las Limitaciones de la movilidad vs el desplazamiento máximo del CM. [21]

Como podemos observar en el gráfico anterior, el método del desplazamiento del centro de masa está extremadamente limitado en su movilidad, la cual es independiente del mecanismo interno de locomoción.

5.5. Impresión 3D por Deposición Fundida.

5.5.1. ¿Qué es la Impresión 3D?

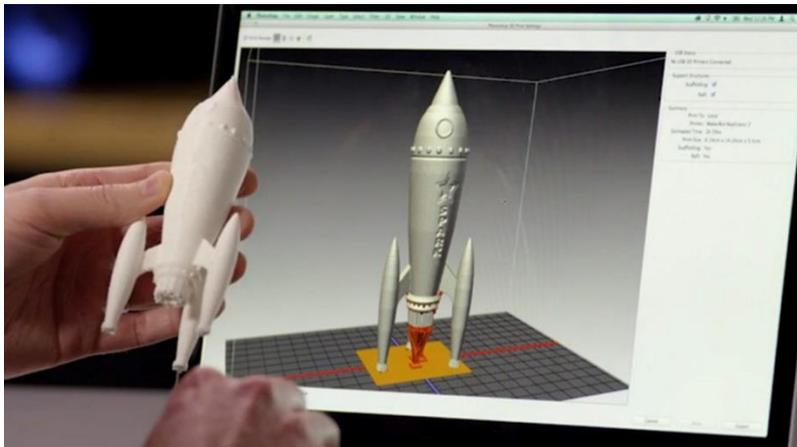


Figura 24. Figura impresa 3D con su respectivo diseño CAD. [33]

La impresión 3D, conocida también como manufactura aditiva o manufactura por adición, es un proceso de manufactura para la creación de objetos físicos colocando capas de un material en base a un modelo CAD.

La tecnología de impresión 3D puede utilizarse para crear todo tipo de cosas, desde prototipos y piezas simples hasta productos finales altamente técnicos, como piezas para aeronaves, edificios ecológicos, implantes médicos que pueden salvar vidas e incluso órganos artificiales que se producen con capas de células humanas. [32]

5.5.2. Métodos comunes de impresión 3D

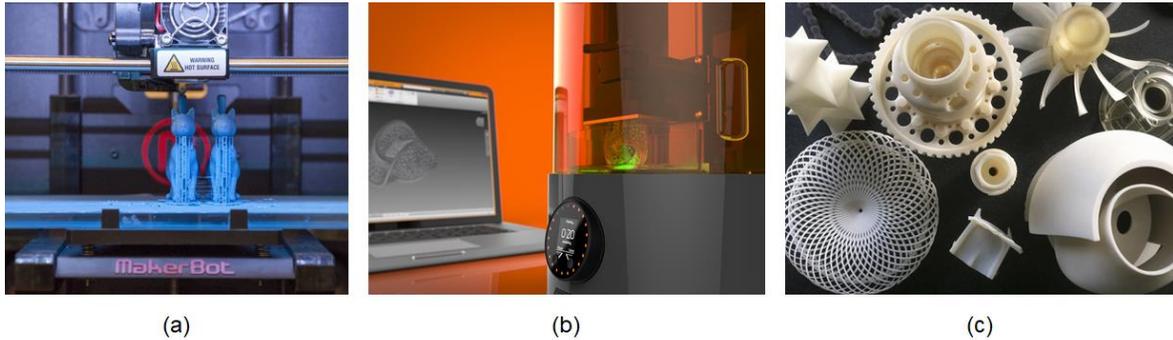


Figura 25. Métodos comunes de impresión 3D. (a) Modelado por deposición fundida (FDM). (b) Estereolitografía (SLA). (c) Sinterizado selectivo por láser (SLS). [33]

Los tres métodos comunes de impresión 3D son:

- **Modelado por deposición fundida (FDM):** Este método de impresión 3D calienta y extrude materiales plásticos. Es el más usado tanto por profesionales como en modelos caseros. [33]
- **Estereolitografía (SLA):** Este método de impresión 3D utiliza la luz UV para curar o endurecer resinas, capa por capa. [33]
- **Sinterizado selectivo por láser (SLS):** Este método de impresión 3D utiliza láser para fusionar materiales pulverizados, capa por capa. Es el más común en el sector industrial. [33]

5.5.3. Materiales compatibles con el modelado por deposición fundida.



Figura 26. Bobina de filamento en la parte trasera de una impresora Ultimaker. [34]

La impresión 3D de deposición fundida (FDM) es compatible con una amplia variedad de polímeros termoplásticos, como lo son: PLA y ABS, también de policarbonato, como lo son: PETG, PS, ASA, PVA, nylon, ULTEM, polímeros flexibles, como el TPU y muchos filamentos compuestos que estén basados en metal, piedra, madera. Esto ofrece interesantes propiedades mecánicas tales como conductividad, biocompatibilidad, resistencia a temperaturas o condiciones extremas, por mencionar algunos. [34]

5.5.3.1. Ácido poliláctico (PLA).

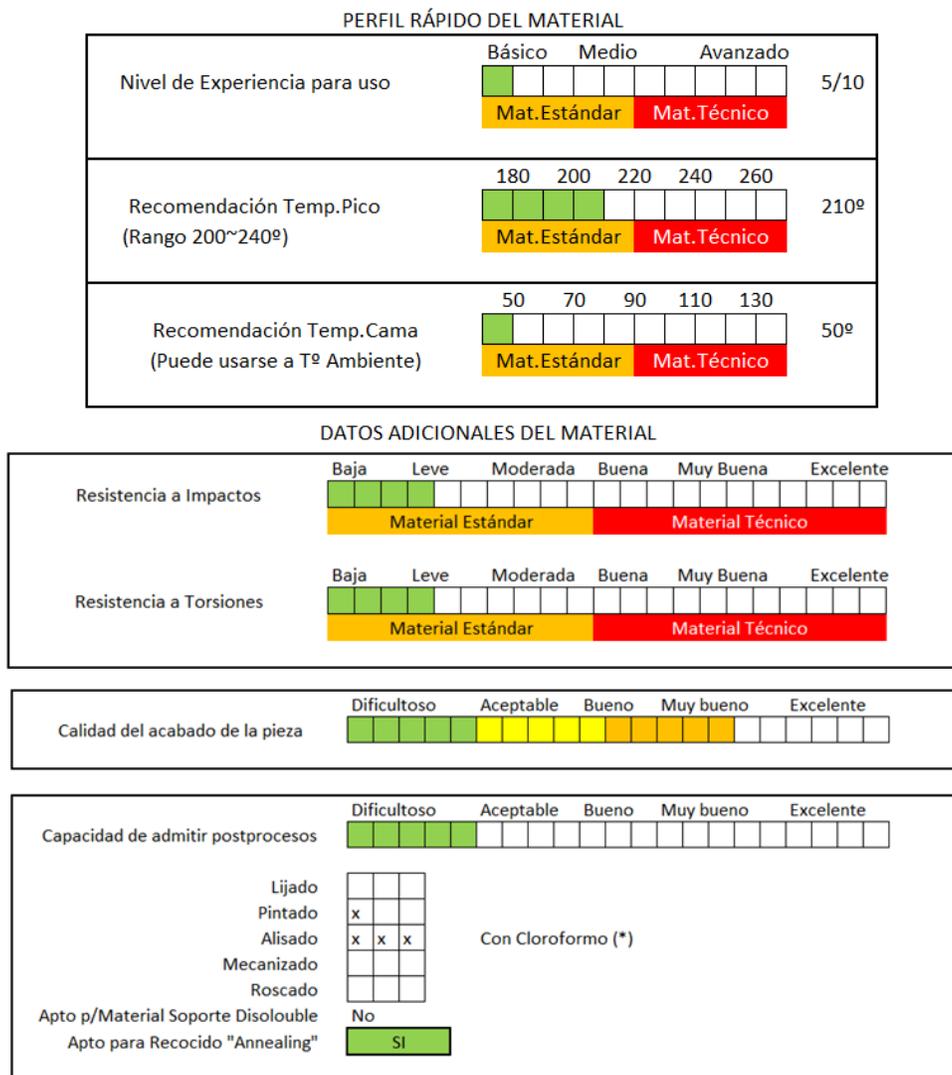


Figura 27. Perfil Rápido del PLA+. [35]

El PLA es el material más utilizado en impresión 3D y destaca por su simplicidad de uso, bajo costo, material biodegradable y baja temperatura de impresión. Su perfil de aplicación ideal es para prototipos rápidos y piezas decorativas. Tiene un buen brillo en el color final y un material de acabado rígido. [35]

5.5.3.2. Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS).

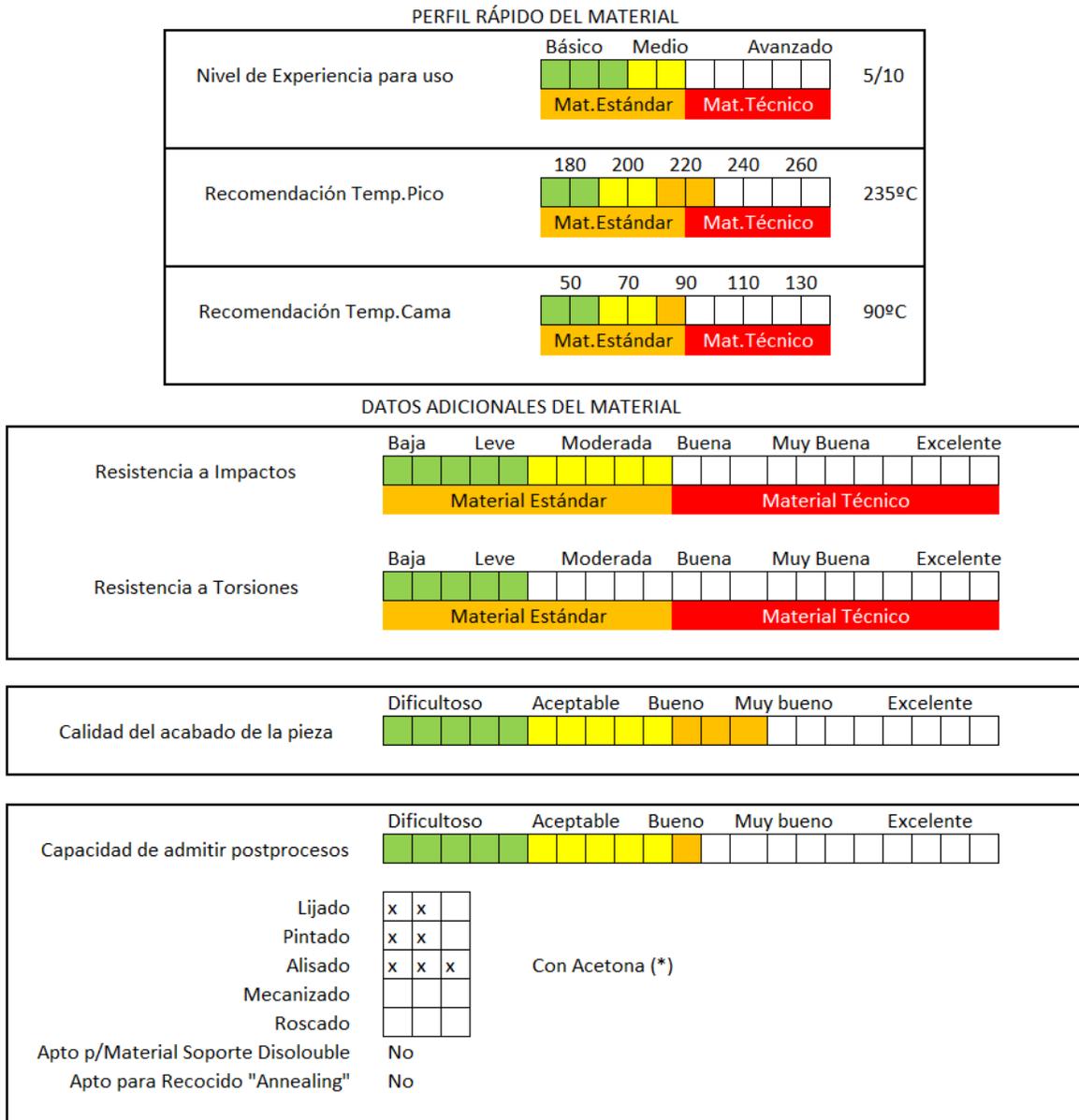
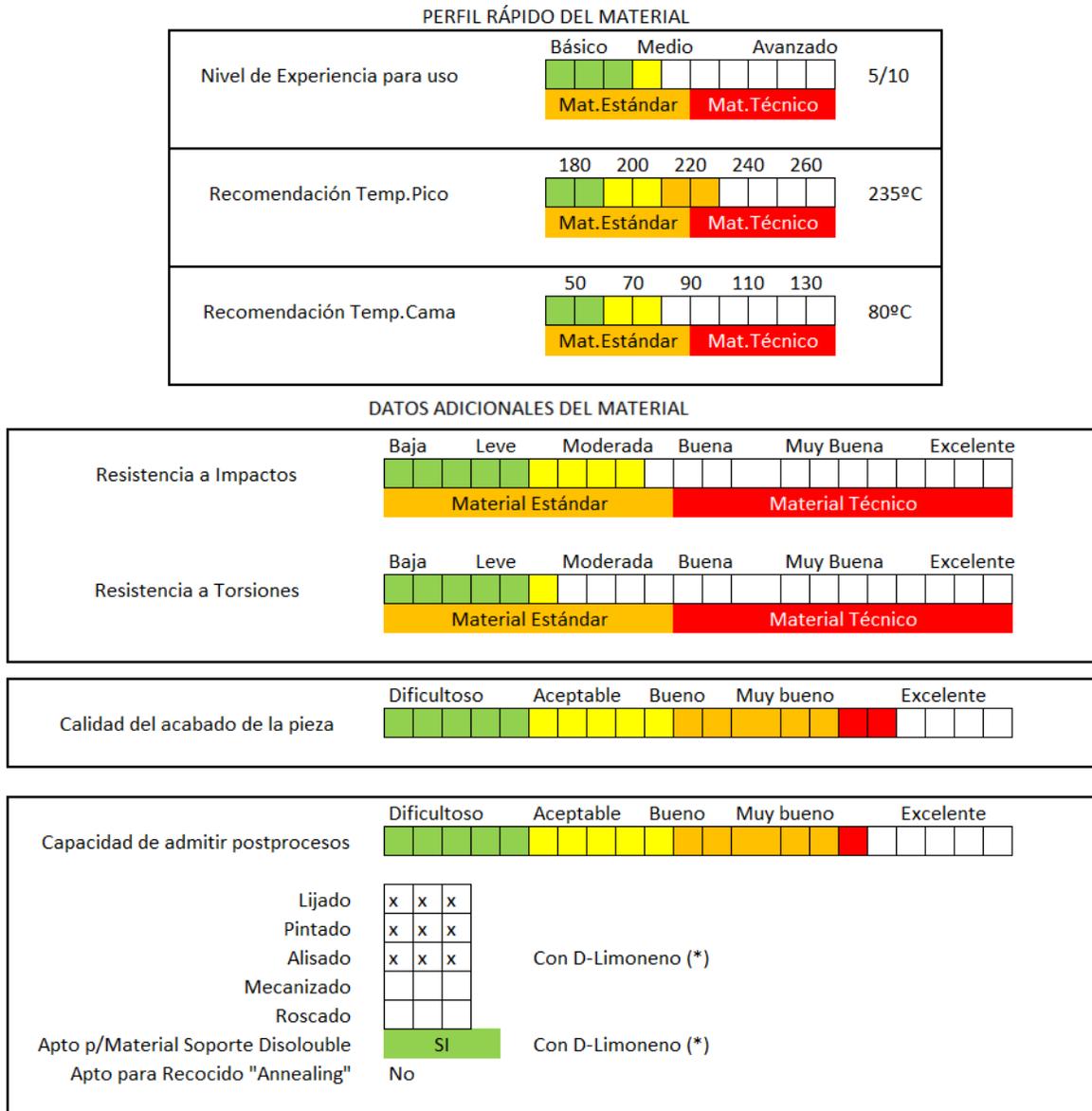


Figura 28. Perfil rápido del ABS. [35]

El ABS es el material con el que se inició prácticamente la impresión 3D, dada su abundancia en el mundo, sus capacidades al impacto, a temperaturas, y su buena fluencia al imprimirse. Es el más económico de los plásticos de ingeniería. Su fuerte radica en pequeñas piezas mecánicas o de soporte estructural. Sin embargo, es difícil de imprimir ya que es sensible a la temperatura y tiende a expandirse. [35]

5.5.3.3. Poliestirenos de Alto Impacto (HIPS)



El HIPS es un derivado del poliestireno, plástico abundante como ABS en el mundo, muy empleado en la industria. Para impresión general tiene aplicaciones como las de ABS, ya que es de similar manejo y prestaciones, el plus que genera es que se usa como material de soporte soluble, siendo este totalmente soluble en D-Limoneno. Muchos alisan las piezas 3D de HIPS con un rocío de D-Limoneno. El Acabado de la pieza es gratamente opaco, áspero. [35]

5.5.3.4. PolyEthylen Terephthalato de Glicol (PETG).

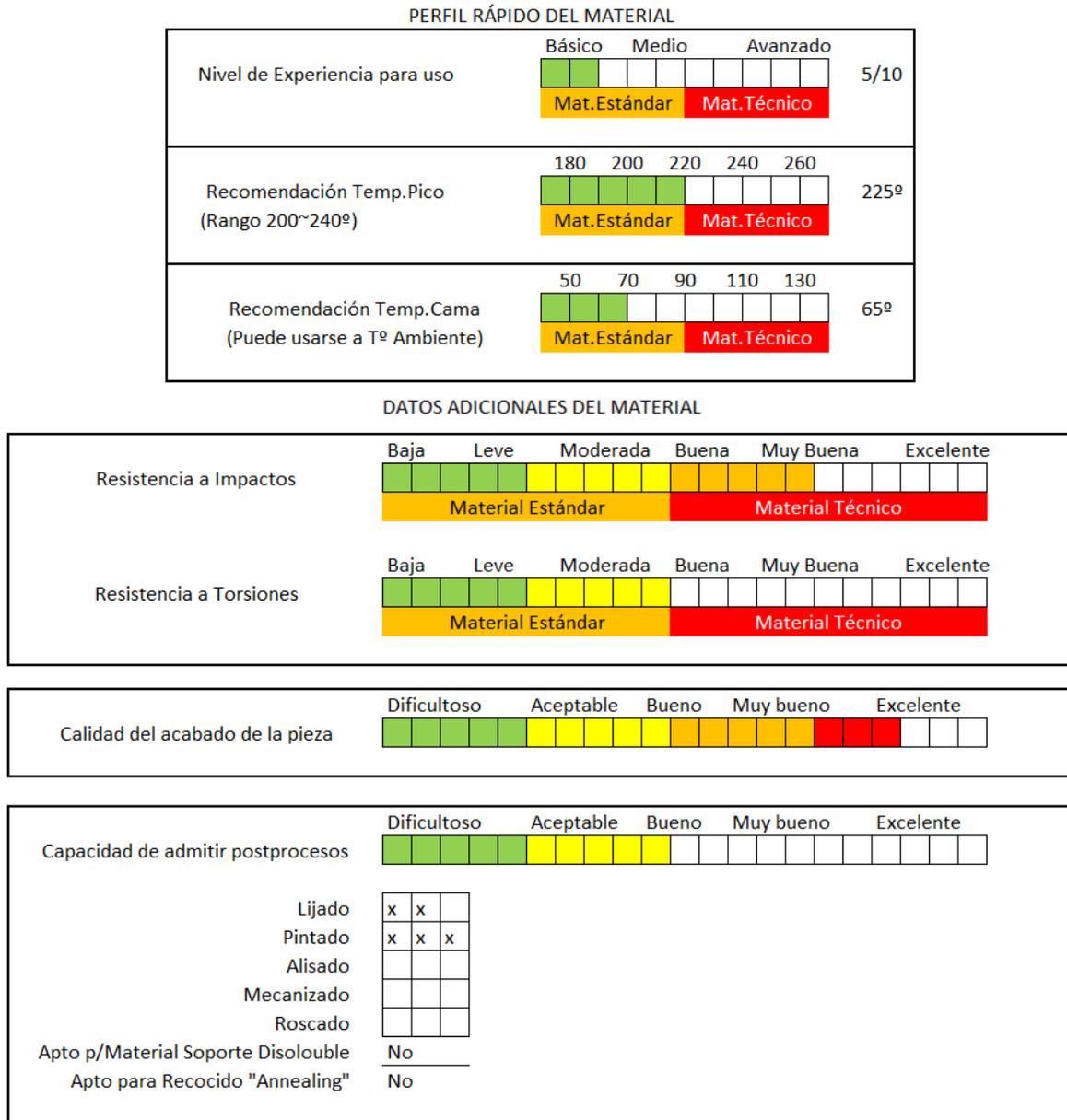


Figura 30. Perfil rápido del PETG. [35]

El PETG es uno de los filamentos más versátiles para impresión 3D, dada su resistencia y su facilidad para imprimir. Es una variante del PET (Tereftalato de polietileno), añadiéndole a su composición el Glycol-modificado, convirtiéndolo en un polímero más transparente, menos frágil y más fácil de procesar que el PET. Últimamente ha tenido gran popularidad por sus buenas propiedades mecánicas al impacto y la torsión.

5.5.3.5. Poliuretano termoplástico (TPU).

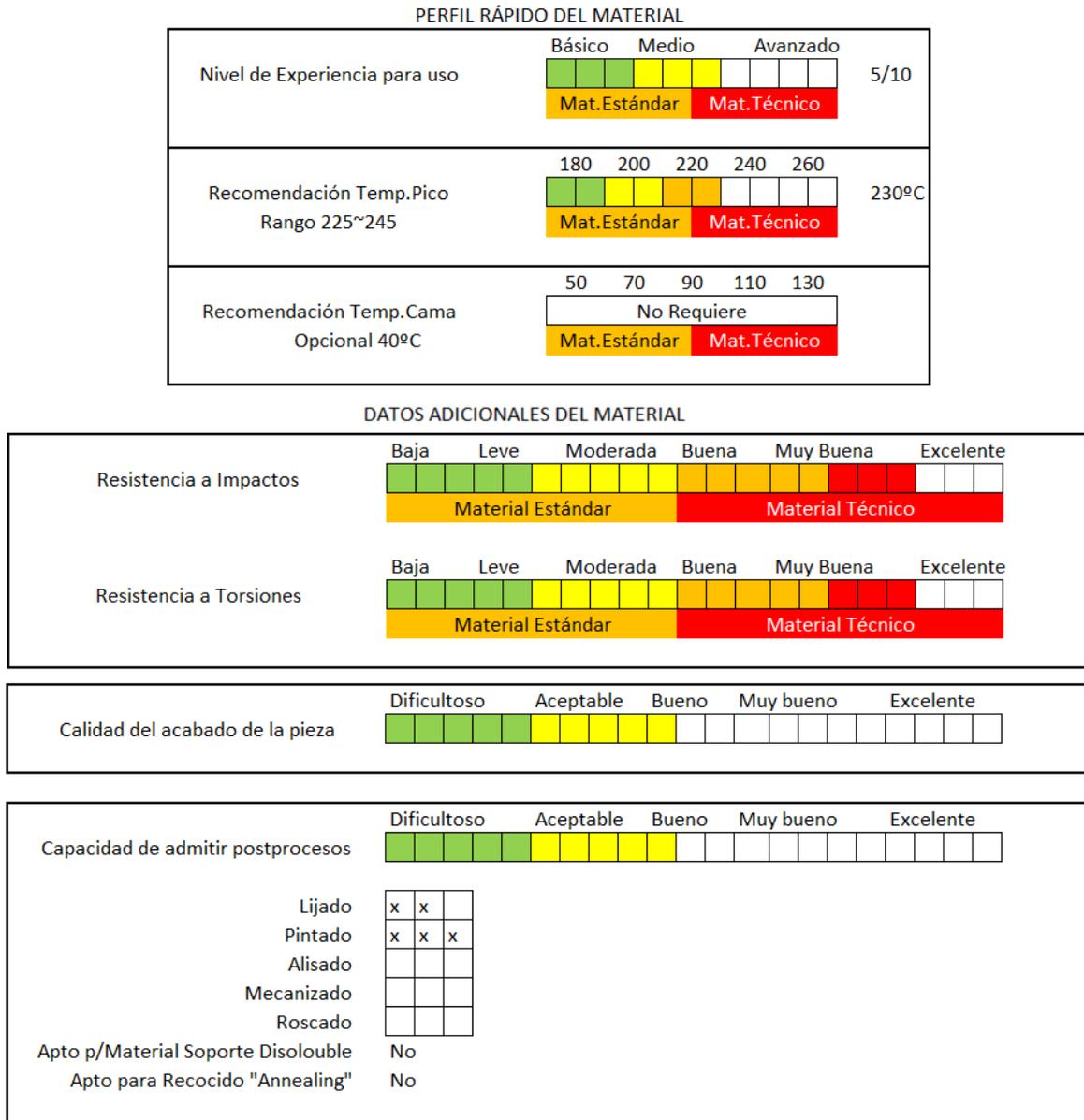


Figura 31. Perfil rápido del TPU. [35]

El TPU es un tipo de filamento flexible a base del poliuretano termoplástico, cuya principal cualidad es poder lograr piezas elásticas, dada su flexibilidad y su condición de elastómero de termoplástico, ósea que permite estirarse y retraerse en ciclos muy elevados sin alteraciones dimensionales [35]. Sin embargo, dadas sus cualidades flexibles, requiere un especial cuidado a la hora de imprimirse, puesto que puede llegar a enredarse en el extrusor causando obstrucción.

5.5.4. Slicing Software.



Figura 32. Diagrama de bloques del proceso de obtención del G-CODE.

El proceso de impresión 3D de un archivo CAD requiere 3 pasos importantes, empezando por el diseño de la pieza en un software CAD, luego esta pieza tiene que ser exportada a un formato STL, es decir que se describe en una superficie triangular sin estructurar y sin procesar por la unidad normal utilizando un sistema de coordenadas cartesiano tridimensional. Luego la pieza debe ser “rebanada” en capas que contengan los datos necesarios para su construcción.

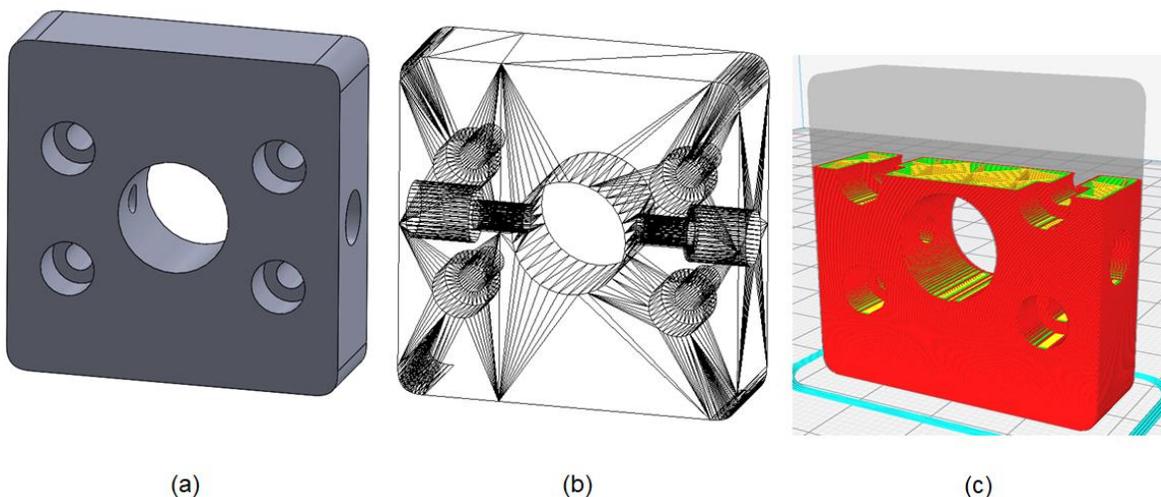


Figura 33. Proceso de diseño de una pieza para imprimirla en 3D. (a) Archivo CAD. (b) Archivo STL. (c) G-CODE graficado por el software rebanador.

Un “slicing software” o “software rebanador” es un programa que divide los modelos digitales en 3D en un código G (un nombre genérico para un lenguaje de control) que una impresora 3D puede entender, creando rutas para que las siga una impresora 3D al imprimir. Estas rutas son instrucciones para la geometría, y le indican a la impresora 3D la velocidad de impresión en varios puntos y los grosores de capa que deben adoptar. [38]

En la actualidad existen diversos tipos de software rebanadores, algunos de tipo gratuito, como Ultimaker CURA (Figura 34), o de carácter pago, como lo es Simplify3D (Figura 35). Su uso generalmente depende de la elección del usuario, aunque existen algunas impresoras que vienen con su propio software rebanador.

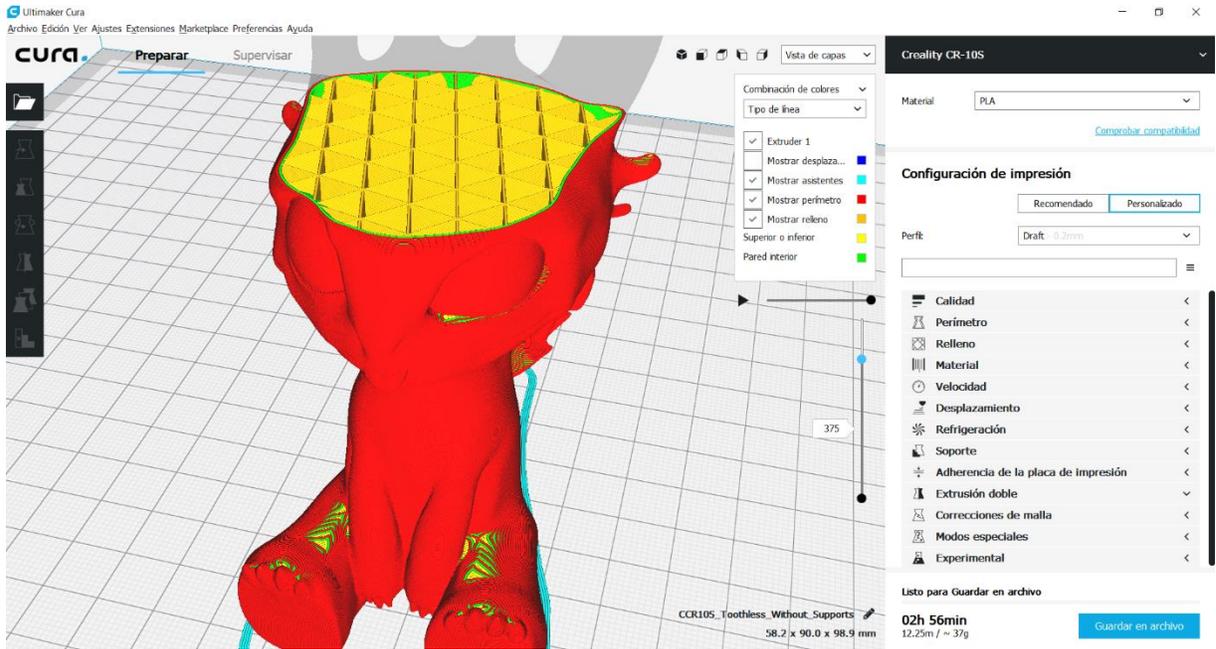


Figura 34. Slicing Software: Ultimaker Cura.

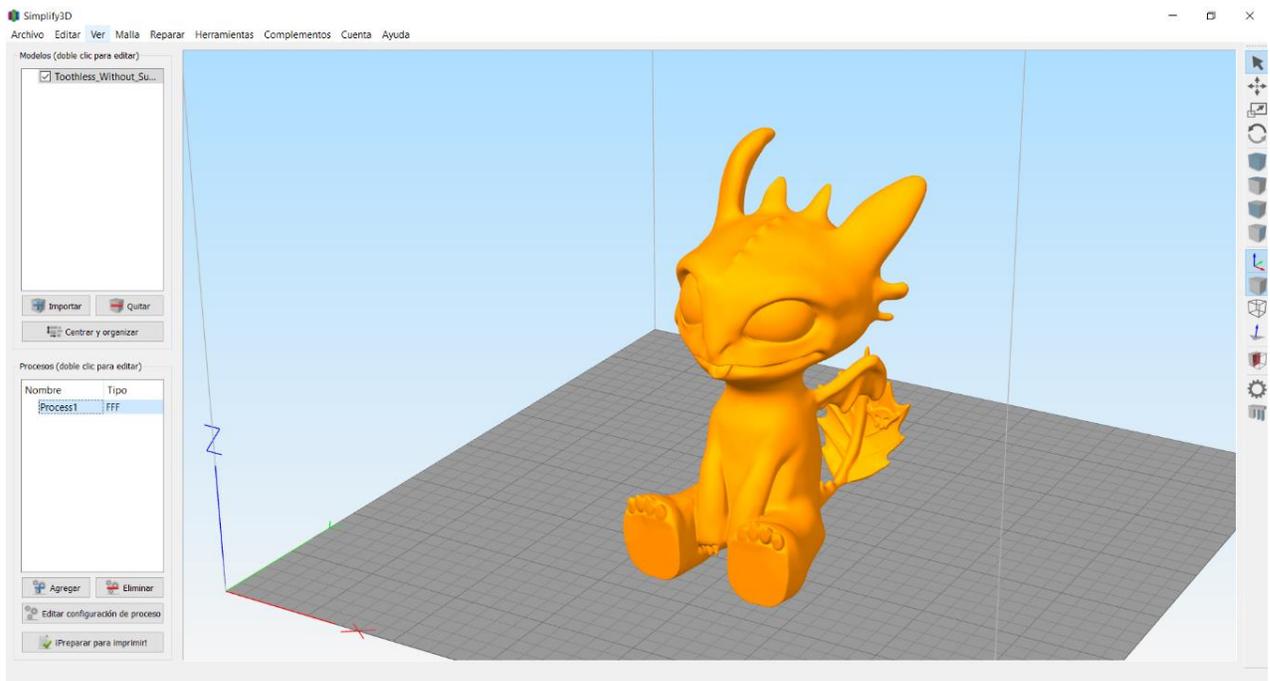


Figura 35. Slicing Software: Simplify3D.

5.5.5. Secciones de la impresión 3D por FDM.

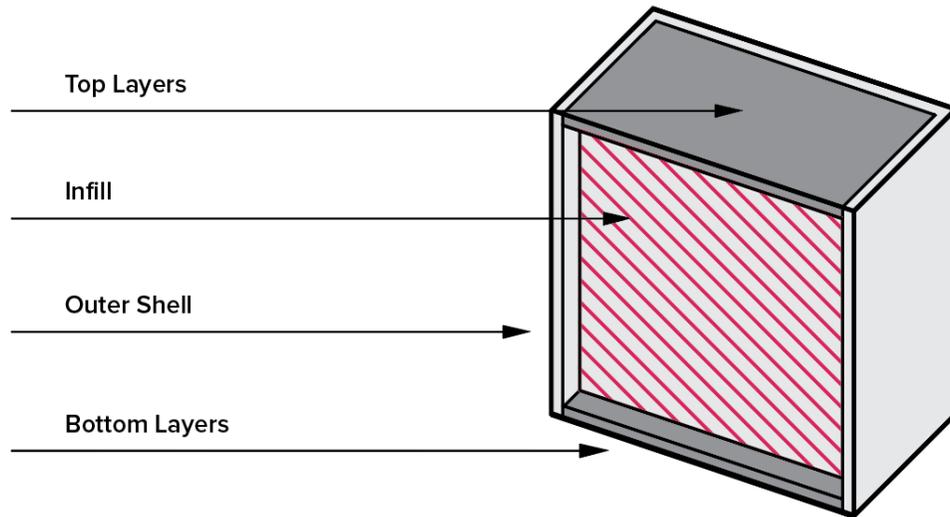


Figura 36. Las cuatro secciones de la impresión 3D por FDM. [36]

En una impresión 3D estándar por FDM se divide en cuatro secciones, las cuales son:

- **Cascarón (Shell):** son las paredes de la impresión que están expuestas al exterior del modelo.
- **Capas Inferiores (Bottom Layers):** son las partes de la impresión que está expuesta al exterior del modelo, orientadas hacia la placa de impresión.
- **Capas superiores (Top Layers):** son las partes de la impresión que están expuestas al exterior del modelo, mirando hacia arriba (hacia la boquilla).
- **Relleno (Infill):** es la estructura interna de la impresión.

5.6. Selección de parámetros óptimos para aumentar la resistencia de piezas impresas en 3D utilizando Ultimaker CURA.

5.6.1. Cascarón (Shell) – Grosor de la pared.

El cascarón de un objeto consiste en capas en el exterior, conformando las paredes del objeto. Esto significa que el grosor de la pared del cascarón está íntimamente ligada al porcentaje de relleno y a su resistencia. Cuando se aumenta el grosor de la pared, el objeto se vuelve más resistente y más capaz de manejar el estrés sin la necesidad de aumentar la densidad del relleno de la pieza.

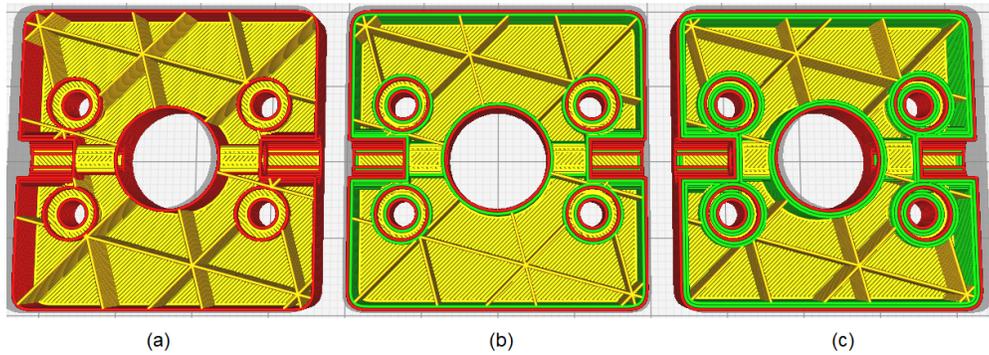


Figura 37. Vista de capas de una pieza con diferente grosor de la pared. (a) Grosor de 0.4mm. (b) Grosor de 0.8mm. (c) Grosor de 1.2mm.

Por ejemplo, observemos las tres piezas de la Figura 37, cada pieza cuenta con la misma cantidad de relleno, pero con diferente grosor de la pared. El cascarón de la pieza (a) tiene una sola pared, la (b) tiene dos y el (c) tiene tres, por lo que esta última será más resistente en el plano XY. Igualmente, podemos ver que el grosor de la pared está relacionado con la cantidad paredes de la pieza, siendo múltiplo del diámetro de la boquilla (que es de 0.4 en este caso).

Si una impresión se va a terminar lijando o alisando con productos químicos, es recomendable aumentar el grosor del cascarón, ya que los métodos de post-procesado reducen el grosor de la superficie del modelo.

5.6.2. Alternar pared extra.

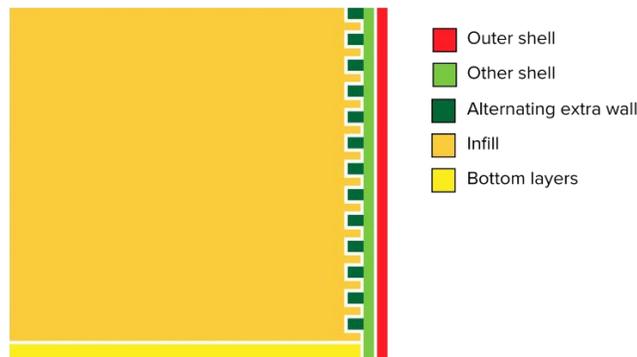


Figura 38. Proceso de alternar una pared extra en Ultimaker CURA. [36]

CURA cuenta con la configuración de “Alternar pared extra”, que agrega una pared adicional cada otra capa. De esta manera, el relleno queda atrapado entre las paredes, lo que da como resultado impresiones más fuertes. Por ejemplo, si establece el recuento de líneas en dos paredes y habilita un muro adicional alternativo, imprimirá dos muros en capas con números pares y tres muros en capas con números impares, tal y como se puede observar en la Figura 38.

5.6.3. Densidad del relleno.

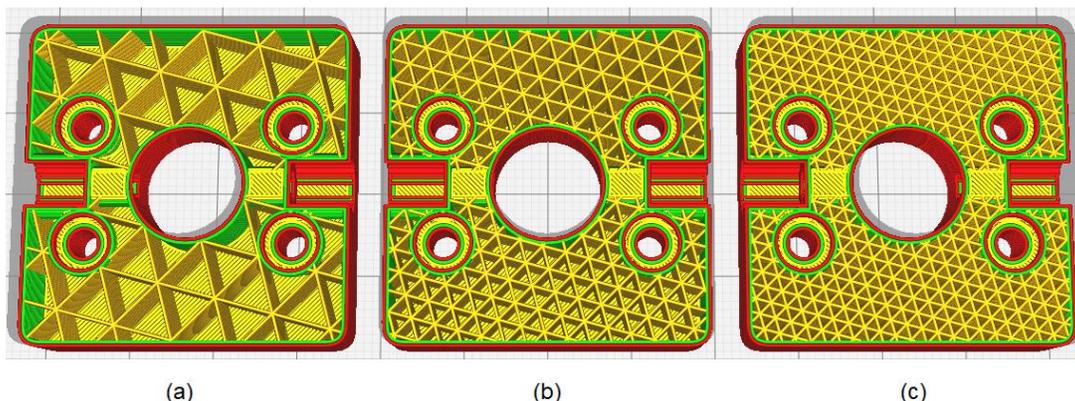


Figura 39. Tres piezas con diferente densidad del relleno. (a) 20% de relleno. (b) 50% de relleno. (c) 70% de relleno.

Al igual que la mayoría de puertas no son del todo sólidas, sino que cuentan con un núcleo de baja densidad, las piezas impresas en 3D no son sólidas, sino que cuentan con un cierto porcentaje de relleno en su interior, pues esto permite impresiones rápidas y más asequibles.

La fuerza de un diseño está directamente relacionada con la densidad de relleno. Por ejemplo, observemos las piezas de la Figura 39. Piezas con un 50% de relleno, comparadas con las de un 20%, suelen ser un 25% más fuertes, mientras que un cambio de un 50% a un 70% solo aumenta su resistencia un 10% aproximadamente [37], tal y como se puede visualizar en la Figura 40.

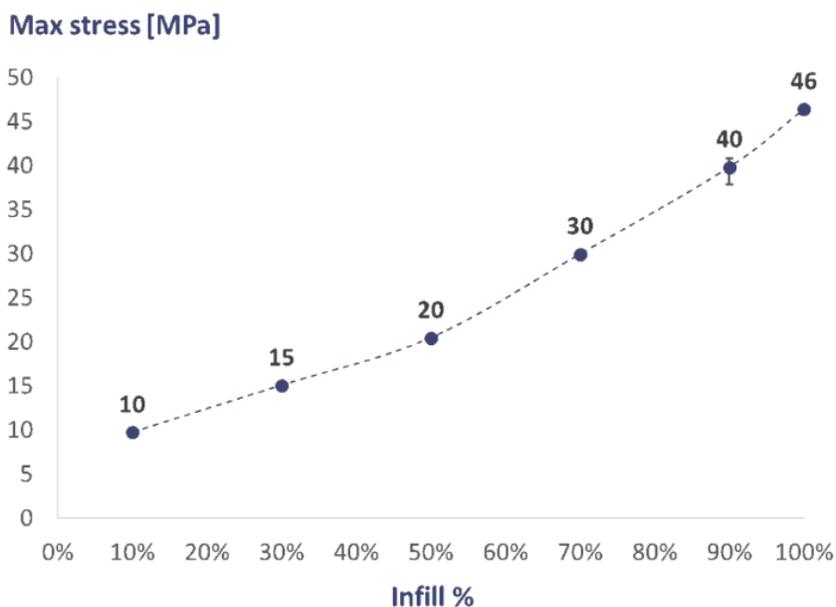


Figura 40. Prueba de resistencia de piezas en PLA con diferente densidad de relleno. [39]

Sin embargo, aumentar la densidad de relleno implica mayor cantidad de material y tiempo gastado en la impresión, por lo que el porcentaje óptimo de relleno depende de la aplicación, generalmente un 20% es más que suficiente para la mayoría de aplicaciones, sin embargo, si la pieza está sometida a esfuerzos o cargas estructurales, se recomienda un porcentaje entre el 30% y el 70%, dependiendo del caso.

5.6.4. Patrón de relleno.

La forma en cómo se imprime el relleno también afecta su resistencia, por eso la mayoría de programas rebanadores cuentan con distintos patrones, cada uno cuenta con características especiales que dependen del uso de la pieza.

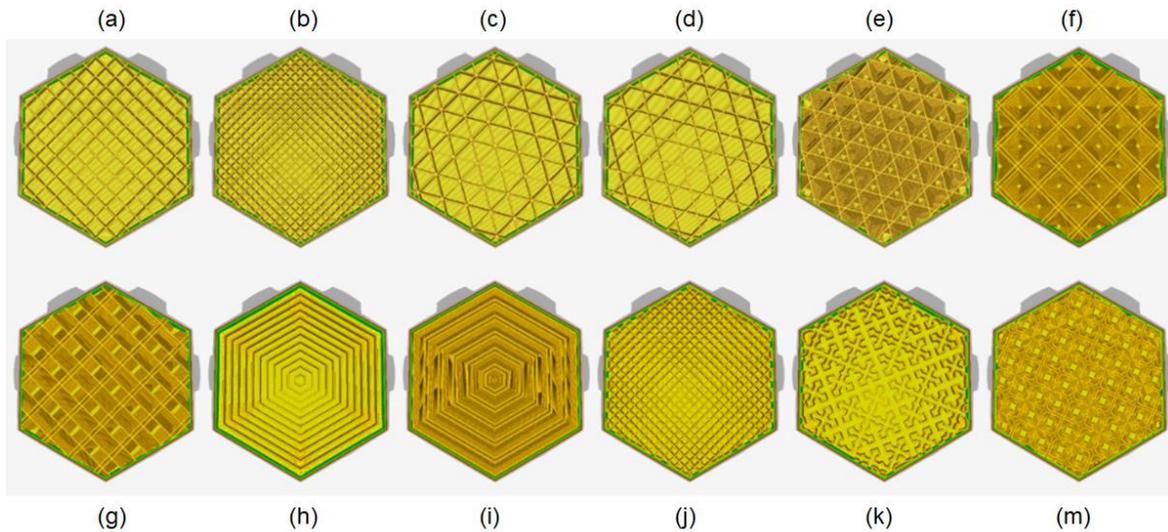


Figura 41. Patrones de relleno disponibles en CURA. (a) Rejilla. (b) Líneas. (c) Triángulos. (d) Tri-Hexágono. (e) Cúbico. (f) Cúbico sub. (g) Octeto. (h) Cuarto cúbico. (i) Concéntrico. (j) Zigzag. (k) Cruz. (m) Cruz 3D. [40]

Existen cuatro tipos de beneficios con los cuales fueron diseñados los patrones en específico, los cuales son:

- **Rellenos 2D fuertes:** se utilizan para impresiones rápidas, son resistentes en las direcciones X y.
- **Rellenos 2D rápidos:** se utilizan para modelos rápidos pero muy poco resistentes.
- **Rellenos 3D:** se utilizan para hacer que el objeto sea igual de fuerte en TODAS las direcciones.
- **Rellenos 3D concéntricos:** se utilizan para materiales flexibles.

Los patrones disponibles en CURA son:

- **Rejilla:** relleno 2D fuerte.
- **Líneas:** relleno 2D rápido.
- **Triángulos:** relleno 2D fuerte.

- **Tri-hexágono:** relleno 2D fuerte.
- **Cúbico:** relleno 3D fuerte.
- **Cúbico sub:** relleno 3D fuerte, que ahorra más material en comparación con el cúbico.
- **Octeto:** relleno 3D fuerte.
- **Cuarto Cúbico:** relleno 3D fuerte.
- **Concéntrico:** relleno 3D flexible.
- **Zigzag:** un relleno en forma de cuadrícula, que se imprime continuamente en una dirección diagonal.
- **Cruz:** relleno 3D flexible.
- **Cruz 3D:** relleno 3D flexible.

5.6.5. Reforzar zonas cruciales de una pieza.

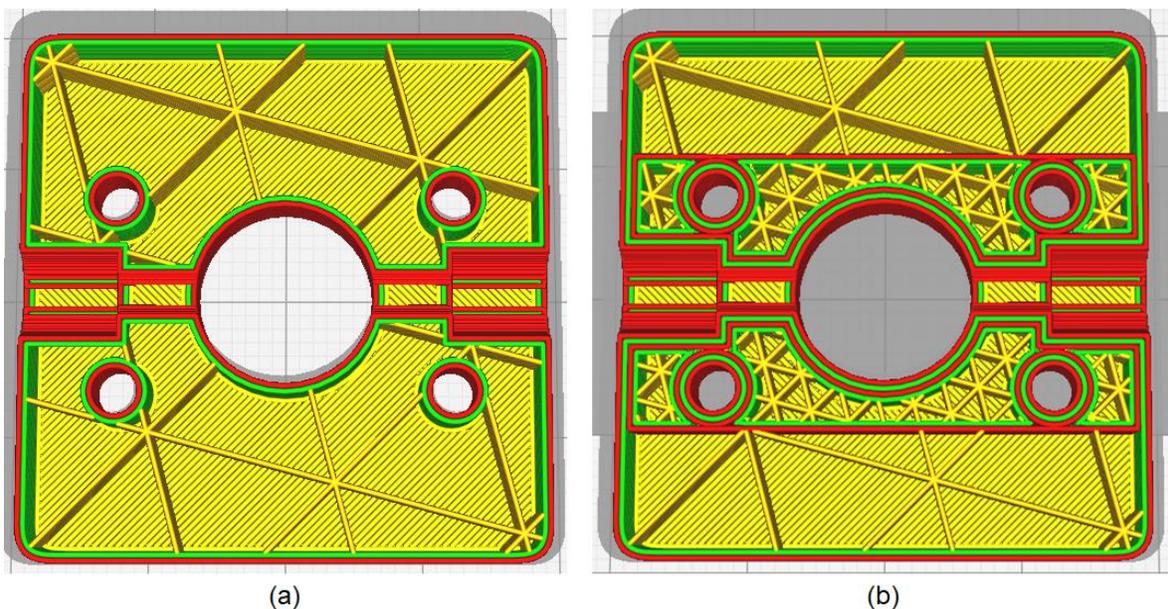
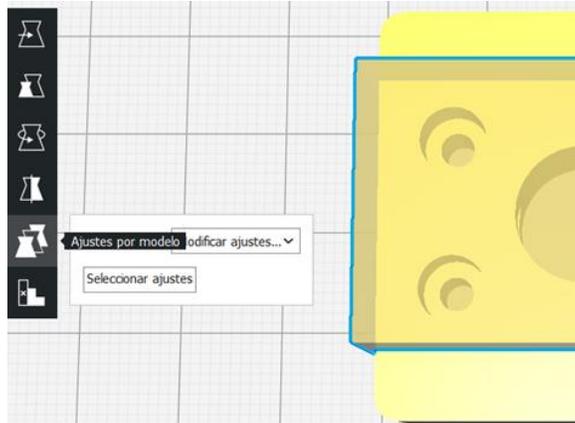


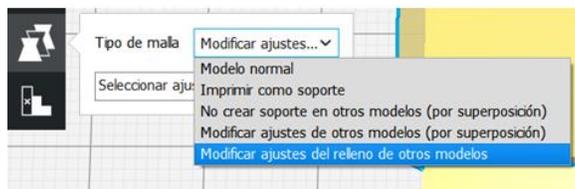
Figura 42. Reforzar zonas cruciales de una pieza. (a) Pieza no reforzada. (b) Pieza reforzada.

En piezas mecánicas, muchas veces existen ciertas zonas especiales donde conviene tener mayor cantidad de relleno y otras donde no, por lo que CURA brinda la posibilidad de reforzar zonas específicas.

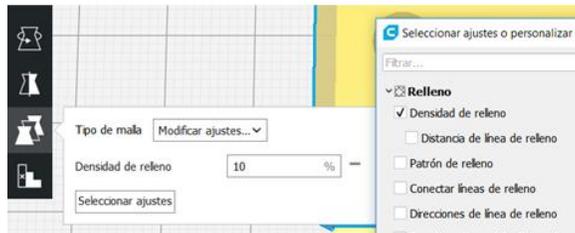
Para realizar este procedimiento solo se requiere la pieza a reforzar y una pieza base del tamaño o la forma de la zona a reforzar. Se posiciona la pieza base en la zona donde se desea reforzar, se selecciona dicha pieza y se oprime en “Ajustes por modelo”, luego se selecciona en “Ajustes del relleno de otros modelos”, luego en “selección de ajustes”, se busca la opción de “Densidad de relleno” y se ajusta al relleno deseado. El proceso se muestra claramente en la Figura 43.



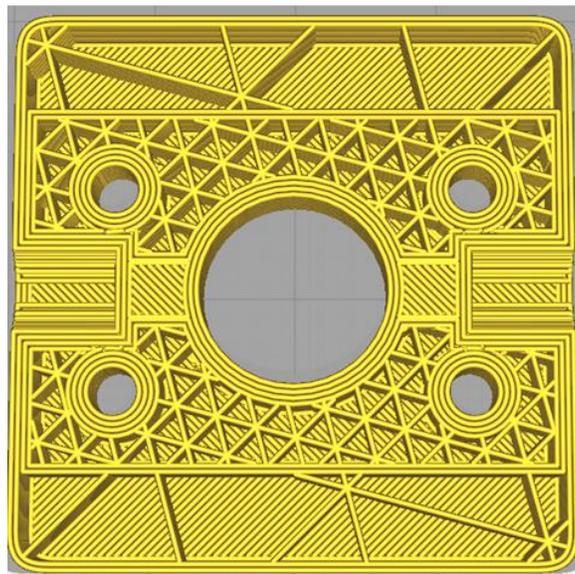
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 43. Pasos para reforzar zonas cruciales. (a) Paso 1. (b) Paso 2. (c) Paso 3. (d) Resultado final.

5.7. Metodología de diseño de sistemas mecatrónicos.

Una de las metodologías más reconocidas para el diseño de sistemas mecatrónicos es la metodología propuesta por Kevin Craig, la cual aborda los principales desafíos del diseño mecatrónico a través del modelado y la simulación, facilitando la comprensión del comportamiento conceptual del sistema propuesto y la optimización del mismo [24]. Esta metodología promueve el desarrollo del algoritmo de control bajo varios escenarios y probando el controlador bajo varios escenarios simulados en tiempo real antes de conectarlo a la planta real. Su objetivo es reducir el riesgo de no cumplir con los requisitos funcionales al permitir la verificación temprana y continua a lo largo de todo el flujo de trabajo del diseño. El diagrama de flujo de la Figura 44 ilustra esta metodología e indica la secuencia a seguir del mismo.

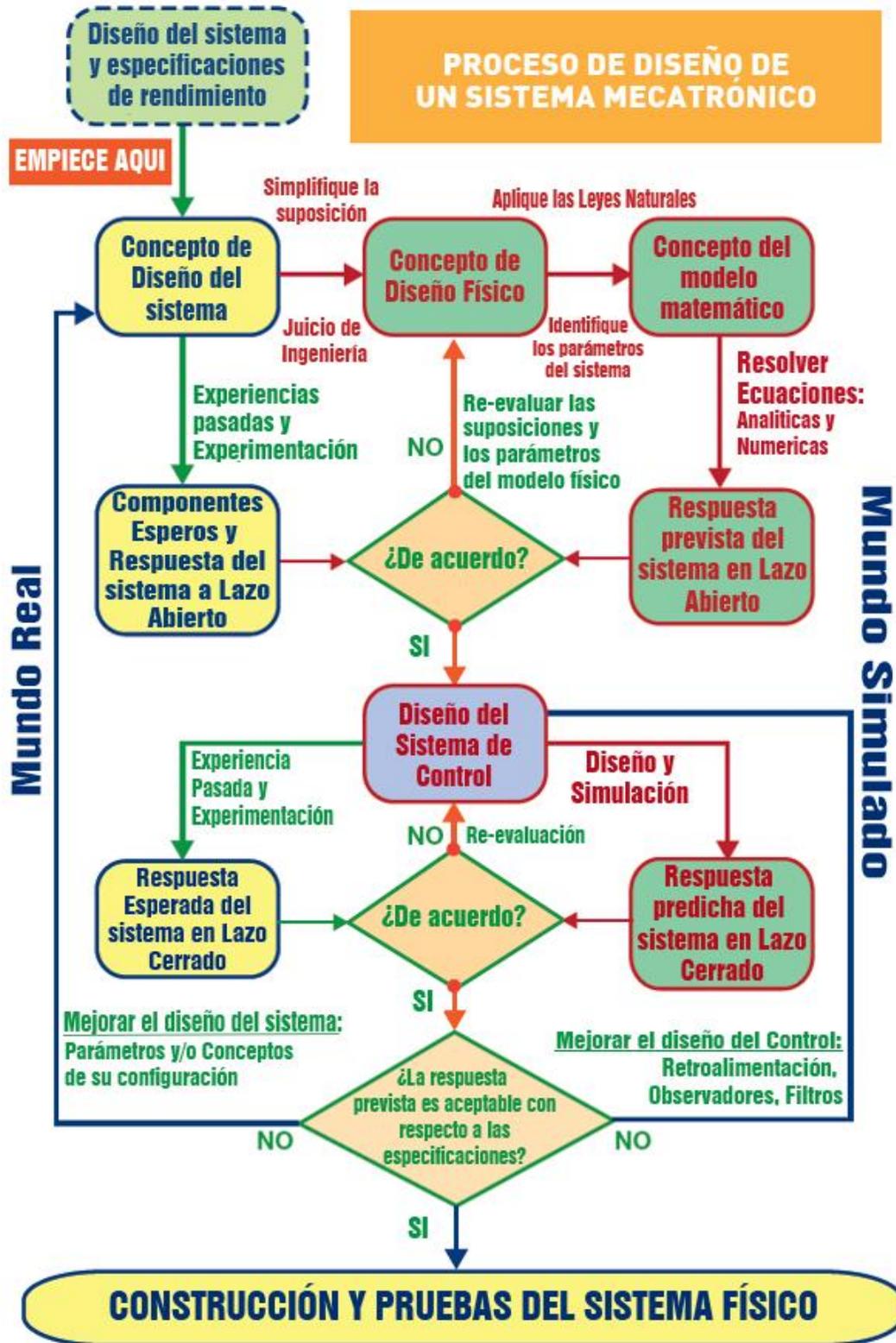


Figura 44. Metodología de Diseño Mecatrónico creado por Kevin Craig. [24]

5.8. Linealización aproximada de sistemas.

La linealización es un procedimiento que permite aproximar el modelo no lineal, por otro que si lo es y que cumple con las propiedades de los sistemas lineales, en particular el principio de superposición. Esta aproximación no tiene validez universal sino únicamente en el entorno del punto de funcionamiento elegido (*punto de equilibrio*), por lo que su aplicación está indicada para aquellos sistemas cuyas señales sufren pequeñas variaciones alrededor de sus valores de equilibrio [49].

- **Punto de equilibrio:** un punto $x = x^*$ en el espacio de estados es un punto de equilibrio si cuando el estado inicial del sistema es x^* , el estado permanece en x^* en todo tiempo futuro. Por lo tanto, un punto de equilibrio es un punto en el cual todas las razones de cambio de los estados valen cero.

5.8.1. Linealización por series de Taylor.

Dada la función de una única variable $y = f(x)$ y un punto de equilibrio igual a $y_0 = f(x_0)$, al desarrollar en serie de Taylor alrededor de dicho punto se obtiene la función:

$$y = f(x_0) + \left[\frac{df}{dx} \right]_0 (x - x_0) + \left[\frac{d^2f}{dx^2} \right]_0 (x - x_0)^2 + \dots + \left[\frac{d^n f}{dx^n} \right]_0 (x - x_0)^n \quad (3)$$

Si se toma en cuenta solo los dos primeros términos de la ecuación anterior, obtenemos una aproximación por recta tangente, de tal forma que:

$$y \approx f(x_0) + \left[\frac{df}{dx} \right]_0 (x - x_0) \quad (4)$$

Tomando en cuenta que el punto de equilibrio fue definido inicialmente como $y_0 = f(x_0)$, la ecuación se transforma en:

$$y - y_0 \approx \left[\frac{df}{dx} \right]_0 (x - x_0) \quad (5)$$

Lo que es igual a:

$$\Delta y \approx K \Delta x \quad (6)$$

En donde K es la derivada de la función con respecto a la variable particularizada y su valor depende del punto de funcionamiento elegido, por lo tanto, el modelo linealizado también depende de dicho punto. Esto se puede observar en la siguiente gráfica:

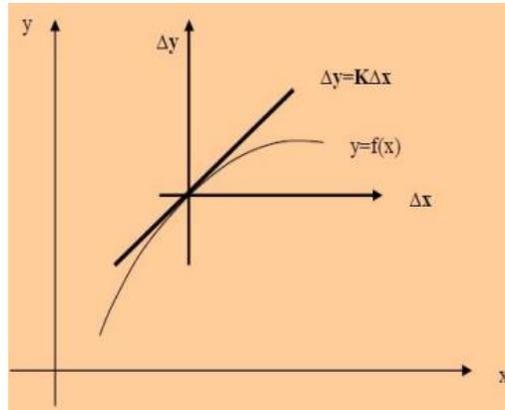


Figura 45. Explicación gráfica de la linealización por series de Taylor. [49]

Tal y como se puede visualizar en la gráfica anterior, la aproximación entre la curva original (modelo no lineal) y la recta (modelo linealizado), es tanto más exacta cuando más cerca estemos del punto elegido. Una vez linealizado el modelo, las variables originales se reemplazan por las variables incrementales recto del punto de funcionamiento seleccionado.

En el caso que la función a linealizar dependa de n variables, bastará con sustituir las derivadas totales por derivadas parciales con respecto a cada una de las variables.

Ahora, dada $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ que cumple con $y_0 = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0})$, se procede a desarrollar la serie de Taylor y al eliminar los términos de segundo orden se obtiene:

$$y = f(x_{10}, x_{20}, \dots, x_{n0}) + \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\partial x_j} \right|_{x_{j0}} (x_j - x) \quad (7)$$

Lo que es igual a:

$$\Delta y \approx k_1 \Delta x_1 + \dots + k_n \Delta x_n \quad (8)$$

5.8.2. Representación en espacio de estados.

Un sistema no lineal se representa mediante las ecuaciones de estado en la siguiente forma matricial:

$$\dot{x} = f(x(t), u(t)) \quad (9)$$

En donde:

- $x(t)$ representa el vector de estados de tamaño $n \times 1$.
- $u(t)$ representa el vector de entradas de tamaño $p \times 1$.
- $f(x(t), u(t))$ denota un vector función de $n \times 1$.

Al realizar una expansión de las ecuaciones de estado no lineales utilizando las series de Taylor y descartando los términos de orden superior, el resultado es una aproximación lineal del sistema:

$$\dot{x} = f(x_0, u_0) + \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial x_j} \right|_{x_0, u_0} (x_j - x_{0j}) + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f(x, u)}{\partial u_j} \right|_{x_0, u_0} (u_j - u_{0j}) \quad (10)$$

Definiendo:

$$\Delta x_i = x_i - x_{0i} \quad (11)$$

$$\Delta \dot{x}_i = \dot{x}_i - \dot{x}_{0i} \quad (12)$$

$$x_{0i} = \dot{f}(x_0, u_0) \quad (13)$$

$$\Delta u_j = u_j - u_{0j} \quad (14)$$

Se obtiene que:

$$\Delta \dot{x}_i = \sum_{j=1}^n \left. \frac{\partial f_i(x, u)}{\partial x_j} \right|_{x_0, u_0} \Delta x_j + \sum_{j=1}^p \left. \frac{\partial f_i(x, u)}{\partial u_j} \right|_{x_0, u_0} \Delta u_j \quad (15)$$

Por lo tanto, utilizando las ecuaciones (6) y (15), la representación en espacio de estados queda de la forma:

$$\Delta \dot{x} = A \Delta x + B \Delta u \quad (16)$$

$$\Delta \dot{y} = C \Delta x + D \Delta u \quad (17)$$

En donde las matrices constantes (A y B), llamadas matrices Jacobianas, que definen a esta aproximación lineal están dadas por:

$$A = \left. \frac{\partial f}{\partial x} \right|_{(X, U)} \quad (18)$$

$$B = \left. \frac{\partial f}{\partial u} \right|_{(X, U)} \quad (19)$$

6. METODOLOGÍA

Para desarrollar este proyecto se plantea usar la metodología de diseño mecatrónico de Kevin Craig presentada en la sección del marco teórico de este documento, para la cual se planteó las siguientes actividades con el fin de lograr de los objetivos propuestos:

- Recopilación bibliografía, estado del arte y Marco teórico. Con base a esta información, analizar la información recolectada.
- Definir los criterios y especificaciones requeridos en el sistema según la aplicación designada.
- Evaluar los diferentes sistemas de locomoción de los robots esféricos y seleccionar el sistema de locomoción que más se adapte a los requerimientos previstos. Con base al sistema seleccionado, profundizar en la técnica escogida.
- Realizar la dinámica del sistema, con el fin de crear un modelo matemático del mismo. Con este modelo, simular el comportamiento del sistema en lazo cerrado.
- Realizar el diseño conceptual del prototipo, incluyendo el diseño mecánico, y electrónico del prototipo. Para luego realizar la respectiva selección de actuadores e instrumentación.
- Evaluar si el diseño realizado cumple con los requerimientos escogidos para el sistema.
- Realizar el diseño del sistema de control, para lo cual se debe escoger la estrategia de control óptima para el sistema. Se simula el sistema de control en lazo cerrado y se verifica que cumpla con la respuesta requerida en el sistema.
- Construcción del prototipo, implementando el sistema de control y realizando las debidas pruebas experimentales de su uso. Para luego elaborar los respectivos documentos de ingeniería.

Para una mejor visualización de esta serie de pasos, se procede a adaptar el diagrama de Kevin Craig al proyecto, utilizando las actividades previamente planteadas, el cual se puede observar en la Figura 46.

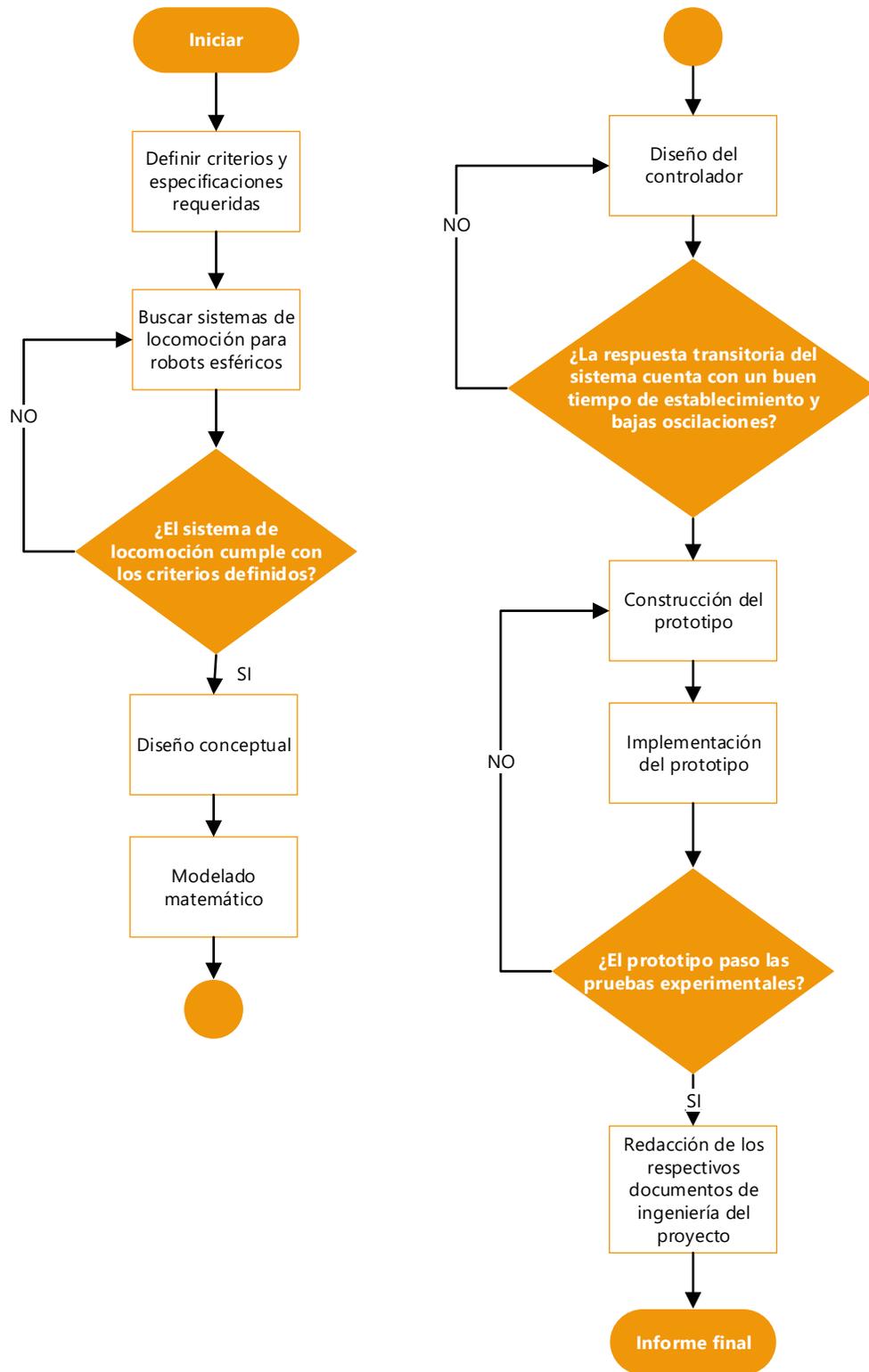


Figura 46. Diagrama de Flujo de la metodología planteada.

6.1. Análisis funcional

El análisis funcional permite evadir ciertos atajos clásicos del diseño como la falta de objetividad, la mala gestión de las prioridades o la elección de la primera opción que se le puede ocurrir a un diseñador, por lo que la meta del análisis funcional es optimizar el diseño de productos al apoyarse sobre las funciones que debe realizar el producto. Una vez identificadas, el equipo de diseño puede medir su estado de avance y éxito en relación a criterios objetivos. [25]

Para realizar el análisis funcional, se optó por utilizar la metodología APTE, la cual se subdivide en 3 etapas presentadas en orden cronológico:

- **Análisis de la necesidad:** genera el objetivo que soluciona la necesidad.
- **Análisis funcional de la necesidad:** genera un listado de funciones.
- **Análisis funcional técnico:** genera el listado de soluciones técnicas.

6.1.1. Análisis de la necesidad.

El método de análisis de la necesidad se apoya en dos hipótesis:

- **Hipótesis 1:** La satisfacción de la necesidad es lograda al utilizar el producto a diseñar. [25]
- **Hipótesis 2:** La necesidad es satisfecha por el cambio de estado del objeto sobre el que se obra. [25]

Para el cumplimiento de estas primicias, se planteó el siguiente diagrama:

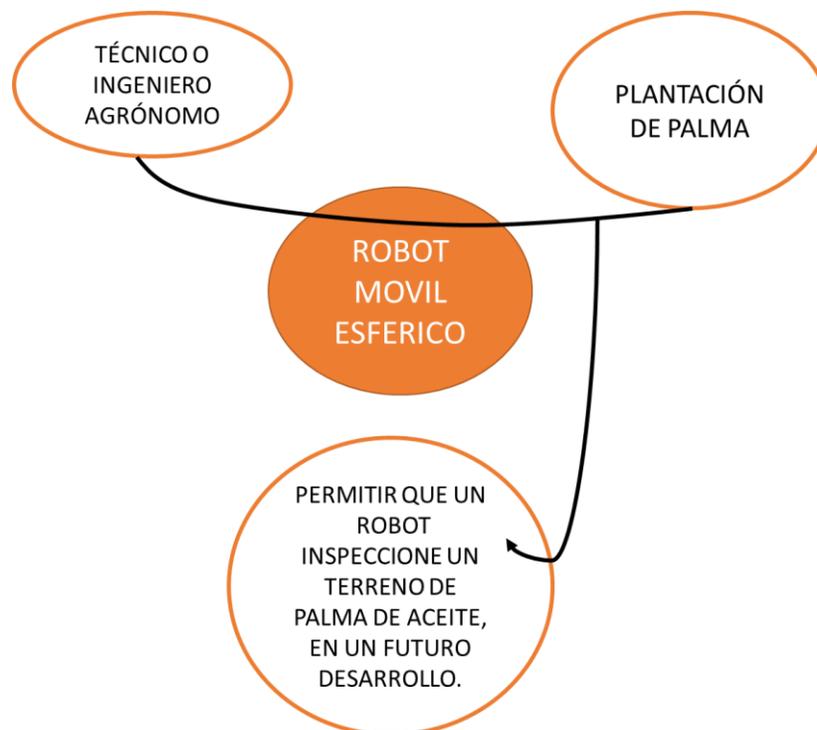


Figura 47. Diagrama del Toro del proyecto.

6.1.2. Análisis funcional de la necesidad.

De igual forma, el análisis de funcional de la necesidad se apoya en dos hipótesis:

- **Hipótesis 1:** la necesidad es satisfecha al utilizarse el producto. [25]
- **Hipótesis 2:** el producto es un generador de servicios o prestaciones para el cliente. [25]

Para cumplir estas hipótesis, la metodología APTE plantea tres etapas:

1. **Identificación de la fase de vida del producto:** diseño, fabricación, mantenimiento, utilización, actualización, etc. [25]
2. **Para cada fase de vida del producto:** [25]
 - a. Identificar y caracterizar los elementos de medio exterior.
 - b. Identificar las funciones de servicio.
 - c. Caracterizar las funciones de servicio.
3. **Redactar un listado de funciones principales.**

Siguiendo el orden lógico de cada etapa, en la Figura 48 se planteó el respectivo diagrama del pulpo, en donde se encuentran los elementos de medio exterior, las funciones principales y restrictivas del proyecto.

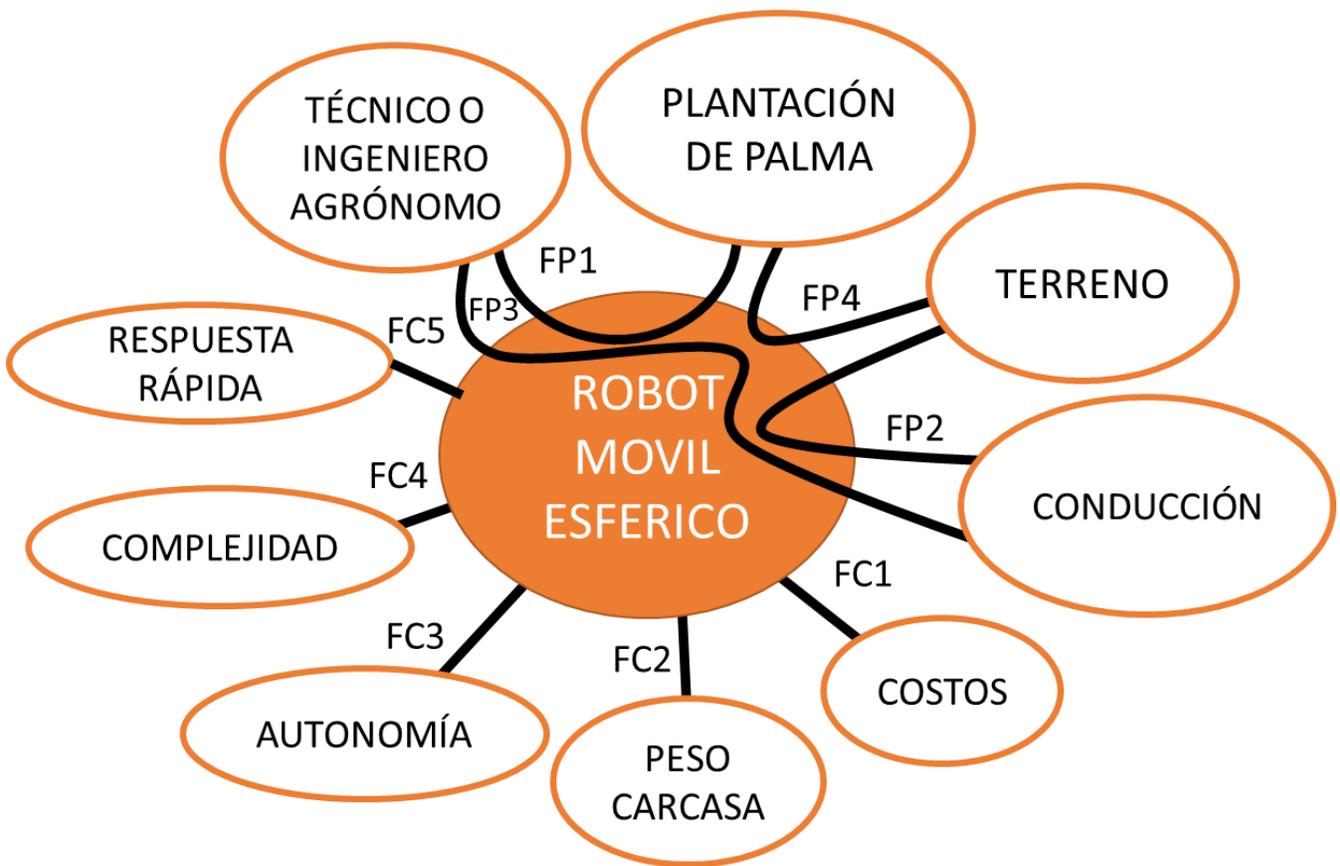


Figura 48. Diagrama del pulpo del proyecto.

En donde las funciones principales son:

- **FP1.** Permitir que el robot inspeccione un terreno de palma de aceite en un futuro desarrollo.
- **FP2.** Garantizar la estabilidad del robot a la hora de conducir el robot en un cierto entorno.
- **FP3.** Permitir el control del movimiento del robot.
- **FP4.** Proteger el mecanismo de locomoción de las condiciones externas del terreno.

Y las funciones restrictivas son:

- **FC1.** Mantener bajo los costos del prototipo.
- **FC2.** Mantener el menor peso posible en la carcasa de la esfera.
- **FC3.** Garantizar un grado de autonomía energética al robot.
- **FC4.** Mantener un grado de complejidad media en el diseño.
- **FC5.** Garantizar una respuesta rápida del robot ante los comandos mandados.

6.1.3. Análisis funcional técnico.

En esta parte del análisis funcional se busca descomponer las funciones principales de tal forma de que se pueda llegar a unas soluciones técnicas. Para alcanzar este objetivo se plantea usar el diagrama FAST, el cual describe el sistema bajo estudio y permite explorar soluciones innovadoras partiendo del “COMO” y terminando en el “PORQUE”. [26]

Para desarrollar el diagrama FAST se procedió a desglosar las posibles soluciones a las funciones principales definidas anteriormente y llegando así a las posibles soluciones técnicas.

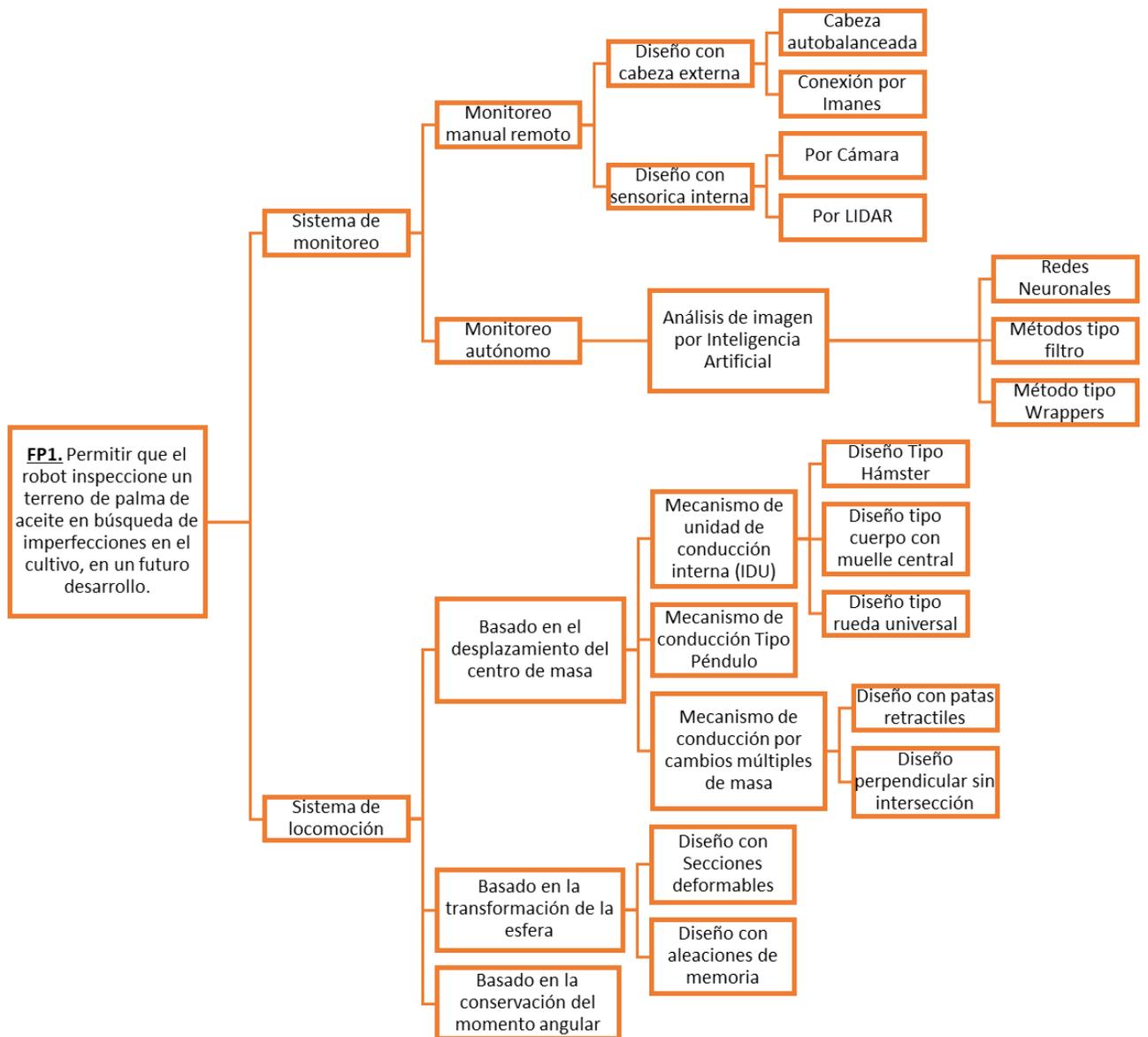


Figura 49. Diagrama FAST de la función principal 1.

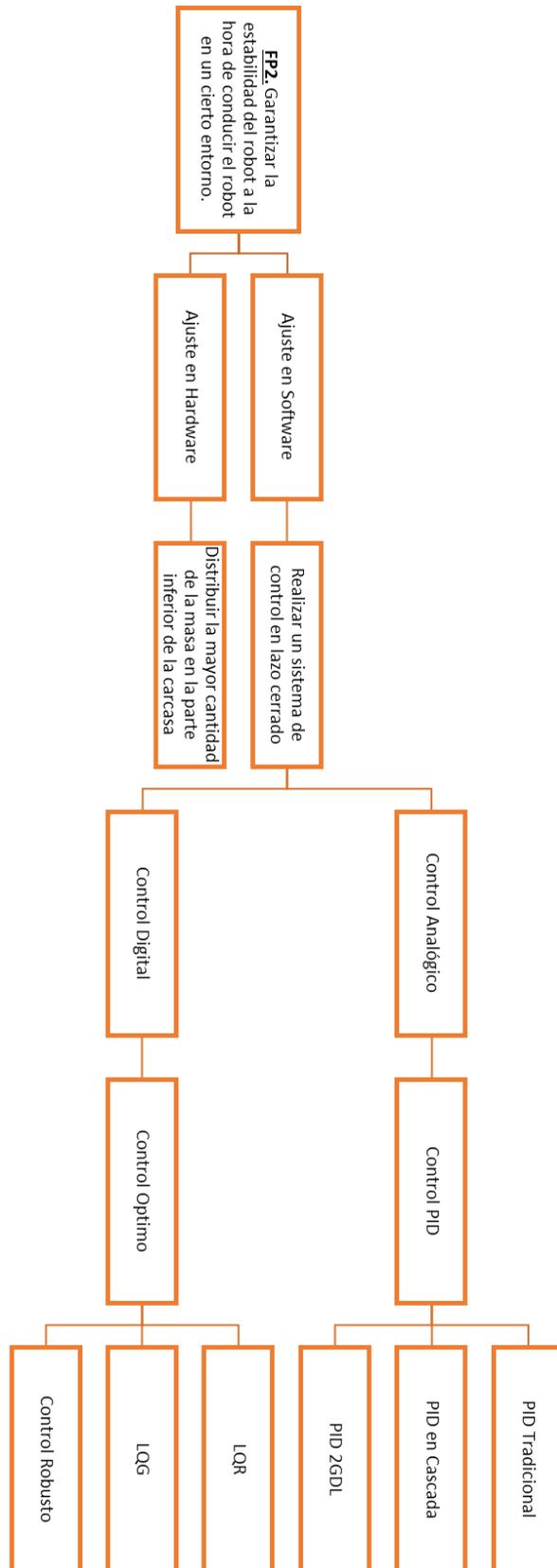


Figura 50. Diagrama FAST de la función principal 2.

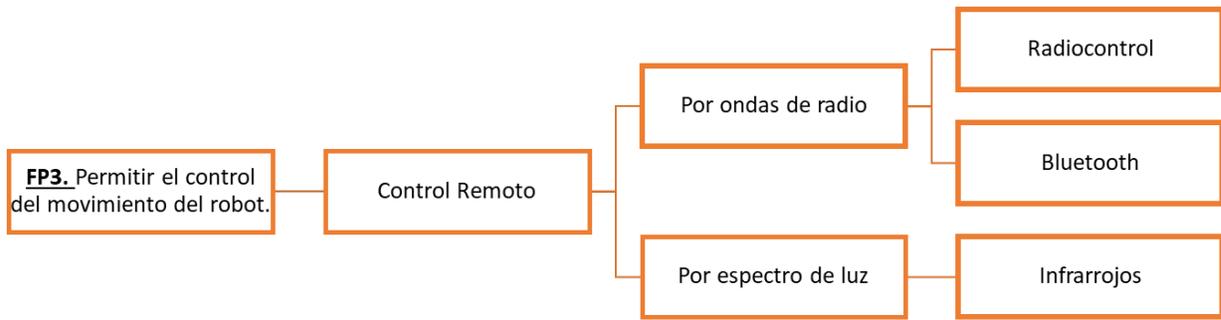


Figura 51. Diagrama FAST de la función principal 3.



Figura 52. Diagrama FAST de la función principal 4.

6.1.4. Selección de las soluciones técnicas.

Para poder seleccionar las soluciones técnicas que se adapten a mejor al proyecto, se procede a utilizar la matriz de selección de despliegue de la función de calidad (QFD, por sus siglas en ingles), la cual me permite evaluar las distintas soluciones técnicas con base en los requerimientos del diseño utilizando los siguientes puntajes: “1” para bajo, “3” para medio y “9” para alto. Por lo que se procede a transformar las funciones principales y restrictivas, en criterios de evaluación para as soluciones técnicas, los cuales son:

- **FP1:** Maniobrabilidad.
- **FP2:** Controlabilidad.
- **FP3:** Alcance de la señal.
- **FP4:** Resistencia y estanqueidad.
- **FC1:** Costos.
- **FC2:** Baja masa.
- **FC3:** Eficiencia energética.
- **FC4:** Complejidad.
- **FC5:** Recepción y velocidad.

Tomando en cuenta lo anterior, se procedió a evaluar las soluciones técnicas en las siguientes matrices QFD:

Tabla 1. Matriz QFD, sistemas de locomoción basados en el desplazamiento del CM.

Sistemas de Locomoción: Basados en el desplazamiento del CM						
	Valor de la necesidad	Tipo Hámster	Tipo cuerpo con muelle central	Tipo Rueda Universal	Tipo Péndulo	Tipo Conducción por cambios múltiples de masa
Maniobrabilidad		3	3	9	3	9
Controlabilidad	3	3	1	3	9	1
Alcance Señal	5					
Resistencia y Estanqueidad	5	3	1	1	3	1
Costos	5	9	9	3	3	1
Baja Masa	3					
Eficiencia Energética	2	1	3	1	3	3
Complejidad	5	9	3	3	3	1
Recepción y Velocidad	4					
Total		128	86	82	90	60

Tabla 2. Matriz QFD, sistemas de locomoción basados en la transformación de la esfera y el CMA.

Sistemas de Locomoción: Transformación de la esfera				CMA
	Valor de la necesidad	Diseño con secciones deformables	Diseño con aleaciones de memoria	Diseño basado en la CMA
Maniobrabilidad	4	1	1	9
Controlabilidad	3	1	1	3
Alcance Señal	5			
Resistencia y Estanqueidad	5	1	1	9
Costos	5	1	1	1
Baja Masa	3			
Eficiencia Energética	2	1	1	9
Complejidad	5	1	1	1
Recepción y Velocidad	4			
Total		24	24	118

Tabla 3. Matriz QFD, monitoreo remoto.

Monitoreo remoto				
	Valor de la necesidad	Cabeza externa		Diseño con sensorica interna
		Diseño con cabeza autobalanceada	Diseño con cabeza por conexión con imanes	
Criterios				
Maniobrabilidad	4	3	9	3
Controlabilidad	3	3	9	1
Alcance Señal	5			
Resistencia y Estanqueidad	5			
Costos	5	1	1	3
Baja Masa	3			
Eficiencia Energética	2	9	3	9
Complejidad	5	3	1	3
Recepción y Velocidad	4			
Total		59	79	63

Tabla 4. Matriz QFD, control remoto.

Control Remoto				
	Valor de la necesidad	Por ondas de radio		Por luz
		Radiocontrol	Bluetooth	Infrarrojos
Criterios				
Maniobrabilidad	4			
Controlabilidad	3			
Alcance Señal	5	9	3	1
Resistencia y Estanqueidad	5			
Costos	5	3	3	9
Baja Masa	3			
Eficiencia Energética	2			
Complejidad	5	3	3	9
Recepción y Velocidad	4	9	3	1
Total		111	57	99

Tabla 5. Matriz QFD, Cascaron esférico.

Cascaron Esférico					
	Valor de la necesidad	Con Armazón		Sin Armazón	
		Armazón Impreso en 3D	Armazón en Aluminio	Cascaron en Acrílico	Cascaron Impreso en 3D
Criterios					
Maniobrabilidad	4				
Controlabilidad	3				
Alcance Señal	5				
Resistencia y Estanqueidad	5	3	9	1	3
Costos	5	9	1	1	9
Baja Masa	3	1	9	9	9
Eficiencia Energética	2				
Complejidad	5	3	3	3	3
Recepción y Velocidad	4				
Total		78	92	52	102

Con base en las matrices QFD, las soluciones técnicas seleccionadas son las siguientes:

- **Sistema de locomoción:** diseño basado en el desplazamiento del centro de masa utilizando un sistema tipo hámster.
- **Monitoreo remoto:** diseño con cabeza externa utilizando conexión por imanes.
- **Control remoto:** utilizando ondas de radio tipo radiocontrol (RC).
- **Cascaron esférico:** diseño sin armazón y cascarón impresos en 3D.

7. MODELADO MATEMÁTICO.

7.1. Profundización teórica del sistema de locomoción seleccionado.

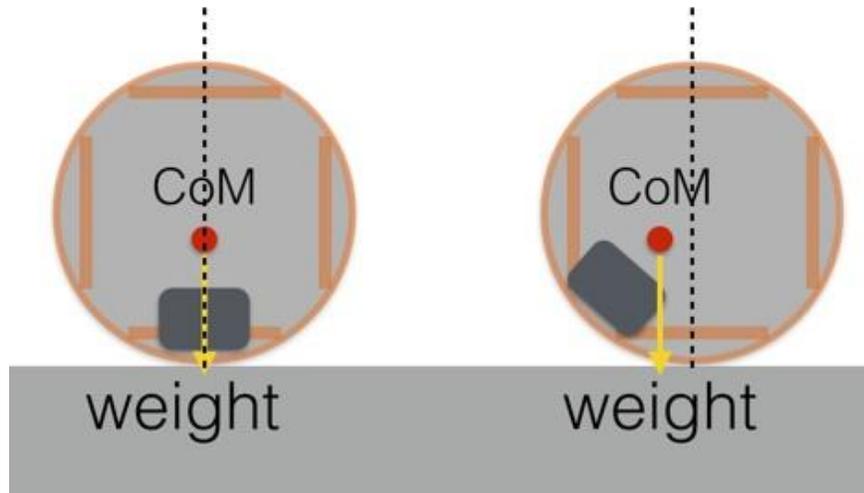


Figura 53. Fundamento del diseño basado en el desplazamiento del centro de masa. [27]

Todos los diseños basados en el desplazamiento del centro de masa se rigen por el mismo principio básico. Cuando el centro de masa se desplaza lejos de su centroide, se genera un torque externo en la esfera, lo cual aumenta el momento angular y hace que ruede. Una vez que la esfera comience a rodar, la masa interior podría permanecer en el punto más bajo, excepto que haya una fricción externa que requiera que la masa continúe subiendo para proporcionar más torque, esa fricción externa es producida por la superficie de contacto por donde rodara la esfera. Cuando la masa interior se mueve hacia un costado (Figura 54), una fuerza externa hará que la esfera se mueva horizontalmente: la fricción.

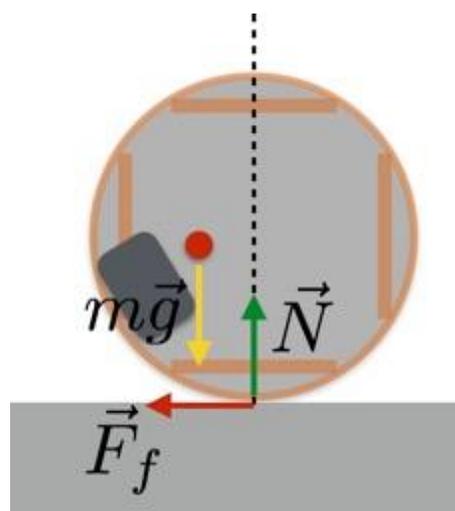


Figura 54. Sistema de fuerzas básicas en un robot esférico. [27]

Ahora, el diseño tipo hámster es típicamente un vehículo de dos ruedas que se encuentra dentro de la esfera. El movimiento recto se hace girando ambas ruedas actuadas en la misma dirección (Figura 55a). El movimiento hacia los lados se realiza girando las ruedas en direcciones opuestas, utilizando el principio de conducción diferencial (Figura 55b).

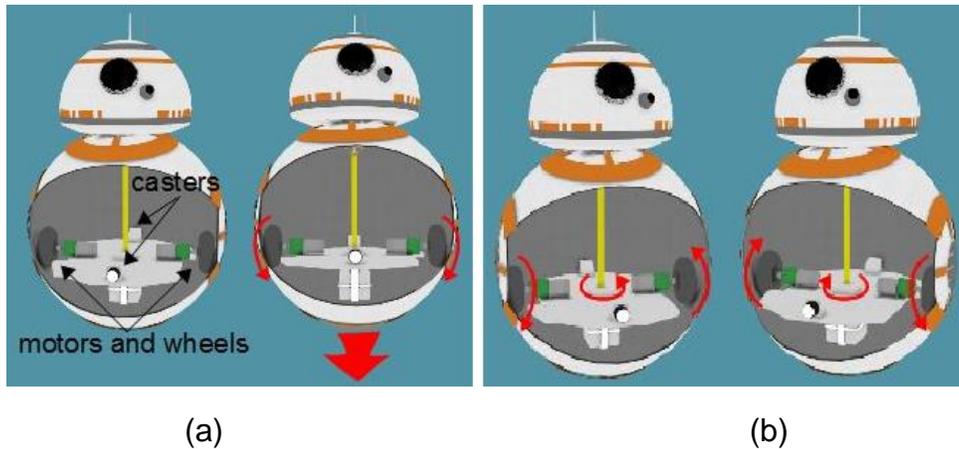


Figura 55. BB-8 con diseño tipo hámster. [28]

Por lo general, para brindar una mayor estabilidad se añaden ruedas no actuadas y que están ancladas a un resorte para obligar que dichas ruedas siempre entren en contacto con la esfera. Algunos diseños se estabilizan moviéndose adelante y hacia atrás en un bucle de control. En cambio, en otros diseños se utiliza un contrapeso en la parte inferior del mecanismo, para así poder reducir las oscilaciones y aumentar la estabilidad.

7.2. Suposiciones importantes.

Para realizar el modelado matemático del proyecto se plantearon las siguientes suposiciones importantes:

- Se supone que el robot realizará movimientos bidimensionales en el plano XY, esto con el fin de simplificar el modelado y se aplicará el principio de conducción diferencial para el cambio de dirección.
- Se supone que el peso de la cabeza es despreciable, por lo que cualquier acción adversa que pueda generar la cabeza será considerada una perturbación adicional al sistema de control que más adelante se implementará.
- Se supone una condición de no deslizamiento entre las llantas del robot, la esfera y el suelo.
- Se supone que la esfera se moverá inicialmente en sentido negativo al sistema newtoniano.
- Se supone despreciable la dinámica de la parte eléctrica del motor y el termino correspondiente a la inductancia.

7.3. Diseño conceptual del prototipo.

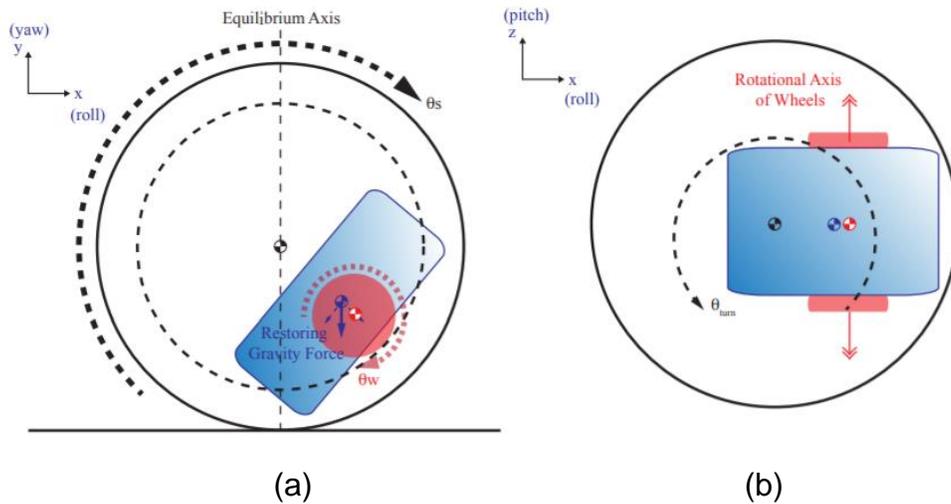


Figura 56. Diseño conceptual del prototipo tipo hámster. (a) Vista lateral (rodadura). (b) Vista superior (conducción diferencial). [29]

En la Figura 56 podemos observar el diseño conceptual planteado para el prototipo dejando de lado el mástil en el cual estará apoyado el conector magnético de la cabeza. El sistema tipo hámster contará con un mecanismo de accionamiento diferencial de 2 grados de libertad, el cual estará dentro de la esfera. En la Figura 56a se puede observar la vista lateral del robot y se presenta el caso de movimiento de rodadura; por su parte en la Figura 56b, se puede observar la vista superior y se muestra el movimiento diferencial.

7.4. Modelado cinemático del robot.

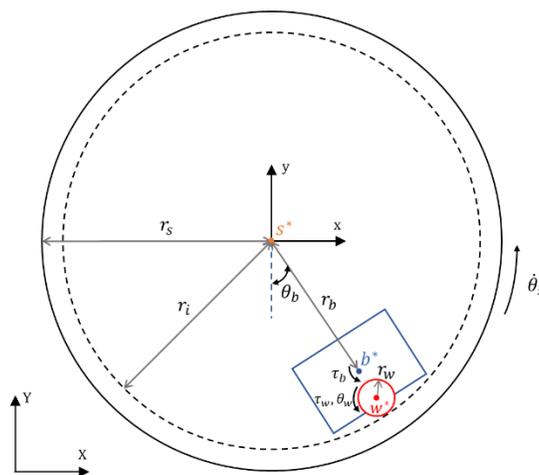


Figura 57. Modelado y parámetros del sistema tipo hámster.

El modelo se compone de 3 partes principales: la capa exterior (shell), el cuerpo (body) del robot y las ruedas (wheels), como se muestra en la Figura 57. Suponiendo que la esfera se mueve en sentido negativo al sistema newtoniano, se procede a hallar las posiciones de los centroides de dichos cuerpos, partiendo de un análisis trigonométrico, de tal forma que:

$$\vec{x}_s = -\theta_s r_s \hat{i} \quad (20)$$

$$\vec{y}_s = r_s \hat{j} \quad (21)$$

En donde:

- \vec{x}_s es el vector posición en x del centroide de la esfera.
- \vec{y}_s es el vector posición en y del centroide de la esfera.
- θ_s es el desplazamiento angular de la esfera con respecto a la vertical.
- r_s es el radio de la esfera.

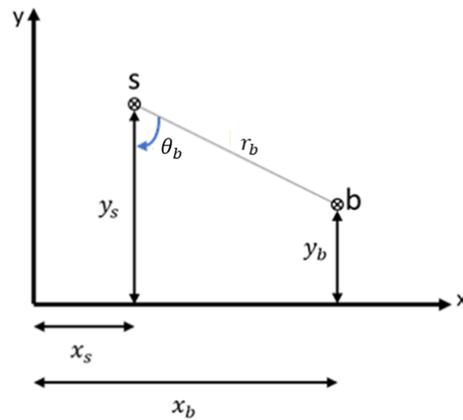


Figura 58. Distancia a los centroides “s” y “b”.

De igual forma, la posición del centroide del cuerpo es:

$$\vec{x}_b = \vec{x}_s + r_b \text{sen}(\theta_b) \hat{i} \quad (22)$$

$$\vec{y}_b = \vec{y}_s - r_b \text{cos}(\theta_b) \hat{j} \quad (23)$$

En donde:

- \vec{x}_b es el vector posición en x del centroide del cuerpo.
- \vec{y}_b es el vector posición en y del centroide del cuerpo
- θ_b es el desplazamiento angular del cuerpo con respecto a la vertical.
- d_b es la distancia desde el centroide “s” hasta “b”.

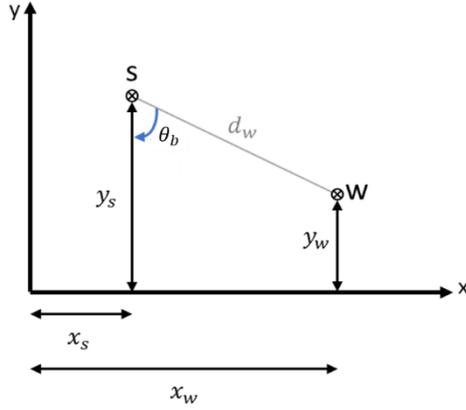


Figura 59. Distancia a los centroides “s” y “w”.

Finalmente, la posición del centroide de la rueda es:

$$\vec{x}_w = \vec{x}_s + d_w \text{sen}(\theta_b) \hat{i} \quad (24)$$

$$\vec{y}_w = \vec{y}_s - d_w \text{cos}(\theta_b) \hat{j} \quad (25)$$

En donde:

- \vec{x}_w es el vector posición en x del centroide de la rueda.
- \vec{y}_w es el vector posición en y del centroide de la rueda.
- d_w es la distancia desde el centroide “s” hasta “b”.

Ahora, sabiendo que la velocidad es la derivada de la posición en el tiempo, entonces al derivar las posiciones se obtiene que:

$$\dot{x}_s = -\dot{\theta}_s r_s \quad (26)$$

$$\dot{x}_b = \dot{x}_s + r_b \dot{\theta}_b \text{cos}(\theta_b) \quad (27)$$

$$\dot{y}_b = r_b \dot{\theta}_b \text{sen}(\theta_b) \quad (28)$$

$$\dot{x}_w = \dot{x}_s + d_w \dot{\theta}_b \text{cos}(\theta_b) \quad (29)$$

$$\dot{y}_w = d_w \dot{\theta}_b \text{sen}(\theta_b) \quad (30)$$

En donde:

- \dot{x}_s es la velocidad en x del centroide de la esfera.
- $\dot{\theta}_s$ es la velocidad angular de la esfera.
- \dot{x}_b es la velocidad en x del centroide del cuerpo.
- \dot{y}_b es la velocidad en y del centroide del cuerpo.
- $\dot{\theta}_b$ es la velocidad angular del cuerpo.
- \dot{x}_w es la velocidad en x del centroide de la rueda.
- \dot{y}_w es la velocidad en y del centroide de la rueda.

7.5. Modelado dinámico del robot.

Utilizando el método de LaGrange, se procede a calcular el Lagrangiano:

$$L = K_1 + K_2 - V \quad (31)$$

En donde:

- L es el Lagrangiano.
- K es la energía cinética, la cual es la suma de la energía cinética de translación (K_1) y de rotación (K_2).
- V es la energía potencial.

Por lo que la energía cinética de translación es igual a:

$$K_1 = \frac{1}{2} m_s (\dot{x}_s^2 + \dot{y}_s^2) + \frac{1}{2} m_b (\dot{x}_b^2 + \dot{y}_b^2) + \frac{1}{2} m_w (\dot{x}_w^2 + \dot{y}_w^2) \quad (32)$$

En donde:

- m_s es la masa de la esfera.
- m_b es la masa del cuerpo.
- m_w es la masa de la rueda.

De la misma forma, la energía cinética de rotación es igual a:

$$K_2 = \frac{1}{2} I_s \dot{\theta}_s^2 + \frac{1}{2} I_b \dot{\theta}_b^2 + \frac{1}{2} I_w (\dot{\theta}_b + \dot{\theta}_w)^2 \quad (33)$$

En donde:

- I_s es la inercia de la esfera.
- I_b es la inercia del cuerpo.
- I_w es la inercia de la rueda.

Finalmente, la energía potencial es igual a:

$$V = m_s g y_s + m_b g y_b + m_w g y_w \quad (34)$$

Al reemplazar las ecuaciones (32), (33) y (34) en la ecuación (35) obtenemos que el Lagrangiano queda:

$$L = \frac{\dot{\theta}_s^2}{2} (r_s^2 K_{n1} + I_s) + \frac{\dot{\theta}_b^2}{2} (m_b r_b^2 + m_w d_w^2 + I_b + I_w) + \frac{\dot{\theta}_w^2}{2} I_w - \dot{\theta}_s \dot{\theta}_b r_s C_{\theta_b} K_{n2} + \dot{\theta}_b \dot{\theta}_w I_w - g (r_s K_{n1} - C_{\theta_b} K_{n2}) \quad (35)$$

En donde:

$$K_{n1} = m_s + m_b + m_w \quad (36)$$

$$K_{n2} = m_b r_b + m_w d_w \quad (37)$$

$$C_{\theta_b} = \cos(\theta_b) \quad (38)$$

$$S_{\theta_b} = \text{sen}(\theta_b) \quad (39)$$

Asumiendo fricción no deslizante, la ecuación de movimiento de LaGrange es igual a:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (40)$$

En donde:

- Las coordenadas generalizadas q_i son: $q_1 = \theta_b$, $q_2 = \theta_w$ y $q_3 = \theta_s$.
- Las fuerzas generalizadas no conservativas Q_i .

Al resolver el lado derecho de la ecuación de LaGrange con la primera coordenada generalizada $q_1 = \theta_b$, obtenemos que:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} = \dot{\theta}_b (m_b r_b^2 + m_w d_w^2 + I_b + I_w) - \dot{\theta}_s r_s K_{n2} C_{\theta_b} + \dot{\theta}_w I_w \quad (41)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_1} \right) = \ddot{\theta}_b (m_b r_b^2 + m_w d_w^2 + I_b + I_w) - \ddot{\theta}_s r_s K_{n2} C_{\theta_b} + \dot{\theta}_s \dot{\theta}_b r_s K_{n2} S_{\theta_b} \quad (42)$$

$$+ \ddot{\theta}_w I_w \quad (43)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_1} = K_{n2} S_{\theta_b} (\dot{\theta}_b \dot{\theta}_s r_s - g)$$

Del mismo modo, se procede a resolver las derivadas de la ecuación de LaGrange con la segunda coordenada generalizada $q_2 = \theta_w$:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} = I_w (\dot{\theta}_b + \dot{\theta}_w) \quad (44)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_2} \right) = I_w (\ddot{\theta}_b + \ddot{\theta}_w) \quad (45)$$

$$\frac{\partial L}{\partial q_2} = \frac{\partial L}{\partial q_3} = 0 \quad (46)$$

Por último, se procede a resolver las derivadas con la tercera coordenada generalizada $q_3 = \theta_s$:

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_3} = \dot{\theta}_s (r_s^2 K_{n1} + I_s) - \dot{\theta}_b r_s K_{n2} C_{\theta_b} \quad (47)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_3} \right) = \ddot{\theta}_s (r_s^2 K_{n1} + I_s) + r_s K_{n2} (\dot{\theta}_b^2 S_{\theta_b} - \ddot{\theta}_b C_{\theta_b}) \quad (48)$$

Al reemplazar las ecuaciones (42), (43), (45), (46) y (48) dentro de la ecuación (40), la ecuación de LaGrange queda igual a:

$$\ddot{\theta}_b (m_b r_b^2 + m_w d_w^2 + I_b + I_w) - \ddot{\theta}_s r_s K_{n2} C_{\theta_b} + \dot{\theta}_s \dot{\theta}_b r_s K_{n2} S_{\theta_b} + \ddot{\theta}_w I_w - K_{n2} S_{\theta_b} (\dot{\theta}_b \dot{\theta}_s r_s - g) = Q_1 \quad (49)$$

$$I_w (\ddot{\theta}_b + \ddot{\theta}_w) = Q_2 \quad (50)$$

$$\ddot{\theta}_s (r_s^2 K_{n1} + I_s) + r_s K_{n2} (\dot{\theta}_b^2 S_{\theta_b} - \ddot{\theta}_b C_{\theta_b}) = Q_3 \quad (51)$$

Ahora se procede a resolver el lado izquierdo de la ecuación de LaGrange, sabiendo que la ecuación general de las fuerzas generalizadas es:

$$Q_r \triangleq \sum_{i=1}^n \vec{F}_i \cdot \frac{\partial \vec{r}_i}{\partial q_r} + \sum_{j=1}^{\xi} \vec{M}_j \cdot \frac{\partial \vec{\omega}}{\partial \dot{q}_r} \quad (52)$$

En donde:

- \vec{F}_i es el vector fuerza "i".
- \vec{r}_i es el vector radial relacionado a la fuerza "i".
- \vec{M}_j es el vector momento "j".
- $\vec{\omega}$ es el vector de la velocidad angular.

Las fuerzas externas no conservativas que actúan sobre el robot incluyen el torque del motor τ_m y el torque del cuerpo τ_b . Por lo tanto, se utiliza la ecuación (52) para hallar las fuerzas generalizadas no conservativas Q_i , dando como resultado las siguientes ecuaciones:

$$Q_1 = \tau_b \cdot \frac{\partial {}^N \vec{\omega}^b}{\partial \dot{q}_1} + \tau_m \cdot \frac{\partial {}^N \vec{\omega}^w}{\partial \dot{q}_1} \quad (53)$$

$$Q_2 = \tau_b \cdot \frac{\partial {}^N \vec{\omega}^b}{\partial \dot{q}_2} + \tau_m \cdot \frac{\partial {}^N \vec{\omega}^w}{\partial \dot{q}_2} \quad (54)$$

$$Q_3 = \tau_b \cdot \frac{\partial {}^N \vec{\omega}^b}{\partial \dot{q}_3} + \tau_m \cdot \frac{\partial {}^N \vec{\omega}^w}{\partial \dot{q}_3} \quad (55)$$

En donde las velocidades angulares son iguales a:

$${}^N \vec{\omega}^b = \dot{\theta}_b \hat{k} \quad (56)$$

$${}^N \vec{\omega}^w = (\dot{\theta}_b + \dot{\theta}_w) \hat{k} \quad (57)$$

Al realizar las respectivas derivadas de las velocidades angulares con respecto a \dot{q}_i obtenemos que:

$$\frac{\partial {}^N\vec{\omega}^b}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial {}^N\vec{\omega}^w}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial {}^N\vec{\omega}^w}{\partial \dot{q}_2} = 1 \hat{k} \quad (58)$$

$$\frac{\partial {}^N\vec{\omega}^b}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial {}^N\vec{\omega}^b}{\partial \dot{q}_3} = \frac{\partial {}^N\vec{\omega}^w}{\partial \dot{q}_3} = 0 \hat{k} \quad (59)$$

Al remplazar el resultado de las derivadas de las velocidades angulares dentro de las ecuaciones de las fuerzas generalizadas, se obtiene que:

$$Q_1 = \tau_b + t_m \quad (60)$$

$$Q_2 = \tau_m \quad (61)$$

$$Q_3 = 0 \quad (62)$$

Ahora, sabiendo que:

$$\tau_b = -t_m \quad (63)$$

Entonces, al remplazar la ecuación (63) dentro de la ecuación (60), se obtiene que la fuerza generalizada 1 es igual a:

$$Q_1 = 0 \quad (64)$$

Al reemplazar las ecuaciones (64), (61) y (62) dentro de las ecuaciones (49), (50) y (51), obtenemos las ecuaciones de movimiento del sistema:

$$\ddot{\theta}_b(m_b r_b^2 + m_w d_w^2 + I_b + I_w) - \ddot{\theta}_s r_s K_{n2} C_{\theta_b} + \dot{\theta}_s \dot{\theta}_b r_s K_{n2} S_{\theta_b} + \ddot{\theta}_w I_w \quad (65)$$

$$- K_{n2} S_{\theta_b} (\dot{\theta}_b \dot{\theta}_s r_s - g) = 0$$

$$I_w (\ddot{\theta}_b + \ddot{\theta}_w) = \tau_m \quad (66)$$

$$\ddot{\theta}_s (r_s^2 K_{n1} + I_s) + r_s K_{n2} (\dot{\theta}_b^2 S_{\theta_b} - \ddot{\theta}_b C_{\theta_b}) = 0 \quad (67)$$

7.6. Modelo dinámico de un motor DC.

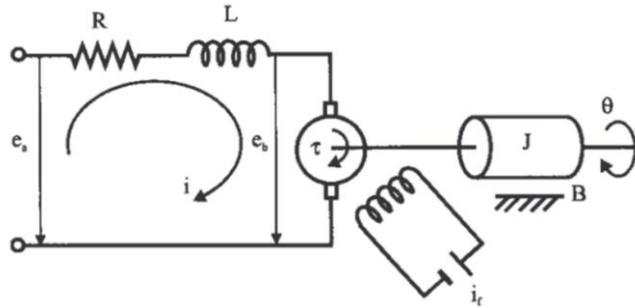


Figura 60. Esquema de funcionamiento de un motor de corriente continua controlado por inducción. [31]

El modelado de un motor de corriente continua controlado por inducción cuenta un esquema de funcionamiento equivalente al que se puede observar en la Figura 60. Cuando el rotor gira, se induce en él una tensión e_b directamente proporcional a la velocidad angular $\dot{\theta}_w$, esa constante de proporcionalidad k_b constante de fuerza contraelectromotriz. Esta relación proporcional cumple la siguiente ecuación:

$$e_b = k_b \dot{\theta}_w \quad (68)$$

La velocidad de giro se controla mediante la tensión de armadura e_a , salida del amplificador de potencia. La ecuación diferencial del circuito del rotor es:

$$L\dot{I} + RI + e_b = e_a \quad (69)$$

En donde:

- L es la inductancia de armadura.
- R es la resistencia de armadura.
- I es la corriente de armadura.

Ahora, para simplificar el modelo del motor se desprecia la dinámica de la parte eléctrica del motor, puesto que es muy rápida en comparación con la parte dinámica, por tal se supone e_b y se desprecia el termino correspondiente a la inductancia, pues en los motores de corriente continua dicha inductancia es típicamente muy bajo. Tomando en cuenta estas consideraciones dentro de la ecuación (69), se obtiene que:

$$RI = e_a \quad (70)$$

Igualmente, el motor desarrolla un torque que es proporcional al producto del flujo en el entrehierro Ψ y la corriente. De esta forma, el flujo en el entrehierro se puede calcular como:

$$\Psi = k_f I_f \quad (71)$$

Donde I_f es la corriente de campo. De esta manera la expresión del torque desarrollado por el motor es la siguiente:

$$\tau_e = k_l I \Psi \quad (72)$$

Para el caso de una corriente de campo constante, el flujo se vuelve constante y el torque eléctrico τ_e es directamente proporcional a la corriente que circula por el rotor:

$$\tau_e = k_p I \quad (73)$$

$$I = \frac{\tau_e}{k_p} \quad (74)$$

Donde k_p es la constante de torque del motor. Reemplazando la ecuación (74) dentro de la ecuación (70) se obtiene:

$$\tau_e = \frac{e_a k_p}{R} \quad (75)$$

El torque eléctrico que ejerce el motor se emplea para vencer la inercia y la fricción, de tal forma que:

$$J\ddot{\theta}_w + B\dot{\theta}_w + \tau_m = \tau_e \quad (76)$$

En donde:

- J es la inercia del motor y la carga.
- B es la constante de fricción viscosa.
- $\ddot{\theta}_w$ es la aceleración angular del motor.

Al reemplazar la ecuación (75) dentro de la ecuación (76), se obtiene la ecuación de movimiento del motor de corriente continua simplificado:

$$\tau_m = \frac{e_a k_p}{R} - J\ddot{\theta}_w - B\dot{\theta}_w \quad (77)$$

7.7. Representación en espacio de estados del sistema unificado.

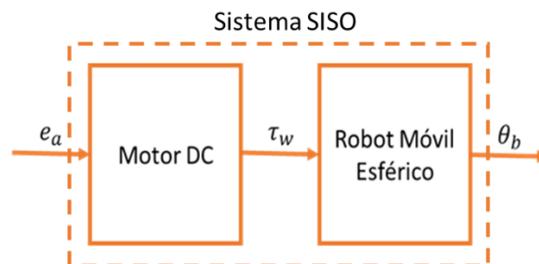


Figura 61. Diagrama de bloques de un robot móvil esférico SISO.

En la Figura 61 se puede apreciar el sistema SISO (“Single Input Single Output” por sus siglas en inglés) empleado para este proyecto, en donde la entrada del sistema es el voltaje e_a del motor y la salida a controlar es el ángulo de inclinación θ_b . Se

procede a realizar la representación en espacio de estados del sistema, para lo cual se definen los siguientes estados:

$$x_1 = \theta_b; x_2 = \dot{\theta}_b; x_3 = \dot{\theta}_w; x_4 = \dot{\theta}_s$$

Por lo que la derivada de los estados quedaría:

$$\dot{x}_1 = x_2; \dot{x}_2 = \ddot{\theta}_b; \dot{x}_3 = \ddot{\theta}_w; \dot{x}_4 = \ddot{\theta}_s$$

De tal forma que la representación en espacios de estados sea igual a:

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \quad (78)$$

$$y(t) = C x(t) + D u(t) \quad (79)$$

En donde:

- $u(t)$ es el vector de entrada que contiene el voltaje del motor e_a , siendo este voltaje la única entrada del sistema SISO.
- $x(t)$ es el vector de estados.
- A es la matriz de estados.
- B es la matriz de entradas.
- C es la matriz de salidas que contiene el ángulo de inclinación θ_b , siendo este ángulo la única salida del sistema SISO.
- D es la matriz de transmisión directa.
- $\dot{x}(t)$ es la razón de cambio de cada estado.
- $y(t)$ son las salidas del sistema

Utilizando el modelo matemático del motor simplificado e ingresándolo en las ecuaciones (65), (66) y (67), se procede a despejar \dot{x}_2 , \dot{x}_3 y \dot{x}_4 , dando como resultado:

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 = & -(S_{x_1}(I_s I_w K_{n2} R g + I_s J K_{n2} R g + I_w K_{n1} K_{n2} R g r_s^2 + J K_{n1} K_{n2} R g r_s^2) \\ & + C_{x_1} S_{x_1} (I_w K_{n2}^2 R r_s^2 x_2^2 + J K_{n2}^2 R r_s^2 x_2^2) + I_s I_w K_p e_a + I_w K_{n1} K_p e_a r_s^2 \\ & - B_1 I_s I_w R x_3 - B_1 I_w K_{n1} R r_s^2 x_3) / (R(I_b I_s I_w + I_b I_s J + I_s I_w J \\ & + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w + I_s J d_w^2 m_w \\ & + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 - J K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 \\ & + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2)) \end{aligned} \quad (80)$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_3 = & (S_{x_1}(I_w K_{n1} K_{n2} R g r_s^2 + I_s I_w K_{n2} R g) + I_b I_s K_p e_a + I_s I_w K_p e_a + I_b K_{n1} K_p e_a r_s^2 \\
& + I_w K_{n1} K_p e_a r_s^2 + I_s K_p d_w^2 e_a m_w + I_s K_p e_a m_b r_b^2 - K_{n2}^2 K_p e_a r_s^2 C_{x_1}^2 \\
& - B_1 I_b I_s R x_3 - B_1 I_s I_w R x_3 + B_1 K_{n2}^2 R r_s^2 x_3 C_{x_1}^2 + K_{n1} K_p d_w^2 e_a m_w r_s^2 \\
& + K_{n1} K_p e_a m_b r_b^2 r_s^2 + (I_w K_{n2}^2 R r_s^2 x_2^2 S_{2x_1})/2 - B_1 I_b K_{n1} R r_s^2 x_3 \\
& - B_1 I_w K_{n1} R r_s^2 x_3 - B_1 I_s R d_w^2 m_w x_3 - B_1 I_s R m_b r_b^2 x_3 \\
& - B_1 K_{n1} R d_w^2 m_w r_s^2 x_3 - B_1 K_{n1} R m_b r_b^2 r_s^2 x_3)/(R(I_b I_s I_w + I_b I_s J + I_s I_w J \\
& + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w + I_s J d_w^2 m_w \\
& + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 - J K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 \\
& + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2))
\end{aligned} \tag{81}$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_4 = & -(r_s(C_{x_1}(K_{n2}(I_w K_p e_a - B_1 I_w R x_3) + K_{n2} S_{x_1}(I_w K_{n2} R g + J K_{n2} R g)) \\
& + K_{n2} S_{x_1}(I_b I_w R x_2^2 + I_b J R x_2^2 + I_w J R x_2^2 + I_w R d_w^2 m_w x_2^2 \\
& + J R d_w^2 m_w x_2^2 + I_w R m_b r_b^2 x_2^2 + J R m_b r_b^2 x_2^2)))/(R(I_b I_s I_w + I_b I_s J \\
& + I_s I_w J + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w \\
& + I_s J d_w^2 m_w + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 - J K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 \\
& + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 \\
& + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2))
\end{aligned} \tag{82}$$

En donde:

- S_{2x_1} y C_{2x_1} equivalen a $\sin(2x_1)$ y $\cos(2x_1)$, respectivamente.

Ya habiendo despejado cada una de las razones de cambios de los estados y dejándolas en función de estados y entradas, se procede a hallar la matriz de estados y la matriz de entradas, utilizando los Jacobianos vistos en las ecuaciones (18) y (19), dando como resultado:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \alpha & \delta & \eta & 0 \\ \beta & \varepsilon & \vartheta & 0 \\ \gamma & \zeta & \iota & 0 \end{bmatrix} \tag{83}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \mu \\ \varphi \\ \xi \end{bmatrix} \tag{84}$$

En donde:

$$\begin{aligned}
\alpha = & (K_{n2}^2 r_s^2 S_{2x_1}(I_w + J)(I_s I_w K_p e_a + I_w K_{n1} K_p e_a r_s^2 - B_1 I_s I_w R x_3 \\
& + (K_{n2}^2 R r_s^2 x_2^2 S_{2x_1}(I_w + J))/2 + K_{n2} R g S_{x_1}(K_{n1} r_s^2 + I_s)(I_w + J) \\
& - B_1 I_w K_{n1} R r_s^2 x_3)/(R \sigma^2) - (K_{n2}(I_w + J)(K_{n2}(2C_{x_1}^2 - 1)r_s^2 x_2^2 \\
& + K_{n1} g C_{x_1} r_s^2 + I_s g C_{x_1}))/\sigma
\end{aligned} \tag{85}$$

$$\begin{aligned}
\beta = & (K_{n2}(K_{n2}K_p e_a r_s^2 S_{2x_1} + I_s I_w R g C_{x_1} + I_w K_{n2} R r_s^2 x_2^2 C_{2x_1} + I_w K_{n1} R g r_s^2 C_{x_1} \\
& - B_1 K_{n2} R r_s^2 x_3 S_{2x_1}))/ (R\sigma) - (K_{n2}^2 r_s^2 S_{2x_1} (I_w + J) (I_b I_s K_p e_a + I_s I_w K_p e_a \\
& + I_b K_{n1} K_p e_a r_s^2 + I_w K_{n1} K_p e_a r_s^2 + I_s K_p d_w^2 e_a m_w + I_s K_p e_a m_b r_b^2 \\
& - K_{n2}^2 K_p e_a r_s^2 C_{x_1}^2 - B_1 I_b I_s R x_3 - B_1 I_s I_w R x_3 + B_1 K_{n2}^2 R r_s^2 x_3 C_{x_1}^2 \\
& + K_{n1} K_p d_w^2 e_a m_w r_s^2 + K_{n1} K_p e_a m_b r_b^2 r_s^2 + (I_w K_{n2}^2 R r_s^2 x_2^2 S_{2x_1})/2 \\
& - B_1 I_b K_{n1} R r_s^2 x_3 - B_1 I_w K_{n1} R r_s^2 x_3 + I_s I_w K_{n2} R g S_{x_1} - B_1 I_s R d_w^2 m_w x_3 \\
& - B_1 I_s R m_b r_b^2 x_3 + I_w K_{n1} K_{n2} R g r_s^2 S_{x_1} - B_1 K_{n1} R d_w^2 m_w r_s^2 x_3 \\
& - B_1 K_{n1} R m_b r_b^2 r_s^2 x_3))/ (R\sigma^2)
\end{aligned} \tag{86}$$

$$\begin{aligned}
\gamma = & (2K_{n2}^2 r_s^3 C_{x_1} S_{x_1} (K_{n2} R S_{x_1} (I_b I_w + I_b J + I_w J + I_w d_w^2 m_w + J d_w^2 m_w + I_w m_b r_b^2 \\
& + J m_b r_b^2) x_2^2 + K_{n2} C_{x_1} (I_w K_p e_a - B_1 I_w R x_3 + I_w K_{n2} R g S_{x_1} \\
& + J K_{n2} R g S_{x_1}))/ (R\sigma^2) - (r_s (K_{n2} R x_2^2 C_{x_1} (I_b I_w + I_b J + I_w J \\
& + I_w d_w^2 m_w + J d_w^2 m_w + I_w m_b r_b^2 + J m_b r_b^2) - K_{n2} S_{x_1} (I_w K_p e_a \\
& - B_1 I_w R x_3 + I_w K_{n2} R g S_{x_1} + J K_{n2} R g S_{x_1}) + K_{n2}^2 R g C_{x_1}^2 (I_w \\
& + J)))/ (R\sigma)
\end{aligned} \tag{87}$$

$$\delta = - \frac{K_{n2}^2 r_s^2 x_2 S_{2x_1} (I_w + J)}{\sigma} \tag{88}$$

$$\varepsilon = \frac{I_w K_{n2}^2 r_s^2 x_2 S_{2x_1}}{\sigma} \tag{89}$$

$$\zeta = - \frac{2K_{n2} r_s x_2 S_{x_1} (I_b I_w + I_b J + I_w J + I_w d_w^2 m_w + J d_w^2 m_w + I_w m_b r_b^2 + J m_b r_b^2)}{\sigma} \tag{90}$$

$$\eta = \frac{B_1 I_w (K_{n1} r_s^2 + I_s)}{\sigma} \tag{91}$$

$$\vartheta = -(B_1 (I_b I_s + I_s I_w - K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 + I_b K_{n1} r_s^2 + I_w K_{n1} r_s^2 + I_s d_w^2 m_w + I_s m_b r_b^2 \\
+ K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2))/\sigma \tag{92}$$

$$\iota = \frac{B_1 I_w K_{n2} r_s C_{x_1}}{\sigma} \tag{93}$$

$$\begin{aligned}
\sigma = & I_b I_s I_w + I_b I_s J + I_s I_w J + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w \\
& + I_s J d_w^2 m_w + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 - J K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 \\
& + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2
\end{aligned} \tag{94}$$

$$\mu = -\frac{I_w K_p \sigma_2 (K_{n1} r_s^2 + I_s)}{R} \quad (95)$$

$$\varphi = (K_p \sigma_2 (I_b I_s + I_s I_w - K_{n2}^2 r_s^2 C_{x1}^2 + I_b K_{n1} r_s^2 + I_w K_{n1} r_s^2 + I_s d_w^2 m_w + I_s m_b r_b^2 + K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2)) / R \quad (96)$$

$$\xi = -\frac{I_w K_{n2} K_p r_s \sigma_2 C_{x1}}{R} \quad (97)$$

$$\sigma_2 = 1 / (I_b I_s I_w + I_b I_s J + I_s I_w J + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w + I_s J d_w^2 m_w + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 C_{x1}^2 - J K_{n2}^2 r_s^2 C_{x1}^2 + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2) \quad (98)$$

Ya habiendo hallado las matrices A y B, procedemos a completar la linealización del sistema utilizando series de Taylor, para las cuales se hallan los puntos de equilibrio del sistema igualando a cero las razones de cambio de los estados.

Sabiendo que $\dot{x}_1 = x_2 = \dot{\theta}_b$, al igual la razón de cambio del primer estado a cero se obtiene que:

$$x_{20} = 0$$

En donde:

- x_{20} es el punto de equilibrio del estado x_2 .

Ahora se procede a reemplazar x_{20} dentro de las ecuaciones (80), (81) y (82), correspondiendo a las ecuaciones de las razones de cambio \dot{x}_2 , \dot{x}_3 y \dot{x}_4 , respectivamente, dando como resultado:

$$\dot{x}_2 = -((K_{n1} r_s^2 + I_s)(I_w K_p e_a - B_1 I_w R x_3 + I_w K_{n2} R g S_{x1} + J K_{n2} R g S_{x1})) / (R * (I_b I_s I_w + I_b I_s J + I_s I_w J + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w + I_s J d_w^2 m_w + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 C_{x1}^2 - J K_{n2}^2 r_s^2 C_{x1}^2 + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2)) \quad (99)$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_3 = & (S_{x_1}(I_w K_{n1} K_{n2} R g r_s^2 + I_s I_w K_{n2} R g) + I_b I_s K_p e_a + I_s I_w K_p e_a \\
& + I_b K_{n1} K_p e_a r_s^2 + I_w K_{n1} K_p e_a r_s^2 + I_s K_p d_w^2 e_a m_w + I_s K_p e_a m_b r_b^2 \\
& - K_{n2}^2 K_p e_a r_s^2 C_{x_1}^2 - B_1 I_b I_s R x_3 - B_1 I_s I_w R x_3 + B_1 K_{n2}^2 R r_s^2 x_3 C_{x_1}^2 \\
& + K_{n1} K_p d_w^2 e_a m_w r_s^2 + K_{n1} K_p e_a m_b r_b^2 r_s^2 - B_1 I_b K_{n1} R r_s^2 x_3 \\
& - B_1 I_w K_{n1} R r_s^2 x_3 - B_1 I_s R d_w^2 m_w x_3 - B_1 I_s R m_b r_b^2 x_3 \\
& - B_1 K_{n1} R d_w^2 m_w r_s^2 x_3 - B_1 K_{n1} R m_b r_b^2 r_s^2 x_3) / (R(I_b I_s I_w + I_b I_s J \\
& + I_s I_w J + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w \\
& + I_s J d_w^2 m_w + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 - J K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 \\
& + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 \\
& + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2))
\end{aligned} \tag{100}$$

$$\begin{aligned}
\dot{x}_4 = & -(r_s C_{x_1} (K_{n2} (I_w K_p e_a - B_1 I_w R x_3) + K_{n2} S_{x_1} (I_w K_{n2} R g + J K_{n2} R g))) / (R \\
& * (I_b I_s I_w + I_b I_s J + I_s I_w J + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 + I_w J K_{n1} r_s^2 \\
& + I_s I_w d_w^2 m_w + I_s J d_w^2 m_w + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 \\
& - J K_{n2}^2 r_s^2 C_{x_1}^2 + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 \\
& + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2))
\end{aligned} \tag{101}$$

Al igualar las anteriores razones de cambio a cero y resolviendo el sistema de ecuaciones, se obtiene que los puntos de equilibrio restantes son:

$$x_{10} = 0; x_{30} = 0; e_{a0} = 0$$

Luego se aplica los puntos de equilibrio dentro del modelo de espacios de estados y se obtiene que el modelo lineal del sistema es:

$$A_L = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \alpha_L & 0 & \eta_L & 0 \\ \beta_L & 0 & \vartheta_L & 0 \\ \gamma_L & 0 & \iota_L & 0 \end{bmatrix} \tag{102}$$

$$B_L = \begin{bmatrix} 0 \\ \mu_L \\ \varphi_L \\ \xi_L \end{bmatrix} \tag{103}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0] \quad D = 0 \tag{104}$$

En donde:

$$\alpha_L = -K_{n2} g \sigma_L (K_{n1} r_s^2 + I_s) (I_w + J) \tag{105}$$

$$\beta_L = I_w K_{n2} g \sigma_L (K_{n1} r_s^2 + I_s) \quad (106)$$

$$\gamma_L = -K_{n2}^2 g r_s \sigma_L (I_w + J) \quad (107)$$

$$\eta_L = B_1 I_w \sigma_L (K_{n1} r_s^2 + I_s) \quad (108)$$

$$\vartheta_L = -B_1 \sigma_L (I_b I_s - K_{n2}^2 r_s^2 + I_s I_w + I_b K_{n1} r_s^2 + I_w K_{n1} r_s^2 + I_s d_w^2 m_w + I_s m_b r_b^2 + K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2) \quad (109)$$

$$\iota_L = B_1 I_w K_{n2} r_s \sigma_L \quad (110)$$

$$\begin{aligned} \sigma_L = 1 / & (I_b I_s I_w - J K_{n2}^2 r_s^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 + I_b I_s J + I_s I_w J + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 \\ & + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w + I_s J d_w^2 m_w + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 \\ & + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 \\ & + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2) \end{aligned} \quad (111)$$

$$\mu_L = -\frac{I_w K_p \sigma_{L2} (K_{n1} r_s^2 + I_s)}{R} \quad (112)$$

$$\varphi_L = (K_p \sigma_{2L} (I_b I_s - K_{n2}^2 r_s^2 + I_s I_w + I_b K_{n1} r_s^2 + I_w K_{n1} r_s^2 + I_s d_w^2 m_w + I_s m_b r_b^2 + K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 + K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2)) / R \quad (113)$$

$$\xi_L = -\frac{I_w K_{n2} K_p r_s \sigma_{L2}}{R} \quad (114)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{L2} = 1 / & (I_b I_s I_w - J K_{n2}^2 r_s^2 - I_w K_{n2}^2 r_s^2 + I_b I_s J + I_s I_w J + I_b I_w K_{n1} r_s^2 + I_b J K_{n1} r_s^2 \\ & + I_w J K_{n1} r_s^2 + I_s I_w d_w^2 m_w + I_s J d_w^2 m_w + I_s I_w m_b r_b^2 + I_s J m_b r_b^2 \\ & + I_w K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + J K_{n1} m_b r_b^2 r_s^2 + I_w K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2 \\ & + J K_{n1} d_w^2 m_w r_s^2) \end{aligned} \quad (115)$$

8. DISEÑO MECÁNICO DEL PROTOTIPO

8.1. Diseño de la esfera.

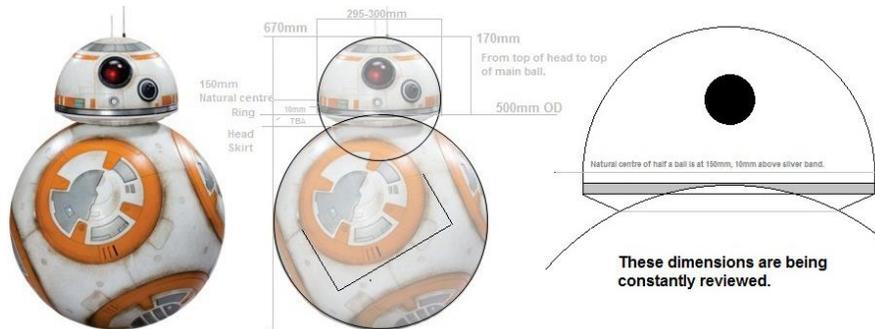


Figura 62. Dimensiones base de BB-8. [16]

El diseño del prototipo está inspirado en el droide BB-8 dado a que su diseño funcional se adecua a las necesidades básicas planteadas en el diseño de un robot móvil esférico con cabeza. En cuanto a dimensiones, se planteó un tamaño total de 356 mm para todo el prototipo, incluyendo la cabeza, dado a que se pretende inicialmente **monitorear palmas de aceite en crecimiento**. La esfera ensamblada cuenta con un diámetro interior de 300 mm y un grosor total de 3mm.

8.1.1. Diseño del cascarón de la esfera.

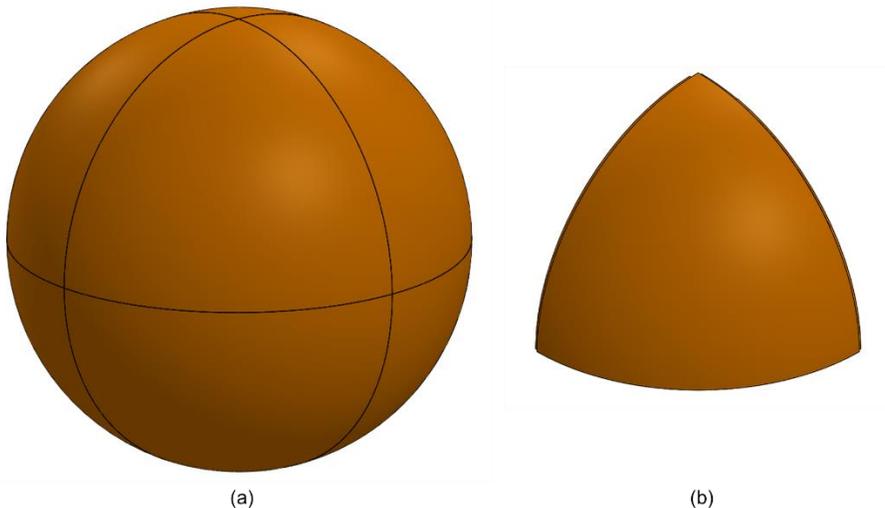


Figura 63. Diseño del armazón de la esfera. (a) Armazón ensamblado. (b) Pieza individual del armazón.

El cascarón está conformado por 8 paneles en forma de cuarto de esfera, ensamblables e impresos en 3D. La esfera se ensamblará de dos formas:

- **Ensamble labio – ranura:**

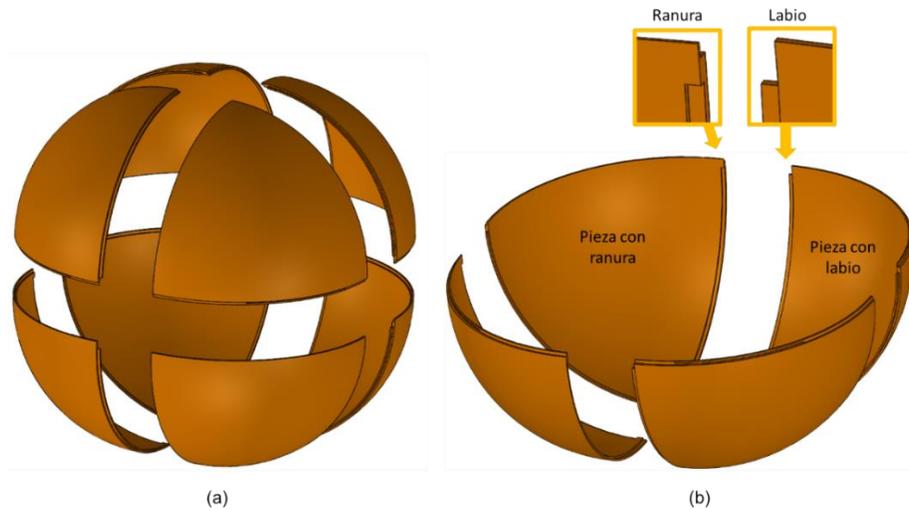


Figura 64. Diseño del sistema de ensamble labio - ranura. (a) Vista explosionada de la esfera. (b) Vista explosionada de media esfera con las especificaciones del sistema labio - ranura.

Primeramente, se ensamblan dos medias esferas utilizando el método de ensamble de labio-ranura para cada una. Cada media esfera consta de cuatro paneles, dos piezas tipo ranura (es decir, piezas en que dos de sus lados están conformados por ranuras) y dos piezas tipo labio, tal y como se puede observar en la Figura 64b. Para garantizar la adhesión de las piezas se debe utilizar un pegamento epóxico que permita una firme sujeción.

- **Ensamble riel - pasador:**

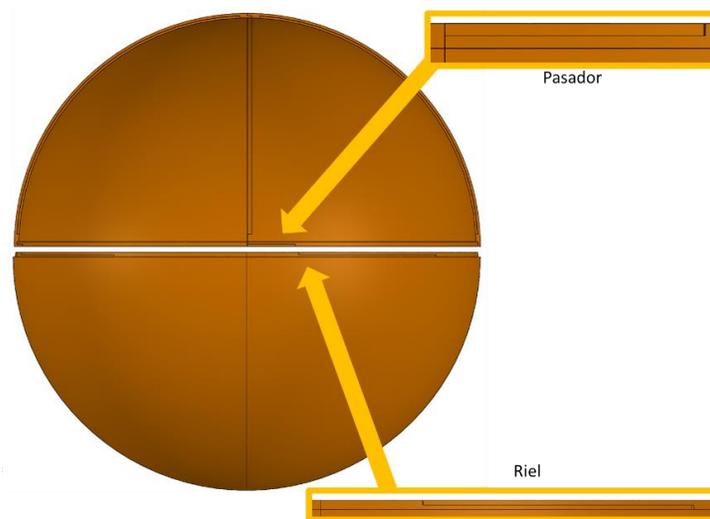


Figura 65. Diseño del sistema de ensamble riel – pasador.

Como el objetivo es que la esfera sea desarmable, se diseñó un sistema de riel pasador que mantenga firmemente unida la esfera mientras se está utilizando y

cuando se necesite, se pueda desarmar para tener acceso a la unidad interna del robot. Para armar el sistema solo se debe unir la media esfera que tenga el sistema de riel, junto con la otra que tenga el sistema de pasador, luego gire la media esfera que tenga el pasador hasta el límite del riel.

Se diseñó un sistema de encaje en el pasador (tipo hembra) y al final del riel (tipo macho) con el fin de garantizar que ambas partes queden unidas, de tal manera que queden sujetas a presión al finalizar el recorrido. El sistema de ensamble riel-pasador puede observarse en la Figura 66 y Figura 67.

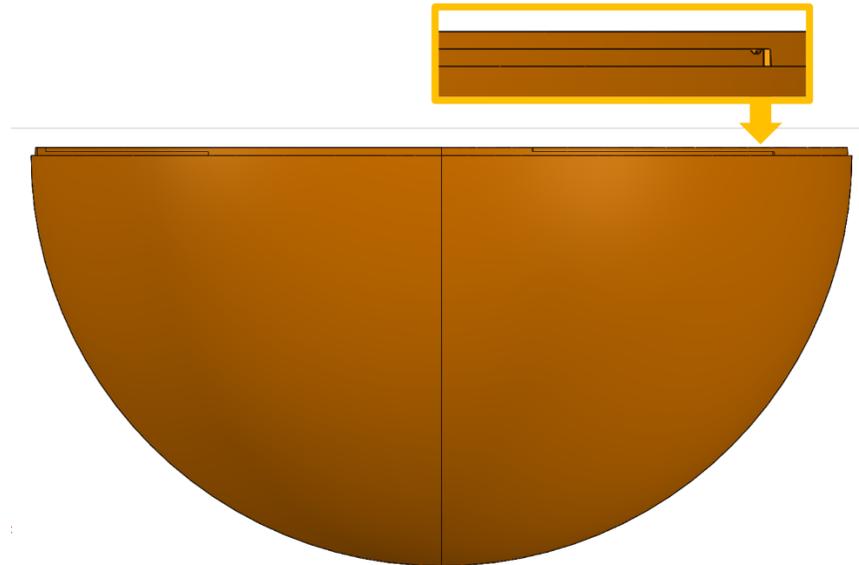


Figura 66. Diseño de la media esfera que tiene el sistema de riel.

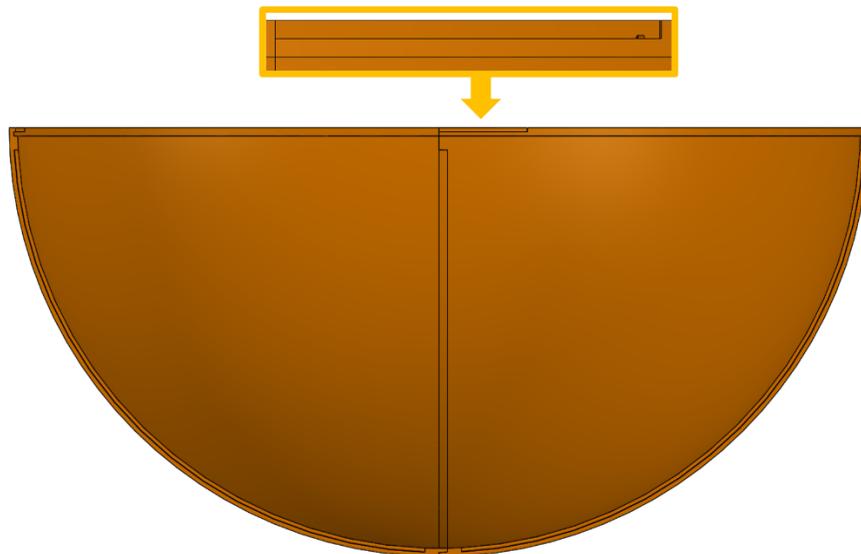


Figura 67. Diseño de la media esfera que tiene el sistema de pasador.

8.2. Diseño de la cabeza del robot.

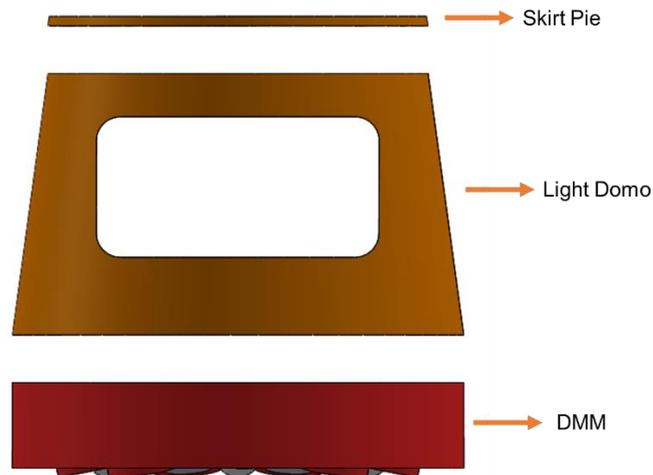


Figura 68. Vista explosionada del diseño de la cabeza.

El diseño de la cabeza del robot consta de tres partes principales: El domo, el “skirt pie” y el “DMM” (Dome Magnet Mount), así como se puede observar en la Figura 68. La parte superior de la cabeza es conocida como “domo” y es donde en un futuro se albergará el sistema monitoreo remoto, mientras que la parte inferior es conocida como “DMM” o mecanismo de sujeción magnética, por sus siglas en inglés, que le permite al domo sujetarse a la esfera utilizando imanes. La cabeza cuenta con una altura total de 46mm.

8.2.1. Diseño del domo.

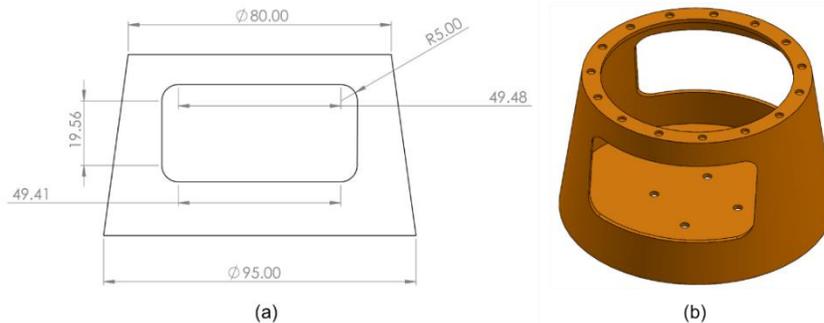


Figura 69. Diseño del domo. (a) Vista frontal con cotas en milímetros. (b) Vista isométrica.

El diseño del domo consta de un cono truncado de 95mm de diámetro inferior, 80mm de diámetro superior y 52mm de altura, con un grosor de 2 mm en las paredes. En la parte inferior se encuentran 4 agujeros de 3.2mm destinados para los tornillos M3 que mantendrán unido el domo al DMM, mientras que en la parte superior se encuentran 10 agujeros de 3mm de diámetro, los cuales sirven como conectores entre el “skirt ring”, como se puede observar en la Figura 70.

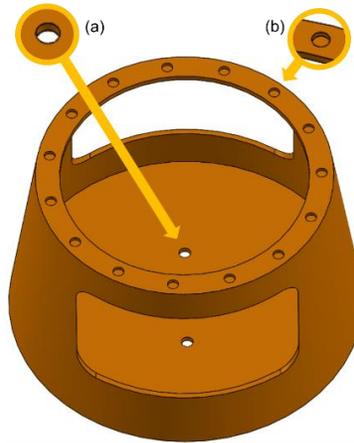


Figura 70. Vista isométrica superior del domo. (a) Enfoque al agujero conector inferior. (b) Enfoque al agujero superior.

8.2.2. Diseño del “skirt pie”

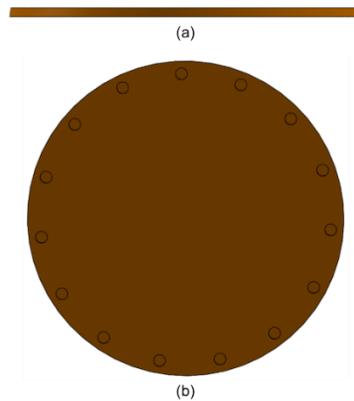


Figura 71. Diseño del skirt ring. (a) Vista lateral. (b) Vista de planta.

La apertura superior del domo está diseñada con el fin de servir de punto de acceso principal al domo, por lo que, para cubrir esta parte se utiliza el “skirt pie”, ambos se conectan mediante atracción magnética gracias a imanes N35 de 3mm de diámetro ubicados en el extremo inferior del “skirt pie” (Figura 71b) y en el extremo superior del domo (Figura 70b).

8.2.3. Diseño del “Dome Magnet Mount” o DMM.

El “Dome Magnet Mount” o DMM está diseñado para integrar las “ball casters” (también conocidas como “ruedas locas”) y los imanes al robot. Existen dos versiones del DMM, el que conecta el IDU con el armazón interior y el que conecta el “skirt ring” con el cascarón exterior de la esfera, así como se pueden observar la Figura 72 y la Figura 73, respectivamente.

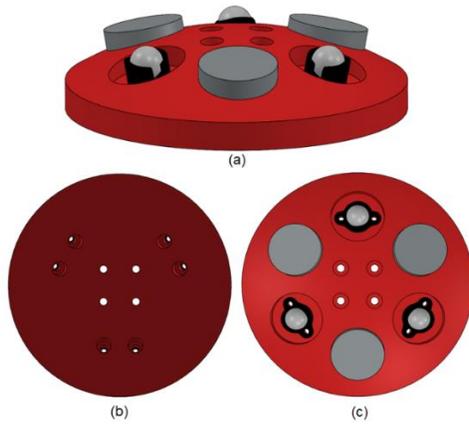


Figura 72. Diseño del DMM V1. (a) Vista isométrica. (b) Vista de planta inferior. (c) Vista de planta superior.

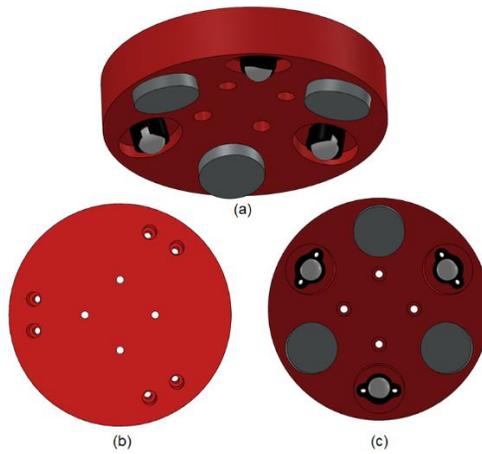


Figura 73. Diseño del DMM V2. (a) Vista isométrica. (b) Vista de planta inferior. (c) Vista de planta superior.

8.3. Diseño de la unidad de conducción interna (IDU).

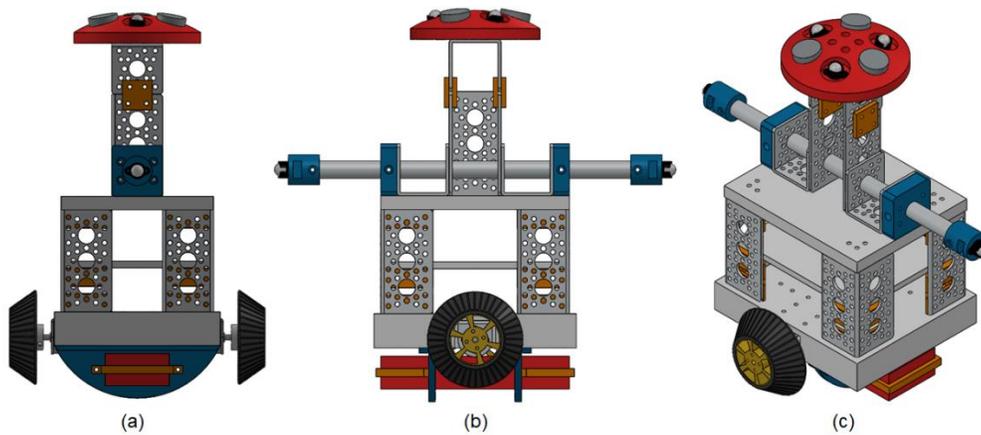


Figura 74. Diseño de la unidad de conducción interna (IDU). (a) Vista lateral. (b) Vista de alzado. (c) Vista isométrica.

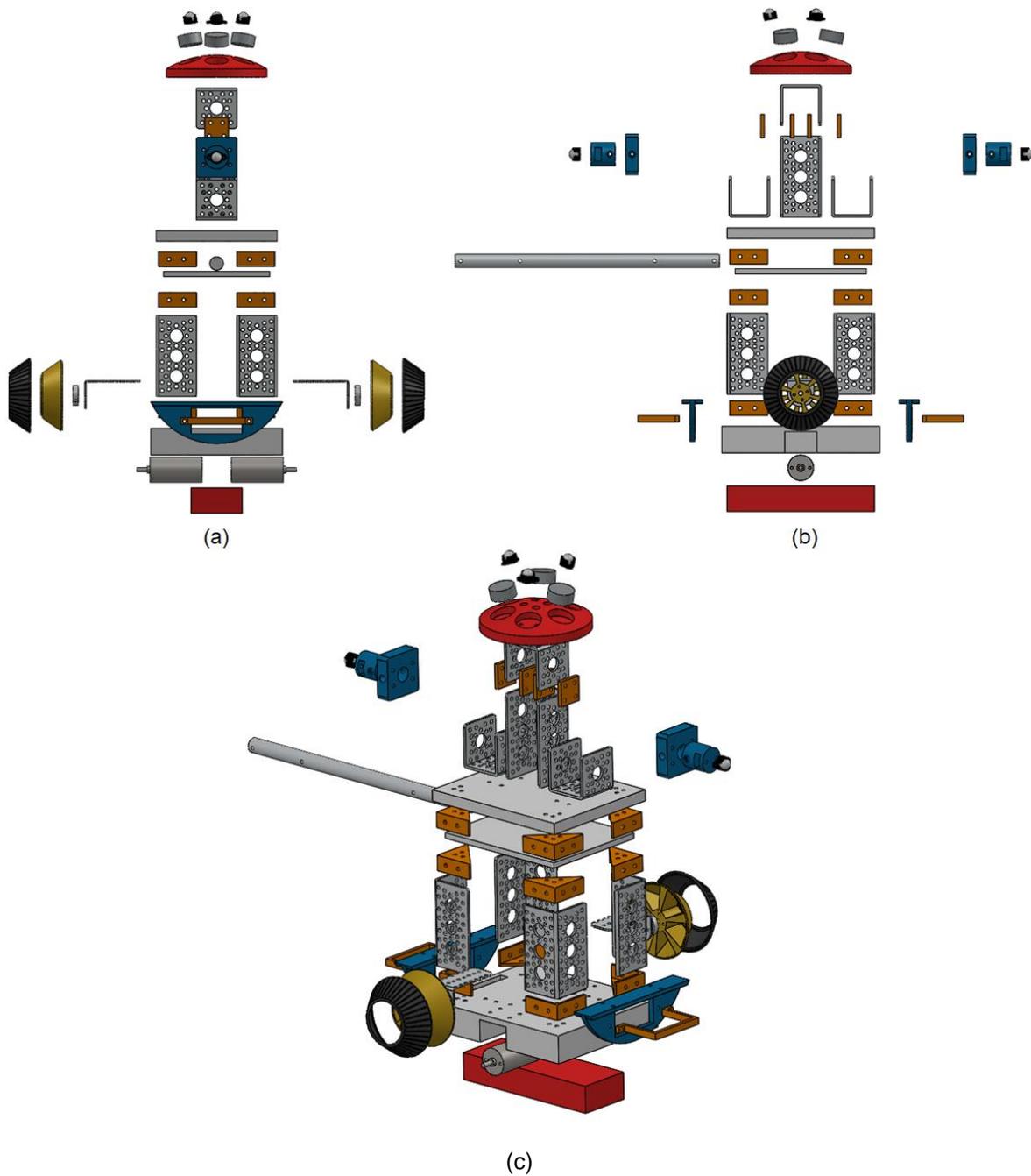


Figura 75. Vista explosionada de la unidad de conducción interna (IDU). (a) Vista lateral. (b) Vista de alzado. (c) Vista isométrica.

El diseño de la unidad de conducción interna está basado en el sistema de desplazamiento del centro de masa utilizando una unidad tipo hámster para lograr dicho desplazamiento, así como se puede observar en la Figura 74 y Figura 75. El movimiento será transmitido a la esfera por medio de dos llantas cónicas conectadas a los dos motores principales por medio de “hubs” (también conocidos como bridas). Para mayor estabilidad se agregó un eje principal perpendicular a las llantas, el cual permite que las “ball casters” de sus extremos hagan contacto con la

esfera, aportando soporte a la unidad. La unidad también cuenta con un sistema de 3 pisos, el primero es el soporte principal de la estructura, en el segundo se encuentran los elementos de control y en el último se posiciona el eje y la torre principal que conecta magnéticamente al DMM V1 con la cabeza externa del robot.

8.3.1. Diseño de la llanta cónica.

Utilizando una llanta circular normal, el área de contacto entre la esfera y la llanta se disminuye debido a la forma de la superficie esférica del cascarón, causando un problema de deslizamiento entre ambas superficies, lo que conlleva a una perturbación indeseada. Por lo que se vio la necesidad de utilizar un tipo de llanta que mitigue este problema, utilizando la mayor área de contacto posible, por lo que se llegó a la solución de usar una llanta cónica, la cual asegura el mayor contacto entre ambas superficies.

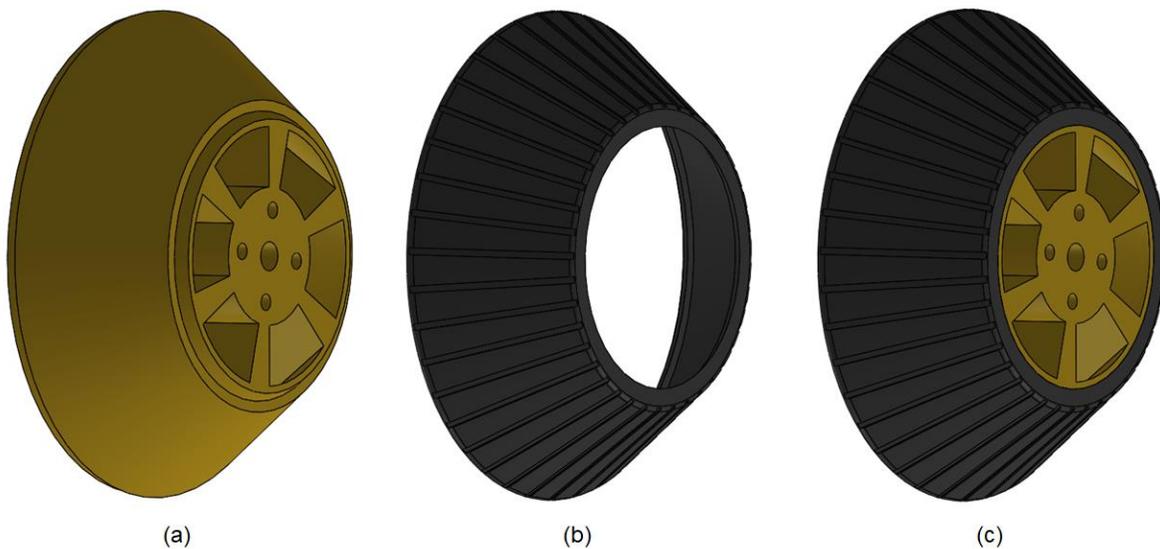


Figura 76. Diseño de la llanta cónica: (a) Rin de la llanta cónica. (b) Cuera de la llanta. (c) Ensamble de la llanta.

Dado a que no se encuentran comercialmente este tipo de llantas, se optó por diseñarla, tomando los requerimientos de la esfera a utilizar. Este diseño se divide en dos partes: El Rin (Figura 76a) y la cuera de la llanta (Figura 76b). La cuera utiliza la presión y la elasticidad del material para así encajar dentro del rin. El diámetro total de la rueda es de 72mm. Las partes de la llanta están hechas para ser impresas en 3D y en el caso de la cuera, se imprimirá en una aleación flexible.

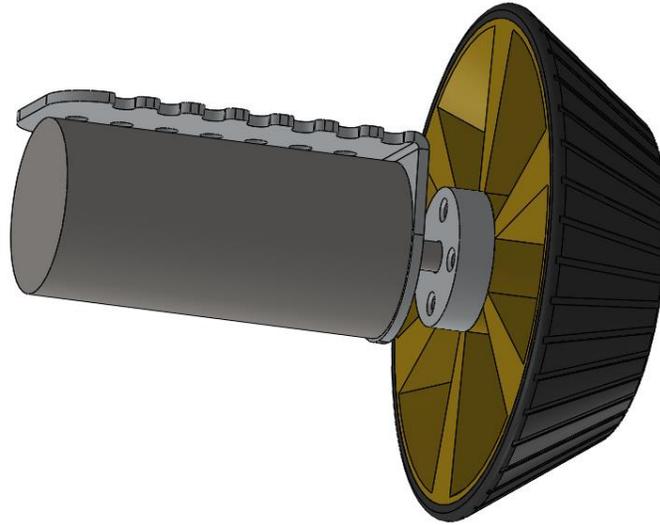


Figura 77. Acople de la llanta al actuador.

La llanta se diseñó para conectarse a un motorreductor utilizando un “hub” universal de 4mm de diámetro y a su vez, el motor se conectará al mecanismo IDU por medio de un “bracket” universal. El sistema de acople se puede visualizar en la Figura 77.

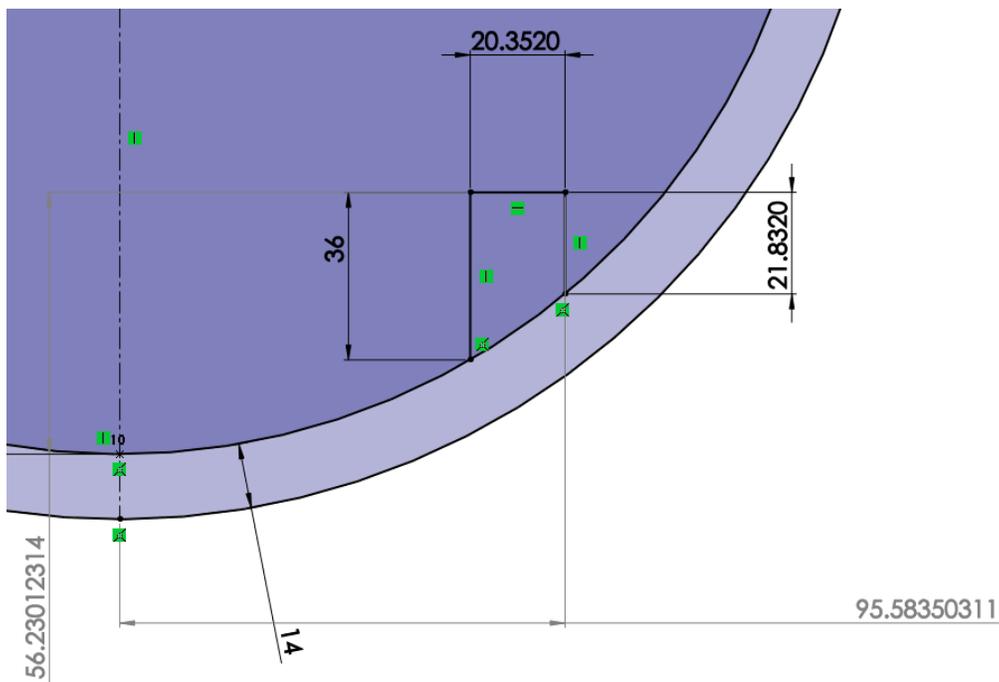


Figura 78. Distancia óptima en donde estará ubicada la rueda.

Dada la forma cónica de la llanta, esta debe ocupar un lugar específico donde ocupe la mayor área superficial, por lo que se procedió a hallar la distancia entre la llanta y el eje central de la esfera que me garantice un máximo contacto, de esta forma se conoce su posición en la esfera y esta medida se convirtió en la base del diseño del mecanismo IDU.

8.3.2. Diseño de la base del IDU.

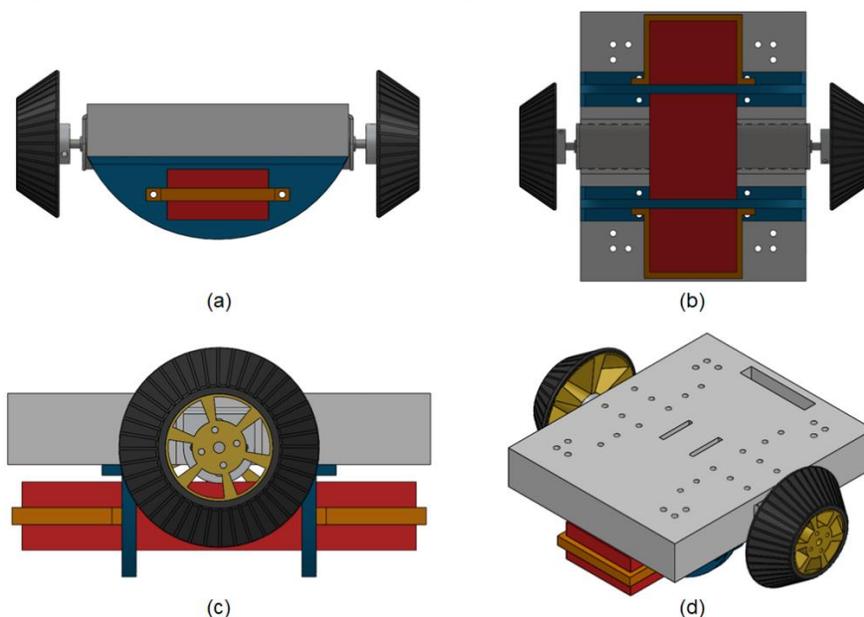


Figura 79. Diseño de la base del IDU. (a) Vista frontal. (b) Vista de planta inferior. (c) Vista lateral. (d) Vista isométrica.

El primer piso del sistema es la base estructural del IDU, está diseñada de tal forma que las llantas estén ubicadas exactamente en la zona de mayor área de contacto con la esfera. Adicionalmente, se buscó optimizar el espacio disponible, por lo que se diseñó un sistema de sujeción para que la batería logre quedar en el espacio restante de la parte inferior, sin que entre en contacto con los motores o la esfera, ahorrando así espacio. El sistema de sujeción de la batería y los demás elementos del primer piso, se pueden observar a detalle en la Figura 80.

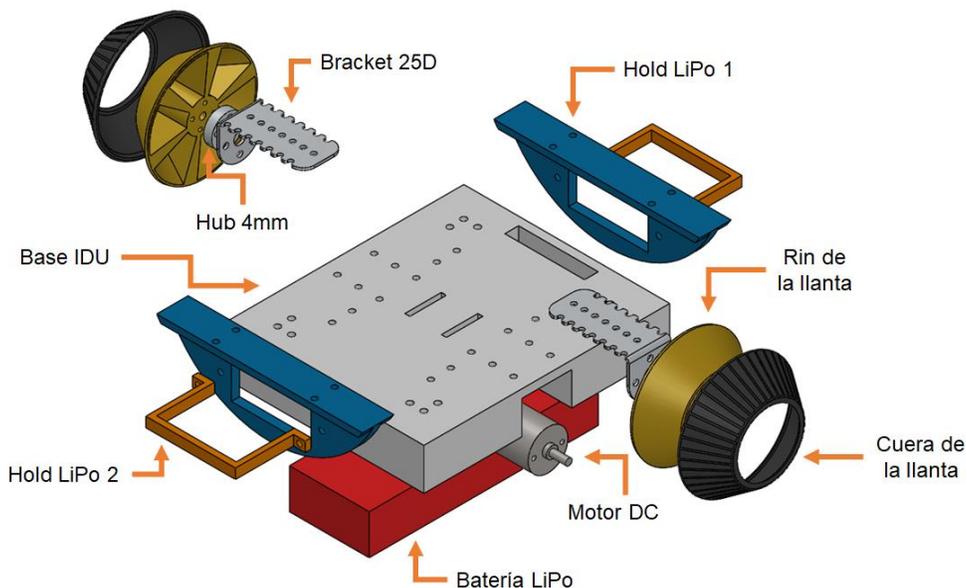


Figura 80. Partes del piso base del IDU.

8.3.3. Diseño de la base para el controlador y la sensórica.

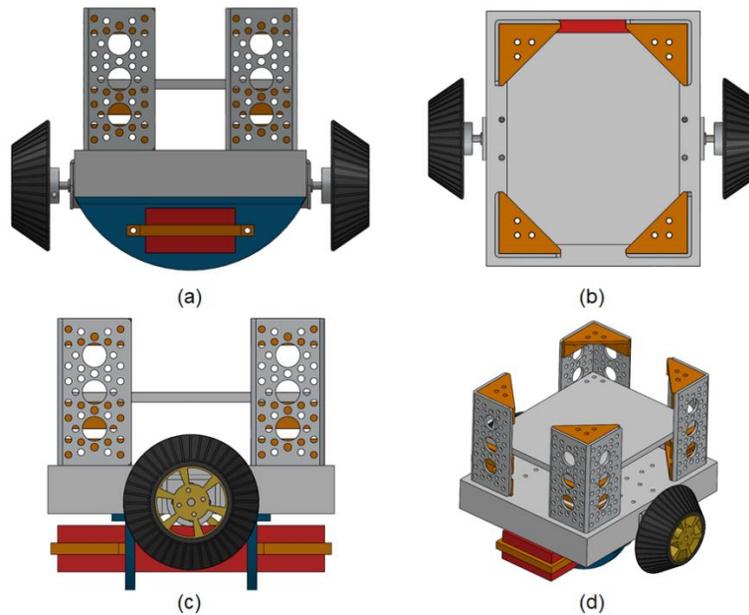


Figura 81. Diseño de la base para el controlador y la sensórica. (a) Vista frontal. (b) Vista de planta superior. (c) Vista lateral. (d) Vista isométrica.

Para el diseño de los demás pisos, se utiliza cuatro columnas en “L” de aluminio como soporte principal y se sujetan a las bases por medio de cuatro soportes angulares de forma triangular, nombrados como “L pizza”, los cuales fueron fabricados en impresión 3D. El segundo piso está reservado para el controlador y la sensórica del proyecto.

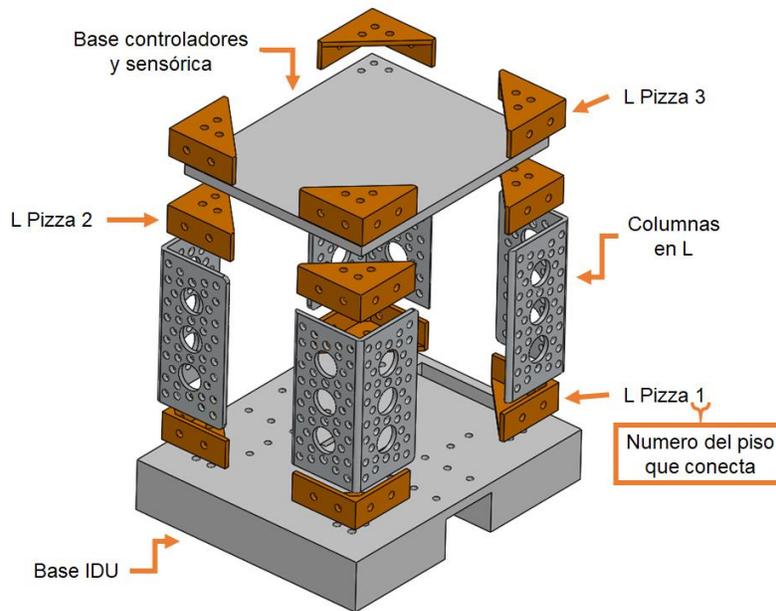


Figura 82. Partes del segundo piso y la estructura de soporte principal.

8.3.4. Diseño del eje y torre principal.

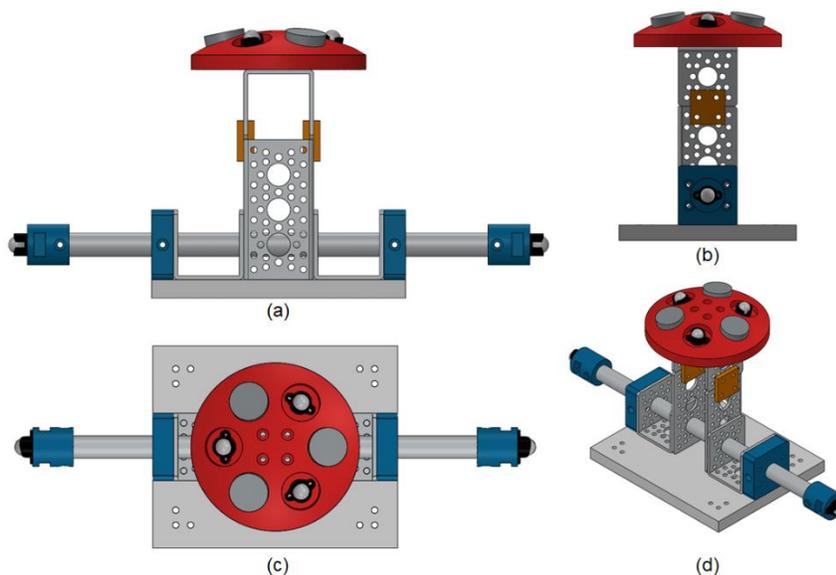


Figura 83. Diseño del eje y torre principal. (a) Vista lateral. (b) Vista frontal. (c) Vista de planta superior. (d) Vista isométrica.

Para sostener el DMM V1, se diseñó una torre conformada por un canal de aluminio rectangular unido a uno cuadrado por medio de 4 conectores (nombrados “Hold T” en este diseño). Igualmente, el eje principal reposa sobre el canal rectangular, dos canales cuadrados y dos conectores cuadrados (nombrados “Hold eje”), dándole así el soporte y la unión requeridos. Para unir las “ball caster” y el eje, se diseñó la pieza “Hold BallCas”. El eje se mantendrá sujeto al “Hold BallCas” gracias a sus respectivas aperturas, por donde un sistema de tornillo-tuerca tendrá la función de un prisionero para el eje.

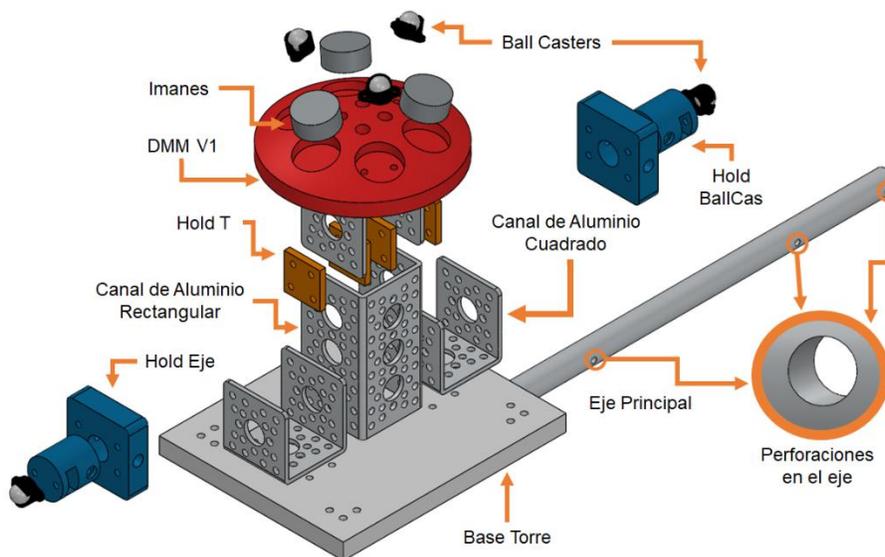


Figura 84. Partes del eje y la torre principal.

8.4. Selección de materiales.

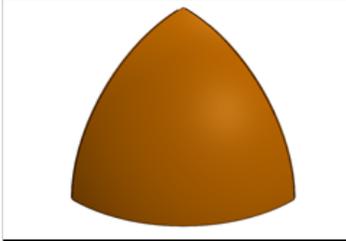
Tomando en cuenta las características de “prototipo” del proyecto, la versatilidad del proceso, el alcance económico y el tiempo asignado, se optó por utilizar el proceso de “prototipado rápido” para la creación de la mayoría de las piezas del proyecto. Para la selección de los diferentes materiales de impresión 3D, se optó por utilizar una matriz de QFD, tomando en cuenta los siguientes parámetros de calificación:

- **Resistencia a impactos:** este parámetro es crítico para asegurar la resistencia mecánica del prototipo ante posibles impactos en el campo de prueba.
- **Resistencia a torsión:** aunque no tan crítico como el parámetro anterior, se busca buenas características mecánicas para brindarle mayor rigidez al prototipo ante cualquier situación que se presente.
- **Calidad del acabado:** este parámetro busca proteger la estética del prototipo ante las posibles circunstancias en su uso.
- **Facilidad de imprimir:** con este parámetro se garantiza un ahorro de tiempo en la configuración de las características de impresión que definirán cada pieza.
- **Capacidad de Post-procesado:** en llegado caso de que la pieza requiera alguna modificación o ajuste menor, este parámetro definirá que tan posible es realizar dicha actividad sin afectar considerablemente la integridad de la pieza.
- **Capacidad para puentes y voladizos:** entre mayor capacidad tenga el material para la creación de puentes y voladizos, menor será la cantidad de soportes a utilizar en la impresión de las piezas, traducándose en un ahorro de material y tiempo.
- **Costos:** este parámetro definirá que tan factible es el uso de dicho material con su relación definición/precio.

Los resultados de esta selección de materiales se pueden observar en las siguientes matrices QFD:

8.4.1. Selección de materiales para la esfera.

Tabla 6. Selección de materiales para el cascarón esférico.

Selección de materiales: Cascaron esferico					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	5	1	3	9	3
Resistencia a torsion	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	3	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	2	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	3	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	3	9	3	3	3
Costos	4	9	9	3	1
Total		176	128	180	106

8.4.2. Selección de materiales para el domo.

Tabla 7. Selección de materiales para el domo.

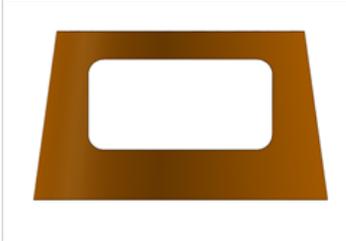
Selección de materiales: Dome					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	4	1	3	9	3
Resistencia a torsion	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	4	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	3	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	4	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	4	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		214	158	192	128

Tabla 8. Selección de materiales para el skirt pie.

Selección de materiales: Skirt Pie					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	2	1	3	9	3
Resistencia a torsión	2	1	3	9	3
Calidad del acabado	4	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	3	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	4	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	4	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		211	149	165	119

Tabla 9. Selección de materiales para el DMM V2.

Selección de materiales: DMM V2					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	4	1	3	9	3
Resistencia a torsión	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	4	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	3	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	3	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	3	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		196	152	186	122

8.4.3. Selección de materiales para el sistema IDU.

Tabla 10. Selección de materiales para la base de los motores.

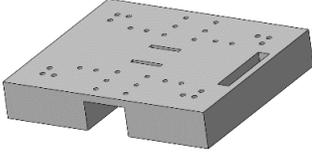
Selección de materiales: Base Motores					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	4	1	3	9	3
Resistencia a torsión	4	1	3	9	3
Calidad del acabado	4	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	4	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	3	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	3	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		200	164	198	134

Tabla 11. Selección de materiales para la base T y la base de control.

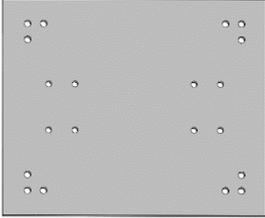
Selección de materiales: Base T y Base Arduino					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	4	1	3	9	3
Resistencia a torsión	4	1	3	9	3
Calidad del acabado	4	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	4	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	3	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	3	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		200	164	198	134

Tabla 12. Selección de materiales para el DMM V1.

Selección de materiales: DMM V1					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	4	1	3	9	3
Resistencia a torsión	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	4	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	3	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	3	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	3	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		196	152	186	122

Tabla 13. Selección de materiales para el L Pizza.

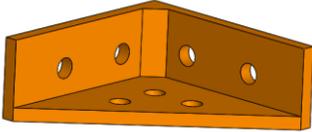
Selección de materiales: L Pizza					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	5	1	3	9	3
Resistencia a torsión	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	4	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	3	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	4	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	2	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		197	155	195	125

Tabla 14. Selección de materiales para el Hold T.

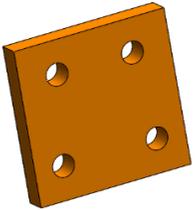
Selección de materiales: Hold T					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	3	1	3	9	3
Resistencia a torsión	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	3	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	2	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	2	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	2	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		165	125	159	95

Tabla 15. Selección de materiales para el Hold Lipo 1.

Selección de materiales: Hold Lipo 1					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	2	1	3	9	3
Resistencia a torsión	2	1	3	9	3
Calidad del acabado	3	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	2	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	4	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	4	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		199	131	153	101

Tabla 16. Selección de materiales para el Hold Lipo 2.

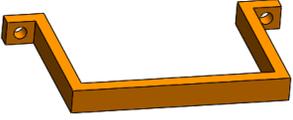
Selección de materiales: Hold Lipo 2					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	3	1	3	9	3
Resistencia a torsión	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	3	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	3	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	3	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	3	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		186	140	168	110

Tabla 17. Selección de materiales para el Hold eje.

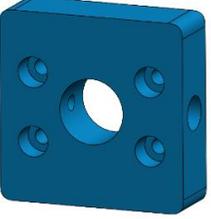
Selección de materiales: Hold eje					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	2	1	3	9	3
Resistencia a torsión	2	1	3	9	3
Calidad del acabado	3	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	3	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	3	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	3	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		184	134	150	104

Tabla 18. Selección de materiales para el Hold BallCaster.

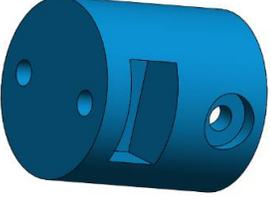
Selección de materiales: Hold BallCaster					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	3	1	3	9	3
Resistencia a torsión	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	3	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	2	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	4	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	4	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		201	137	171	107

Tabla 19. Selección de materiales para el rin rueda.

Selección de materiales: Rin Rueda					
	Valor de la necesidad	PLA+	ABS	PETG	HIPS
Criterios					
Resistencia a impactos	3	1	3	9	3
Resistencia a torsión	3	1	3	9	3
Calidad del acabado	4	9	9	9	9
Facilidad de imprimir	5	9	1	9	3
Capacidad de post-procesado	3	3	9	3	9
Capacidad para "puentes"	4	9	3	3	3
Capacidad para "voladizos"	4	9	3	3	3
Costos	5	9	9	3	1
Total		213	155	183	125

8.5. Simulación estática por elementos finitos de la esfera.

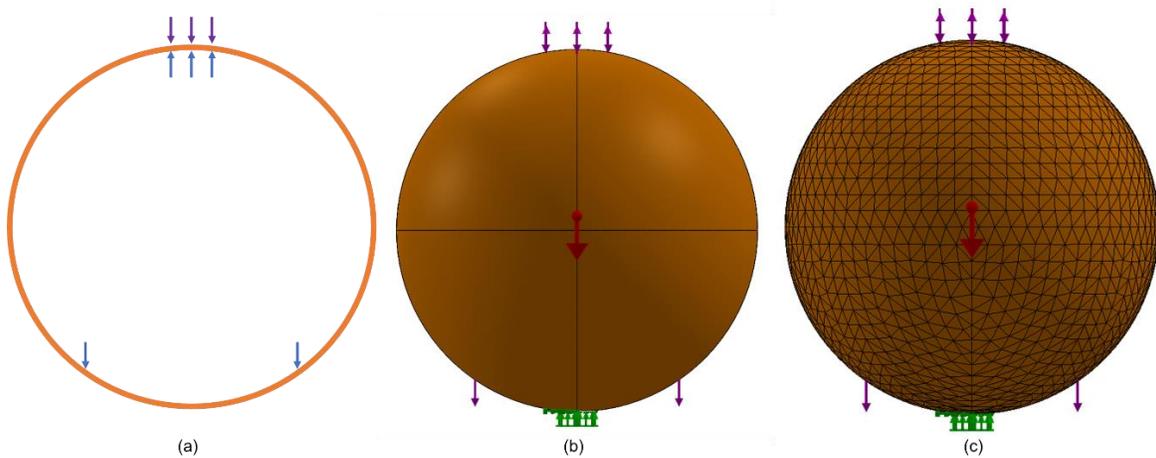


Figura 85. Simulación estática por elementos finitos de la esfera. (a) Reacciones presentes en el sistema. (b) Reacciones agregadas dentro de la simulación. (c) Enmallado del sistema.

Con el fin de comprobar la selección del material de la esfera, se procedió a hacer una simulación estática por elementos finitos, donde se reemplazó el robot interno por sus respectivas fuerzas unitarias equivalentes (vistas de color azul en la Figura 85a). También se reemplazó la cabeza por sus respectivas fuerzas equivalentes (vistas de color morado en la Figura 85a). Igualmente, para simular el suelo se añadió una restricción de movimiento en una pequeña sección plana que simula la pequeña deformación que hace el suelo sobre la esfera.

Los resultados de la simulación fueron los siguientes:

8.5.1. Esfuerzos de von Mises.

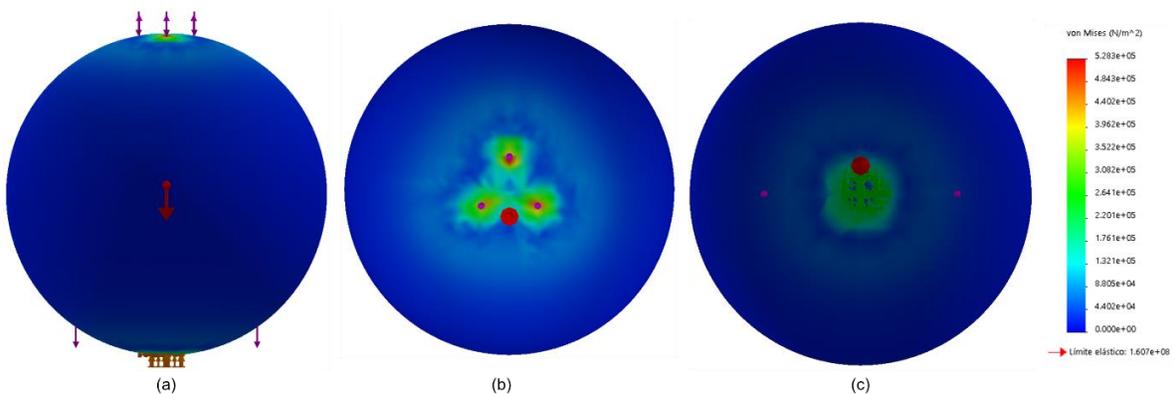


Figura 86. Esfuerzos externos de von Mises. (a) Vista lateral. (b) Vista de planta superior. (c) Vista de planta inferior.

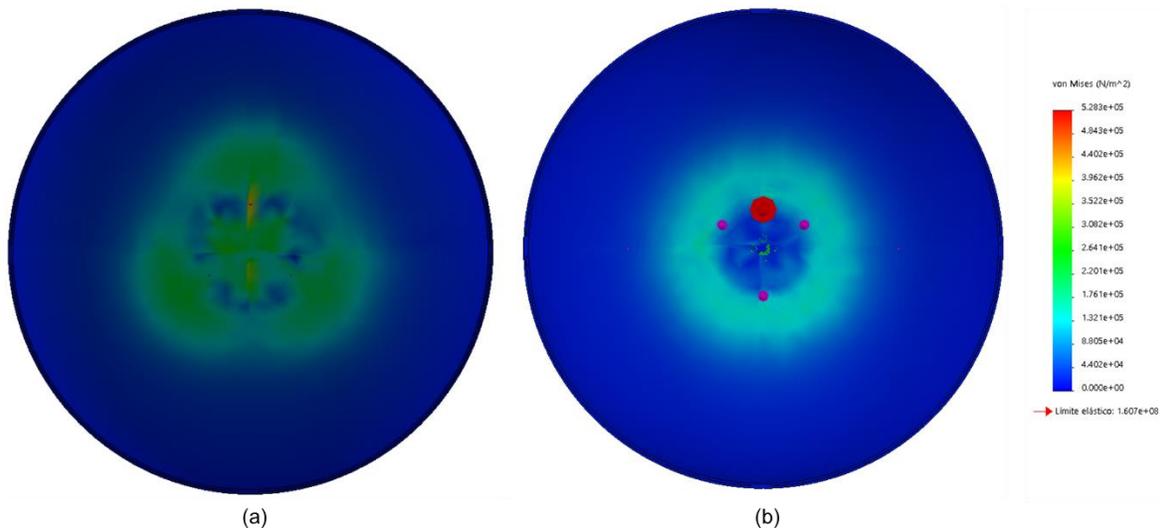


Figura 87. Esfuerzos internos de von Mises. (a) Vista de planta superior. (b) Vista de planta inferior.

Como se puede observar en la Figura 86 y Figura 87, el esfuerzo máximo presentado es de $5.0283 \times 10^5 [N/m^2]$ el cual no logra superar el límite elástico del material, que es de $1.607 \times 10^5 [N/m^2]$, por lo que se puede validar la selección del material PET-G, ya que en condiciones estáticas este material puede soportar fácilmente los esfuerzos que presenta el sistema.

Cabe resaltar que cuando se habla de esfuerzos internos y externos, se refieren a los vistos en los bordes internos y externos de la esfera, ósea que “externos” se refiere a la parte externa de la esfera e “internos” a la parte interna de la misma.

8.5.2. Desplazamientos.

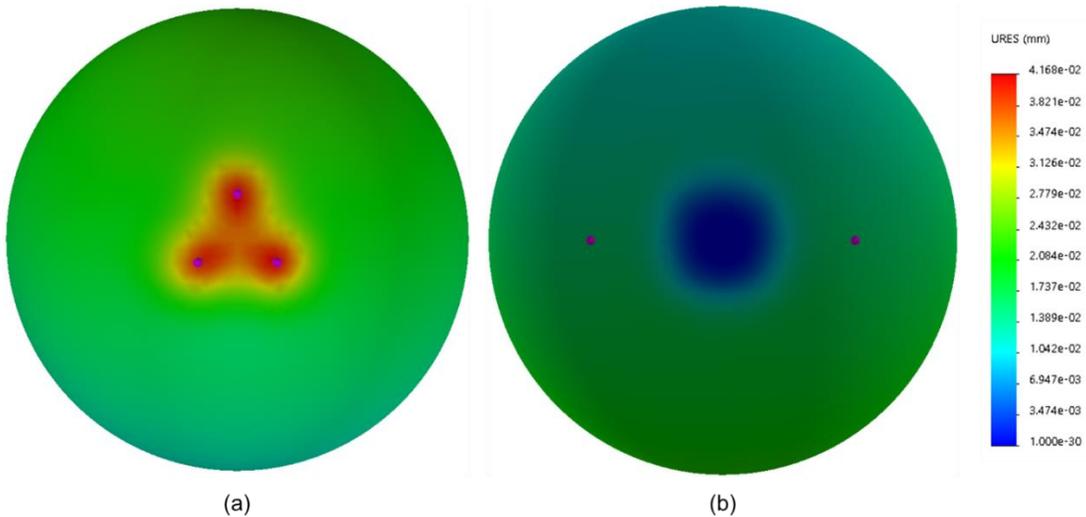


Figura 88. Desplazamientos externos. (a) Vista de planta superior. (b) Vista de planta inferior.

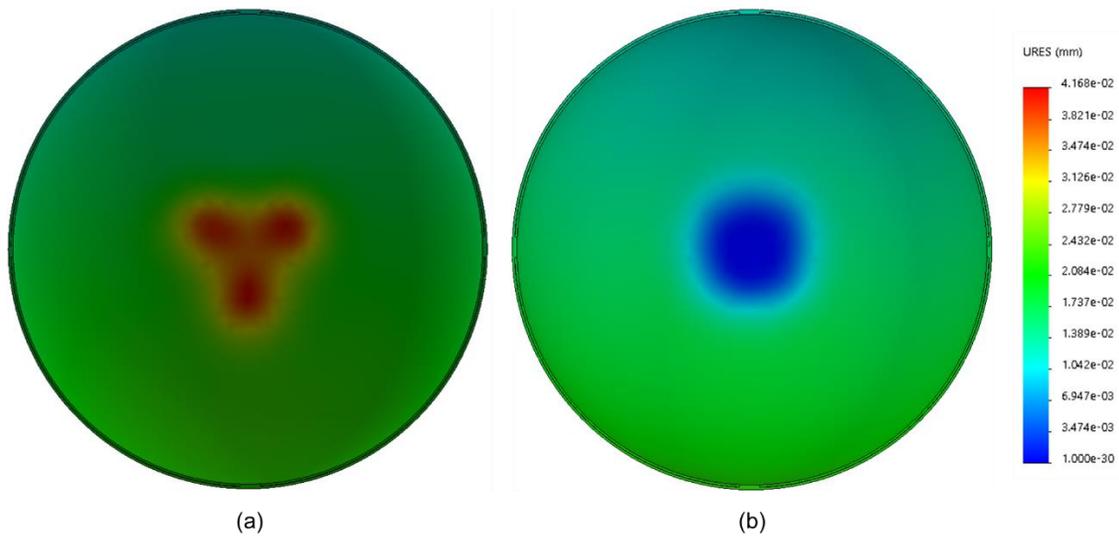


Figura 89. Desplazamientos internos. (a) Vista de planta superior. (b) Vista de planta inferior.

El resultado de la simulación demostró que el mayor desplazamiento que se genera es de 0.04168 mm, el cual no representa ningún riesgo para la integridad de la esfera.

8.5.3. Deformaciones unitarias.

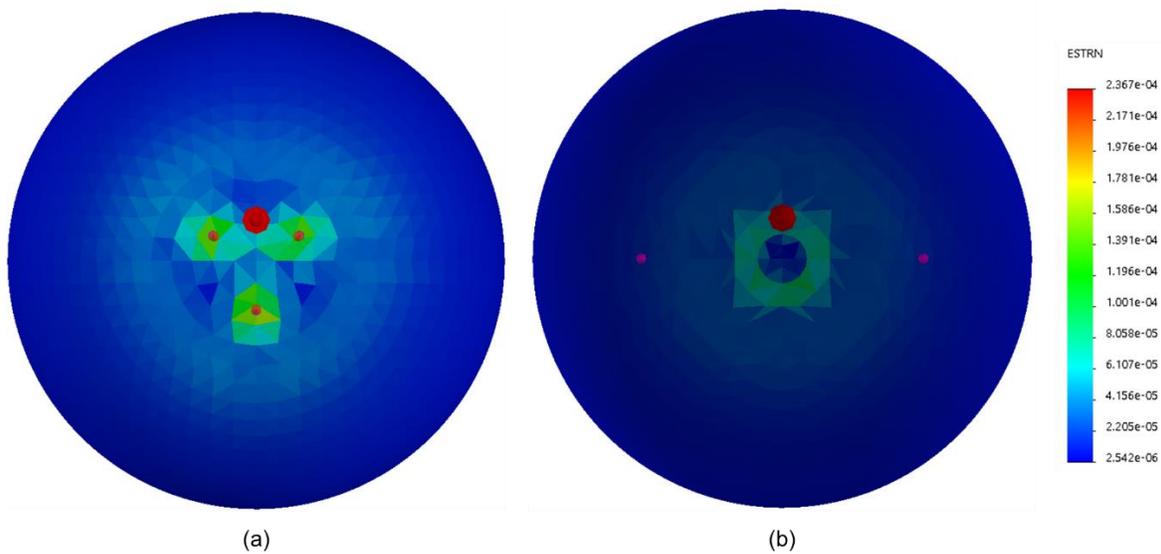


Figura 90. Deformaciones unitarias externas. (a) Vista de planta superior. (b) Vista de planta inferior.

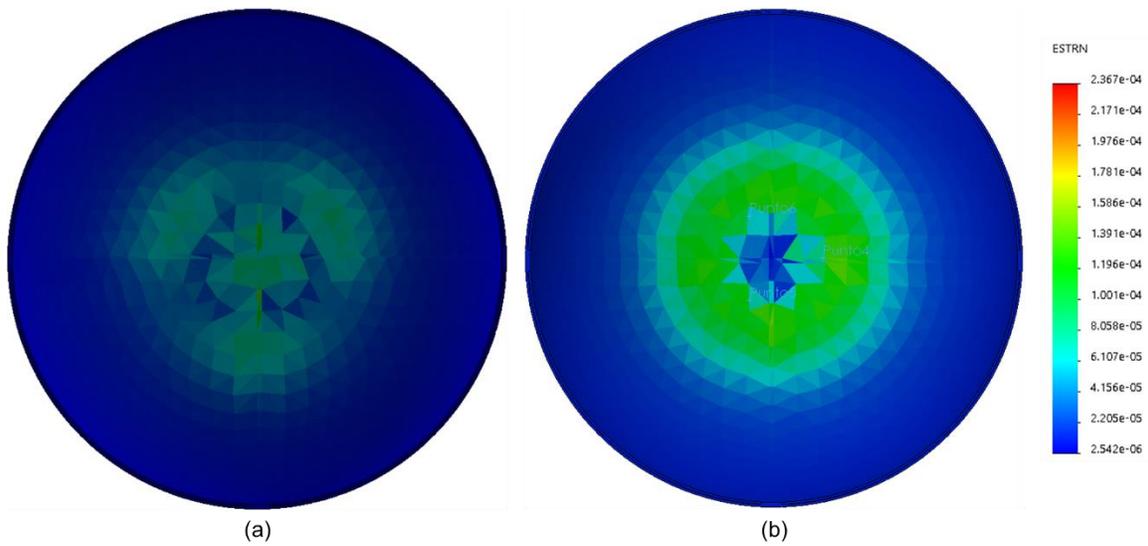


Figura 91. Deformaciones unitarias internas (a) Vista de planta superior. (b) Vista de planta inferior.

El grafico de deformaciones unitarias nos muestra que la deformación máxima no supera los $1.196 * 10^4$ y se encuentra en la parte inferior de la esfera en su borde interior, tal y como se puede observar en la Figura 91b.

9. DISEÑO ELECTRÓNICO DEL PROTOTIPO.

9.1. Selección de la instrumentación.

La selección de la instrumentación del prototipo esta subdividida en cinco categorías principales:

- **Selección de los actuadores.**
- **Selección del sensor de ángulo.**
- **Selección del controlador y el driver para los motores**
- **Selección de las baterías.**
- **Selección del control RC.**

9.1.1. Selección de los actuadores.

Para poder seleccionar adecuadamente los dos actuadores del prototipo, es necesario conocer el torque máximo que requiere la acción de control para cumplir con las máximas exigencias del sistema en lazo cerrado. Para esto recurrimos al modelo matemático NO lineal del robot móvil esférico (incluyendo el modelo del motor), ensamblándolo en Simulink® y utilizando las ecuaciones (80), (81) y (82) correspondiente a los estados del sistema (Figura 95b). Al modelo se les asignan parámetros estándar ya conocidos y se implementa un controlador por punto equilibrio, tal y como se puede observar en el siguiente diagrama de bloque:

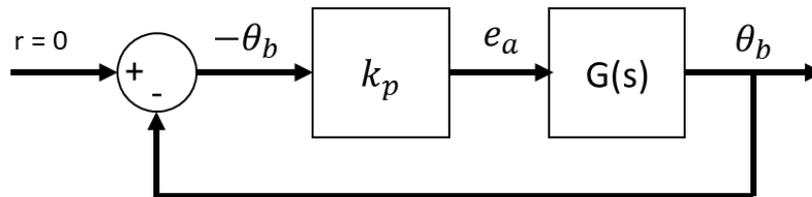


Figura 92. Diagrama de bloques del sistema de control para la selección de motores.

El objetivo del sistema de control por punto de equilibrio es poder disminuir el cabeceo del robot controlando su inclinación. Este objetivo será explorado a detalle en la sección 11.2.

Para la selección del actor se propone utilizar un controlador proporcional, puesto que con este tipo de controlador se obtiene acciones de control más bruscas, ideales para seleccionar un buen torque ideal máximo. Los parámetros de diseño básicos del controlador son:

- Tiempo de establecimiento menor a 8 segundos.
- Sobrepasso después de cero menor a 0.35 radianes (≈ 20 grados).
- Condición inicial de inclinación de 0.5 radianes (≈ 27 grados).

Al implementar los anteriores parámetros en el diseño del controlador da como resultado una constante proporcional de $K_p = -11$ con un tiempo de establecimiento teórico de 5.17 segundos, sin señal de perturbación. Su respuesta transitoria puede observarse en la Figura 93 y su acción de control en la Figura 94.

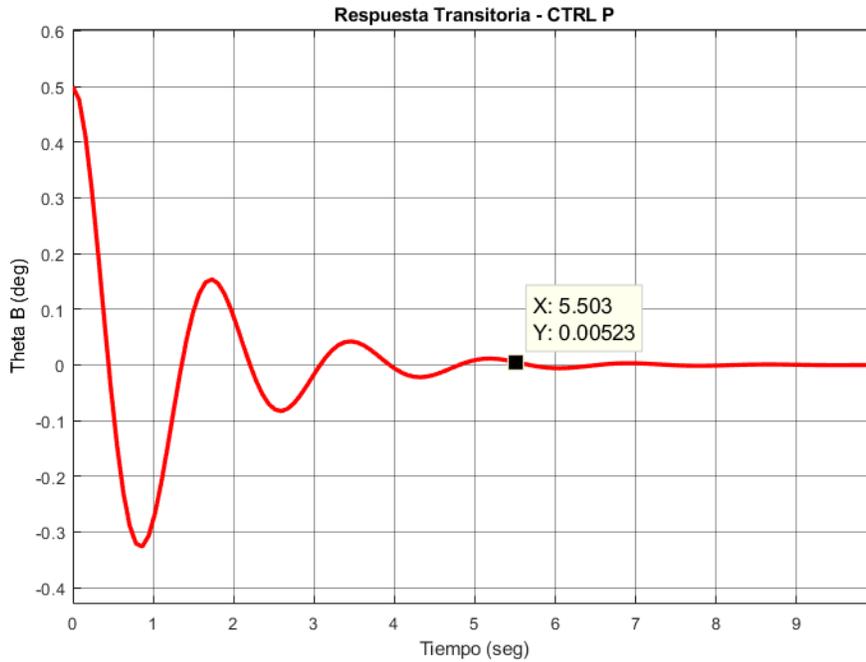


Figura 93. Respuesta transitoria de la inclinación Theta B ante un impulso inicial de 0.5 rad.

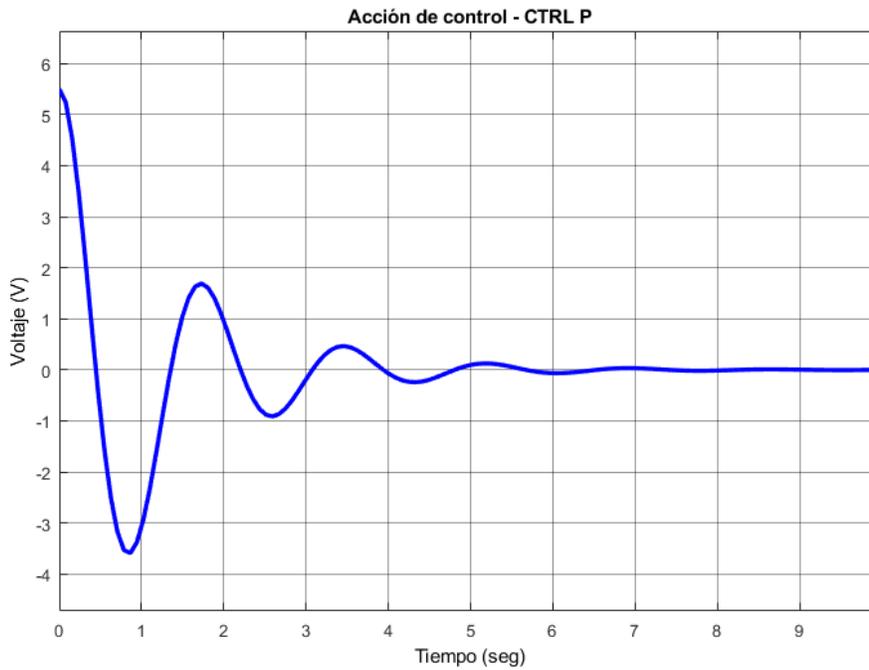


Figura 94. Acción de control proporcional ante un impulso inicial de 0.5 rad.

Con los datos obtenidos se procede a crear un bloque en Simulink[®] que nos permita conocer el torque simulado necesario para cumplir con las exigencias de la acción de control sin la necesidad de desensamblar el motor del modelo no lineal, utilizando la ecuación (77) del motor, tal y como se puede visualizar en la Figura 95c.

El modelo ensamblado final puede observarse en la Figura 95 y los parámetros de diseño aplicados en la selección se encuentran almacenados en la Tabla 20. El resultado de esta simulación puede visualizarse en la Figura 96, representando la respuesta transitoria del sistema ante un impulso inicial de 0.5 radianes.

Tabla 20. Parámetros de diseño asignados para la selección del motor DC.

Parámetros de diseño		
Características	Valor	Unidades
Voltaje del motor	12	V
Factor de seguridad (σ_s)	2	-

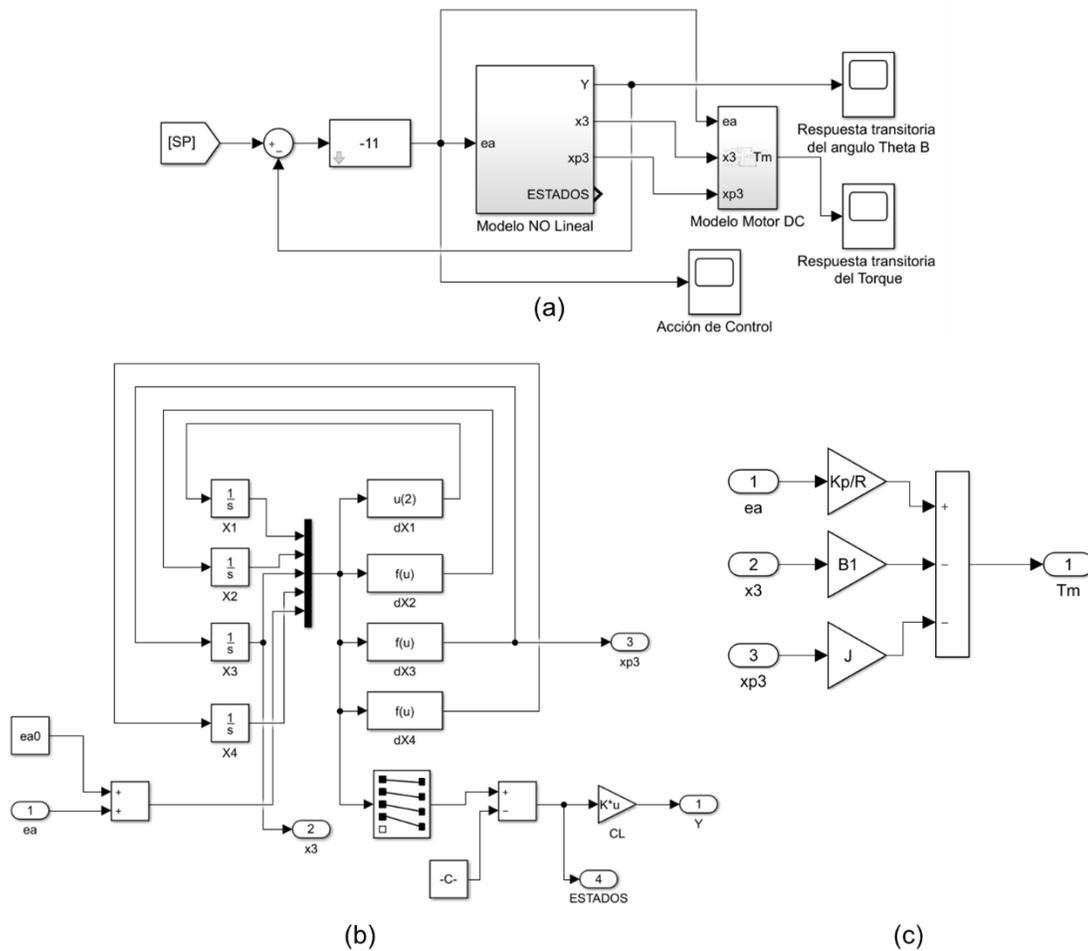


Figura 95. Ensamble en Simulink del modelo matemático NO Lineal. (a) Modelo completo. (b) Subsistema "Modelo No Lineal1". (c) Subsistema modelo del motor desacoplado.

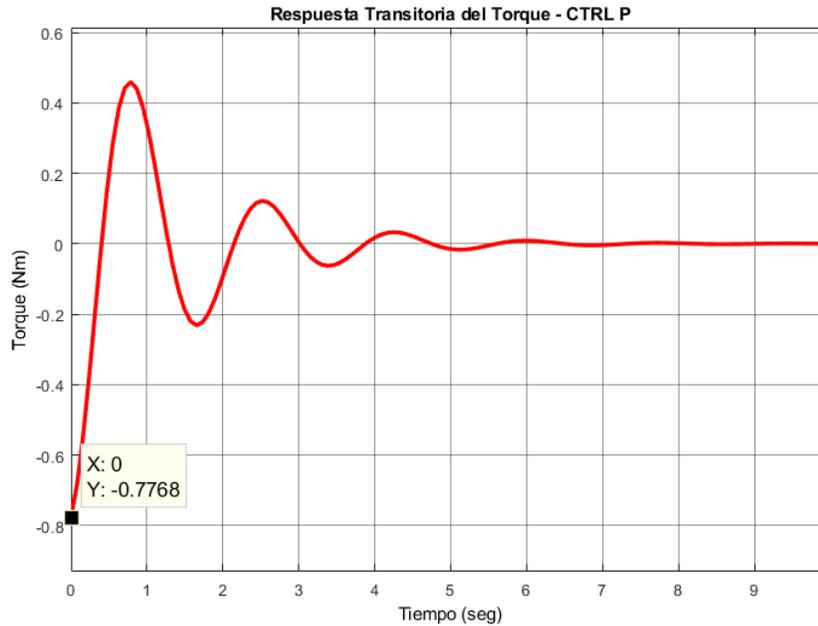


Figura 96. Respuesta transitoria del torque ante una entrada impulso de 0.5 rad.

En la gráfica anterior muestra la respuesta transitoria del torque en la que se puede notar que el torque máximo que requerirá el sistema para necesario para cumplir con las exigencias de la acción de control es de:

$$|T_m| = \tau_{max} = 0.7768 [Nm]$$

Ahora se le aplica un factor de seguridad igual a 2 para así garantizar el torque implementado sea el suficiente para moverse en terreno irregular. Aplicando el factor de seguridad asignado, el torque máximo queda:

$$T_m = \tau_{max} * \sigma_s = 0.7768 * 2 [Nm] = 1.4072 [Nm] \approx 16 [kg * cm]$$

Con el resultado obtenido, se buscó un motor que cumpliera con este requisito de torque, resultando en el siguiente motor:



Figura 97. Motorreductor 16 kg*cm. [41]

Tabla 21. Características básicas de los actuadores.

Modelo: SKU: 5-02-35		
Características	Valor	Unidades
Velocidad angular de la llanta	1.56	kg*cm
Velocidad	100	RPM
Voltaje	12	V
Corriente máxima	6.5	A

9.1.2. Selección del sensor de ángulo.



Figura 98. Acelerómetro y Giroscopio MPU6050. [42]

Para la medición del ángulo de inclinación del robot, se optó por utilizar una unidad de medición inercial o IMU (Inertial Measurement Units), la cual combina un acelerómetro de 3 ejes y un giroscopio de 3 ejes, para un total de 6 GDL. Permite usar dos tipos de protocolos de comunicación con lo son el protocolo SPI o el bus I2C. Este sensor detecta el movimiento o el giro, y es capaz de responder con una señal eléctrica ante una perturbación inducida por la aplicación de una fuerza o la gravedad, permitiendo medir un ángulo de inclinación con respecto a la vertical, siendo lo que se requiere para este proyecto.

9.1.3. Selección del controlador y el driver para los motores.



Figura 99. Arduino MEGA 2560. [43]

Como controlador principal del sistema se usó un Arduino MEGA 2560, ya que cuenta con 16 pines de entradas analógicas, 54 pines digitales I/O y una capacidad de memoria más que suficiente para lo que requiere el proyecto.

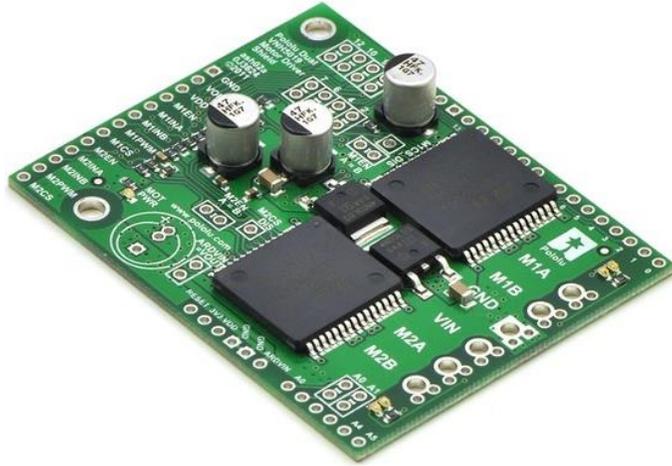


Figura 100. Driver para motores DC Pololu Dual VN5019. [44]

Para el control del giro y la potencia de los motores, se escogió el driver VN5019, el cual está especialmente diseñada para motores DC de potencia, ya que resiste un amperaje máximo de hasta 30 amperios y trabaja con hasta 24 volts de entrada externa. Además de esto, permite controlar el giro del motor, cuenta con protección contra inversión de voltaje y permite una frecuencia de PWM máxima de 20 [kHz]. Un motor de continua determina su dirección de giro en función de la tensión entre sus terminales, por lo que este driver permite controlar fácilmente la dirección del robot.

9.1.4. Selección de las baterías.

La autonomía del prototipo es un factor determinante en la selección de la batería, por esta razón es primordial seleccionar efectivamente la capacidad de descarga. Pero este factor está muy ligado al costo y es muy variable dependiendo del costo, por lo que se procedió a realizar las siguientes consideraciones para el planteamiento energético del proyecto:

- La batería debe ser liviana, relativamente pequeña y fácil de transportar.
- Para fines de observar y recrear algunas pruebas, la autonomía de prototipo será ≤ 5 horas.
- Se supone un consumo promedio ≤ 5 amperios, tomando en cuenta el consumo de los motores, la sensorica y el Arduino.

La capacidad de descarga de una batería puede calcularse fácilmente utilizando la siguiente ecuación:

$$C = x * t \quad (116)$$

En donde:

- “C” es la capacidad de la batería.
- “x” son los amperios que son consumidos de la batería.
- “t” es el tiempo en horas que queremos que funcione hasta descargarse.

Por lo tanto, si agregamos las consideraciones anteriores en la ecuación (116), obtendremos que la capacidad requerida para el prototipo es de:

$$C = 25 [Ah]$$

Con el resultado obtenido, se buscó y se encontró la siguiente batería:



Figura 101. Batería LiPo 4000mAh 7.4V HardCase. [45]

Tabla 22. Especificaciones técnicas de la batería.

Modelo: Z40002S-25 x2		
Características	Valor	Unidades
Capacidad de descarga	25	C
Capacidad de descarga	4000	mAh
Voltaje	7.5	v
Numero de celdas	2S1P	-
Peso	235	g

9.1.5. Selección del control RC.



Figura 102. Radiocontrol RC Turnigy 5X – 5 Canales. [47]

Para el radiocontrol, se optó por utilizar un control RC básico de 5 canales marca Turnigy. Este radiocontrol cuenta con un transmisor de 2.4 GHz que incluyendo módulos conmutables entre el modo 1 y el modo 2. También cuenta con su propio receptor e indicador de batería baja.

9.2. Conexión de la etapa de potencia.

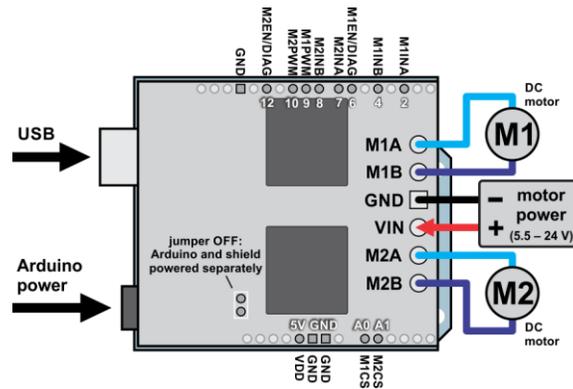


Figura 103. Pines del driver VHN5019. [44]

La etapa de potencia cuenta con el driver VHN5019, encargado de controlar la velocidad y el giro de los dos motores del robot. Este driver cuenta con cuatro borneras, dos para la conexión de cada motor (M1, M2) y dos para conectar una batería externa. Con los pines 2 y 4 se controla el giro del motor M1, mientras que con 7 y 8 se controla el giro del motor M2. La velocidad se controla mediante con el pin 9 para el motor M1 y el pin 10 para el motor M2. El diagrama de conexiones de la etapa de potencia se puede observar en la Figura 104.

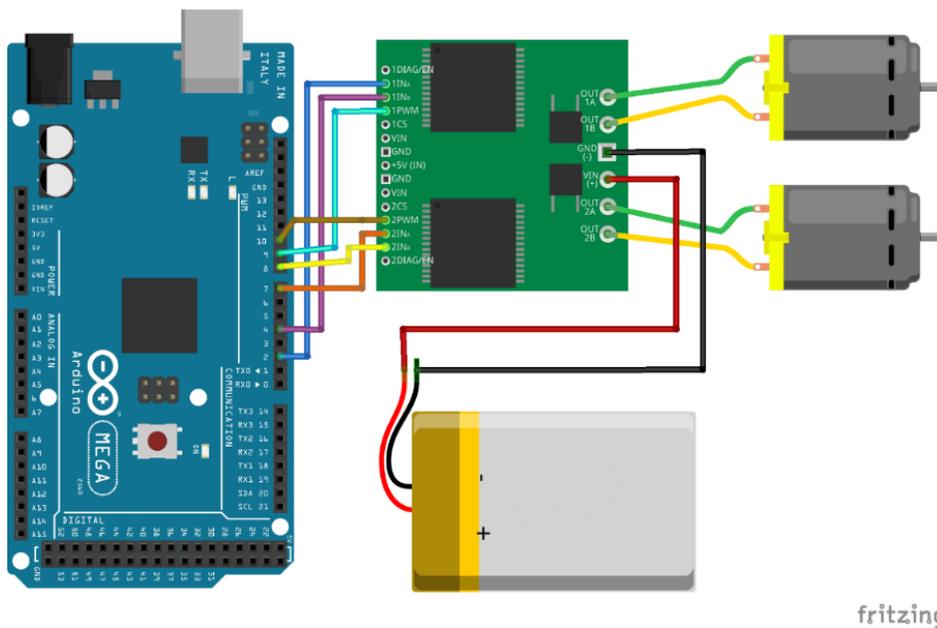


Figura 104. Diagrama de conexiones de la etapa de potencia.

9.3. Conexión de la etapa de sensórica y recepción RC.

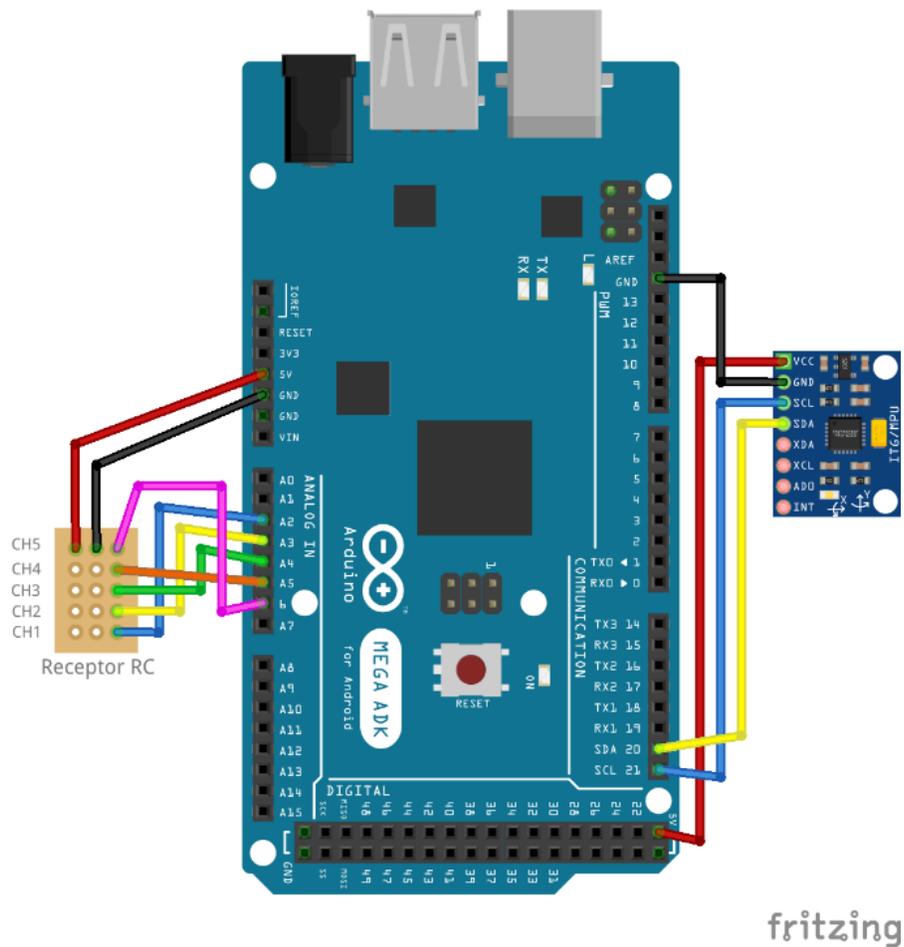


Figura 105. Diagrama de conexión de la etapa de sensórica y recepción RC.

10.CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO.

10.1. Construcción de las piezas de la esfera.

10.1.1. Construcción del cascarón de la esfera.

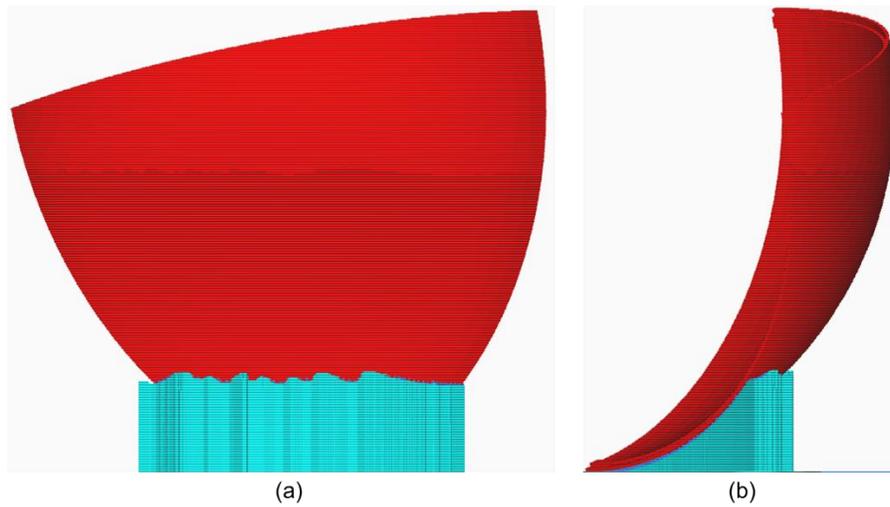


Figura 106. Orientación del cascarón de la esfera. (a) Vista frontal. (b) Vista lateral.

Para poder imprimir correctamente las piezas del cascarón de la esfera, se requirió ubicarlas en una orientación con la que se pueda optimizar el tiempo de impresión y minimizar el desperdicio de material al utilizar soportes. Por lo que se utilizó el plugin de auto orientación de Cura para obtener la orientación adecuada para la pieza. El resultado se puede observar en la Figura 107.

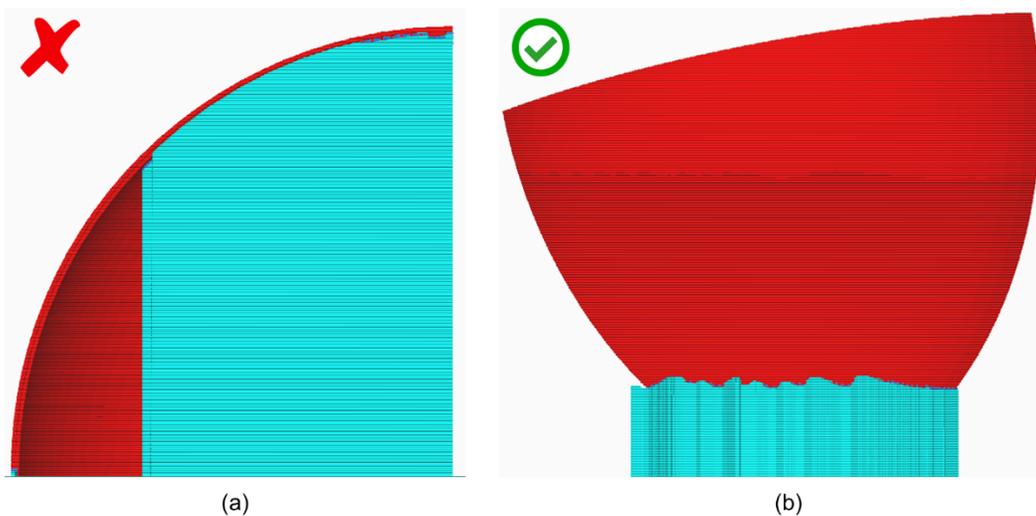


Figura 107. Diferencias en la utilización del material. (a) Orientación por defecto. (b) Orientación óptima.

En la Figura 107 podemos visualizar la gran diferencia entre la orientación por defecto de la pieza y la orientación óptima. Con la orientación por defecto, el tiempo de impresión es de aproximadamente 1 día con 23 horas y se gasta 533 gramos de material, mientras que, utilizando la orientación óptima, la pieza se gasta un total de 18 horas con 33 minutos y gasta tan solo 158 gramos de material.

Para garantizar una buena resistencia de la pieza, se seleccionaron parámetros óptimos de impresión, como los vistos en la sección 5.6 del marco teórico, tales como una densidad del 40%, se alternó una pared adicional y se usó un patrón de relleno fuerte en 3D.

10.2. Construcción de las piezas del domo.

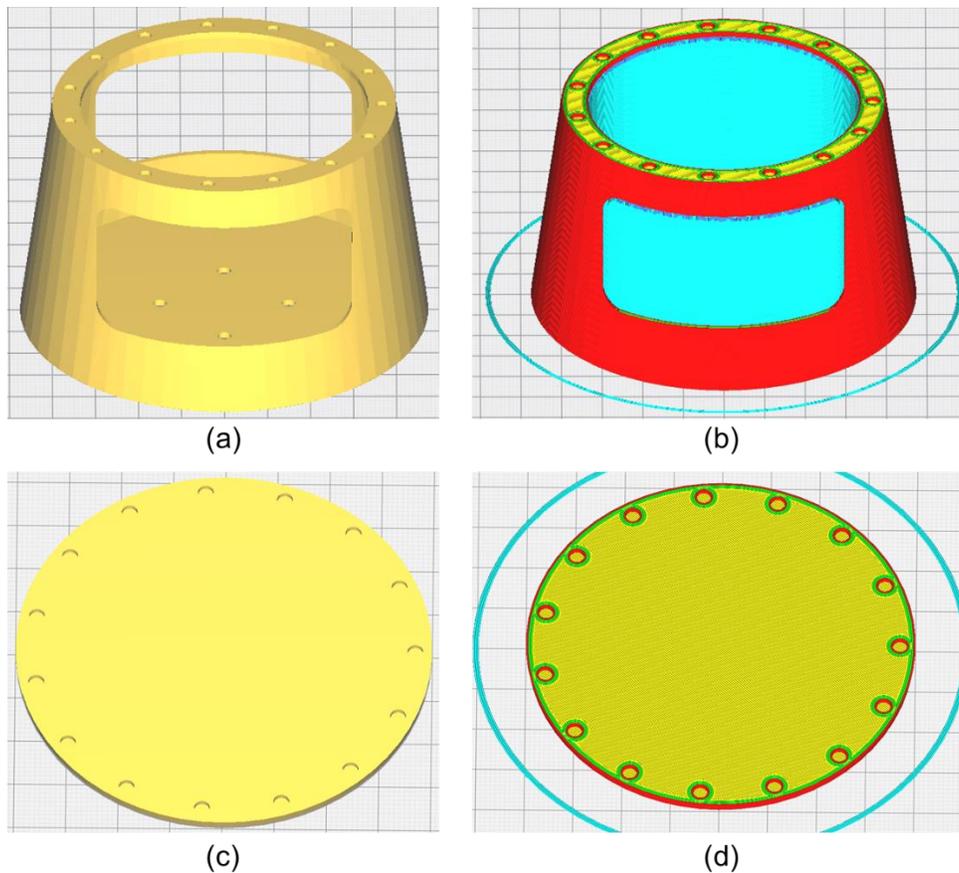


Figura 108. Construcción de las piezas del domo. (a) Domo, sólido. (b) Domo, vista de capas. (c) Skirt Ring, sólido. (d) Skirt Ring, vista de capas.

En la construcción de las piezas del domo, se utilizaron parámetros de resistencia aceptables, como una densidad del 20%, un patrón de relleno 3D fuerte y se alternó una pared adicional.

10.3. Construcción de las piezas del robot interno IDU.

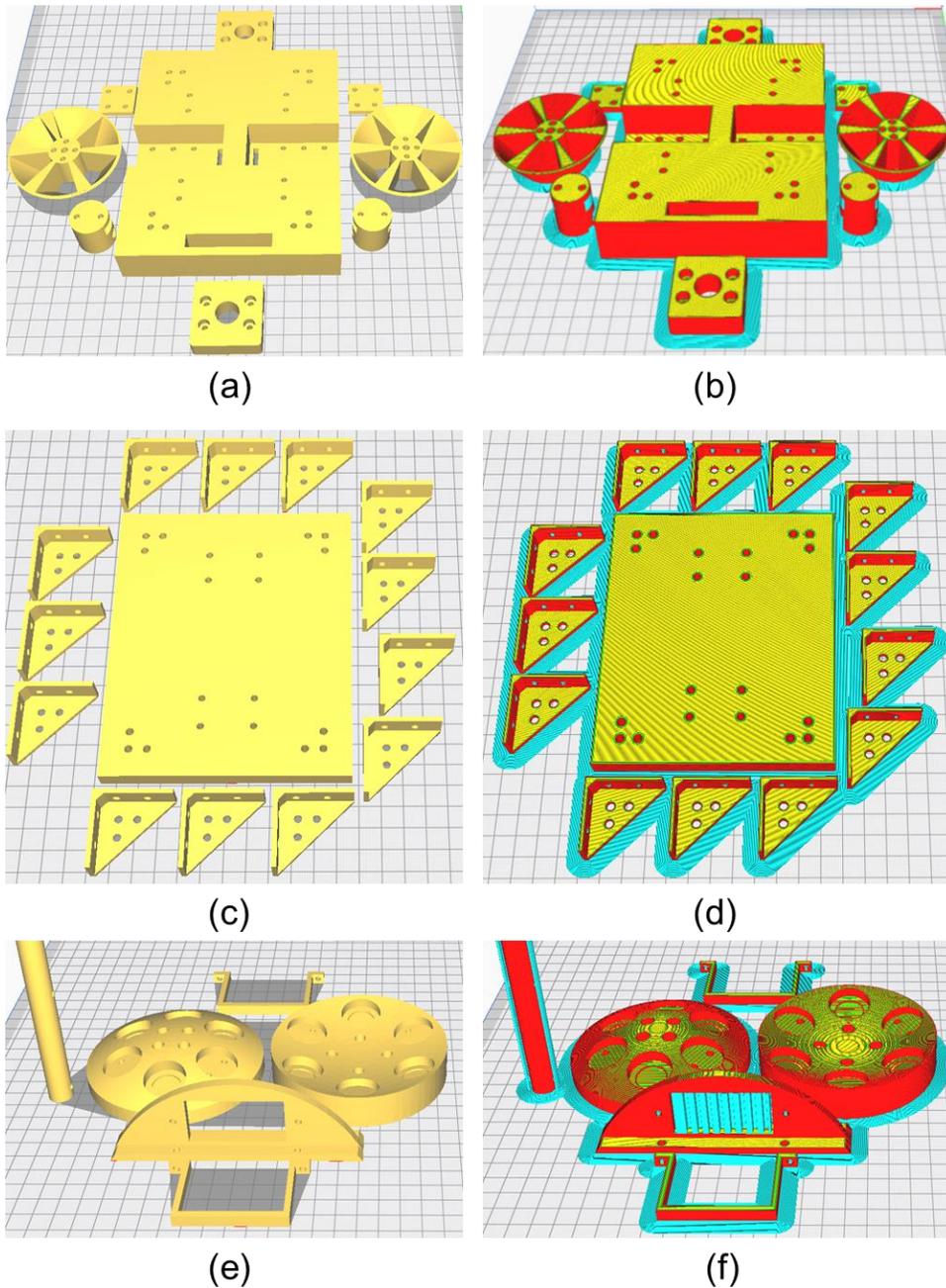


Figura 109. Construcción de las piezas del IDU. (a) Bandeja 1, solidos. (b) Bandeja 1, vista de capas. (c) Bandeja 2, solidos. (d) Bandeja 2, vista de capas. (e) Bandeja 3, solidos. (f) Bandeja 3, vista de capas.

En la construcción de las piezas del robot interno IDU, se utilizaron parámetros de impresión óptimos para las piezas que más lo requerían, incluyendo las bases, los “L-pizza”, el eje y los rines. En las demás piezas, se utilizaron parámetros de resistencia aceptables.

10.4. Post procesamiento de las piezas impresas.

10.4.1. Post procesamiento de la esfera.

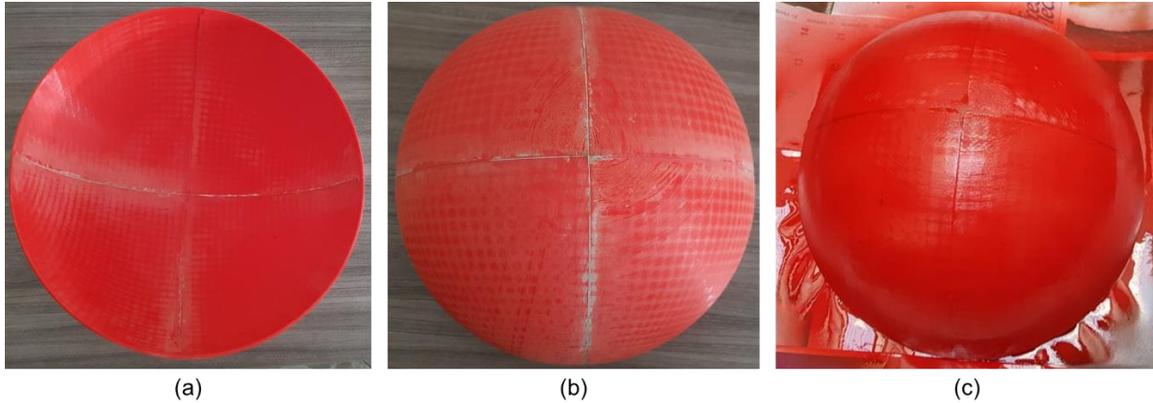


Figura 110. Post procesamiento de la esfera (a) Proceso de adhesión de los paneles. (b) Proceso de lijado. (c) Proceso de pintado.

Ya teniendo las piezas necesarias para ensamblar la esfera, se requirió acoplar cada panel del sistema labio – ranura para formar las dos media esferas, luego aplicar pegamento epóxico para garantizar una fuerte adherencia entre las piezas. Después se requirió lijar el exceso de pegamento y así garantizar la uniformidad de la superficie. Por último, se pintó cada media esfera con el fin de mantener una consistencia estética.

10.4.2. Proceso de fijación de imanes.



Figura 111. Proceso de fijación de imanes. (a) Imanes del domo. (b) Imanes del DMM.

Por último, se procedió a sujetar a fijar los imanes del proyecto en sus respectivas zonas. Para los imanes del domo se utilizó un adhesivo de secado rápido llamado cianoacrilato. Mientras que para unir los imanes de los DMM se utilizó un adhesivo epóxico transparente.

10.5. Ensamble del domo y el robot interno IDU.



Figura 112. Ensamble del domo.

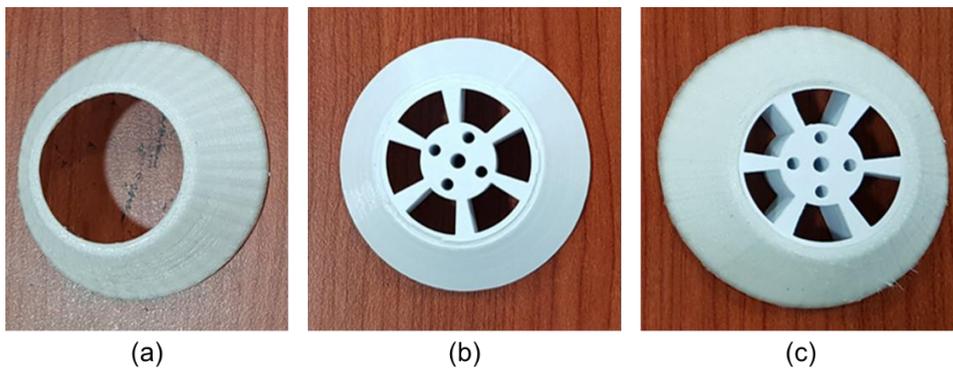


Figura 113. Ensamble de las ruedas. (a) Cuera. (b) Rin. (c) Llanta completa.

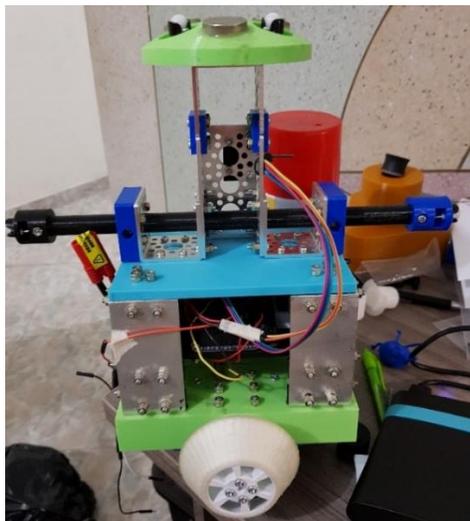


Figura 114. Ensamble del sistema tipo IDU.

Luego de realizar el post procesado de las piezas, se procede a efectuar el ensamble del domo y el sistema IDU, tal y como se puede observar en las Figura 112, Figura 113 y Figura 114.

10.6. Ensamble completo del robot.



Figura 115. Ensamble completo del robot.

Para finalizar con la construcción, se procedió a ensamblar completamente el prototipo, tal y como se puede observar en la Figura 115. Debido a los errores dimensionales inherentes del proceso de impresión 3D y la flexibilidad del material, fue necesario agregar un poco de cinta para mejorar la fijación de ambas esferas y garantizar que la esfera no se desarme en pleno movimiento.

11. DISEÑO DE LA ETAPA DE CONTROL.

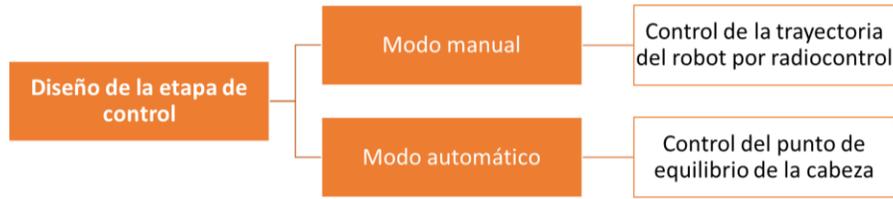


Figura 116. Diagrama de división de la etapa de control.

Para la etapa de control se propone dos modos de controlar el sistema:

- **Modo manual:** en este modo el robot no ejecutará ninguna acción de control automáticamente. El usuario tendrá completo control del robot a través del radiocontrol, con el cual podrá contralar la trayectoria del desplazamiento del robot.
- **Modo automático:** en este modo el robot ejecutará un sistema de control del punto de equilibrio de la cabeza, adicional a la señal mandada por el radiocontrol, con el fin de mantenerla estable y disminuir su cabeceo. La señal radiocontrol se añadirá como una perturbación adicional al sistema de control.

La forma de selección entre el modo manual y el modo automático será por medio del canal #5 del radiocontrol, siendo el usuario el encargado de decidir cuándo se va cambiar entre ambos modos.

11.1. Modo Manual.



Figura 117. Comandos del modo manual por medio del radiocontrol.

En el modo manual, el robot simplemente se desplazará de acuerdo con las acciones de control que le lleguen a través del sistema de radiocontrol. Utilizando el

joystick de la derecha se controla el desplazamiento vertical del robot, mientras que el joystick de la izquierda controla el desplazamiento horizontal, todo conforme al movimiento del robot que se desee en un plano XY. Mientras tanto, el interruptor del canal #5 será el que permita al usuario cambiar de modo, entre manual, automático y viceversa.

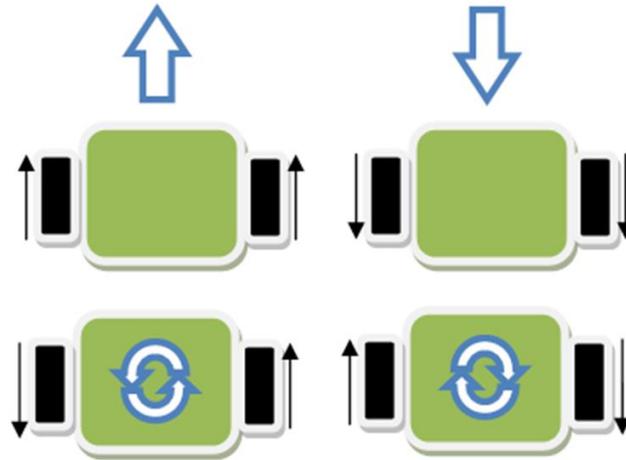


Figura 118. Sistema de movimiento diferencial.

En cuanto al movimiento del robot, para la conducción se utiliza un sistema de movimiento diferencial que, dependiendo del movimiento individual de cada rueda, el robot tomara una trayectoria diferente:

- Si ambas ruedas giran simultáneamente en la misma dirección, el robot se moverá en línea recta hacia adelante o hacia atrás, dependiendo de la dirección en que estén girando las ruedas.
- Si la rueda derecha gira hacia adelante y la rueda izquierda gira hacia atrás, el robot girará en sentido horario.
- Si la rueda derecha gira hacia atrás y la rueda izquierda gira hacia adelante, el robot girará en sentido antihorario.

La velocidad del movimiento también será controlada por el radiocontrol dependiendo de que tanto se mueva el joystick. Es muy importante que cada joystick sea manejado **independientemente**, es decir, si se requiere girar el robot no se debe mover el joystick derecho, solo el izquierdo y viceversa.

11.2. Modo automático.

En el modo automático, el robot ejecutará un sistema de control de posición del punto de equilibrio, con el fin de disminuir el cabeceo del robot al moverse y detenerse. El usuario aún podrá controlar la trayectoria del robot utilizando el radiocontrol, pero dicha señal se añadirá como una perturbación adicional al sistema de control del robot, tal y como se muestra en el siguiente diagrama bloques:

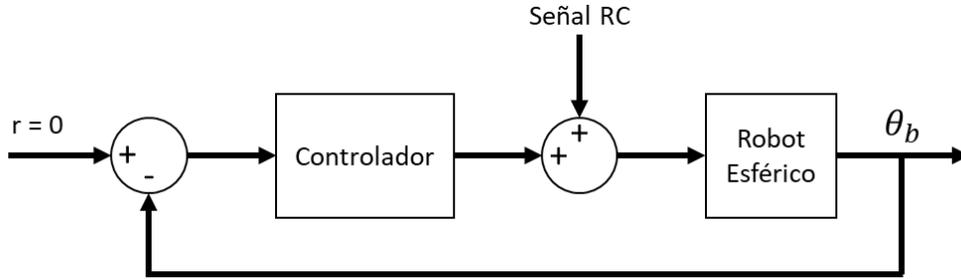


Figura 119. Diagrama de bloques del sistema de control del modo automático.

- Planteamiento del problema de control:** controlar el ángulo de inclinación θ_b con el fin de disminuir el cabeceo del robot a través de comandos de movimiento. Para ello se plantea un controlador de punto de equilibrio para controlar la inclinación, siendo el punto de equilibrio $\theta_b = 0$, en donde se coincide con el eje vertical. Como el robot necesita desplazarse y para ello se requiere una inclinación inicial, se propone añadir la señal de movimiento mandada por el radiocontrol como una perturbación adicional a la señal de control, para así garantizar el movimiento y la disminución del cabeceo. Los parámetros de diseño seleccionados para los controladores son:
 - o **Tiempo de establecimiento** menor a 8 segundos.
 - o **Sobrepaso** después de cero menor a 0.35 radianes (≈ 20 grados) ante una condición inicial de inclinación de 0.33 radianes (≈ 18.9 grados) sin perturbación.
- **Entrada del sistema:** voltaje a través de la una señal PWM.
- **Salida del sistema:** ángulo de inclinación θ_b .

11.2.1. Identificación de los parámetros del sistema.

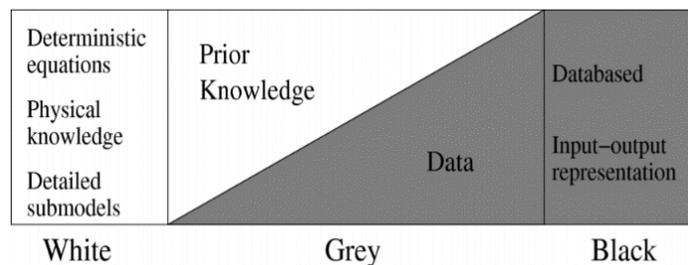


Figura 120. Modelo de caja gris. [48]

Para poder empezar a diseñar un sistema de control automático es necesario conocer el valor de las distintas constantes que intervienen en el modelo matemático anteriormente definido, de tal forma que el modelo teórico (modelo de caja blanca) se parezca lo más posible al modelo real.

Un **modelo de caja gris** combina una estructura teórica parcial con datos experimentales para completar el modelo. En vista de que existen algunas

constantes que no se conocen exactamente y cuya medición no resulta fácil de hacer, se procede a utilizar un modelo de caja gris que permita estimar el valor de dichas variables a partir del modelo matemático y los datos experimentales.

11.2.1.1. Prueba experimental a lazo abierto.

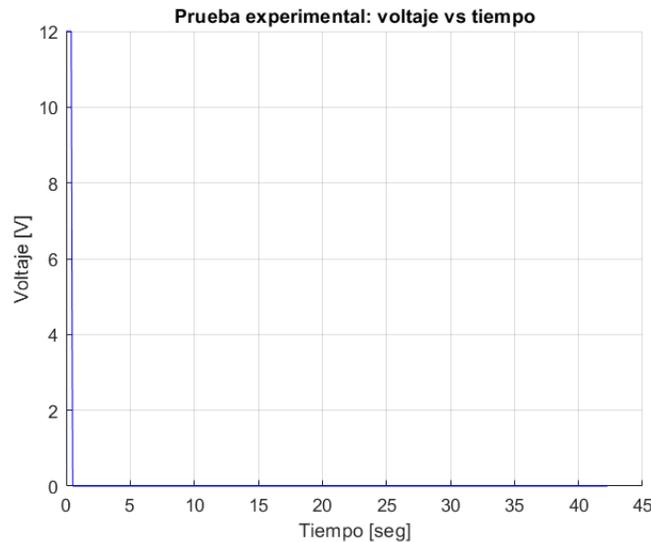


Figura 121. Señal de entrada tipo impulso: voltaje vs tiempo.

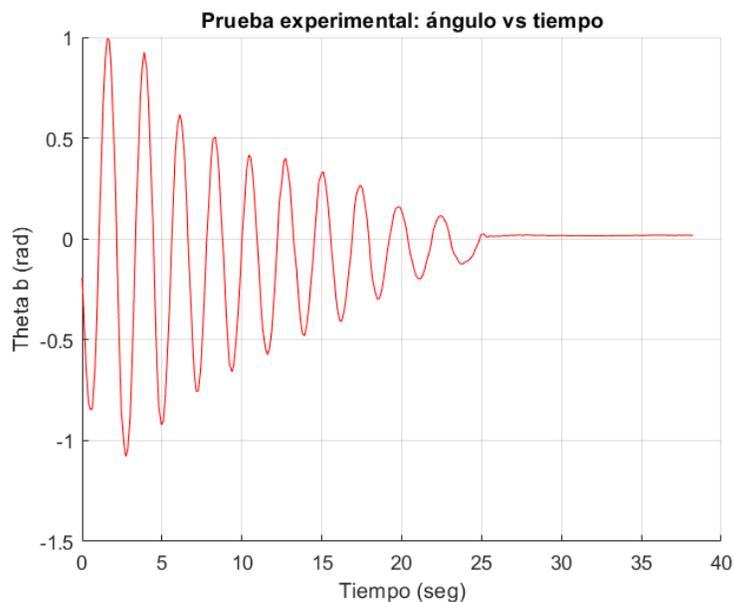


Figura 122. Respuesta transitoria del modelo experimental: ángulo vs tiempo.

Para poder emplear un modelo de identificación de caja gris es necesario añadir la entrada y salida del sistema a lazo abierto como parte del comportamiento experimental del mismo. Por lo tanto, se diseñó una prueba donde se envió una señal de entrada de voltaje, tipo impulso, a los motores y se observó el comportamiento del ángulo de inclinación interno del robot con respecto a la vertical

(θ_b), dando como resultado los datos que se pueden observar en la Figura 121 (entrada) y Figura 122 (salida).

11.2.1.2. Configuración del modelo de caja gris.

Para configurar el modelo de caja gris se requiere crear una función llamada “*BB8Model4*” la cual tendrá el modelo matemático del sistema, se ingresará como entrada los 7 parámetros a estimar y su salida será las matrices lineales A, B, C y D del modelo en espacio de estados. Las constantes que se ingresaran al modelo son:

Tabla 23. Constantes del sistema.

Tabla de datos		
Variable	Valor	Unidad
g	9.81	m/s
r_s	0.153	m
r_w	0.0289	m
r_c	0.02757	m
r_i	0.15	m
m_s	0.9	kg
m_w	0.05638	kg
m_c	2.150	kg

Tabla 24. Tabla de parámetros a estimar.

Tabla de parámetros a estimar		
Variable	Valor inicial	Unidad
I_s	0.0027	kg*m ²
I_w	0.056	kg*m ²
I_c	0.017	kg*m ²
R	2.4	Ω
K_p	2	-
J	0.00533	kg*m ²
B_1	0.1	kg/s

Luego de haber añadido los parámetros anteriores, se procede a ingresarlos dentro de la función “*idgrey*” de Matlab, la cual representa un sistema como un modelo de espacio de estados lineal con coeficientes identificables. Después se procede a ingresar los datos experimentales y guardarlos como objeto tipo “*iddata*”, que encapsula los datos medidos de la entrada y la salida para poder utilizarlos en la identificación. Por último, se procede a configurar el modelo de caja negra utilizando la función “*greyestOptions*” y damos inicio a la estimación de parámetros lineales utilizando la función “*greyest*”. El código utilizado es el siguiente:

```
clc; clear all;
```

```

odefun = 'BB8Model4';
Is = 0.0027; Iw = 0.0056; Ic = 0.0170;
% Parametros del motor
R = 2.4; Kp = 2; J = 0.00533;
B1 = 0.1;
parametros = {Is,Iw,Ib,R,Kp,J,B1};
%% Inicializacion Gray-Box
init_sys = idgrey(odefun,parametros,'c');
%% Importar data
[~,~,raw] = xlsread('C:\Users\falva\Documents\NUEVAS PRUEBAS BB8
MEJOR IMU.xlsx','IMPULSO IMANES','B2:D296'); %IMPULSO IMANES4
data = reshape([raw{:}],size(raw));
tiempo = data(:,1); tiempo = (tiempo-tiempo(1))*0.001;
entrada = data(:,2)*12/100;
salida = data(:,3)*pi/180; %%IMPULSO SC 3
clearvars data raw;
data = iddata(salida,entrada,0.12894023);
%% CAJA NEGRA
opt =
greyestOptions('InitialState','estimate','Display','on','SearchMet
hod','fmincon','Focus','prediction');
opt.EnforceStability = true;
sys = greyest(data,init_sys,opt);
compare(data,sys)
pvec = getpvec(sys)

```

11.2.1.3. Resultados de la estimación de parámetros.

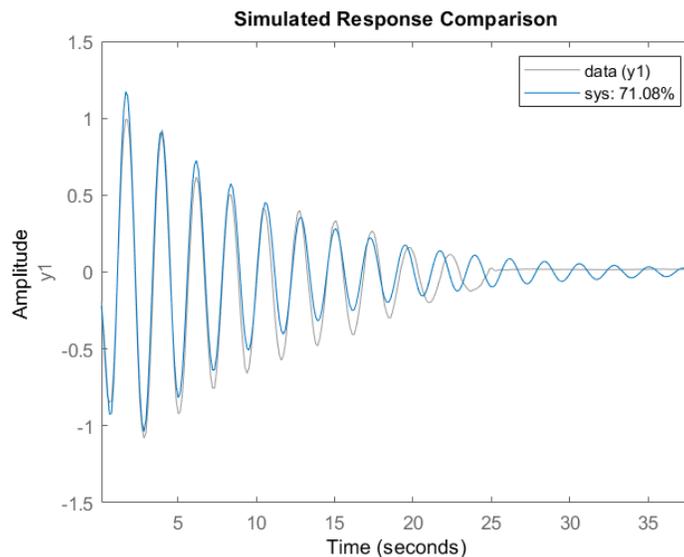


Figura 123. Comparación de los resultados obtenidos vs data experimental.

Después de un proceso iterativo, el modelo de caja gris logró obtener un best-fit total del 71.08%, es decir, una similitud entre lo teórico vs lo experimental del 71.08%, tal y como se puede observar en la Figura 123, en donde se visualiza con

claridad la zona en donde ambas gráficas coinciden hasta que la fricción seca llega a afectar el movimiento real del robot causando que se detenga más rápido. Esta es la principal diferencia entre lo teórico vs lo experimental, puesto que no se tomó en cuenta la acción de la fricción seca dentro del modelo teórico.

Los parámetros resultantes de este proceso de identificación son:

Tabla 25. Parámetros estimados en el proceso de identificación.

Tabla de parámetros a estimar		
Variable	Valor inicial	Unidad
I_s	0.0477	kg*m ²
I_w	0.0014	kg*m ²
I_c	0.0597	kg*m ²
R	9.2883	Ω
K_p	6.1110	-
J	0.016285	kg*m ²
B_1	0.50694	kg/s

Al aplicar estos datos, el modelo en espacios de estados lineal queda de la siguiente forma:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -8.6672 & 0 & 5.4766 & 0 \\ 0.7105 & 0 & -3.3149 & 0 \\ -0.0183 & 0 & 0.0116 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.7108 \\ 0.4302 \\ -0.0015 \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0]$$

$$D = 0$$

Ya teniendo el modelo de espacio de estados lineal del sistema, su equivalencia en función de transferencia estará dada por la siguiente ecuación:

$$\frac{\theta_b(s)}{e_a(s)} = \frac{-0.7108s - 6.978 * 10^{-16}}{s^3 + 3.315s^2 + 8.667s + 24.84} \quad (117)$$

De igual forma podemos conocer si el sistema es estable utilizando los autovalores de la matriz de estados:

```

>> eig(sys.a)

ans =

    0.0000 + 0.0000i
   -0.1064 + 2.8277i
   -0.1064 - 2.8277i
   -3.1021 + 0.0000i

```

Los autovalores de la matriz de estados son los polos que tienen nuestro sistema. Analizando estos datos se puede observar que la parte real de los polos es menor a cero, por lo que indica que el sistema es ESTABLE. También tiene un polo en cero, lo quiere decir que el sistema tiene un INTEGRADOR. Igualmente, al tener polos imaginarios le da al sistema un carácter OSCILATORIO. Esto se puede observar mejor en el diagrama de polos y ceros del sistema que se muestra en la Figura 124 y el grafico “root locus” en la Figura 125.

Igualmente se procedió a discretizar la función de transferencia de la planta con un periodo de muestreo de 0.0786 segundos, dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\frac{\theta_b(z)}{e_a(z)} = \frac{-0.002008z^2 + 0.0001666z + 0.001842}{z^3 - 2.718z^2 + 2.499z - 0.7706} \quad (118)$$

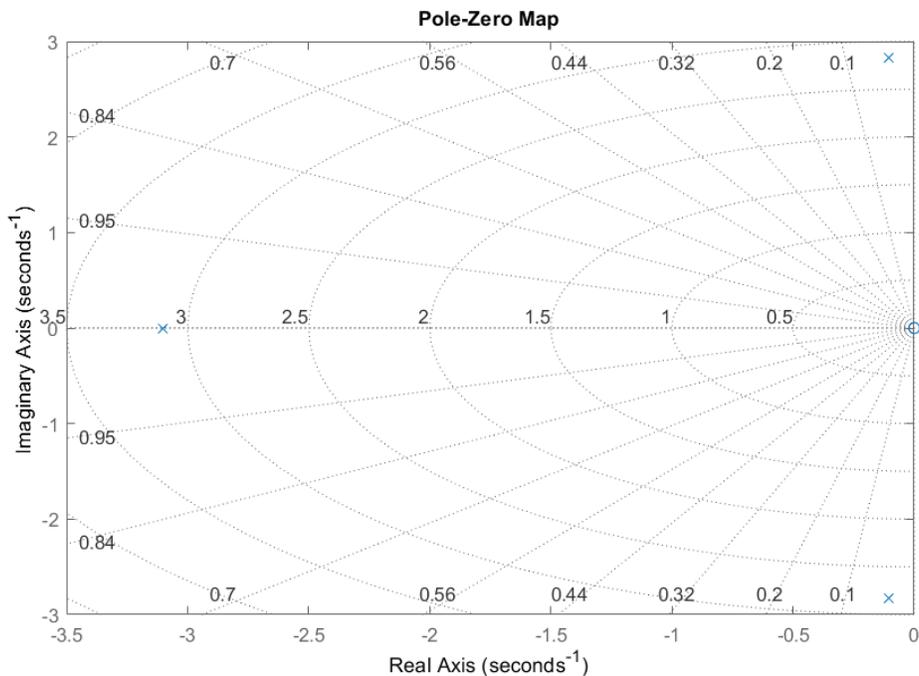


Figura 124. Diagrama de Polos y Ceros del sistema continuo.

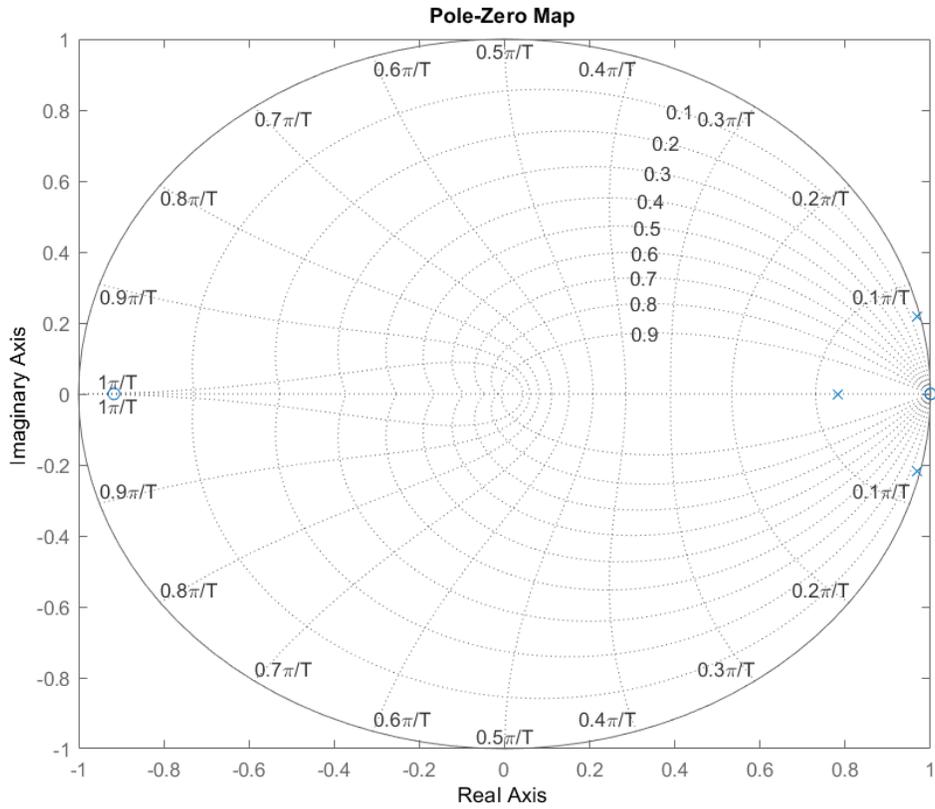


Figura 125. Diagrama de Polos y Ceros del sistema discreto.

11.2.2. Demostración de la calidad del sistema linealizado.

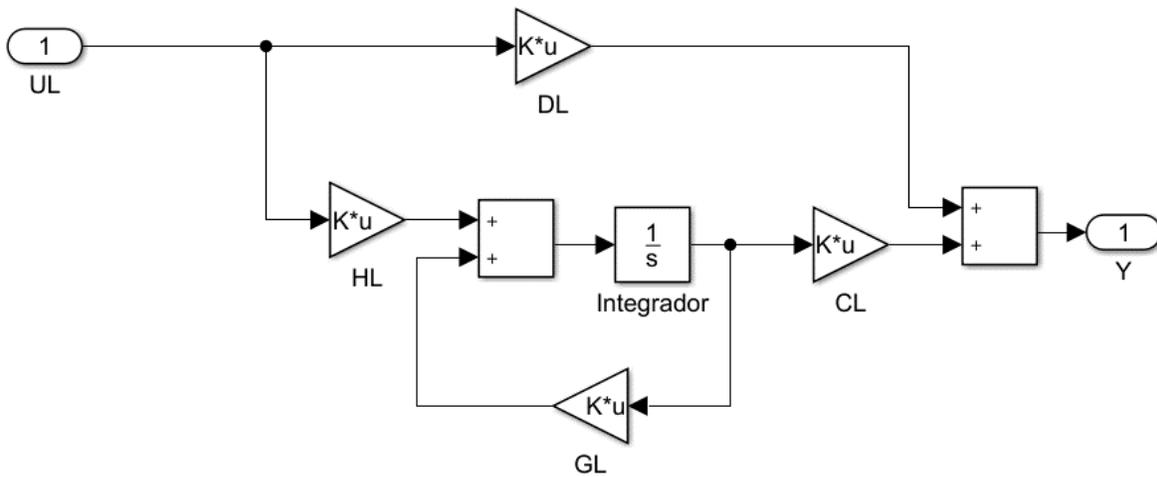


Figura 126. Diagrama de bloques del sistema lineal continuo en Simulink®.

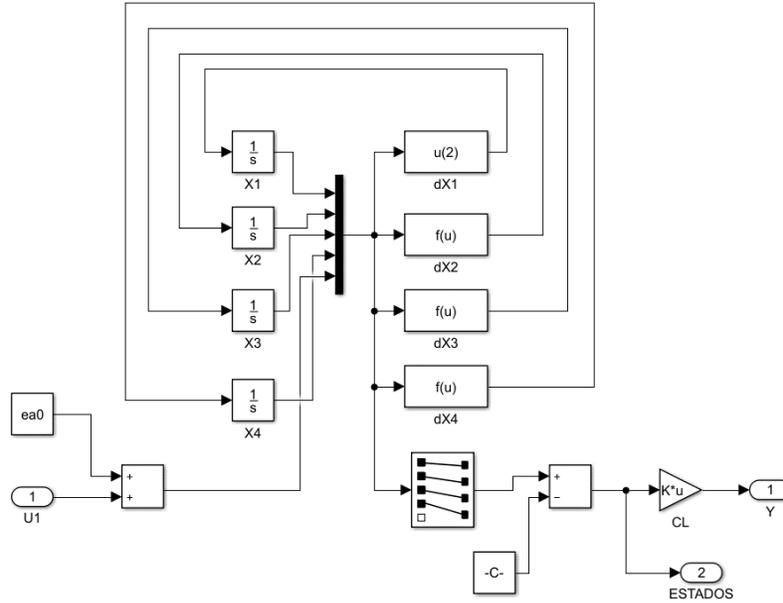


Figura 127. Diagrama de bloques del sistema no lineal continuo en Simulink®.

Para demostrar la calidad del sistema linealizado se procedió a montar el sistema lineal y no lineal en Simulink®, como se puede observar en la Figura 126 y Figura 127, respectivamente, para así poder comparar la respuesta transitoria de ambos modelos a lazo abierto ante impulso inicial de -0.30 radianes, dando como resultado las siguientes gráficas:

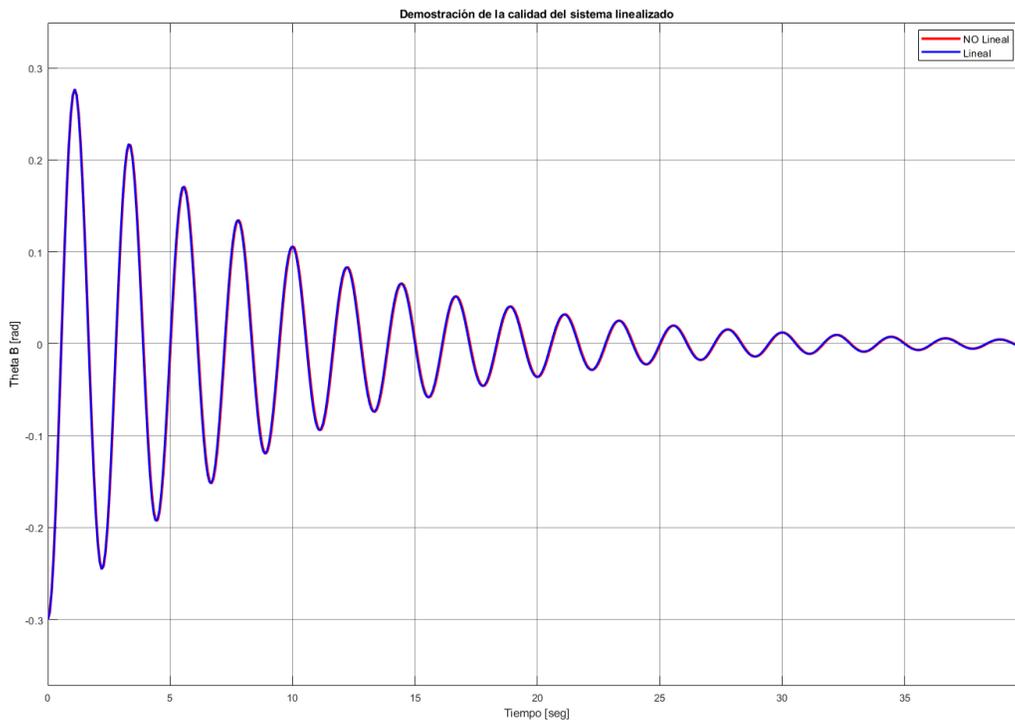


Figura 128. Demostración de la calidad del sistema linealizado. Trazo rojo: sistema no lineal. Trazo azul: sistema lineal.

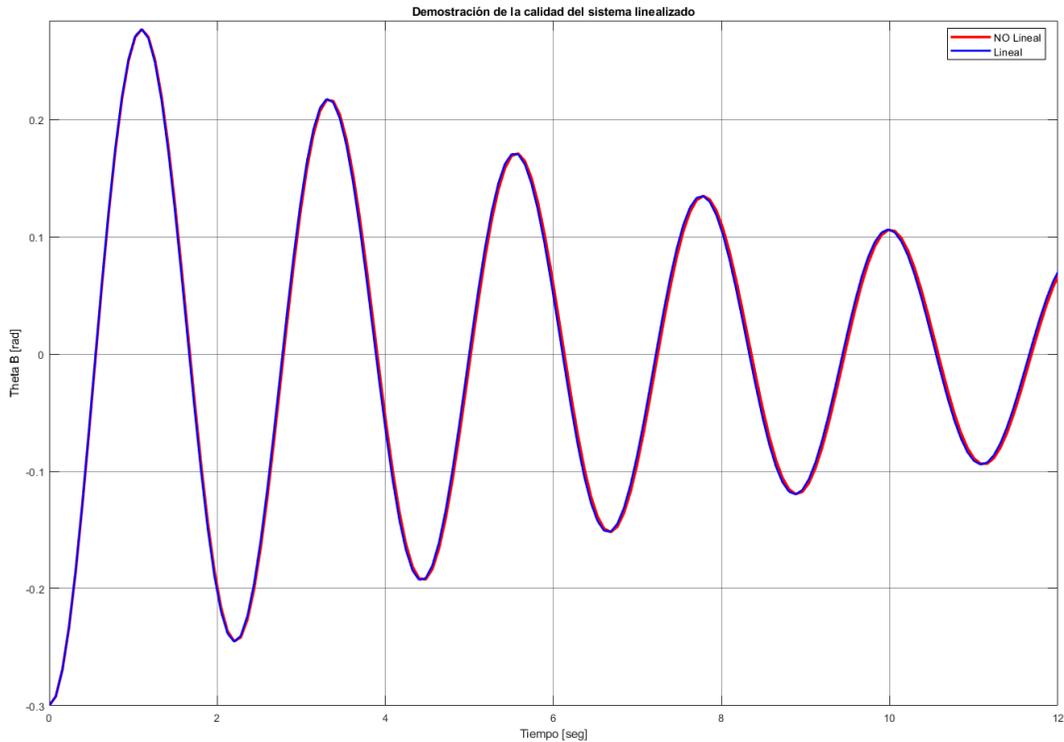


Figura 129. Demostración de la calidad del sistema linealizado (Zoom).

En la Figura 128 (y con más detalle en la Figura 129) se puede observar que la diferencia entre el sistema lineal y NO lineal resulta insignificante, puesto que el margen de desfase entre ambas graficas es mínimo, demostrando la calidad del método de linealización implementado.

11.2.3. Técnicas de control.

Para empezar a diseñar el sistema de control, se optó por iniciar con las técnicas clásicas de control como lo son el proporcional (P), el proporcional derivativo (PD) y el control PID. Se utilizó la herramienta de Matlab: "rltool" para diseñar dichos controladores, pero solo fue posible sintonizar un controlador P y PD, puesto que añadir otra componente integral, a parte de la que ya tiene, hace que el sistema se inestabilice.

11.2.3.1. Control Proporcional.

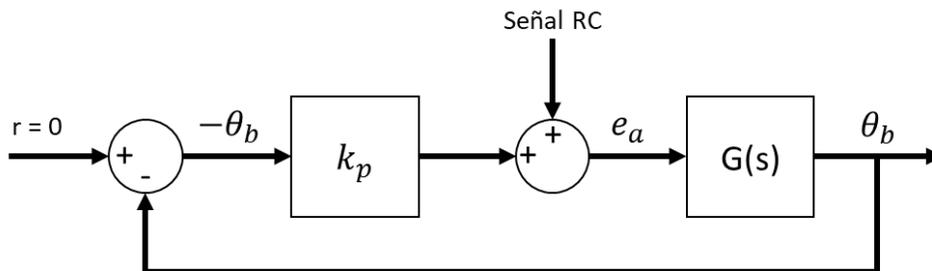


Figura 130. Diagrama de bloques del sistema de control proporcional continuo.

Se diseñó un control proporcional continuo cuyo criterio de diseño fue un tiempo de establecimiento menor a 8 segundos y un sobrepaso menor a 0.35 radianes, utilizando la estructura de control continuo a lazo cerrado vista en la Figura 130 y la planta obtenida en la ecuación (117), dando como resultado una constante proporcional de $K_p = -11$ con un tiempo de establecimiento teórico de 5.18 segundos, sin señal de perturbación. Su respuesta transitoria ante una inclinación inicial de -18.9° (-0.33 rad) puede observarse en la Figura 131 y su acción de control en la Figura 132.

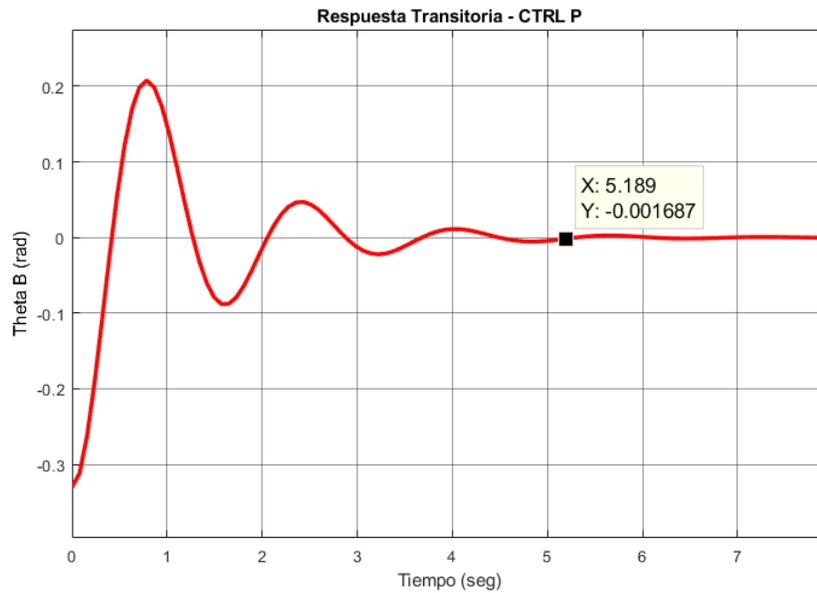


Figura 131. Respuesta transitoria con control P ante un impulso de -0.33 rad.

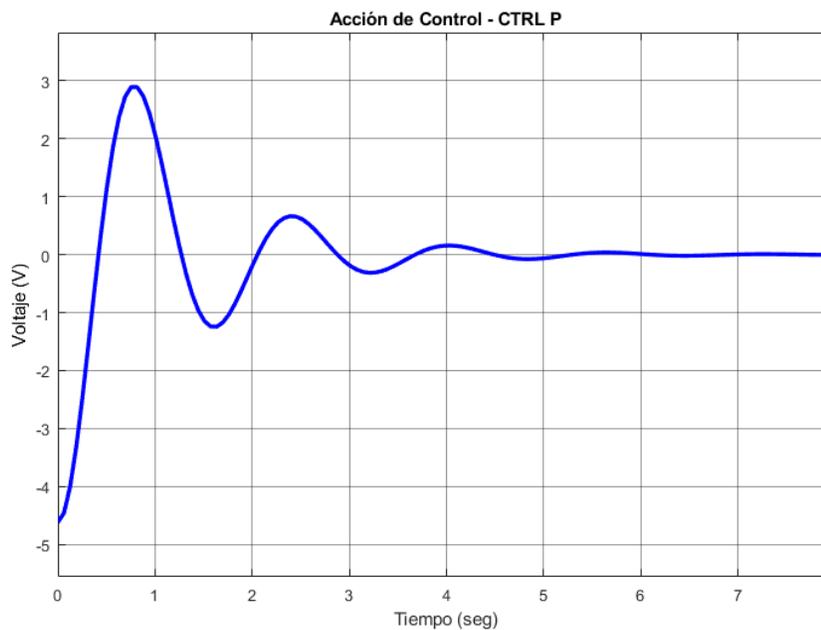


Figura 132. Acción de control proporcional ante un impulso de -0.33 rad.

11.2.3.2. Control Proporcional Derivativo.

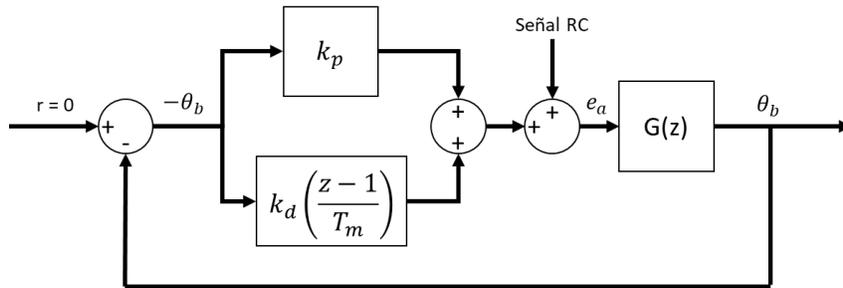


Figura 133. Diagrama de bloques del sistema de control proporcional discreto.

Se diseñó un control proporcional derivativo discreto cuyo criterio de diseño fuera un tiempo de establecimiento menor a 8 segundos y un sobrepaso menor a 0.35 radianes, utilizando la estructura de control discreto a lazo cerrado vista en la Figura 133 y la planta obtenida en la ecuación (118), dando como resultado el siguiente controlador PD:

$$C = k_p + k_d \left(\frac{z-1}{T_m} \right) \quad (119)$$

$$k_p = -11.3; \quad k_d = -1.88; \quad T_m = 0.0786$$

En donde:

- k_p es la constante proporcional.
- k_d es la constante derivativa,
- T_m es el periodo de muestreo.

La respuesta transitoria resultante, ante una inclinación inicial de -18.9° (-0.33 rad), puede observarse en la Figura 134, donde claramente se puede ver que el tiempo de establecimiento (settling time) es igual a 4.08 segundos, sin señal de perturbación. La acción de control también puede visualizarse en la Figura 135.

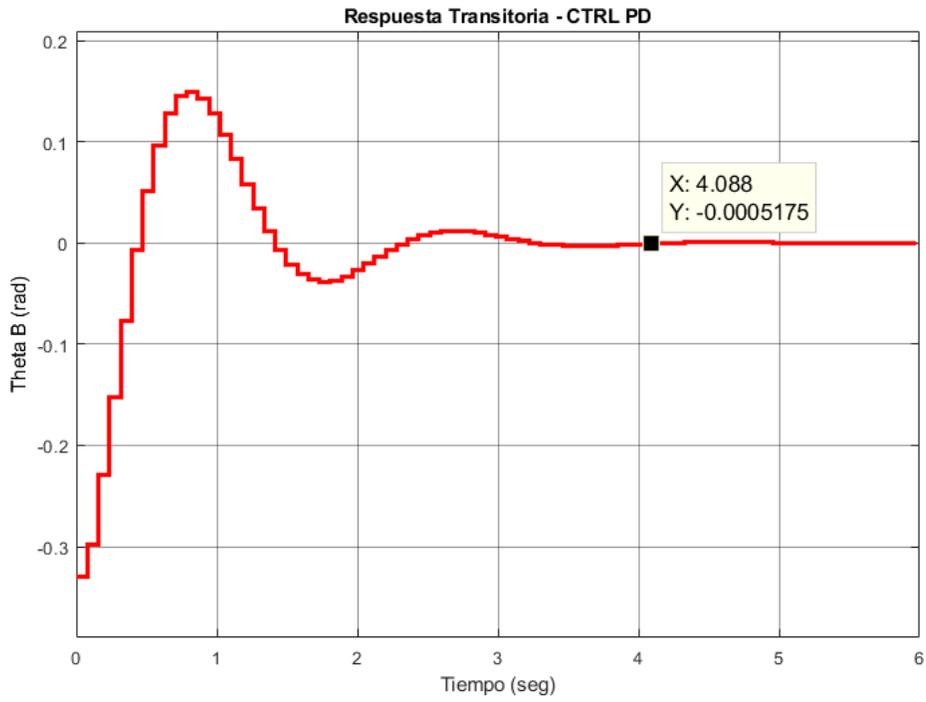


Figura 134. Respuesta transitoria con control PD ante un impulso de -0.33 rad.

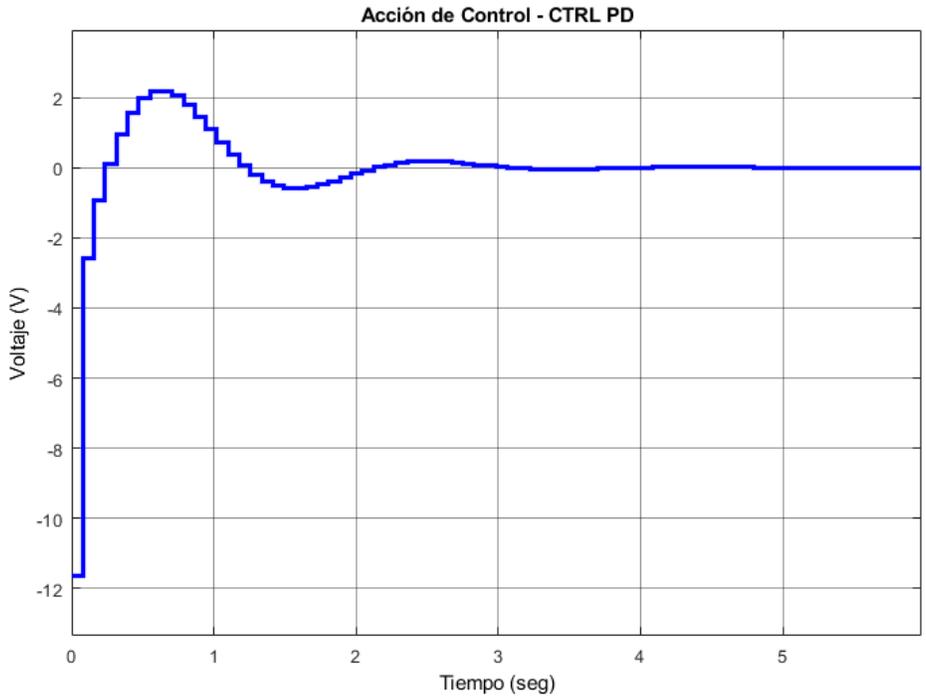


Figura 135. Acción de control PD ante un impulso de -0.33 rad.

12. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.

Para validar experimentalmente el funcionamiento del prototipo se propone pruebas sobre una **superficie ideal** (es decir, un terreno completamente plano y sin obstáculos), una **superficie irregular con pasto bajo** y una **superficie irregular con tierra ligeramente húmeda**, siendo estas dos últimas superficies las que más se aproximan al terreno de una plantación de palma.

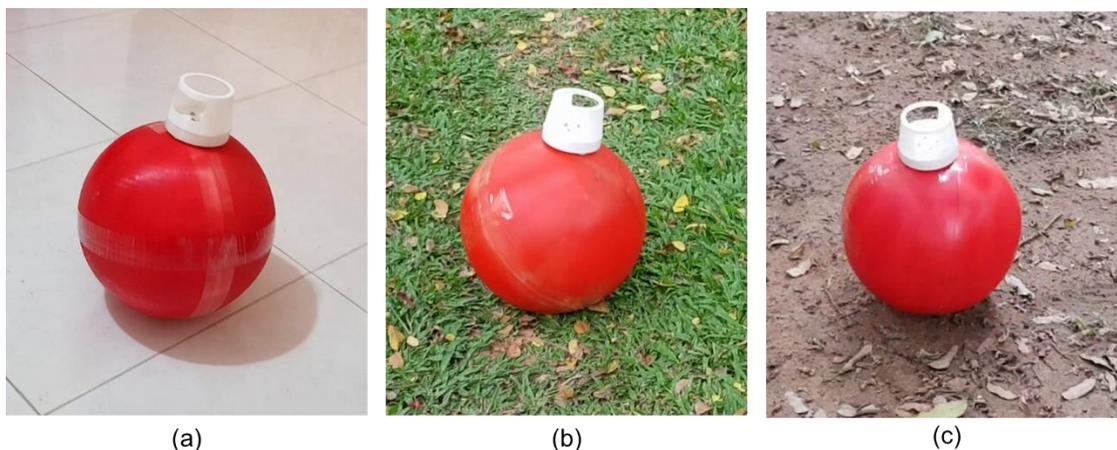


Figura 136. Superficies para la validación del prototipo. (a) Superficie ideal. (b) Superficie irregular con pasto bajo. (c) Superficie irregular con tierra ligeramente húmeda.

12.1. Validación experimental en modo manual.

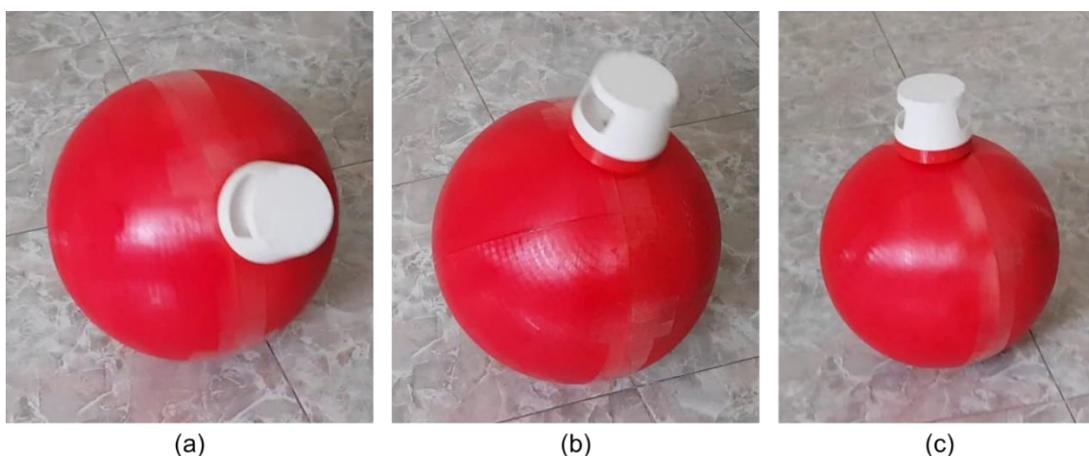


Figura 137. Validación experimental en modo manual. (a) Modo inicial. (b) Trata de estabilizarse. (c) Se estabiliza con un ligero cabeceo y continua el movimiento.

Para validar experimentalmente el modo manual se procedió a realizar una trayectoria simple a control remoto en las 3 diferentes superficies y se observó el compartimiento del robot ante los siguientes factores cuantitativos:

- **Tiempo de establecimiento:** puesto que el robot en lazo abierto es estable, se mide el tiempo de establecimiento sin controlador al detenerse en estas 3 diferentes superficies.
- **Número de oscilaciones al detenerse:** número de oscilaciones que tiene el robot al detener su movimiento.
- **Ángulo de inclinación al estabilizarse:** ángulo en el que el robot llega a estabilizarse luego de detener su movimiento en lazo abierto.
- **Ángulo de inclinación máximo:** ángulo máximo que llega a alcanzar el robot durante el cabeceo causado por su desplazamiento (antes y después de detenerse).
- **Ángulo de inclinación promedio:** promedio de los ángulos de inclinación pico del robot durante el cabeceo causado por su desplazamiento (antes y después de detenerse).
- **Número de oscilaciones al detenerse:** número de oscilaciones del cabeceo del robot después de detener su movimiento.

12.1.1. Validación del modo manual en una superficie ideal.



Figura 138. Secuencia de movimiento en una superficie ideal.

Se procedió a realizar una prueba manual de trayectoria simple en una superficie ideal y en una única dirección. En una superficie completamente plana el robot tiene un alto rendimiento en modo manual y presenta un cabeceo que se disminuye conforme aumenta la velocidad del robot. Al detenerse completamente se puede notar un gran efecto de cabeceo debido a la poca fricción que tiene la esfera con respecto a la superficie ideal. Esto puede observarse en la siguiente grafica de la prueba en modo manual:

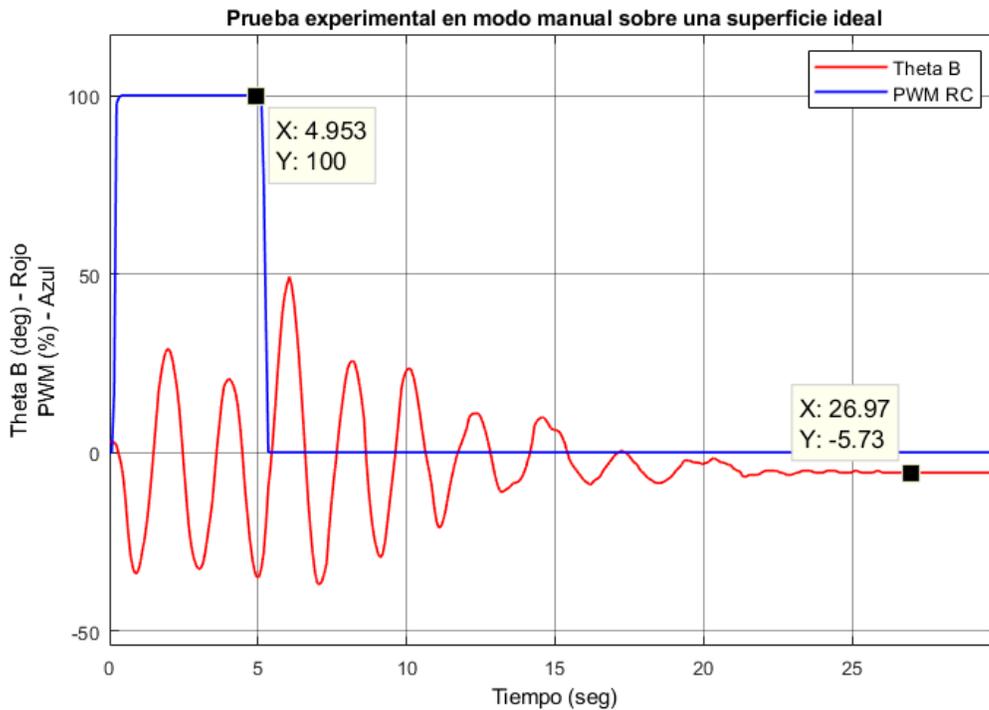


Figura 139. Prueba experimental en modo manual en una superficie ideal. Data 1: salida -Theta B vs Tiempo. Data 2: entrada - Voltaje vs Tiempo.

Como se puede observar en la figura anterior, existe un leve y consistente cabeceo en modo manual, el cual es inevitable, puesto que es necesario para que el centro de masa se desbalancee y genere el movimiento de desplazamiento. El ángulo de inclinación máximo es de 49.2 grados. Por último, se midió el tiempo de establecimiento (sin controlador) que se demora el robot en regresar al punto de equilibrio luego de una perturbación, siendo este de 22 segundos aproximadamente. Los demos datos de los factores que se midieron en esta prueba se encuentran almacenados en la Tabla 26.

12.1.2. Validación del modo manual en una superficie irregular con pasto

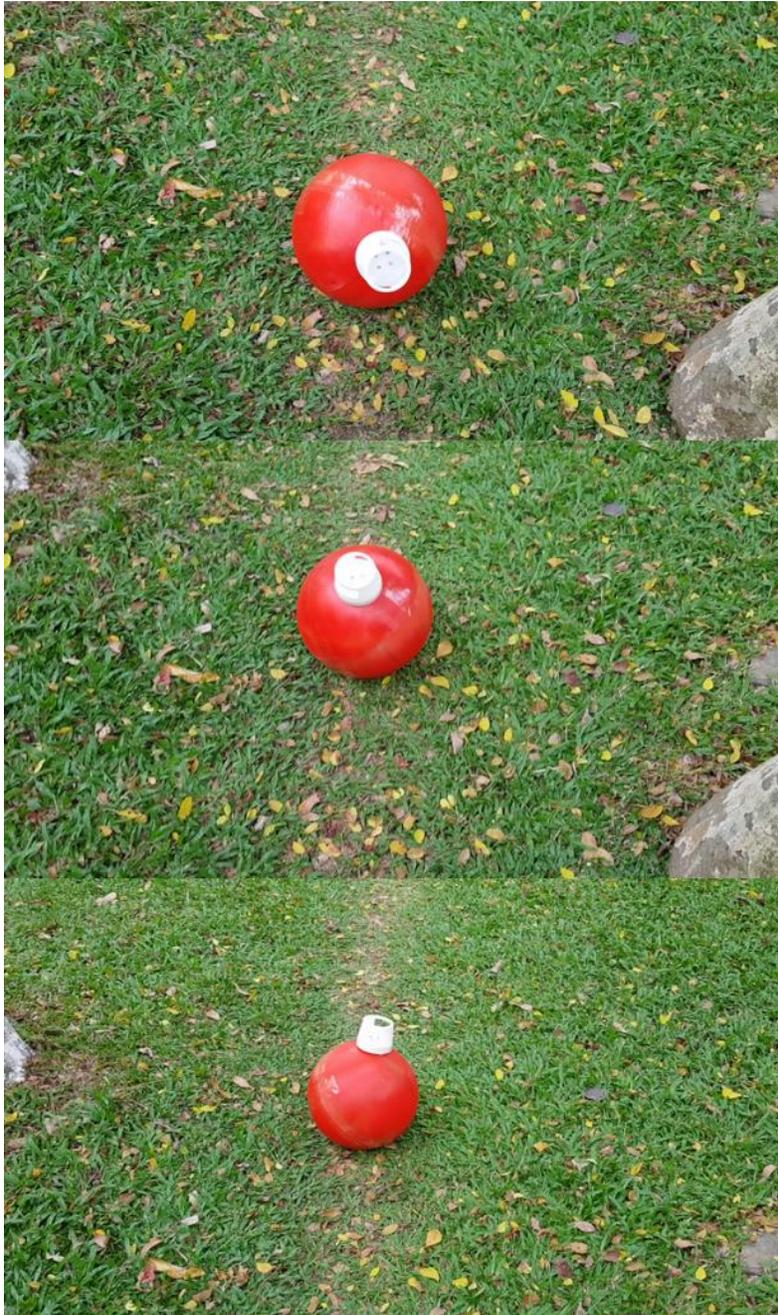


Figura 140. Secuencia de movimiento en una superficie irregular con pasto.

Se procedió a realizar una prueba manual de trayectoria simple en una superficie irregular con pasto bajo y en una única dirección. Al evaluar los factores anteriores en una simple prueba de seguimiento de trayectoria se pudo observar que el sistema es mucho más fácil de controlar manualmente que una superficie ideal,

puesto que la fricción del terreno hace que la esfera se detenga más rápido y el cabeceo disminuya, pero también tiene una gran limitante en cuanto a la cantidad de pasto que debe tener el terreno para que el robot se pueda mover.

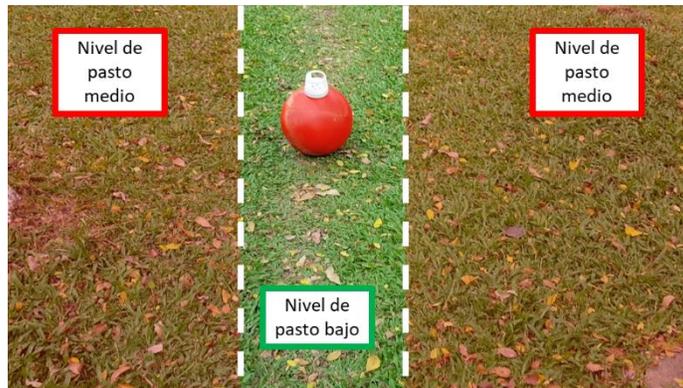


Figura 141. Niveles de pasto encontrados en el terreno irregular pastoso probado.

La disminución del cabeceo en este terreno se puede observar en la Figura 142, donde podemos ver que el ángulo es mucho más estable que en la prueba hecha en una superficie ideal, con un ángulo de inclinación máximo al iniciar el movimiento de -47.07 grados. También se puede notar algunas oscilaciones adicionales añadidas por la irregularidad del terreno, presentando una buena estabilidad alrededor de los 22.42 grados y un tiempo de establecimiento de 4.634 segundos. Los demás datos de los factores que se midieron en esta prueba se encuentran almacenados en la Tabla 26.

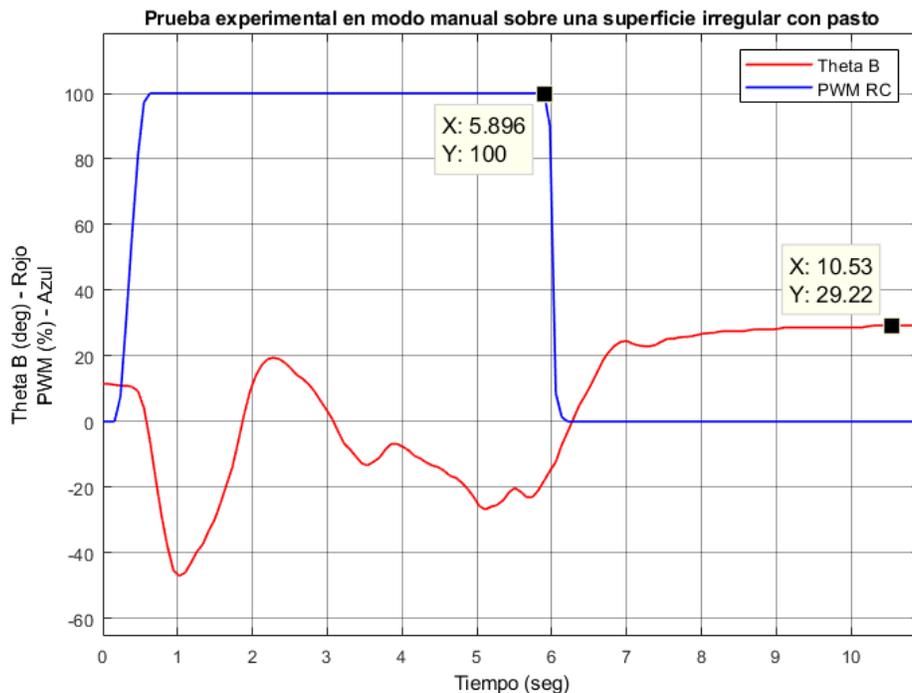


Figura 142. Prueba experimental en modo manual en una superficie irregular con pasto. Data 1: salida -Theta B vs Tiempo. Data 2: entrada - PWM vs Tiempo.

Por último, la superficie en que se implementó esta prueba era lo más plana posible, libre de obstáculos considerables y con un nivel pasto bajo (Figura 141). Cuando se implementó el robot en una superficie con un nivel de pasto más alto, el robot quedo atascado, puesto que la fricción que ejerce este terreno es mayor a la que puede superar el prototipo dada la limitante de torque que tiene los robots móviles esféricos con principio de locomoción basado en el desplazamiento del centro de masa.

12.1.3. Validación del modo manual en una superficie irregular con tierra húmeda.



Figura 143. Secuencia de movimiento en una superficie irregular con tierra húmeda.

Se procedió a realizar una prueba manual de trayectoria simple en una superficie irregular con tierra ligeramente húmeda, llena de restos florales como ramas, hojas y pequeñas cantidades de pasto.

El cabeceo aumento un poco más en magnitud que las dos pruebas anteriores, esto se puede observar en la Figura 144, donde se probó el desplazamiento del robot en modo manual sobre una superficie irregular con tierra y diversos obstáculos superables, se nota un cabeceo producto de la irregularidad del terreno y de su propio desplazamiento pero presenta una mejoría en comparación con el comportamiento visto en una superficie ideal, en especial en el tiempo de establecimiento, puesto que fue de 5.346 segundos. Los demás datos de los factores que se midieron en esta prueba se encuentran almacenados en la Tabla 26.

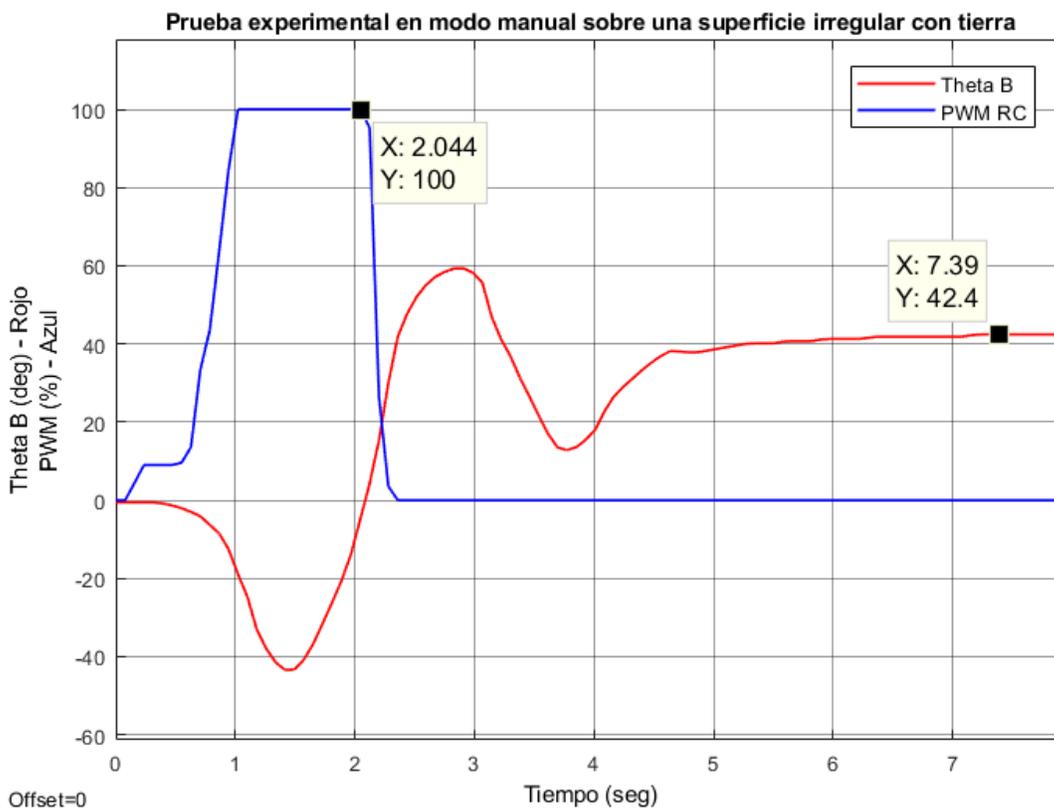


Figura 144. Prueba experimental en modo manual en una superficie irregular con tierra. Data 1: salida -Theta B vs Tiempo. Data 2: entrada - PWM vs Tiempo.

La superficie en que se implementó esta prueba era lo más plana posible, con obstáculos superables y unos cuantos insuperables. El robot logró desplazarse con pocos problemas y cuando alguno se presentaba uno era fácil retroceder y tomar una ruta alterna. Nuevas perturbaciones se añaden al sistema al incluir obstáculos superables como pequeñas ramas, hojas, entre otros.

12.1.4. Evaluación del desempeño del robot en las tres superficies diferentes.

Tabla 26. Tabla de evaluación de desempeño del robot en modo manual.

Superficie	Tiempo de establecimiento	Numero de oscilaciones	Ángulo estable	Ángulo máximo		Ángulo promedio	
				Antes	Después	Antes	Después
Ideal	22.017 segundos	13	-5.73	-33.96	49.2	30.25	17.39
Irregular con Pasto	4.634 segundos	2	22.22	-47.07	29.22	22.42	26.82
Irregular con Tierra	5.346 segundos	2	42.4	-44.12	59.59	-44.12	39.32

Al analizar los datos obtenidos en las validaciones anteriores, almacenados en la Tabla 26, podemos identificar que la superficie en donde se obtiene un mayor desempeño del robot es la superficie irregular con pasto, puesto que se tiene un menor tiempo de establecimiento en lazo abierto y con ángulos de inclinación más cercanos a los obtenidos en la superficie ideal sin elevar el tiempo de establecimiento.

En la superficie con tierra también se obtuvo un tiempo de establecimiento menor a los 10 segundos, pero con ángulos de inclinación mayores, puesto que en esa superficie existían algunos posibles obstáculos que requerían mayor inclinación para ser superados, además que los obstáculos también generaron vibraciones adicionales al desplazamiento lo que aumento el ángulo de inclinación promedio y el tiempo de establecimiento.

En ambas superficies irregulares se alcanzaron ángulos de inclinación más elevados al iniciar el movimiento del robot, puesto que se requiere un mayor ángulo de inclinación para superar la fricción estática inicial del terreno, siendo la superficie irregular con pasto la que genera una mayor fricción, pues su número máximo de inclinación inicial es el más elevado, no obstante, no está muy lejos del ángulo generado en la superficie irregular con tierra.

Igualmente, en ambas superficies irregulares presentaron ángulos de inclinaciones finales mayores a los 10 grados al estabilizarse, siendo la superficie con tierra la que generó el mayor ángulo de inclinación estable, probablemente debido a la interferencia de algún obstáculo presente en el terreno a la hora de detener el movimiento.

12.2. Validación experimental en modo automático.

12.2.1. Validación del controlador proporcional en una superficie ideal.

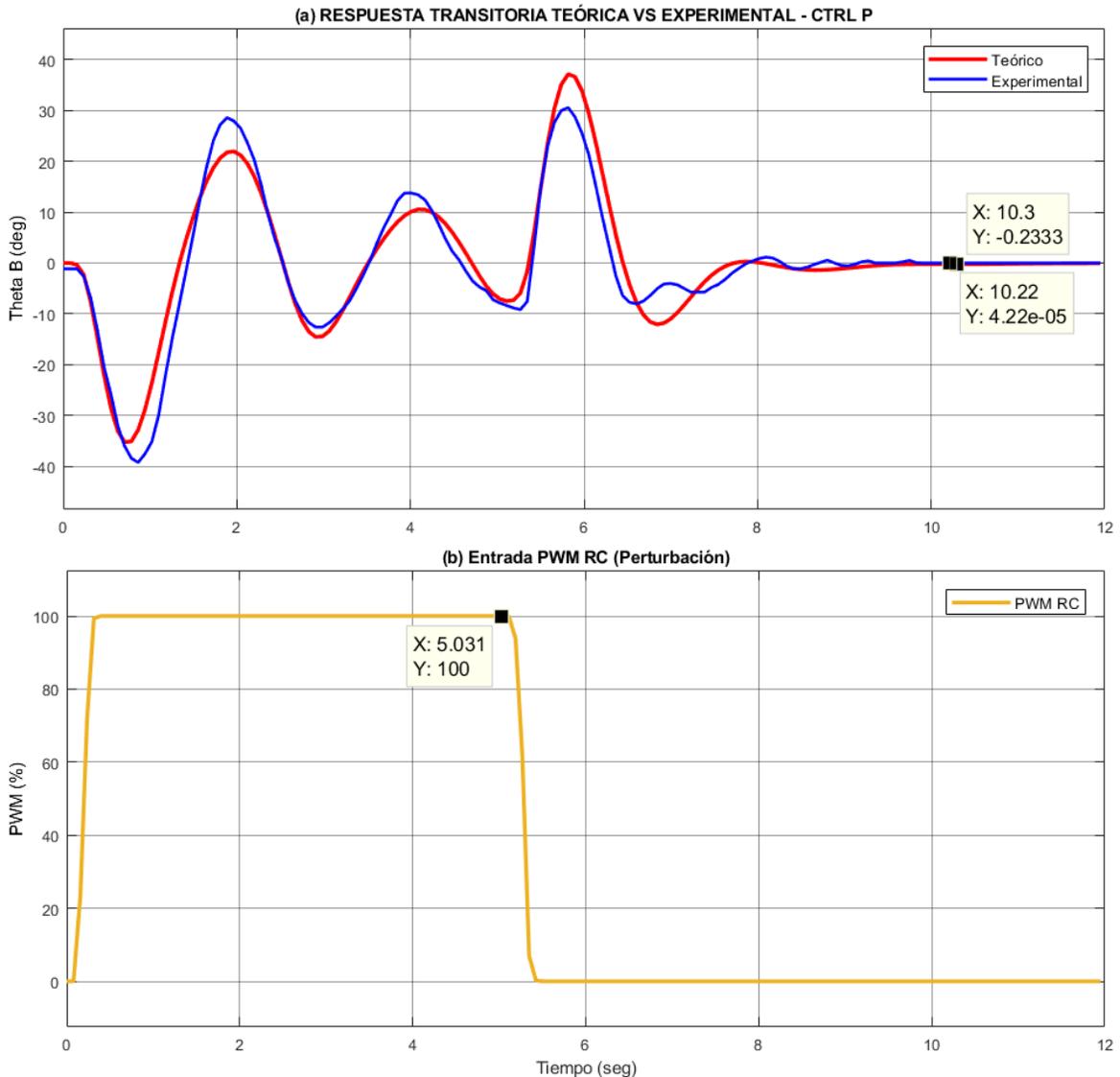


Figura 145. Control P: Respuesta transitoria teórica vs experimental ante una entrada de PWM en una superficie ideal. (a) Respuesta transitoria. (b) Entrada PWM RC.

Se procedió a verificar los controladores tradicionales del modo automático en una superficie ideal, empezando por el controlador proporcional ante una entrada de PWM (perturbación) mandada por el radiocontrol, dando como resultado la respuesta transitoria teórica vs experimental, vista en la Figura 145. Igualmente, la acción de control teórica vs experimental puede observarse en la Figura 146.

Cabe destacar que, por seguridad del motor, acciones de control que generen PWM entre -5% al 5% se consideran despreciables (iguales a cero), puesto que el actuador no es capaz de suministrar movimiento entre ese rango de valores.

Al comparar los resultados obtenidos con el modelo teórico y el experimental, podemos identificar que el teórico tiene un tiempo de establecimiento de 5.156 segundos aproximadamente, mientras que el modelo experimental obtuvo un tiempo de 5.216 segundos.

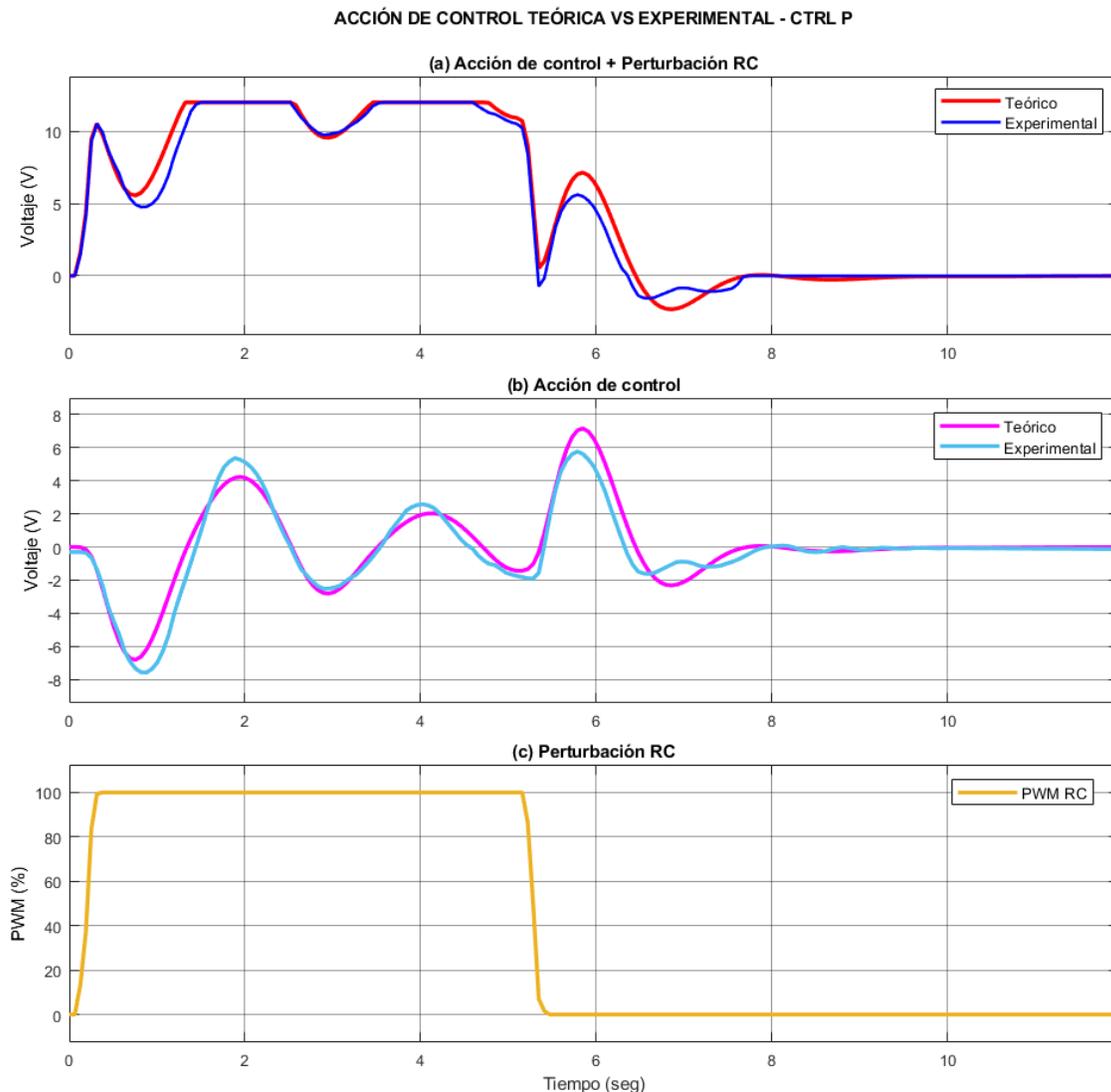


Figura 146. Control P: Acción de control teórica vs experimental ante una entrada de PWM en una superficie ideal. (a) Acción de control + Perturbación. (b) Acción de control. (c) Perturbación de entrada RC.

Con el fin de verificar el tiempo de establecimiento experimental, se procedió a realizar una segunda prueba, esta vez con múltiples impulsos rectangulares para así obtener un tiempo de establecimiento promedio. El resultado puede observarse en Figura 147 y Figura 148. Al realizar un promedio de los tiempos de establecimiento de los impulsos se obtuvo un resultado de 5.243 segundos.

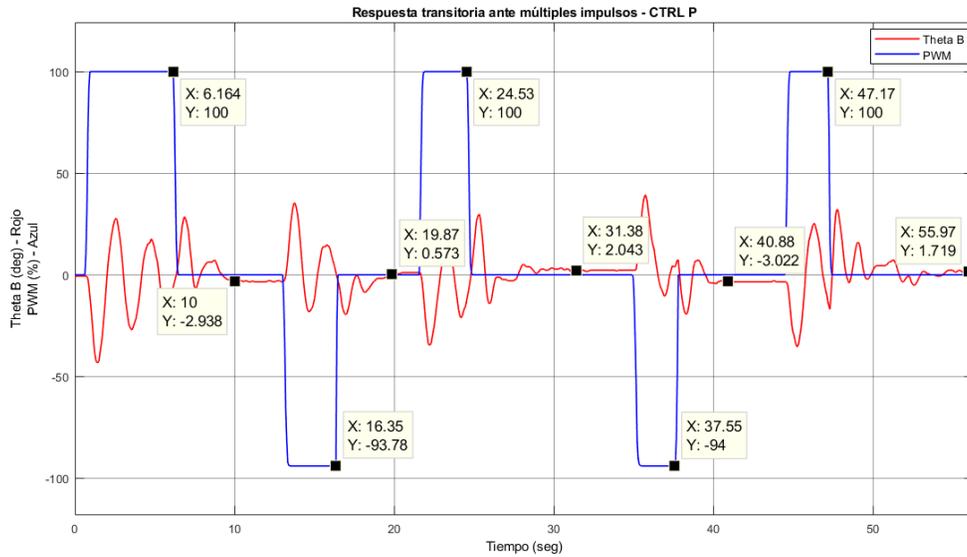


Figura 147. Control P: Respuesta transitoria experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie ideal.

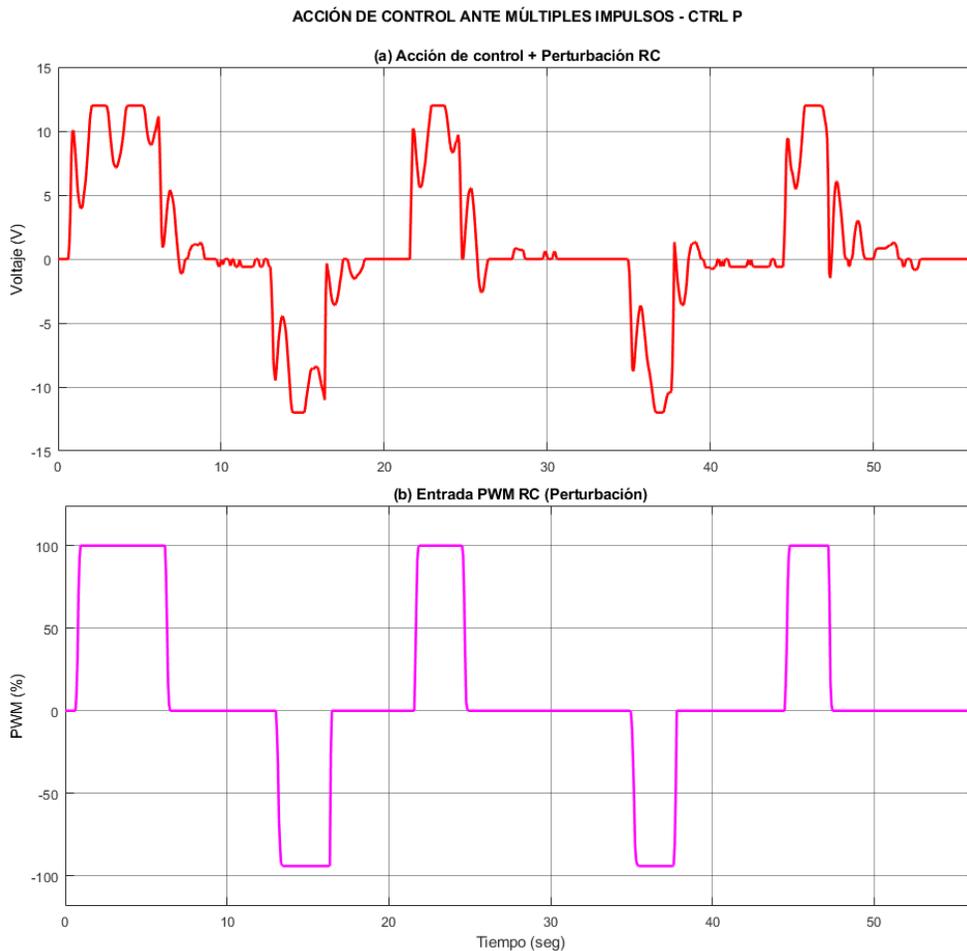


Figura 148. Control P: Acción de control experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie ideal. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Entrada PWM RC.

12.2.2. Validación del controlador proporcional derivativo en una superficie ideal.

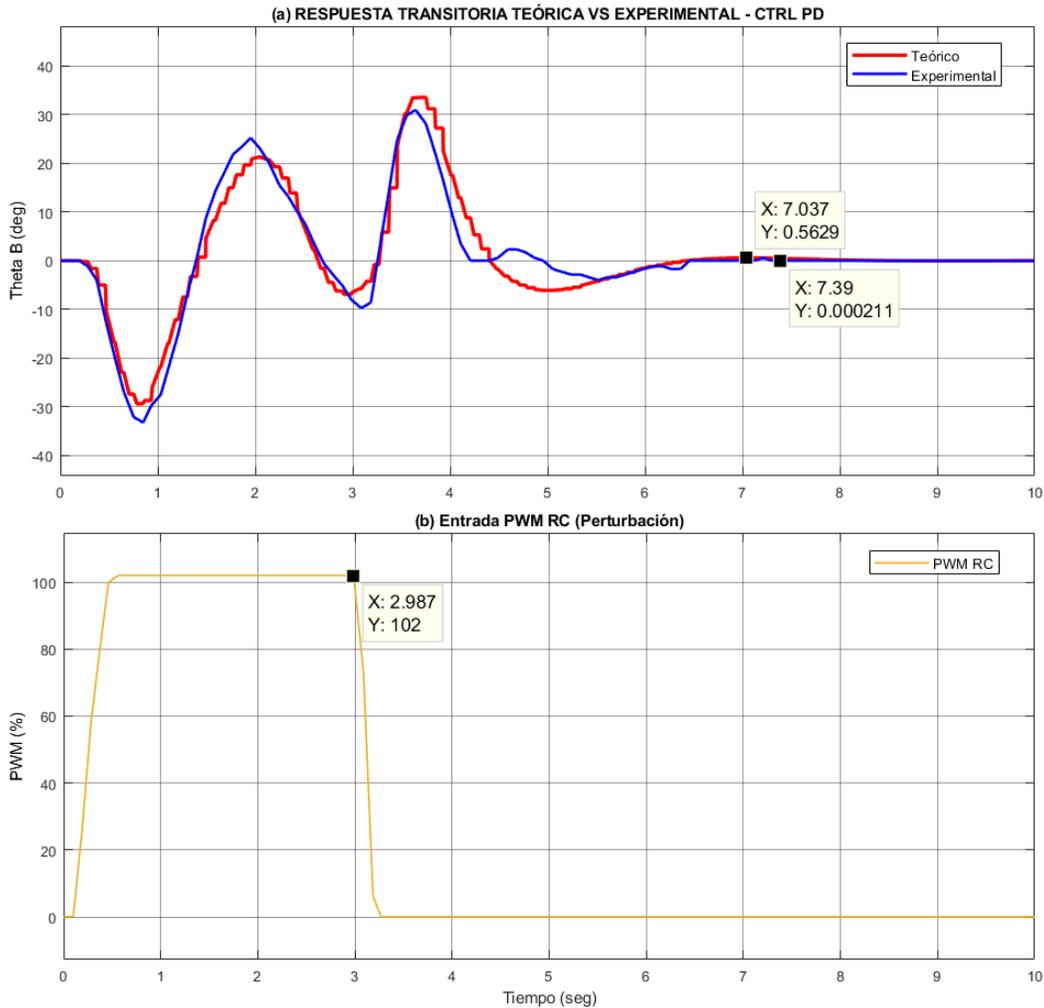


Figura 149. Control PD: Respuesta transitoria teórica vs experimental ante una entrada de PWM en una superficie ideal. (a) Respuesta transitoria. (b) Entrada PWM RC

Se procedió a verificar el controlador proporcional derivativo ante una entrada de PWM (perturbación) mandada por el radiocontrol, dando como resultado la respuesta transitoria teórica vs experimental vista en la Figura 149. Igualmente, la acción de control teórica vs experimental puede observarse en la Figura 150.

Al comparar los resultados obtenidos del modelo teórico con el experimental, podemos identificar que el prototipo tiene un tiempo de establecimiento teórico de 4.05 segundos aproximadamente, mientras que el modelo experimental obtuvo un tiempo de 4.403 segundos.

ACCIÓN DE CONTROL TEÓRICA VS EXPERIMENTAL - CTRL PD

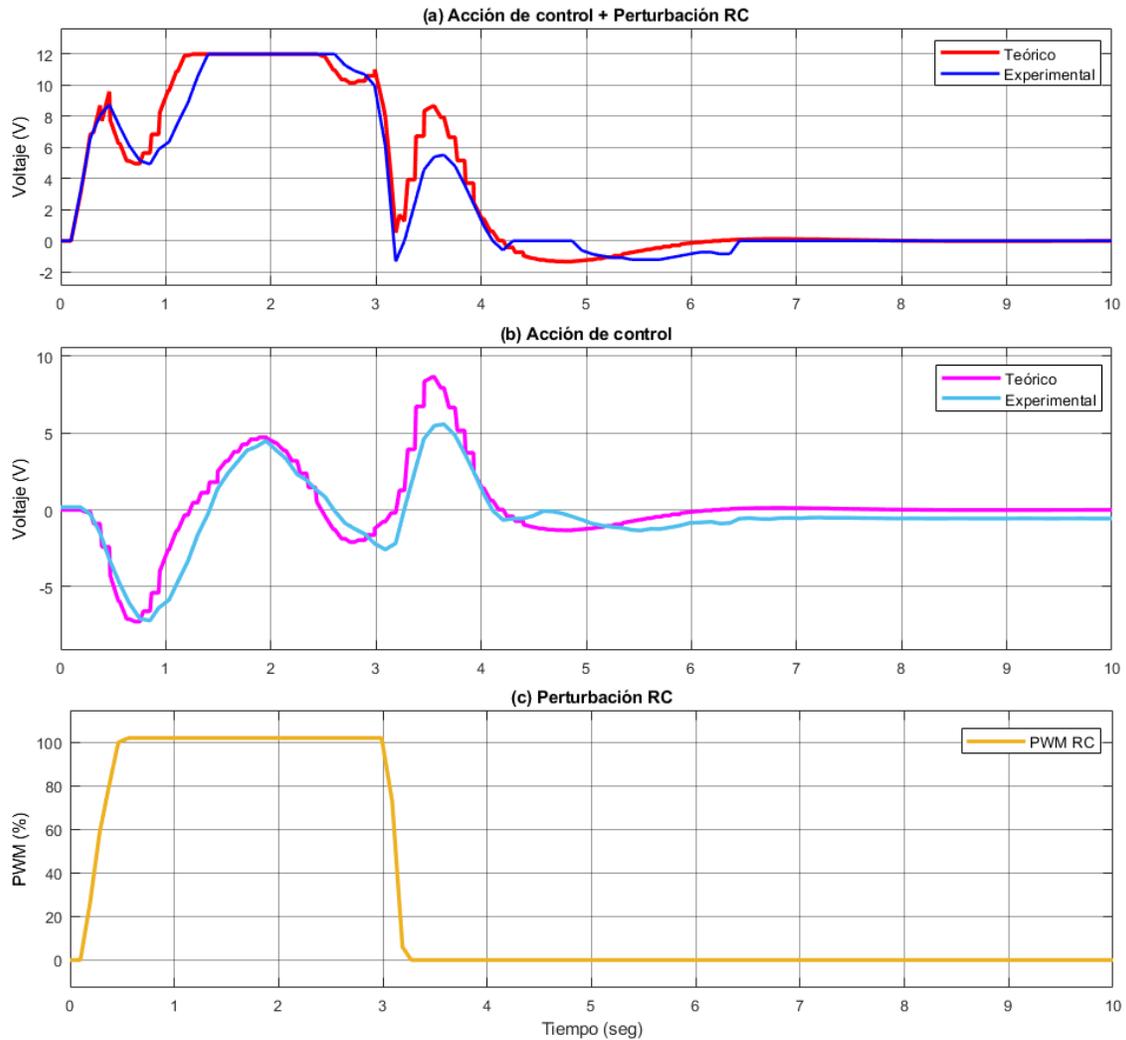


Figura 150. Control PD: Acción de control teórica vs experimental ante una entrada de PWM en una superficie ideal. (a) Acción de control + Perturbación. (b) Acción de control. (c) Perturbación de entrada RC.

Con el fin de verificar el tiempo de establecimiento experimental, se procedió a realizar una segunda prueba, esta vez con múltiples impulsos para así obtener un tiempo de establecimiento promedio. El resultado puede observarse en la Figura 151 y la Figura 152. Al realizar un promedio de los tiempos de establecimiento de los impulsos se obtuvo un resultado de 4.31 segundos.

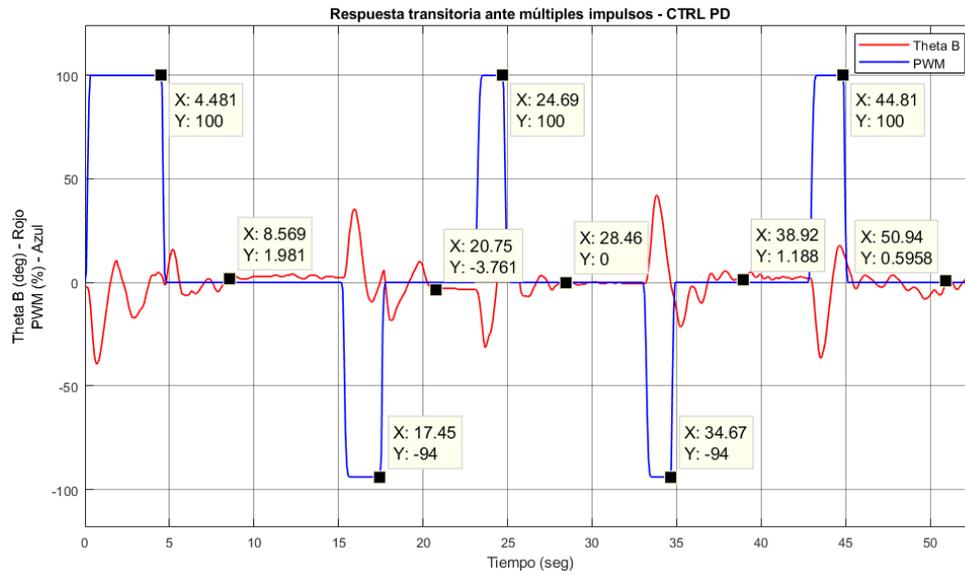


Figura 151. Control PD: Respuesta transitoria experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie ideal.

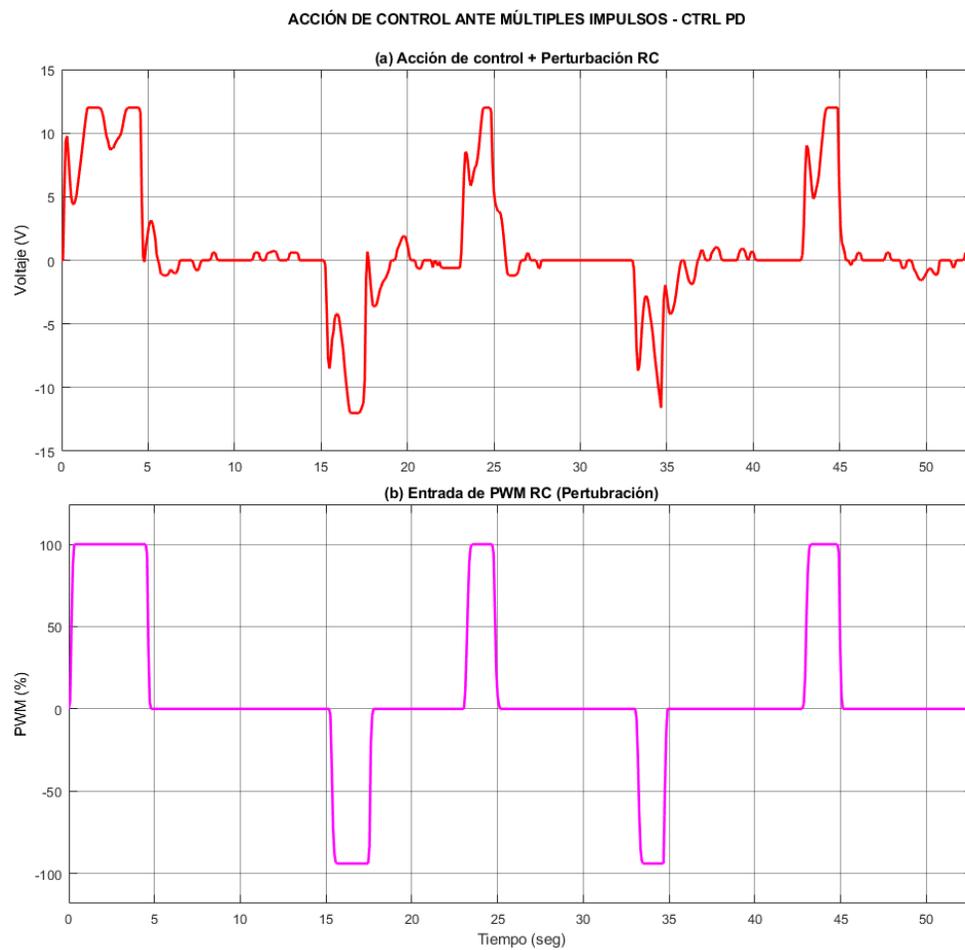


Figura 152. Control PD: Acción de control experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie ideal. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Entrada de PWM RC (Perturbación).

12.2.3. Validación del control proporcional en una superficie irregular con pasto.

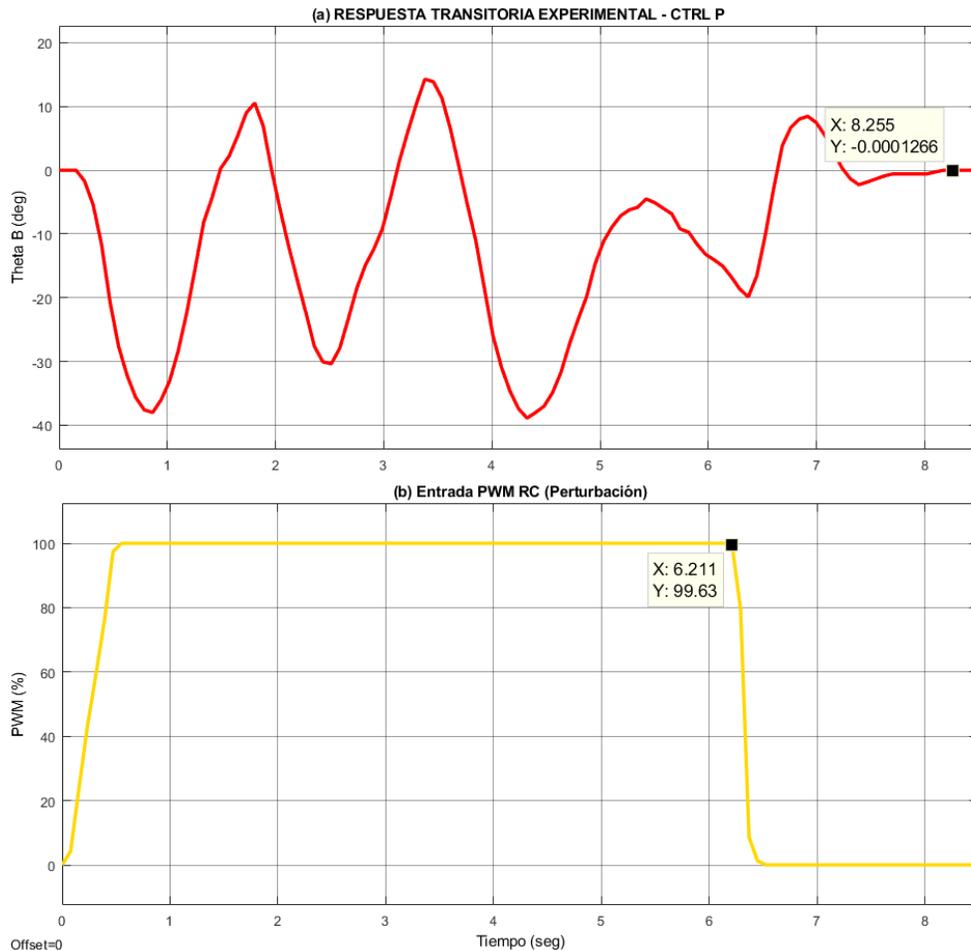


Figura 153. Control P: Respuesta transitoria experimental ante una entrada de PWM en una superficie irregular con pasto. (a) Respuesta transitoria. (b) Entrada PWM RC

Se procedió a verificar el controlador proporcional en una superficie irregular con pasto y ante una entrada de PWM (perturbación) mandada por el radiocontrol, dando como resultado la respuesta transitoria experimental vista en la Figura 153, con un tiempo de establecimiento experimental de 2.044 segundos. Igualmente, la acción de control experimental puede observarse en la Figura 154.

Cabe resaltar que en terrenos irregulares no se puede hacer una comparativa justa con el modelo teórico, puesto que en dicho modelo se considera que el robot siempre estará transitando en una superficie ideal con el fin de simplificar el modelado. En una superficie ideal el robot tiene bajas pérdidas de energía cinética debido a la poca fricción de la superficie con respecto a la esfera, por tal razón el tiempo de establecimiento en esta superficie será mayor que el experimentado en superficies irregulares.

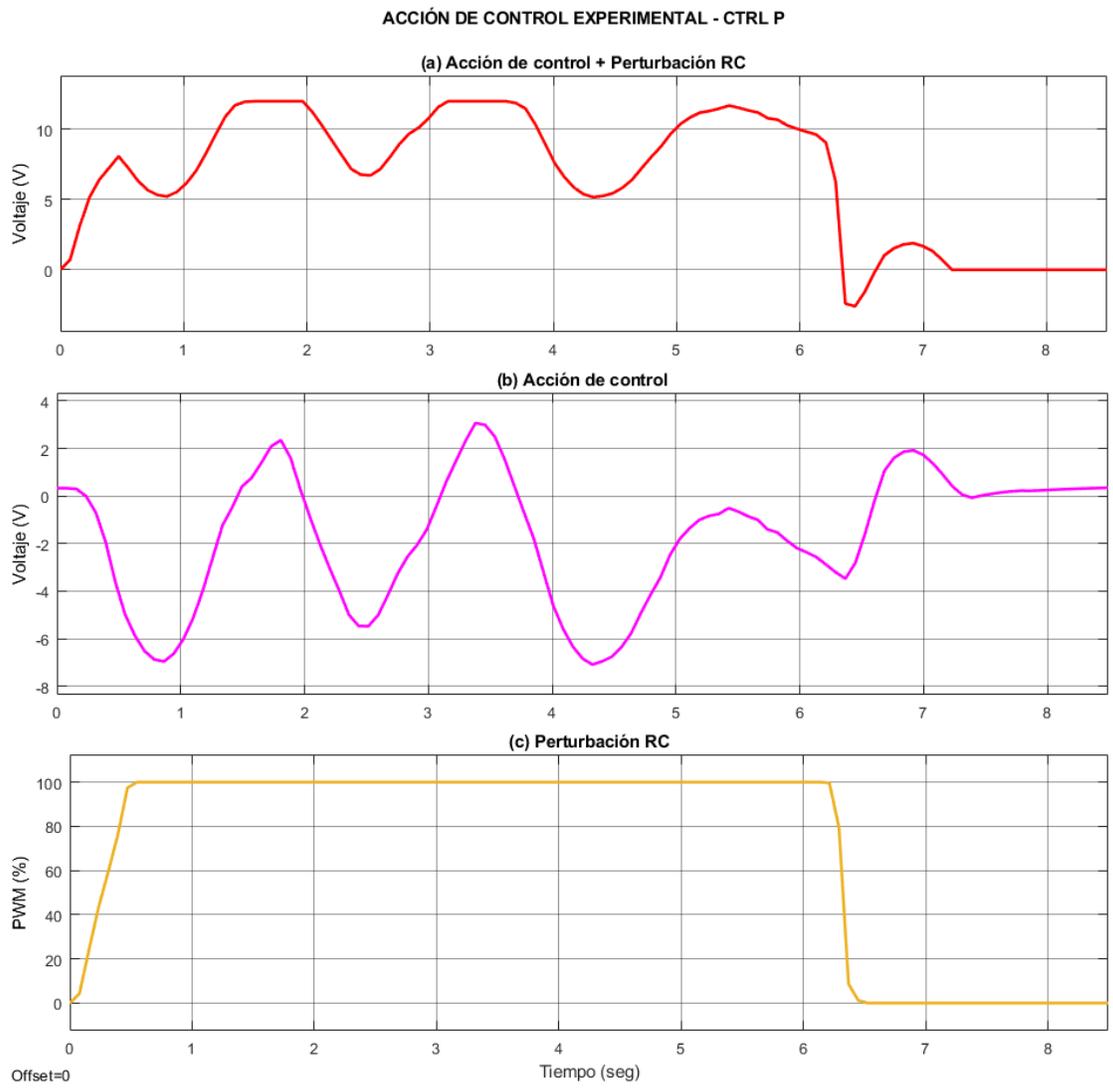


Figura 154. Control P: Acción de control experimental ante una entrada de PWM en una superficie irregular con pasto. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Acción de control. (c) Perturbación RC.

Con el fin de verificar el tiempo de establecimiento experimental, se procedió a realizar una segunda prueba, esta vez con impulsos rectangulares para así obtener un tiempo de establecimiento promedio. El resultado puede observarse en la Figura 155 y la Figura 156. Al realizar un promedio de los tiempos de establecimiento de los impulsos se obtuvo un resultado de 2.0446 segundos.

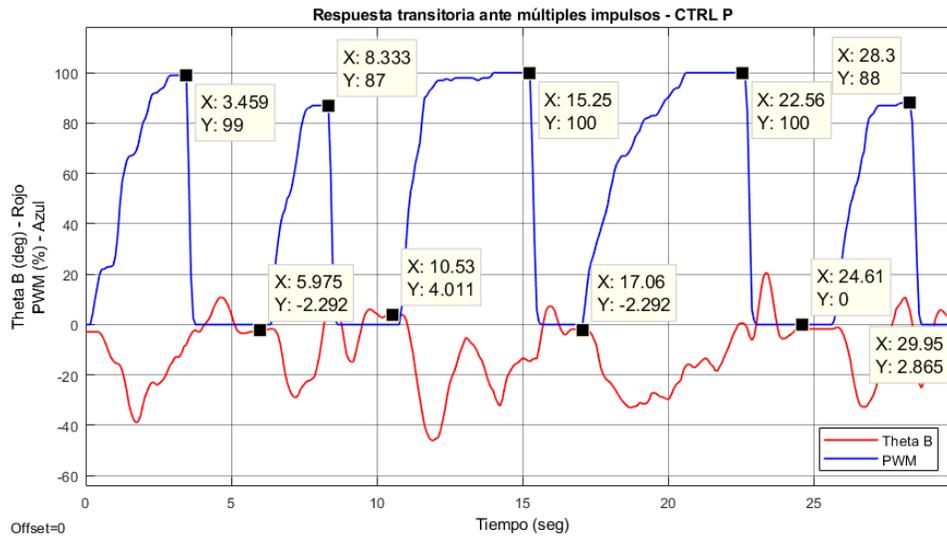


Figura 155. Control P: Respuesta transitoria experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie irregular con pasto.

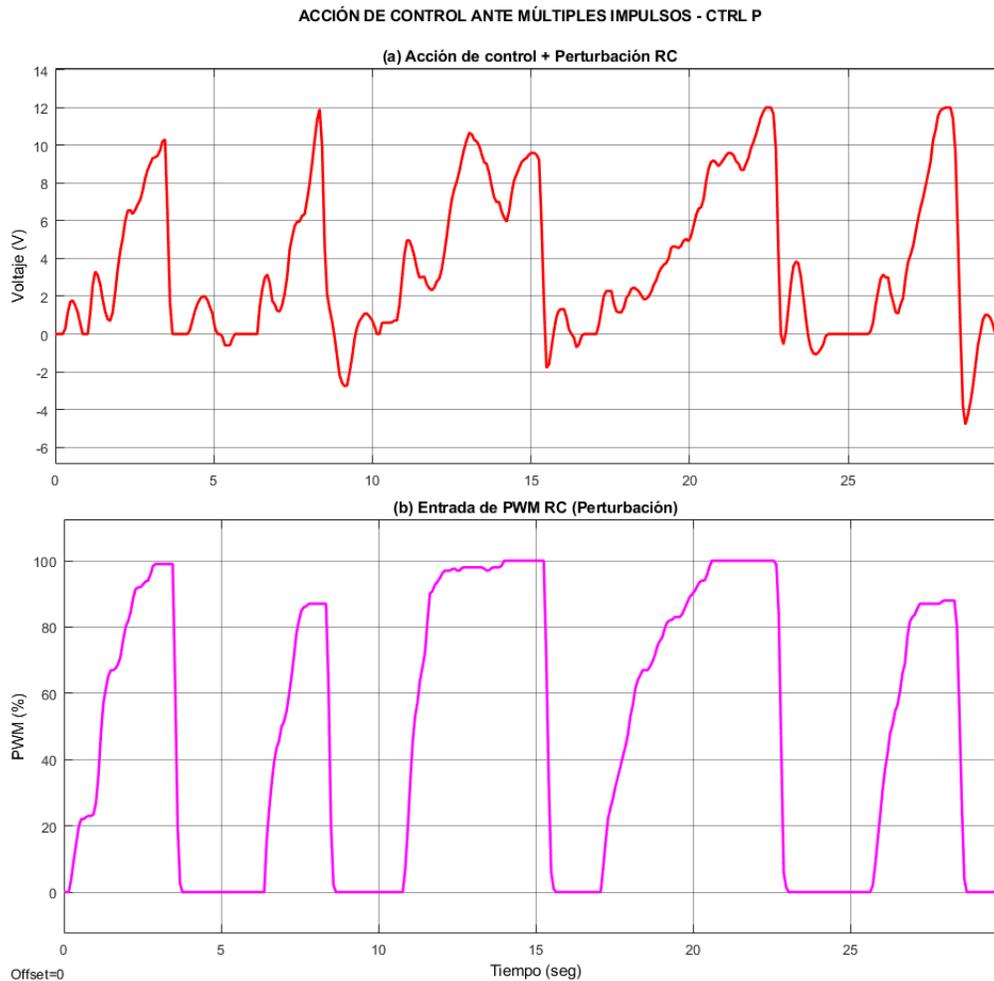


Figura 156. Control P: Acción de control experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie irregular con pasto. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Entrada de PWM RC (Perturbación).

12.2.4. Validación del control proporcional derivativo en una superficie irregular con pasto.

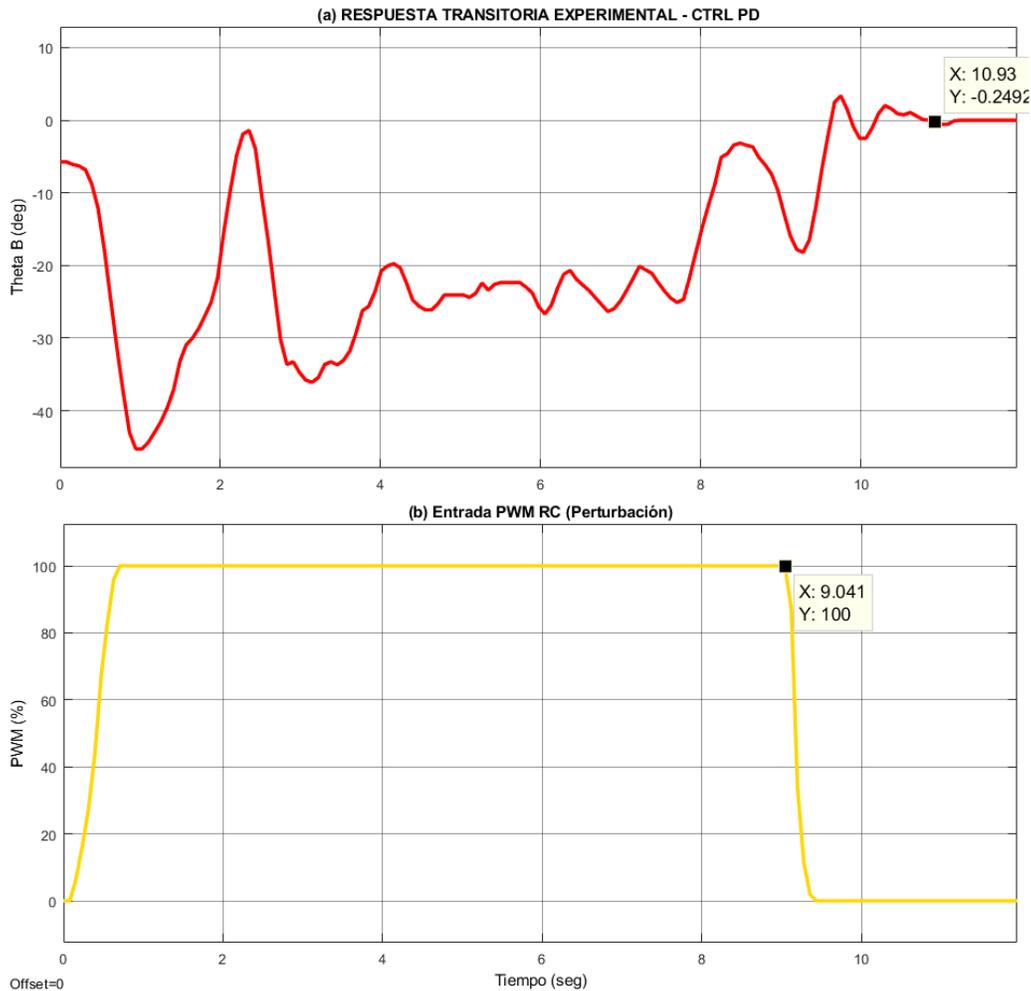


Figura 157. Control PD: Respuesta transitoria experimental ante una entrada de PWM en una superficie irregular con pasto. (a) Respuesta transitoria. (b) Entrada PWM RC.

Se procedió a verificar el controlador proporcional derivativo en una superficie irregular con pasto y ante una entrada de PWM (perturbación) mandada por el radiocontrol, dando como resultado la respuesta transitoria experimental vista en la Figura 157, con un tiempo de establecimiento experimental de 1.889 segundos. Igualmente, la acción de control experimental puede observarse en la Figura 158.

ACCIÓN DE CONTROL EXPERIMENTAL - CTRL PD

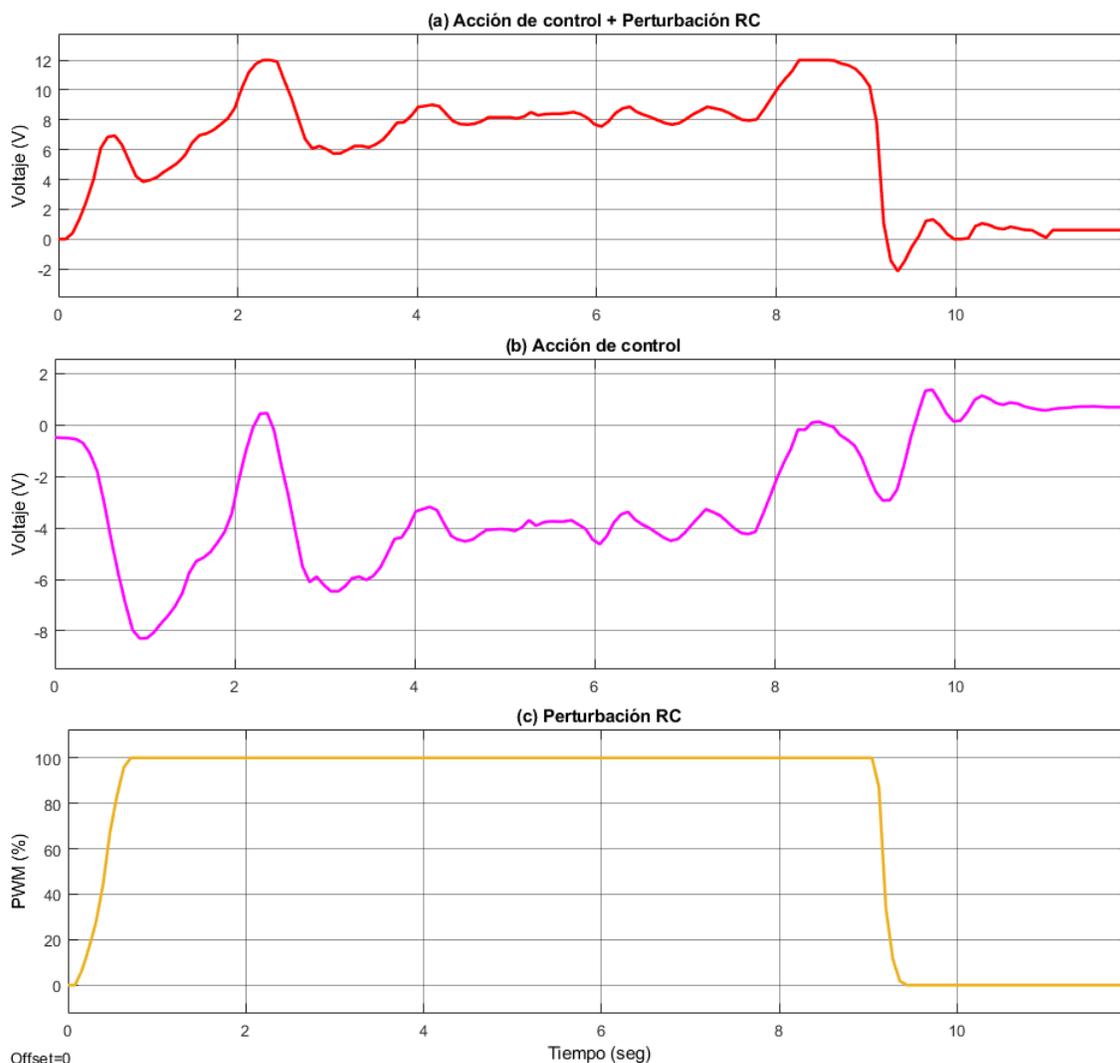


Figura 158. Control PD: Acción de control experimental ante una entrada de PWM en una superficie irregular con pasto. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Acción de control. (c) Perturbación RC.

Con el fin de verificar el tiempo de establecimiento experimental, se procedió a realizar una segunda prueba, esta vez con impulsos rectangulares para así obtener un tiempo de establecimiento promedio. El resultado puede observarse en la Figura 159, y la Figura 160. Al realizar un promedio de los tiempos de establecimiento de los impulsos se obtuvo un resultado de 2.04 segundos.

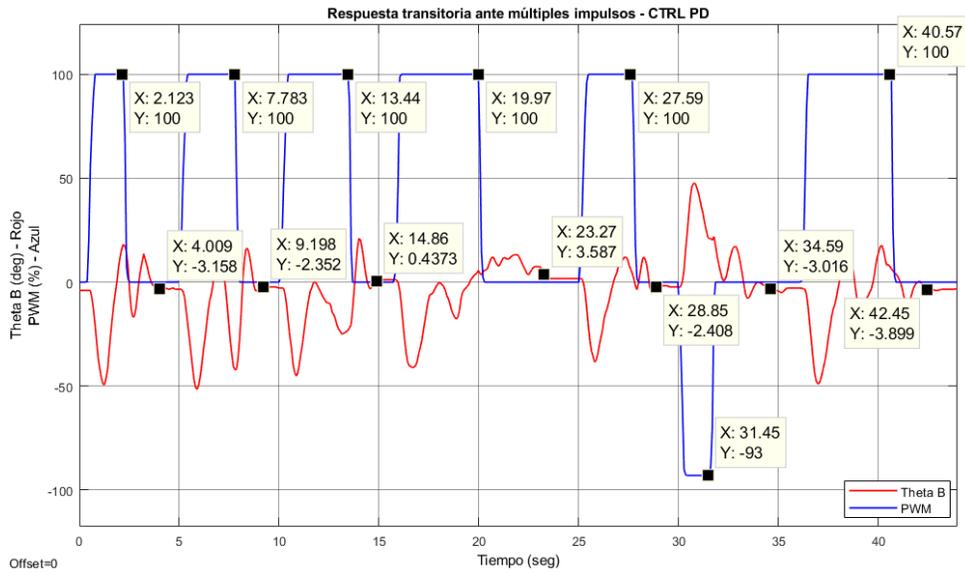


Figura 159. Control PD: Respuesta transitoria experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie irregular con pasto.

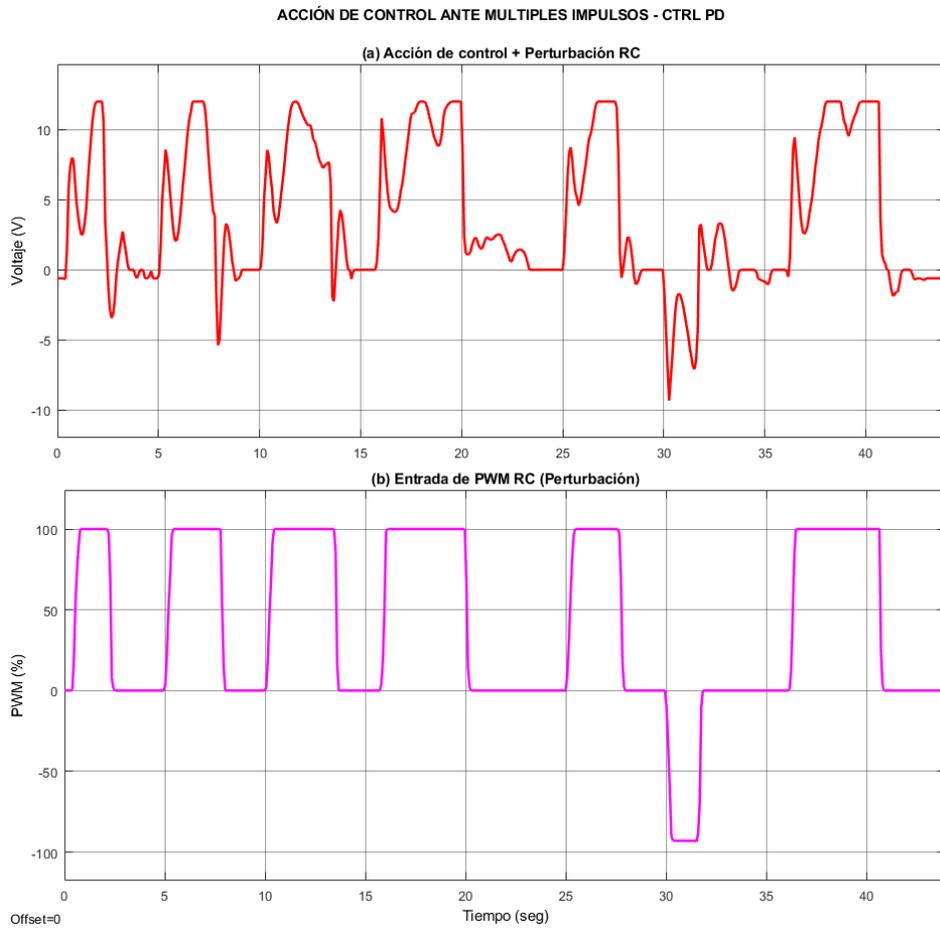


Figura 160. Control PD: Acción de control experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie irregular con pasto. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Entrada de PWM RC (Perturbación).

12.2.5. Validación del control proporcional en una superficie irregular con tierra.

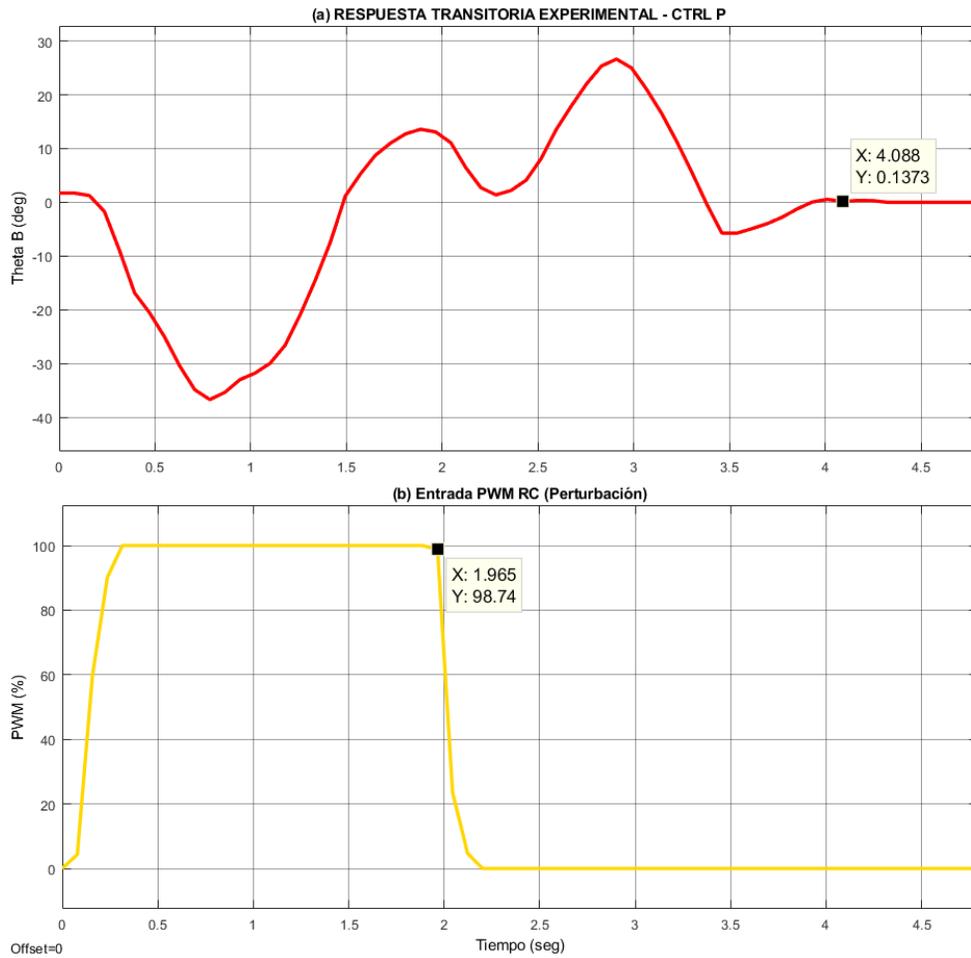


Figura 161. Control P: Respuesta transitoria experimental ante una entrada de PWM en una superficie irregular con tierra. (a) Respuesta transitoria. (b) Entrada PWM RC.

Se procedió a verificar el controlador proporcional en una superficie irregular con tierra y ante una entrada de PWM (perturbación) mandada por el radiocontrol, dando como resultado la respuesta transitoria experimental vista en la Figura 161, con un tiempo de establecimiento experimental de 2.123 segundos. Igualmente, la acción de control experimental puede observarse en la Figura 162.

ACCIÓN DE CONTROL EXPERIMENTAL - CTRL P

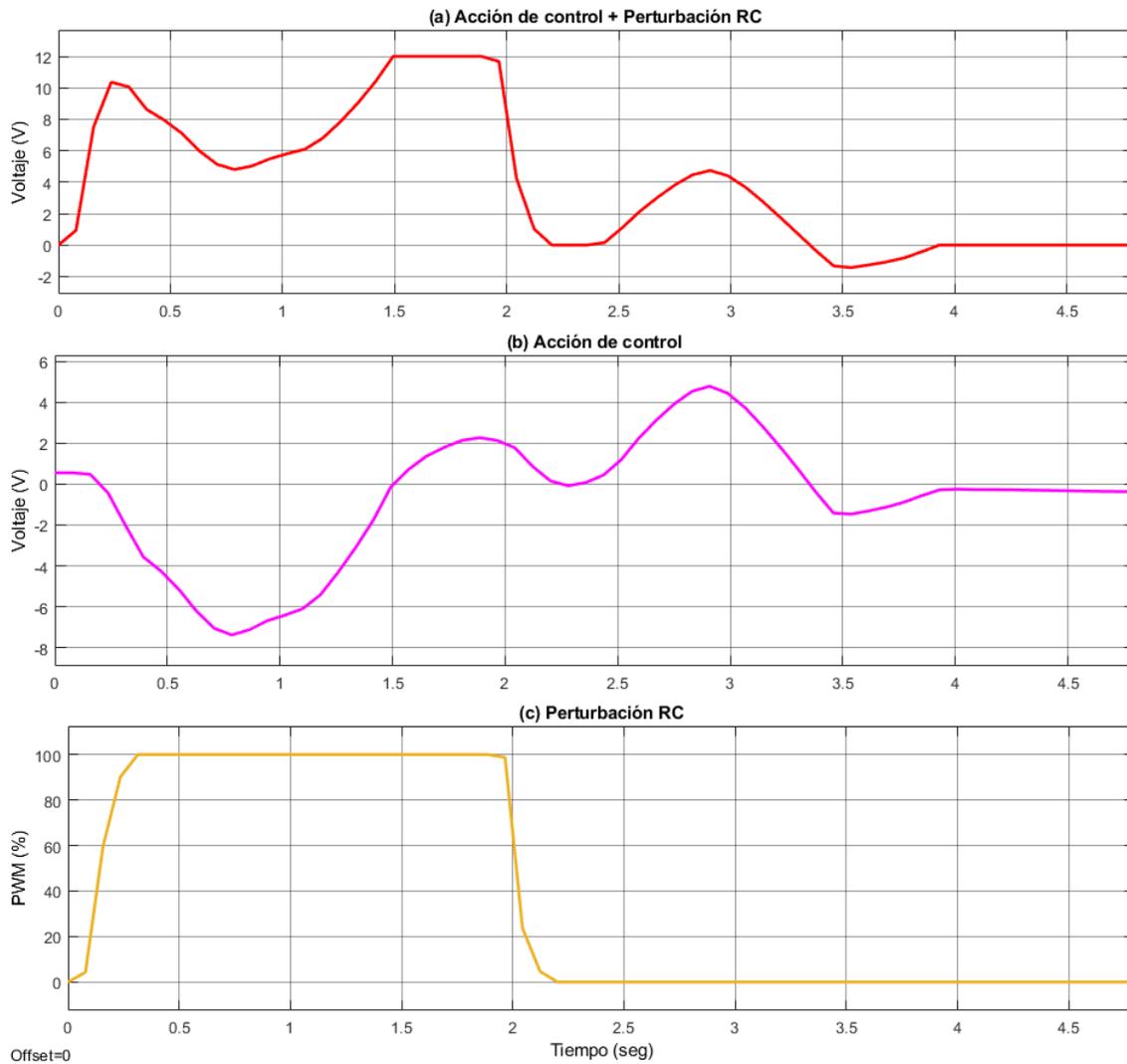


Figura 162. Control P: Acción de control experimental ante una entrada de PWM en una superficie irregular con tierra. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Acción de control. (c) Perturbación RC.

Con el fin de verificar el tiempo de establecimiento experimental, se procedió a realizar una segunda prueba, esta vez con múltiples impulsos para así obtener un tiempo de establecimiento promedio. El resultado puede observarse en la Figura 163, y la Figura 164. Al realizar un promedio de los tiempos de establecimiento de los impulsos se obtuvo un resultado de 2.155 segundos.

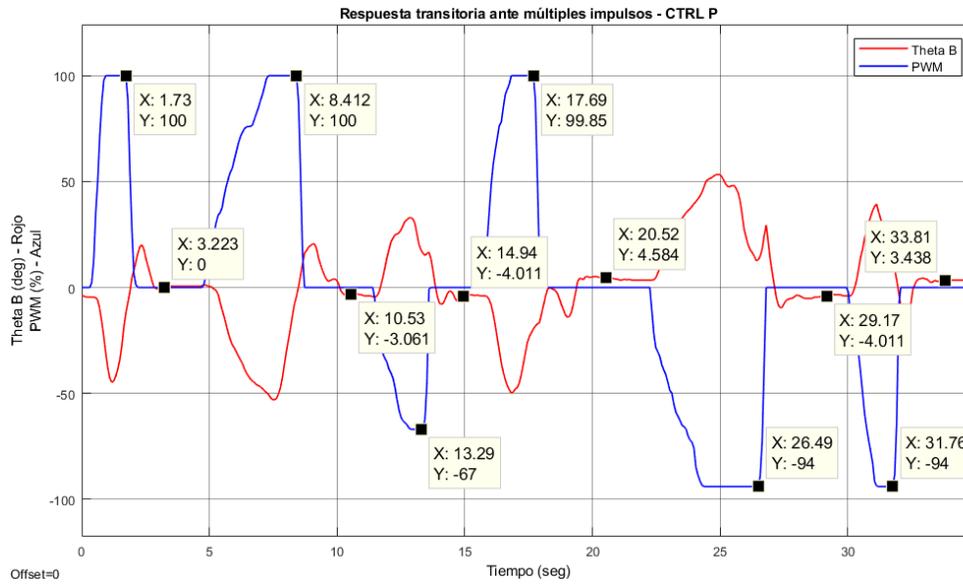


Figura 163. Control P: Resposta transitoria experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie irregular con tierra.

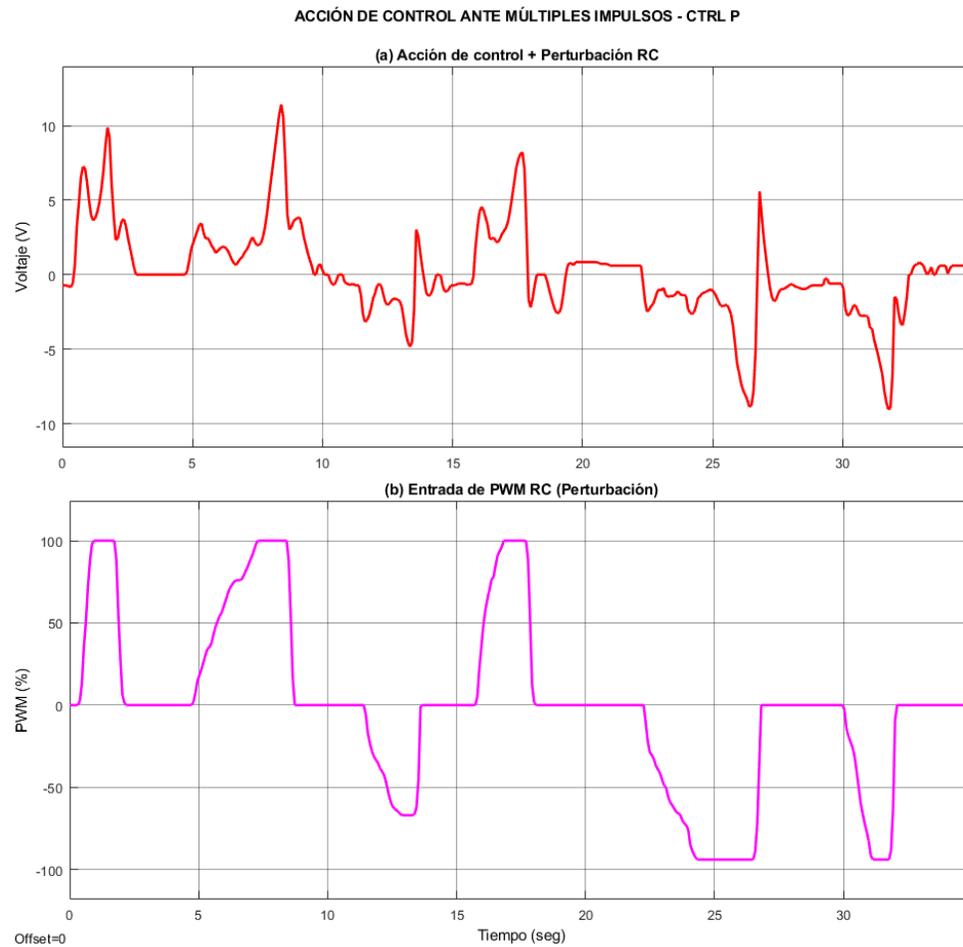


Figura 164. Control P: Acción de control experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie irregular con tierra. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Entrada de PWM RC (Perturbación).

12.2.6. Validación del control proporcional derivativo en una superficie irregular con tierra.

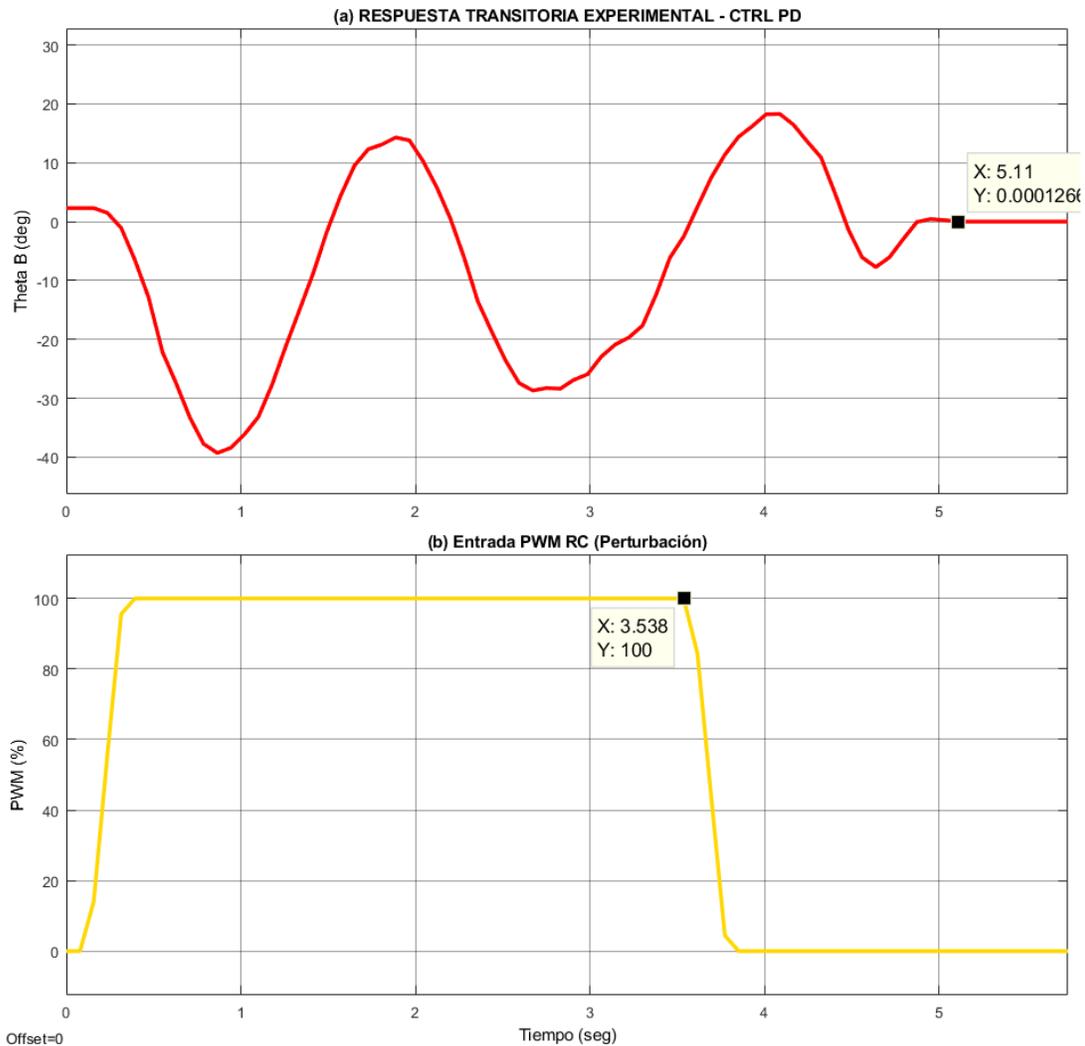


Figura 165. Control PD: Respuesta transitoria experimental ante una entrada de PWM en una superficie irregular con tierra. (a) Respuesta transitoria. (b) Entrada PWM RC.

Se procedió a verificar el controlador proporcional derivativo en una superficie irregular con tierra y ante una entrada de PWM (perturbación) mandada por el radiocontrol, dando como resultado la respuesta transitoria experimental vista en la en la Figura 165, con un tiempo de establecimiento experimental de 1.572 segundos. Igualmente, la acción de control experimental puede observarse en la Figura 166.

ACCIÓN DE CONTROL EXPERIMENTAL - CTRL PD

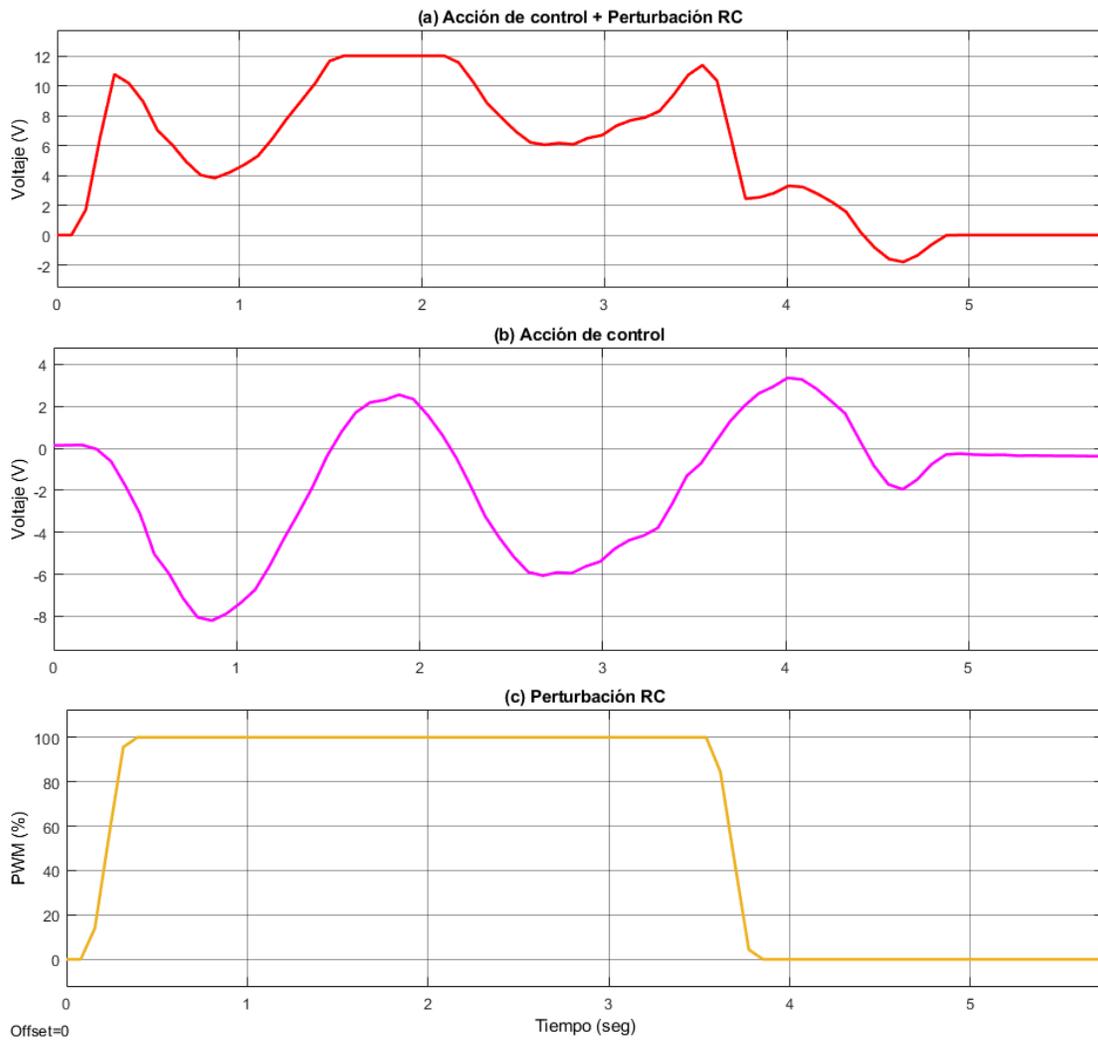


Figura 166. Control PD: Acción de control experimental ante una entrada de PWM en una superficie irregular con tierra. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Acción de control. (c) Perturbación RC.

Con el fin de verificar el tiempo de establecimiento experimental, se procedió a realizar una segunda prueba, esta vez con múltiples impulsos para así obtener un tiempo de establecimiento promedio. El resultado puede observarse en la Figura 167, y la Figura 168. Al realizar un promedio de los tiempos de establecimiento de los impulsos se obtuvo un resultado de 1.579 segundos.

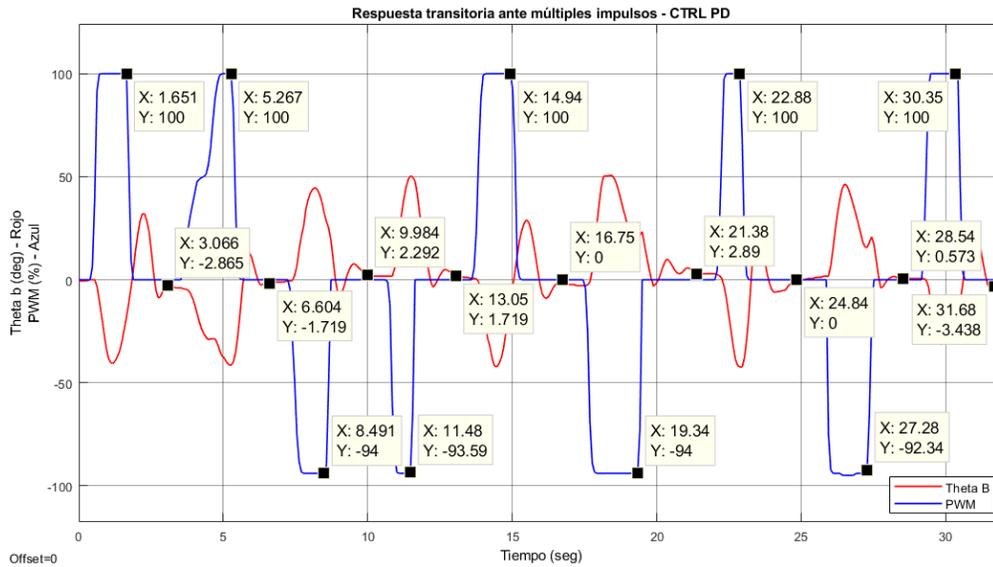


Figura 167. Control PD: Respuesta transitoria experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie irregular con tierra.

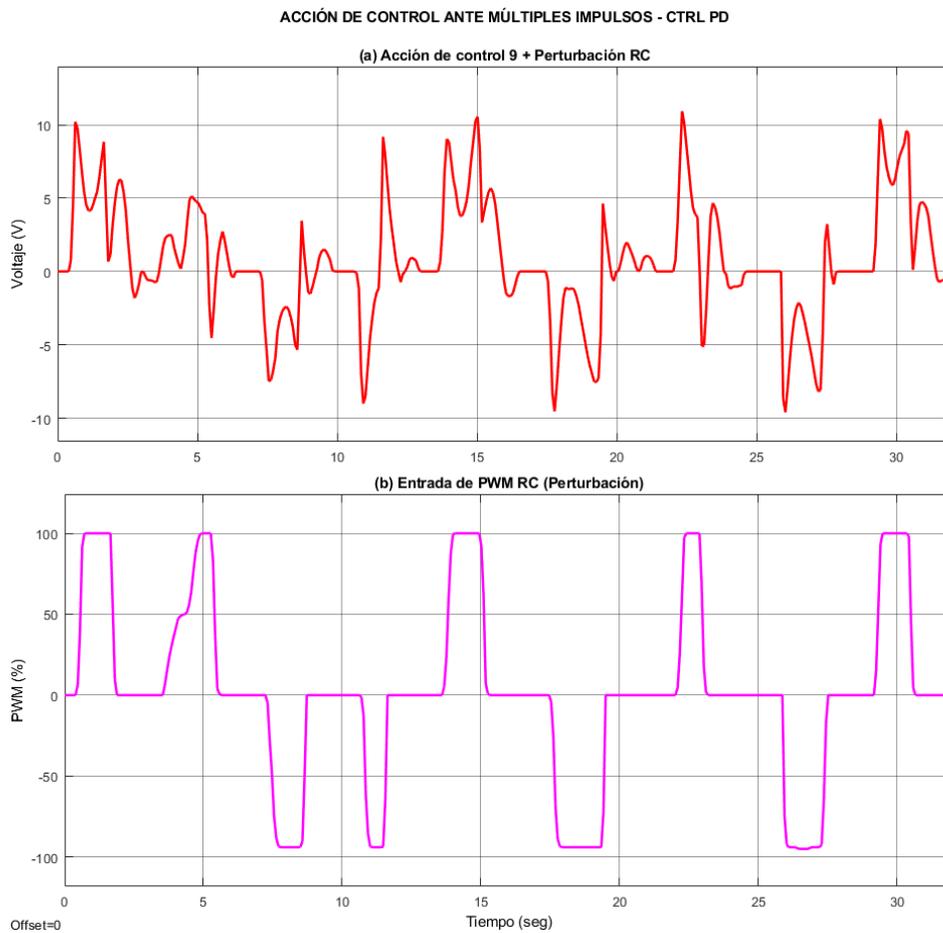


Figura 168. Control PD: Acción de control experimental ante múltiples impulsos rectangulares en una superficie irregular con tierra. (a) Acción de control + Perturbación RC. (b) Entrada de PWM RC (Perturbación).

12.2.7. Evaluación del desempeño de los controladores en las tres superficies diferentes.

Tabla 27. Tabla de evaluación de desempeño de los controladores en modo automático.

Superficie ideal			
Controlador	Tiempo de establecimiento (seg)		
	Teórico	Experimental	Promedio
CTRL P	5.189	5.216	5.243
CTRL PD	4.088	4.403	4.31
Superficie irregular con pasto			
Controlador	Tiempo de establecimiento (seg)		
	Teórico	Experimental	Promedio
CTRL P	-	2.044	2.0446
CTRL PD	-	1.889	2.04
Superficie irregular con tierra			
Controlador	Tiempo de establecimiento (seg)		
	Teórico	Experimental	Promedio
CTRL P	-	2.123	2.155
CTRL PD	-	1.572	1.579

Tabla 28. Tabla de evaluación del margen de error de los controladores en modo automático.

Margen de error	Superficie ideal		Superficie irregular con Pasto		Superficie irregular con Tierra	
	CTRL P	CTRL PD	CTRL P	CTRL PD	CTRL P	CTRL PD
Teórico vs Experimental	1.15%	8.02%	-	-	-	-
Teórico vs Promedio	1.69%	6.42%	-	-	-	-
Experimental vs Promedio	0.51%	2.16%	0.03%	7.40%	1.48%	0.44%

Al analizar los datos obtenidos en las validaciones anteriores (almacenados en la Tabla 27) podemos identificar que el controlador que obtuvo el menor tiempo de establecimiento fue el controlador PD, siendo la superficie con tierra la que registró el menor tiempo de establecimiento.

Igualmente, se procedió a calcular el margen de error teórico versus experimental, teórico vs promedio y experimental vs promedio de los controladores en cada una de las superficies, cuyos datos fueron almacenados en la Tabla 28.

13. CONCLUSIONES

- Implementar una metodología de diseño mecatrónico, como el modelo de Kevin Craig, optimizo la forma en que se organizó y sintonizó las diferentes etapas de la creación del prototipo.
- De la investigación del marco teórico se puede concluir que existen diversas formas de locomoción para un sistema de robot esférico, cada una tiene sus respectivas ventajas y su uso depende mayormente de su aplicación.
- Del proceso de impresión 3D se puede concluir que la orientación de la pieza afecta significativamente su calidad estructural, el material gastado y el tiempo de impresión. También se puede mejorar la resistencia mecánica de la pieza utilizando las configuraciones adecuadas en el software rebanador e imprimiendo en filamentos más resistentes.
- Al implementar el sistema de sellado tipo “riel-pasador” dentro del modelo impreso en 3D se encontró que la presión entre ambas caras no fue lo suficiente para evitar que la esfera se mantuviera unida, esto debido a los errores presentes en el proceso de impresión 3D y a la posición en la que fueron impresas las piezas. Para solucionar temporalmente este problema se procedió a implementar cinta, brindando una sujeción extra que fuera económica y rápida de implementar.
- Al realizar pruebas experimentales del modo manual en superficies irregulares se pudo comprobar que el robot es capaz de maniobrar por esos terrenos, siempre y cuando no tengan obstáculos considerables o mayores a los que él pueda superar, como pasto a un nivel medio, pendientes mayores a los 30 grados, entre otras. Se debe tomar muy en cuenta que este sistema se rige bajo la **limitación de torque** de los sistemas de locomoción basados en el desplazamiento del centro de masa. Sin importar la cantidad de torque que se le añade, el centro de masa no se puede desplazar más allá de los límites geométricos de la esfera, limitando así la capacidad del robot para evadir obstáculos.
- La masa de la esfera también entro a jugar importantemente en la maniobrabilidad del sistema y sus efectos en el desplazamiento del robot. El aumento del torque mitiga sus efectos considerablemente, pero siguen estando presentes debido a la gran cantidad de inercia que posee el prototipo.
- Al realizar el proceso de identificación de los parámetros del sistema utilizando el modelo de caja gris se logró obtener un best-fit máximo del 71.08%, siendo este el más alto conseguido en el proceso iterativo. La diferencia entre ambos modelos se debe a que el modelo experimental cuenta con diferentes factores que no se tomaron en cuenta en el modelo teórico como la fricción seca, el movimiento no restringido en el plano ZY, la simplificación del modelo matemático del motor, entre otros factores relativos a la construcción del prototipo.
- Al comparar los tres tipos de terrenos donde se probó experimentalmente el prototipo, se puede concluir el robot tiene un mejor desempeño en terrenos

con mayor fricción, siempre y cuando sean terrenos planos, libres de obstáculos considerables o pendientes muy inclinadas, puesto que presentan tiempos de establecimiento más óptimo en lazo abierto.

- La superficie que obtuvo el menor tiempo de establecimiento en lazo abierto al detenerse fue la superficie irregular con pasto, seguida por la irregular con tierra y la superficie ideal. Esto se debe a que el aumento de la fricción hace que el robot se detenga más rápidamente, pero con un ángulo de inclinación final más elevado, puesto que la superficie evita que la esfera siga rodando y mantendrá a la unidad IDU en una posición final determinada. Este efecto secundario se puede corregir al activar el modo automático.
- La superficie irregular que obtuvo el mayor ángulo de inclinación en estado estable al detenerse fue la superficie irregular con tierra en lazo abierto, terminando su movimiento con un ángulo de inclinación final de 42.4 grados, casi el doble de la superficie irregular con pasto, probablemente debido a la interacción con algún obstáculo presente en el terreno.
- Las superficies irregulares en lazo abierto presentaron los mayores ángulos de inclinación máximos al iniciar el movimiento, esto debido a que al aumentar la fricción también aumenta el ángulo inicial necesario para hacer rodar la esfera, teniendo una diferencia mínima de aproximadamente 10 grados en comparación con la superficie ideal.
- Las superficies irregulares en lazo abierto también presentaron ángulos de inclinación promedio similares, antes y después del movimiento, en comparación con la superficie ideal en donde existe una gran diferencia entre el ángulo promedio antes y después del movimiento, debido a que en esta superficie el ángulo logró estabilizarse en un valor cercano a cero grados.
- Se comprobó que el modo automático mitiga considerablemente el cabeceo que genera el robot, en comparación con la estabilización mecánica propia del sistema en modo manual, disminuyendo el número de oscilaciones y el tiempo de establecimiento al detenerse, además de que garantiza que la cabeza quede posicionada con el eje vertical al acabar el movimiento en superficies irregulares.
- Las pruebas en modo automático nos permiten comprobar que, aunque se logra una disminución considerable en el cabeceo del robot durante su movimiento, este no desaparece del todo, se logra MITIGAR el ángulo de inclinación y el número de oscilaciones, pero siempre tendrá ese movimiento característico, pues es este el que permite que el centro de masa del robot se desplace y se genere el movimiento.
- El aumento de fricción en terreno irregular ayuda a la disminución del cabeceo, pero para ello requiere de mayor potencia para desplazarse, en comparación con una superficie ideal.
- Las perturbaciones causadas por el plano no controlado ZY no afectan tanto en superficies irregulares y por eso las respuestas transitorias experimentales tienen los menores tiempos de establecimiento en lazo abierto y lazo cerrado.
- El controlador P obtuvo una menor diferencia en la respuesta transitoria teórica vs experimental en una superficie ideal y con un menor margen de

error en comparación con el controlador PD. Sin embargo, el controlador PD obtuvo el menor tiempo de establecimiento en dicha superficie.

- El controlador P obtuvo la menor diferencia entre la acción de control teórica vs la experimental.
- Ninguno de los controladores obtuvo márgenes de error mayores al 10%, siendo el controlador PD el que obtuvo el mayor margen de error entre lo teórico versus lo experimental en la superficie ideal, siendo este del 8.02%.
- En la superficie ideal, el controlador que obtuvo el menor margen de error entre lo teórico vs lo experimental fue el controlador P, siendo este del 1.15%.
- El controlador que obtuvo el menor margen de error entre lo experimental y el promedio fue el controlador P en una superficie irregular con pasto, por lo que se puede concluir que el controlador proporcional fue el más preciso, a pesar de que no fue el más rápido.
- El controlador PD fue el que obtuvo los mayores márgenes de error en casi todas las superficies, excepto en la superficie irregular con tierra en donde obtuvo el menor margen entre lo experimental y el promedio, en comparación con el controlador P.
- La superficie irregular con tierra obtuvo el menor tiempo de establecimiento en comparación con las demás superficies, siendo el controlador PD el que registro dicho tiempo y el cual obtuvo un bajo margen de error experimental vs promedio del 0.44%.
- La correcta identificación del sistema se puede comprobar al comparar los tiempos de establecimiento teóricos contra los experimentales en una superficie ideal, puesto que ambos tiempos son muy similares entre sí, además de contar con respuestas transitorias similares. Sin embargo, los demás factores no considerados pueden causar que este tiempo de establecimiento aumente según lo que se vio en las pruebas ante múltiples impulsos rectangulares con el controlador PD.
- La robustez de los controladores fue comprobada en las pruebas en superficies irregulares. Los controladores se desempeñaron aún mejor en estas superficies y con bajos márgenes de error.
- Al comparar los tres controladores probados en modo automático se puede concluir que el controlador más óptimo y robusto es el proporcional derivativo (PD), puesto que presentó tiempos de establecimientos menores, acciones de control no tan bruscas y sus márgenes de error no superan el 10% en sus diferentes terrenos.

14. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. OLLERO, Aníbal. Robótica Manipuladores y robots móviles. Marcombo S.A, 2001. p.1-13. ISBN: 84-267-1313-0.
- [2]. SIEGWART, Roland. NOURBAKHS, Illah R. Introduction to Autonomous Mobile Robots. A Bradford Book, 2004. p.32-45. ISBN: 0-262-19502-0.
- [3]. CHASE, Richard. PANDYA, Abhilash. A Review of Active Mechanical Driving Principles of Spherical Robots. Robotics, 2012. ISSN: 2218-6581.
- [4]. DEEPAK, Pokhrel. NUTAN Raj Luitel. SUKANTA Das. Design and Development of a Spherical Robot (SpheRobot). En: National Conference on Machines and Mechanisms (Roorkee, India : 2013).
- [5]. EL NUEVO SIGLO. Soluciones ambientales en la industria palmera. En: el nuevo siglo [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <http://www.elnuevosiglo.com.co/articulos/02-2017-soluciones-ambientales-en-la-industria-palmera>
- [6]. DINERO. Panorama desalentador para la palma africana. En: el diario [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <http://www.dinero.com/edicion-impresa/negocios/articulo/en-que-esta-palma-africana-2015/208957>
- [7]. EL DIARIO. La vida de la palma africana. En: Dinero [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <http://www.eldiario.ec/noticias-manabi-ecuador/202402-la-vida-de-la-palma-africana/>
- [8]. SATRIA, Stevanus. WEN, Lee. CHAN, Samantha. Portable Amphibious Spherical Rolling Robot with Live-Streaming Capability for Ground and Aquatic Deployment. En: IRC Conference on Science, Engineering, and Technology, National University of Singapore, 2015.
- [9]. CROPLIFE. Pudrición del Cogollo. En: CroplifeLA [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <https://www.croplifela.org/es/plagas/listado-de-plagas/pudricion-del-cogollo>
- [10]. ROBOTNIK. Servicios de robótica móvil: Agricultura. En: Robotnik. [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <http://www.robotnik.es/servicios-de-robotica-proyectos/aplicaciones-moviles/agricultura/>

- [11]. LOUISIANA STATE UNIVERSITY. Protect Your Home and Maintain Your Lawn With LSU's Revolutionary AgBot. En: LSU. [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <http://www.lsu.edu/highlights/2008/11/agbot.html>
- [12]. SPHERO. Sphero 2.0. En: Sphero. [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <https://www.sphero.com/sphero>
- [13]. THOMPSON, Ashlee. LA, Lynn. LG Rolling Bot will monitor your home, freak out your pets (hands-on). En: CNET. [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <https://www.cnet.com/products/lg-rolling-bot/preview/>
- [14]. TUCKER, Patrick. The Marines Are Building Robotic War Balls. En: Defenseone. [en línea]. (12 de dic., 2017). Disponible en: <http://www.defenseone.com/technology/2015/02/marines-are-building-robotic-war-balls/105258/>
- [15]. ANTOL, Jeffrey. KOLACINSKI, Richard. MINTON, David. OWENS, Rachel. PARKER, Jennifer. Low Cost Mars Surface Exploration: The Mars Tumbleweed. NASA Langley Research Center, Agosto 2003.
- [16]. BROOKS, Dan. Droid dreams: how neal scanlan and the Star Wars: the Force Awakens team brought bb-8 to life. En: Star Wars. [en línea]. (13 de dic., 2017). Disponible en: <http://www.starwars.com/news/droid-dreams-how-neal-scanlan-and-the-star-wars-the-force-awakens-team-brought-bb-8-to-life>
- [17]. MASSINO, P. Una introducción a los Robots Móviles. IL Bambino. 2008.
- [18]. BRAUNL, Thomas. Embedded Robotics, Mobile Robot Design and Applications with Embedded Systems. Second Edition. Springer, 2006. ISBN: 3-540-34318-0.
- [19]. GARCIA, Carlos. Vehículos aéreos no tripulados, Drones y sus sistemas de comunicación. Superintendencia de industria y comercio. 2015. En: Boletín tecnológico.
- [20]. HERNÁNDEZ, Juan. ROSPHERE: Diseño, Construcción y Aplicación de una Esfera Robótica. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2012.
- [21]. SCHROLL, Gregory. Dynamic model of a spherical robot from first principles. Colorado State University. Fort Collins, Colorado, 2010.

- [22]. ALVES, J. DIAS, J. Design and control of a spherical mobile robot. En: Proc IME J. Syst. Contr. Eng. 2003.
- [23]. CROSSLEY, Vincent. A Literature Review on the Design of Spherical Rolling Robots. En: IEEE Xplore Digital Library. Carnegie Mellon University, Pittsburgh.
- [24]. CRAIG, Kevin. Improving mechatronic-system design. En: EDN Network. [en línea]. (27 de ene., 2017). Disponible en: <https://www.edn.com/electronics-blogs/mechatronics-in-design/4368269/Improving-mechatronic-system-design>
- [25]. RUEDA, Oscar. Diseño Mecatrónico (DISE 18012). Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Santander, 2018.
- [26]. RUEDA, Oscar. Análisis de valor y técnica de análisis de funciones de sistemas (FAST). Universidad Autónoma de Bucaramanga. Bucaramanga, Santander, 2018.
- [27]. PELLETIER, Melissa. The Physics of the Star Wars BB-8 Droid: How Does it Work. En: Nuscool. [en línea]. (01 de mar., 2017). Disponible en: <https://www.nuskool.com/learn/lesson/the-physics-of-the-star-wars-bb-8-droid-how-does-it-work/>
- [28]. DUFRESNE, Steven. Driving BB-8: More than one way to move this bot. En: Hackday. [en línea]. (01 de mar., 2017). Disponible en: <https://hackaday.com/2016/06/24/driving-bb-8-more-than-one-way-to-move-this-bot/>
- [29]. XUELEI, Niu. OTTO, Kevin. Mechanical Development and Control of a Miniature Spherical Rolling Robot. En: Draft: the 13th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision. (Mariana Bay Sands, Singapore : 2014).
- [30]. KAMIS, N. Modelling and Simulation Analysis of Rolling Motion of Spherical Robot. En: 6th International Conference on Mechatronics. International Islamic University Malaysia, 53100 Gombak, Selangor.
- [31]. BARRIENTOS, Antonio. Fundamentos de robótica. McGraw-Hill, 2007. p.160-164. ISBN: 9788448156367.
- [32]. AUTODESK. Impresión 3D. En: Autodesk Latinoamérica. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://latinoamerica.autodesk.com/solutions/3d-printing>

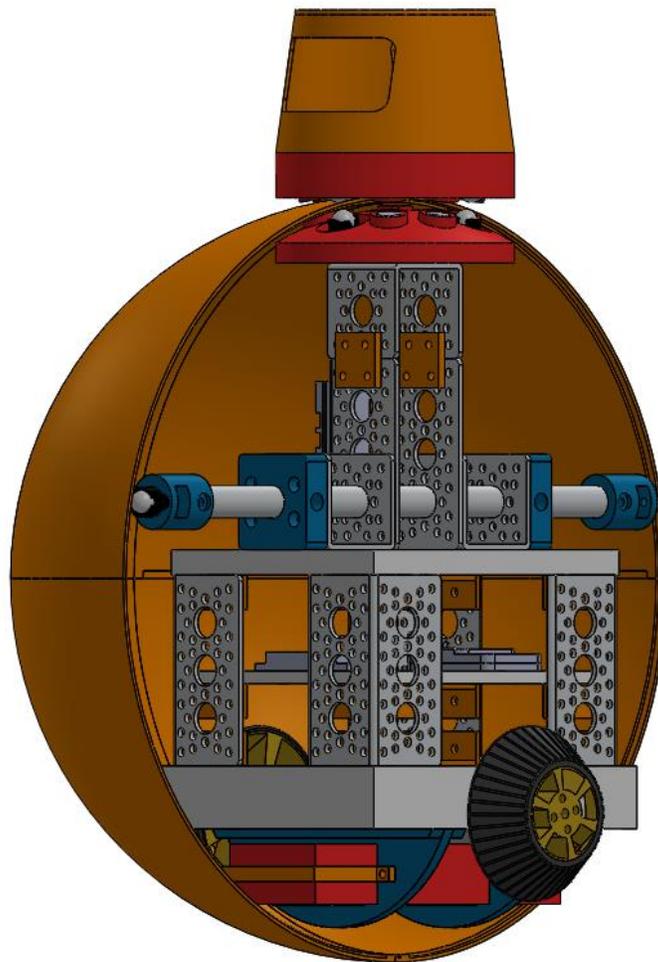
- [33]. TRSD. Desarrollo y tendencias del software para impresión 3D: un estudio de mercado. En: impresiontresde. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://impresiontresde.com/tendencias-software-para-impresion-3d/>
- [34]. SANCHEZ, Susana. FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo! En: 3dnatives. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- [35]. GRILON3D, Filamentos. Tablas de comparativa de materiales Grilon3. En: Nicieza & Taverna Hnos. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <http://www.nth.com.ar/es/content/12-descargas>
- [36]. ULTIMAKER. Manuals: Shell. En: Ultimaker. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://ultimaker.com/en/resources/52343-shell>
- [37]. CAIN, Perri. Selecting the optimal shell and infill parameters for FDM 3D Printing. En: 3D hubs. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing>
- [38]. JAKK. What is slicing software, and what does it do? En: GoPrint3D. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://www.goprint3d.co.uk/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>
- [39]. 3D MATTER. What is the influence of infill %, layer height and infill pattern on my 3D prints? En: My3DMatter. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://my3dmatter.com/influence-infill-layer-height-pattern/>
- [40]. ULTIMAKER. Manuals: Infill. En: Ultimaker. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://ultimaker.com/en/resources/52670-infill>
- [41]. DYNAMO ELECTRONICS. Motorreductor 16Kgcm-100RPM. En: [41]. Dynamo electronics. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://www.dynamoelectronics.com/tienda/motorreductor-16kgcm-100rpm/>
- [42]. ARDOBOT ELECTRONIC. Acelerómetro y Giroscopio GY-521 MPU6050. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://www.ardobot.co/acelerometro-gy-521-mpu6050>
- [43]. ARDUINO. Arduino mega 2560 rev3. En: Arduino Store. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>
- [44]. POLOLU. Pololu Dual VNH5019 Motor Driver Shield for Arduino. En: Pololu Store. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <https://www.pololu.com/product/2502>
- [45]. TDROBOTICA. Batería LiPo 4000mAh 7.4V HardCase. En: tdrobotica. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: http://tdrobotica.co/bateria-lipo-4000mah-74v-hardcase/725.html?search_query=Bateria+LiPo+4000mAh+7.4V+HardCase&results=1
- [46]. CHOWDHURY, Abhra Roy. VIBHUTE, A. SOH, G. FOONG, S. WOOD, K. Implementing Caterpillar Inspired Roll Control of a Spherical Robot. En: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore University of Technology and Design, Singapore.
- [47]. TDROBOTICA. Radiocontrol RC Turnigy 5X - 5 Canales. En: tdrobotica. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: <http://tdrobotica.co/radiocontrol-rc-turnigy-5x-5-canales/491.html>

- [48]. MADSEN, Henrik. BACHER, Peder. JUHL, Rune. KLOPPENBORG, Jan. Gray-Box Modeling; An approach to combined physical and statistical model building. En: Smart-cities-centre. [en línea]. (18 de feb., 2019). Disponible en: http://smart-cities-centre.org/wp-content/uploads/grey_box_intro.pdf
- [49]. GONZALES ACEVEDO, Hernando. Espacio de estados. Universidad Autónoma de Bucaramanga, 2018.

ANEXO A

Manual de usuario del robot móvil esférico

MANUAL DE USUARIO DEL ROBOT MÓVIL ESFÉRICO



DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT
MÓVIL ESFÉRICO PARA MONITOREO DE CULTIVOS DE PALMA
DE ACEITE

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.	164
2. GENERALIDADES DEL SISTEMA.	165
2.1. Partes generales del sistema de robot móvil esférico.	165
2.1.1. Partes de la esfera.....	165
2.1.2. Partes de la unidad de conducción interna (IDU).	166
2.2. Botones, joysticks e interruptores generales del sistema.....	168
2.3. Instrucciones de seguridad básica importantes.	169
3. INSTRUCCIONES DE ENSAMBLE DE LA ESFERA.	170
3.1. Instrucciones de ensamble labio – ranura.....	170
3.2. Instrucciones de sellado de la esfera: Ensamble riel – pasador.....	171
4. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN.	172
4.1. Instrucciones del proceso de encendido del robot.	172
4.2. Instrucciones del proceso de apagado del robot.....	173
4.3. Instrucciones del proceso de parado de emergencia del robot.	173
5. INSTRUCCIONES PARA LA CORRECCIÓN DE ERRORES BÁSICOS.....	174
5.1. Error #1: el robot no se mueve dentro de la esfera en modo manual. ...	174
5.1.1. Proceso de revisión de luces de encendido.	174
5.1.2. Proceso de revisión del radiocontrol RC.....	174
5.1.3. Proceso de revisión del nivel de la batería.	175
5.2. Error #2: el robot no controla la posición de la cabeza en modo automático.	175
5.2.1. Proceso de revisión del estado de la IMU.	175
5.2.2. Proceso de revisión de la lectura del radiocontrol RC.	175

TABLA DE IMAGENES

Imagen I. Vista general del robot ensamblado.....	164
Imagen II. Partes generales del sistema de robot móvil esférico.....	165
Imagen III. Partes de la esfera.....	165
Imagen IV. Partes de la unidad de conducción interna (IDU).	166
Imagen V. Partes de la sección de torre magnética y eje.	167
Imagen VI. Partes de la sección de electrónica y columnas estructurales.	167
Imagen VII. Partes de la sección de potencia y energía.	168
Imagen VIII. Botones, joysticks e interruptores generales del sistema.	168
Imagen IX. Ensamble labio – ranura.....	170
Imagen X. Lado A ensamblado.....	170
Imagen XI. Ensamble riel – pasador.....	171
Imagen XII. Paso I: ubicar el sistema riel-pasador en su respectiva ubicación ..	171
Imagen XIII. Conexión de cables para el encendido del robot.....	172
Imagen XIV. Leds de advertencia de encendido	172
Imagen XV. Configuración correcta del radiocontrol.....	175

1. INTRODUCCIÓN.

Este manual de usuario expone los procesos básicos que el operador puede realizar con el sistema de robot móvil esférico, instruyéndolo en su uso y en la solución de los problemas básicos que se pueden presentar durante la operación del prototipo. En él se detalla de forma resumida las características del sistema y la forma de acceder e instruir la información presentada.

Este manual va dirigido al operador encargado de la conducción del sistema y el control mecánico del mismo.

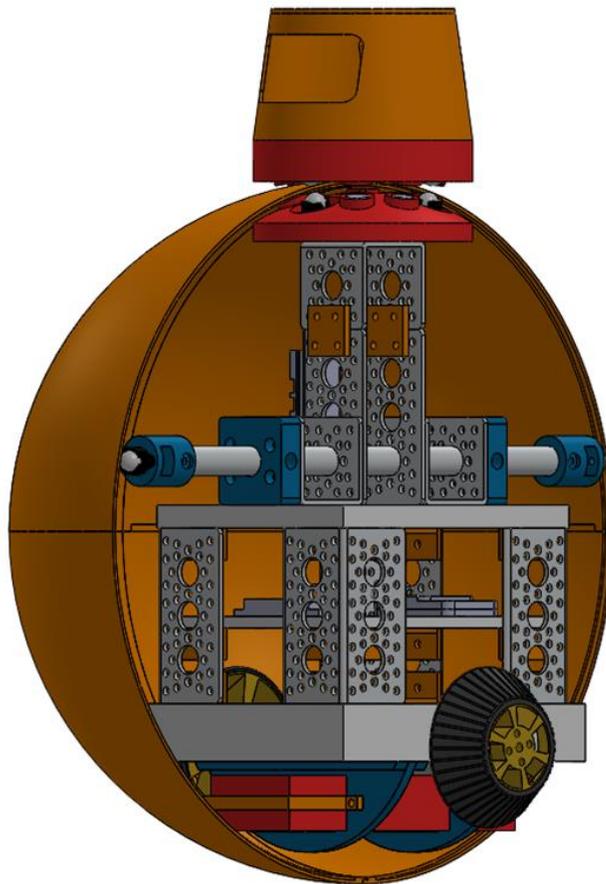


Imagen I. Vista general del robot ensamblado.

2. GENERALIDADES DEL SISTEMA.

2.1. Partes generales del sistema de robot móvil esférico.

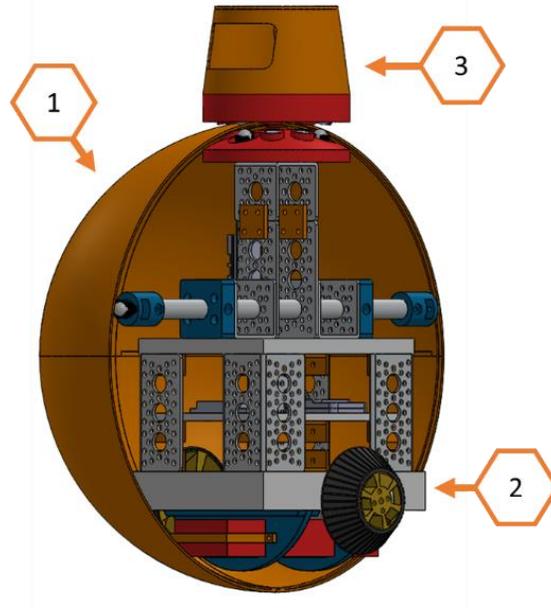


Imagen II. Partes generales del sistema de robot móvil esférico.

El robot móvil esférico está constituido por 3 partes principales:

1. La esfera.
2. La unidad de conducción interna (IDU).
3. La cabeza.

2.1.1. Partes de la esfera.

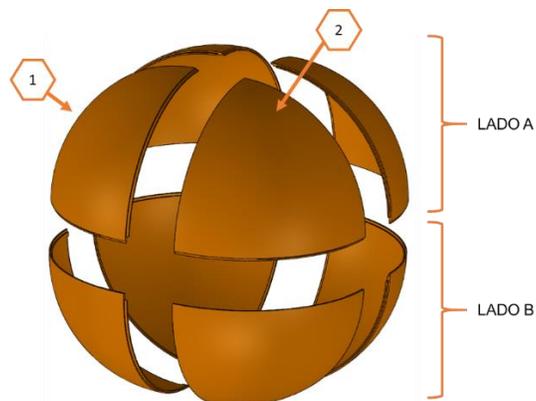


Imagen III. Partes de la esfera.

La esfera está constituida principalmente por dos partes:

- Lado A: Contiene el sistema de sujeción principal tipo pasador.
- Lado B: contiene el sistema de sujeción principal tipo riel.

Igualmente, cada lado de la esfera está constituido por la unión de:

1. Dos paneles de cuarto de esfera con sistema de ensamble tipo labio.
2. Dos paneles de cuarto de esfera con sistema de ensamble tipo ranura.

2.1.2. Partes de la unidad de conducción interna (IDU).

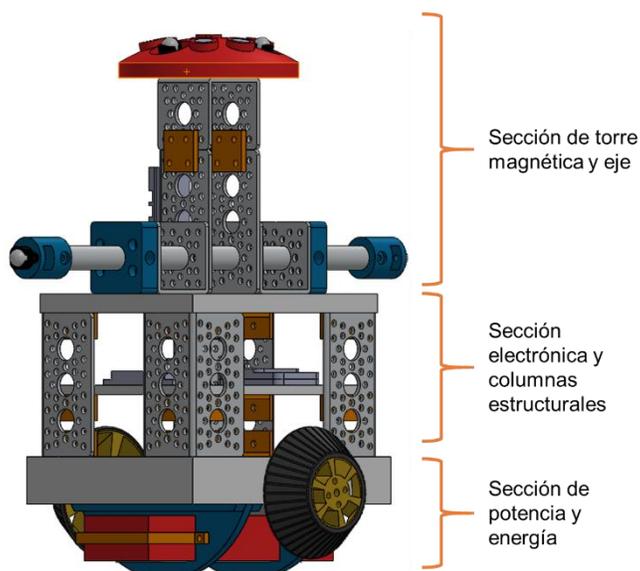


Imagen IV. Partes de la unidad de conducción interna (IDU).

La unidad de conducción interna (IDU) está constituida principalmente por 3 partes:

- La sección de torre magnética y eje.
- La sección de electrónica y columnas estructurales.
- La sección de potencia y energía.

Las partes de la sección de torre magnética y eje, la sección de electrónica y estructural, y la sección de potencia y energía pueden ser vistas en detalle en la Imagen V, la Imagen VI y la Imagen VII.

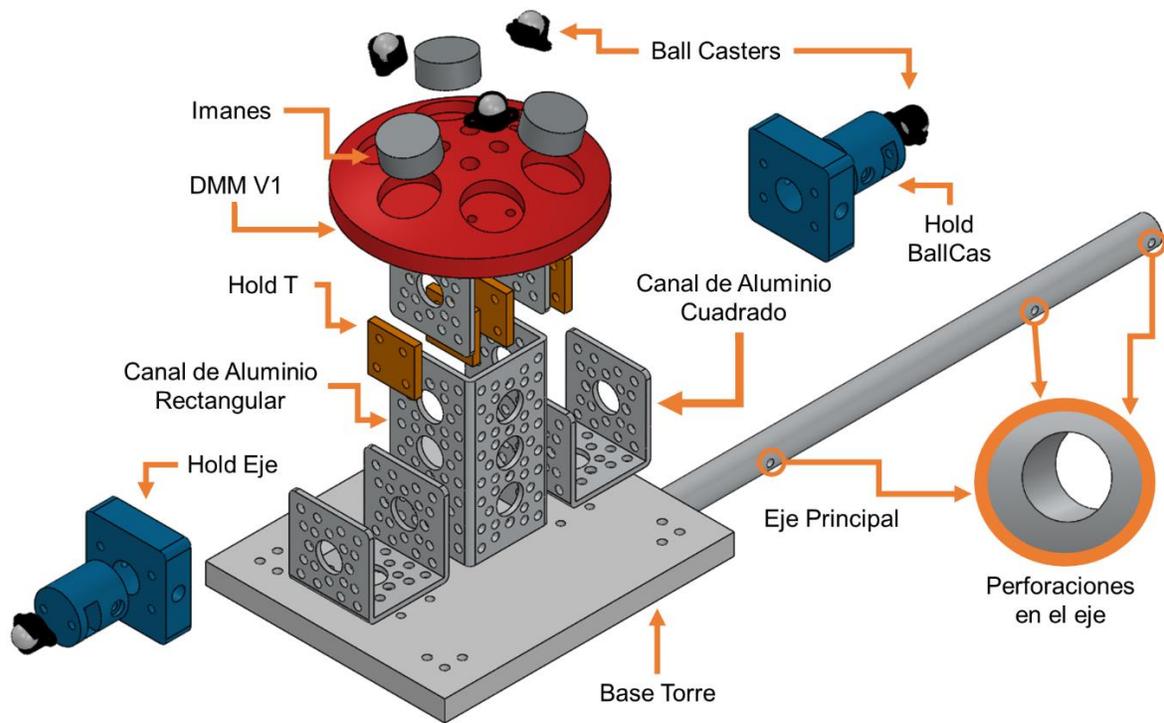


Imagen V. Partes de la sección de torre magnética y eje.

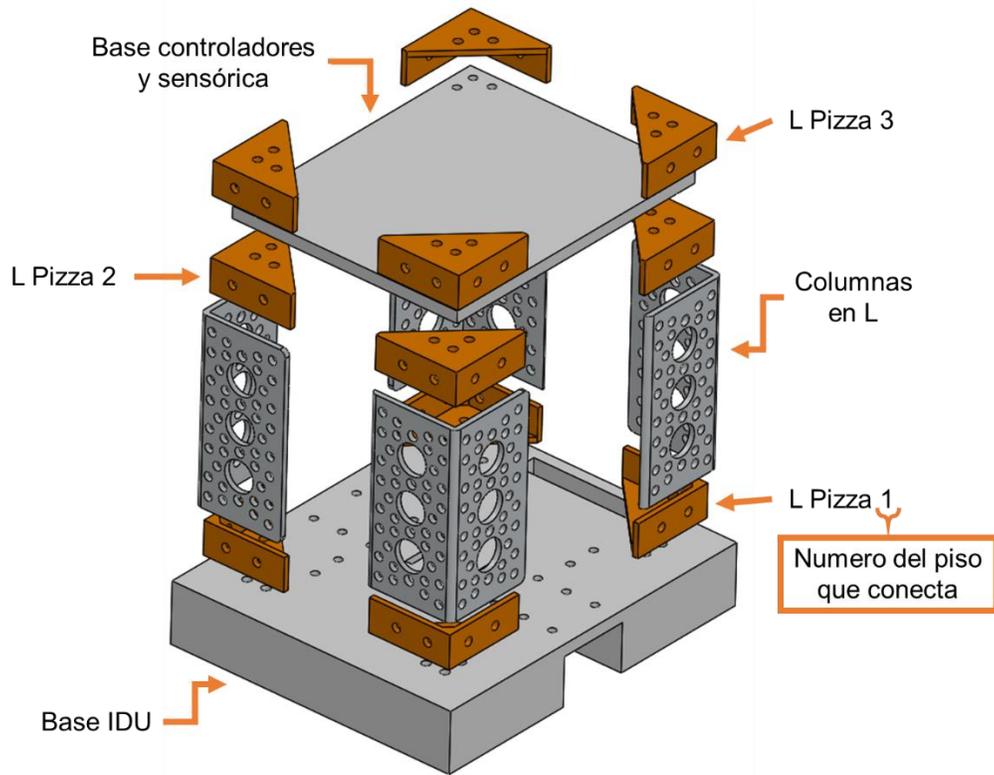


Imagen VI. Partes de la sección de electrónica y columnas estructurales.

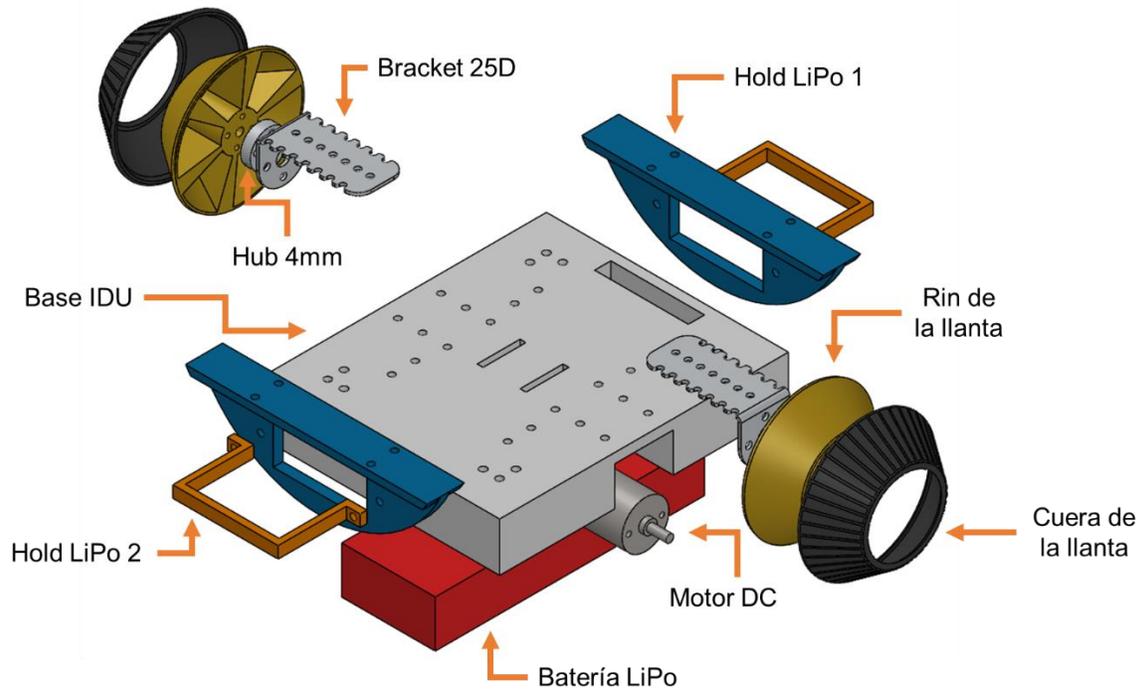


Imagen VII. Partes de la sección de potencia y energía.

2.2. Botones, joysticks e interruptores generales del sistema.



Imagen VIII. Botones, joysticks e interruptores generales del sistema.

El sistema de control del robot móvil esférico cuenta con los siguientes botones, joysticks de control e interruptores en su módulo de control a distancia (radiocontrol RC):

- **Interruptor de encendido del RC:** interruptor on/off conmutable con el cual se controla el encendido y apagado del radiocontrol.
- **Botón de emparejamiento del RC:** botón normalmente abierto con el cual se activa el sistema de emparejamiento entre el control y la baliza del RC (ubicada dentro del robot).
- **Canal #5:** interruptor con enclavamiento con el cual se realiza el cambio entre el modo manual y el modo automático del robot. Cuando el interruptor se encuentra accionado hacia el lado trasero del control, el robot se encontrará en modo manual, y viceversa.
- **Joystick de control vertical:** joystick de desplazamiento vertical con el cual se controla el movimiento de lineal del robot, siempre que se encuentre en modo manual.
- **Joystick de control horizontal:** joystick de desplazamiento horizontal con el cual se controla el giro del robot, siempre que el canal #5 se encuentre en modo manual.

2.3. Instrucciones de seguridad básica importantes.

- Lea todas las instrucciones que este manual le brinda, para así garantizar un manejo adecuado del robot.
- Utilice el robot únicamente para su uso previsto en este manual.
- El mantenimiento, reparación o ajuste deberá ser realizado por personal calificado encargado en su respectiva área.
- Evitar a toda costa que el robot esférico sufra cualquier percance relacionado a impactos significativos, puesto que se corre el riesgo de daño físico del robot o debilitamiento estructural del mismo.
- Evitar sumergir completa o parcialmente el robot en agua, pues se corre el riesgo de daño a los componentes electrónicos.
- Evitar que el nivel de voltaje de la batería LIPO descienda a valores inferiores de 3 volts por celda, puesto que esto puede dejar a la batería en un estado crítico donde es peligroso volverla a cargar.
- No operar el robot en condiciones de altas temperaturas que puedan llevar a un malfuncionamiento de la batería LIPO.

3. INSTRUCCIONES DE ENSAMBLE DE LA ESFERA.

3.1. Instrucciones de ensamble labio – ranura.

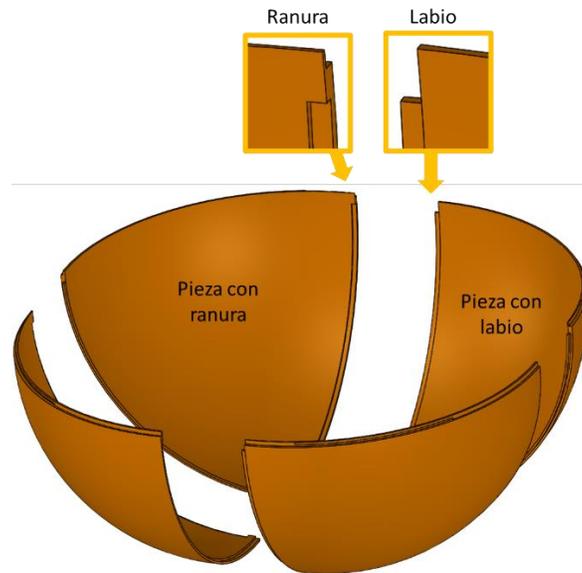


Imagen IX. Ensamble labio – ranura.

Para ensamblar el lado A y el lado B de la esfera se debe seguir los siguientes pasos:

- I. Aplique pegamento epóxico en de las ranuras del panel tipo “ranura”, agregando solo la cantidad precisa para unir las piezas.
- II. Junte la pieza con ranura junto a la pieza con labio, presionando ambas fuertemente entre sí por un aproximado de 15 minutos mientras se seca el pegamento.
- III. Repita los pasos I y II hasta que quede completamente ensamblada la media esfera del lado A y luego repita el mismo procedimiento con las piezas del lado B. El resultado debe ser similar al visto en la Imagen X.



Imagen X. Lado A ensamblado.

3.2. Instrucciones de sellado de la esfera: Ensamble riel – pasador.

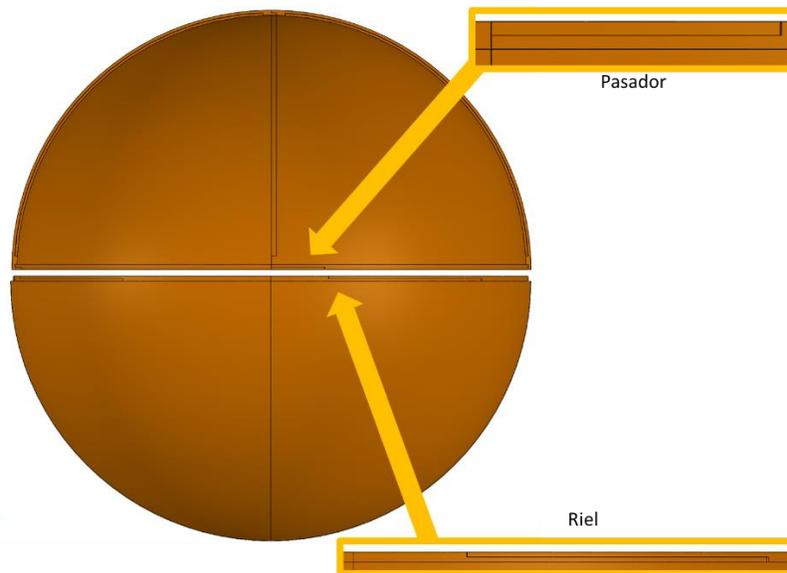


Imagen XI. Ensamble riel – pasador.

Una vez ensambladas ambas media esferas, se coloca la unidad IDU dentro de una de ellas y se procede con los siguientes pasos para sellar la esfera:

- I. Ubique el inicio del sistema de riel (lado B) y posicione el pasador (lado A) sobre el riel, asegurándose que cada uno de los 4 pasadores del lado A encajen bien dentro del inicio de cada riel.

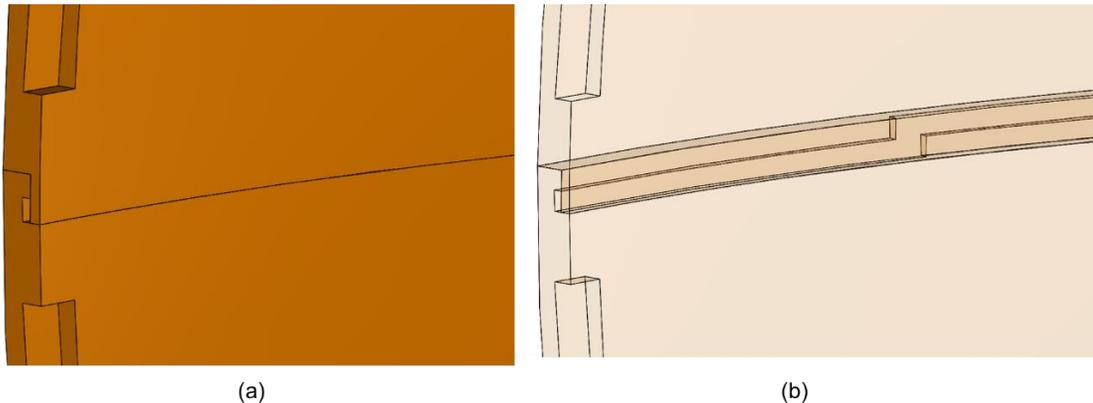


Imagen XII. Paso I: ubicar el sistema riel-pasador en su respectiva ubicación. (a) Vista sólida. (b) Vista transparente.

- II. Gire el lado A en sentido contrario a las manecillas del reloj hasta llegar al tope del riel. Debe cerciorarse de no hacer más fuerza de la debida al momento de girar el lado A y detenerse inmediatamente se sienta que el pasador llevo al tope del riel.

4. INSTRUCCIONES DE OPERACIÓN.

4.1. Instrucciones del proceso de encendido del robot.

Para encender el robot se debe seguir las siguientes instrucciones:

- I. Conectar los cables de energía blanco y amarillo al conector de balanceo de la batería LIPO. El amarillo debe coincidir con lado negativo de la batería y el cable blanco con el lado positivo, tal y como se muestra en la siguiente imagen:

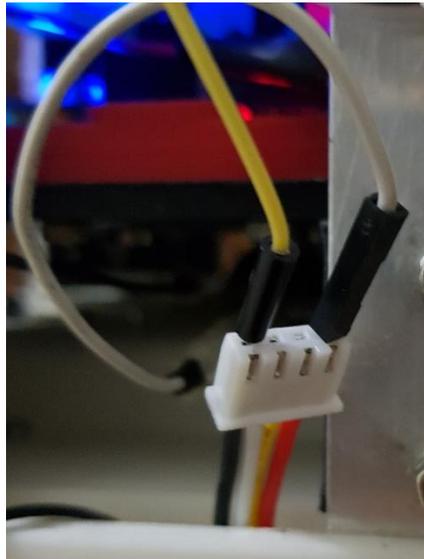
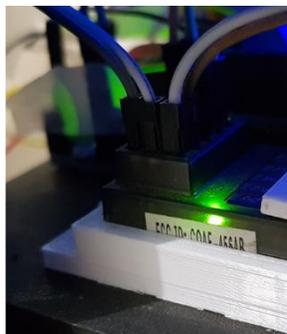


Imagen XIII. Conexión de cables para el encendido del robot.

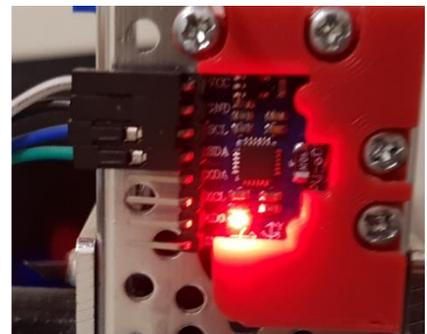
- II. Revise que los 3 leds de advertencia que le indicaran que el robot se encuentra encendido: El led azul de la shield de control de motores, el led amarillo de la baliza RC (en estado intermitente) y el led rojo del sensor IMU.



(a)



(b)



(c)

Imagen XIV. Leds de advertencia de encendido: (a) Led azul de la shield de control de motores. (b) Led amarillo de la baliza RC. (c) Led rojo del sensor IMU.

- III. Encienda el radiocontrol sosteniendo fijamente el botón de emparejamiento y deslizando el interruptor de encendido hacia arriba. El led de advertencia de encendido del radiocontrol entrará en estado intermitente hasta que conecte con la baliza RC o hasta que se venza el tiempo límite de emparejamiento.
- IV. En modo manual, compruebe el correcto funcionamiento del robot antes de introducirlo en la esfera.
- V. Introduzca el robot en la esfera y proceda a sellarla. Por seguridad, apague el control remoto para evitar que el robot se mueva durante el proceso de sellado.
- VI. Vuelva a encender el radiocontrol, pero esta vez no mantenga presionado el botón de emparejamiento puesto que el sistema ya se encuentra emparejado.

4.2. Instrucciones del proceso de apagado del robot.

Para apagar el robot siga las siguientes instrucciones:

- I. En modo manual, deslice hacia abajo el interruptor de encendido del radiocontrol.
- II. Realice el proceso inverso de sellado de la esfera para así poder sacar el robot.
- III. Desconecte los cables de energía del robot y de la batería LIPO.

4.3. Instrucciones del proceso de parado de emergencia del robot.

Para realizar el proceso de parado de emergencia del robot siga las siguientes instrucciones:

- I. Asegúrese de que el robot este en modo manual, en caso contrario active el modo manual.
- II. Deslice el interruptor de encendido del radiocontrol.
- III. Si se desea reiniciar el programa del robot, saque el robot de la esfera, apáguelo y vuélvalo a encender.

5. INSTRUCCIONES PARA LA CORRECCIÓN DE ERRORES BÁSICOS.

5.1. Error #1: el robot no se mueve dentro de la esfera en modo manual.

5.1.1. Proceso de revisión de luces de encendido.

- I. Revise el led de encendido de la baliza RC y verifique que el radiocontrol este encendido.
 - i. Si la luz led amarilla esta apagada y las demás luces de encendido se encuentran encendidas, revise la conexión de los cables de encendido del radiocontrol, verificando que no estén mal conectados o desgastados.
 - ii. Si la luz led amarilla está parpadeando y el radiocontrol este encendido, realice nuevamente el proceso de emparejamiento del radiocontrol con la baliza RC e intente nuevamente hacer mover el robot.
- II. Revise el led azul de encendido de la shield de control de los motores, si se encuentra apagada realice los siguientes pasos:
 - i. Revise los cables de ingreso de energía de la shield, puede ser que no estén haciendo contacto o se encuentren desgastados.
 - ii. Revise que la shield esté haciendo buen contacto con la placa Arduino.
 - iii. Por precaución, revise que los cables de alimentación de los motores estén bien contactados a la shield o desgastados.
- III. Revise que la luz de encendido del Arduino este encendida.
 - i. Si no está encendida, revise que la conexión de energía del Arduino en busca de cables en mal contacto o desgastados.

5.1.2. Proceso de revisión del radiocontrol RC.

- I. Revise que la luz del radiocontrol se encuentre encendida.
 - i. Si la luz se encuentra intermitente entre amarillo y rojo, similar al modo de emparejamiento, quiere decir que el radiocontrol se encuentra con batería baja. Proceda a cambiarlas.
 - ii. Si la luz se encuentra encendida, intente reiniciar el radiocontrol y volver a emparejarlo con la baliza RC.

- II. Revise que el radiocontrol no esté desconfigurado. La configuración para este proyecto se muestra en la siguiente imagen:



Imagen XV. Configuración correcta del radiocontrol.

5.1.3. Proceso de revisión del nivel de la batería.

- I. Si todo lo demás ha fallado, revise el nivel de batería con un medidor y verifique que la batería no esté en un nivel muy bajo o peligroso para cargar

5.2. Error #2: el robot no controla la posición de la cabeza en modo automático.

5.2.1. Proceso de revisión del estado de la IMU.

- I. Revise que el led de encendido del sensor IMU se encuentre encendido, en caso contrario revise que los cables estén bien contactados y haciendo buen contacto con el sensor.
- II. Revise que los cables del sensor IMU estén conectados en sus respectivas posiciones según el diagrama de conexión electrónico del robot.

5.2.2. Proceso de revisión de la lectura del radiocontrol RC.

- I. Revise que el modo automático este correctamente seleccionado.
- II. Revise el nivel de batería del radiocontrol.
- III. Revise que el radiocontrol este configurado correctamente.

ANEXO B

Código de programación

```

//_____ Variables CONTROL RC _____
int CH1; int CH1F; double o_ch1; int o_ch11=0;
int CH2; int CH2F; double o_ch2; int o_ch22=0;
int CH3; int CH3F; double o_ch3;
int CH4; int CH4F; double o_ch4;
int CH5; int o_ch5 = 0;
int CH5_A;
const int pulseInDelay = 40000;

//Filtro CH1
//double x1n_1 =0;
//double y1n_1 =0;
//Filtro CH2
double x2n_1 =0;
double y2n_1 =0;
//Filtro CH3
//double x3n_1 =0;
//double y3n_1 =0;
//Filtro CH4
double x4n_1 =0;
double y4n_1 =0;
//
double d1= 0.081;
double n1= 0.919;

//__ Variables LECTURA IMU __
#include "I2Cdev.h"
#include "MPU6050.h"
#include "Wire.h"

const int mpuAddress = 0x68; // Puede ser 0x68 o 0x69
MPU6050 mpu(mpuAddress);

int volatile ax, ay, az;
int volatile gx, gy, gz;

long tiempo_prev; unsigned long tiempo;
float dt; float T = 1;
float ang_x, ang_y, ang_z;
float ang_x_prev, ang_y_prev, ang_z_prev;

//_____ Variables Periodo de muestreo _____
int timer1_counter; volatile bool flag;
double Tm= 0;
double Un = 0; double U = 0;
double en = 0; int volatile U_11=5;
double volatile sp = 0;

//_____ Variables PID con Anti-Windup _____
double en_1 = 0; //Error una muestra anterior
double I_error_1 = 0; //Memoria integral del error
double dif_act = 0; //Indicador de Saturacion del actuador
double A_p = 0; double A_d = 0; double A_i = 0;
double I_error;

//_____ CONSTANTES del PID con Anti-Windup _____
double volatile Kp = -11.3;
double volatile Ki = 0;
double volatile Kd = -1.88;
double volatile Ka = 0;

//_____ Variables Motores _____

```

```

// MOTOR POLOLU Izquierdo
int mot1_izq=2;//puerto digital controla giro motor (NO MODIFICAR)
int mot1_der=4;//puerto digital controla giro motor (NO MODIFICAR)
int PWM1; int i;
int analog_writel=9; //escritura de puerto pwm (NO MODIFICAR)

// MOTOR POLOLU Derecho
int mot2_izq=8;//puerto digital controla giro motor (NO MODIFICAR)
int mot2_der=7;//puerto digital controla giro motor (NO MODIFICAR)
int PWM2; int PWM_CTRL; int PWM3;
int analog_write2=10; //escritura de puerto pwm (NO MODIFICAR)
int volatile PWM_M = 10;

// _____ SETUP
_____

void setup() {
// _____ GARANTIZAR PERIODO DE MUESTREO (NO TOCAR) _____
// _____ Inicializamos el timer1 _____
noInterrupts(); //desactivamos las interrupciones
TCCR1A = 0; // El registro de control A queda todo en 0
TCCR1B = 0; // El registro de control B queda todo en 0 para el MODO NORMAL
Tm= 0.078616; // tiempo de muestreo
timer1_counter = 65536-(16000000/(64*(1/Tm))); // Formula con pre-escalador
TCNT1 = timer1_counter; // precargamos el timer
TCCR1B |= (1 << CS11) | (1 << CS10); // Configurar el pre-escalador en 64
TIMSK1 |= (1 << TOIE1); // habilitar la interrupción de desbordamiento del
timer
interrupts(); // habilita las interrupciones

// _____ SETUP Bluetooth _____
Serial3.begin(9600); // Inicializamos el puerto serie Serial3 Bluetooth

// _____ SETUP MOTOR _____
Serial.begin(9600);
pinMode(mot1_izq,OUTPUT); //Motor1 izQ
pinMode(mot1_der,OUTPUT); //Motor1 der
pinMode(analog_writel,OUTPUT); //Motor 1
pinMode(mot2_izq,OUTPUT); //Motor2 izQ
pinMode(mot2_der,OUTPUT); //Motor2 der
pinMode(analog_write2,OUTPUT); //Motor 2

// _____ SETUP LECTURA IMU _____

Wire.begin();
mpu.initialize(); //
Serial.println(mpu.testConnection() ? F("IMU iniciado correctamente") :
F("Error al iniciar IMU"));
mpu.setXAccelOffset(1277);
mpu.setYAccelOffset(-4451);
mpu.setZAccelOffset(1754);
mpu.setXGyroOffset(134);
mpu.setYGyroOffset(-70);
mpu.setZGyroOffset(-29);

} //END SETUP
// _____ *END SETUP* _____

// _____ CONTROL PID LOOP _____

ISR(TIMER1_OVF_vect){ // Rutina de Interrupcion
TCNT1 = timer1_counter; // precargamos el timer

```

```

//_____ CONTROL REMOTO _____
LeerControlRC();
updateFiltered();
ang_y = ang_y*PI/180;
if(o_ch5 == 1){ //Si esta inactivo el CH5
//_____ CTRL PID ANTI-W _____

en = sp - ang_y;

//PID con Anti-Windup:
A_p = Kp * en;
A_d = Kd * (en - en_1);
I_error = en + I_error_1 - Ka * dif_act;
A_i = Ki * I_error;
Un = A_p + A_d + A_i;

Un = Un * 100 / 12;
//AntiWidup Saturacion
if (Un < -100) {
    U = -100;
}
else if (Un > 100) {
    U = 100;
}
else {
    U = Un;
}

// SALIDA SEÑAL DE CONTROL
PWM_CTRL = (U*255)/100;

////Cruce por cero
// if(U > U_11 && U < PWM_M){
//     PWM_CTRL = (PWM_M*255)/100;
// }
// else if(U < -U_11 && U > -PWM_M){
//     PWM_CTRL = -(PWM_M*255)/100;
// }
// else {
//     PWM_CTRL = PWM_CTRL;
// }

// Actualizacion
en_1 = en;
I_error_1 = I_error;
dif_act = Un - U;
//_____ MOVIMIENTO MOTORES _____
ModoManual();
} // END IF
//_____ *END CTRL* _____

flag = 1;
}
//_____ *END CONTROL PID LOOP* _____

//_____ Loop Principal _____
void loop() {

//_____ Lectura de Angulo _____
// Leer las aceleraciones y velocidades angulares
mpu.getAcceleration(&ax, &ay, &az);
mpu.getRotation(&gx, &gy, &gz);

```

```

    tiempo = millis();

///_____MOVIMIENTO MOTORES_____

if(o_ch5 == 0){ //Si esta inactivo el CH5
    Un = 0; U = 0; en = 0;
    en_1 = 0; I_error_1 = 0;
    dif_act = 0; A_p = 0; A_d = 0; I_error = 0;
    A_i = 0; PWM_CTRL = 0;
    ModoManual();
}

if(flag){ //post-interrupt operations

///_____ENVIAR VARIABLES BT_____
Serial3.print('A'); Serial3.print(tiempo);
Serial3.print('B'); Serial3.print(PWM2*100/255);
Serial3.print('C'); Serial3.print(ang_y);
Serial3.print('D'); Serial3.print(U);
Serial3.print('E'); Serial3.print(o_ch2);
Serial3.print('F'); Serial3.print(Kp); ;
Serial3.print('G'); Serial3.print(Ki);
Serial3.print('H'); Serial3.print(Kd);
Serial3.print('\n');
flag = 0;

///_____RECIBIR VARIABLES BT_____
if (Serial3.available()) { // Si llega un dato por el puerto BT
    switch (Serial3.read()) {
        case 'P':
            Kp = Serial3.parseFloat();
            break;
        case 'I':
            Ki = Serial3.parseFloat();
            break;
        case 'D':
            Kd = Serial3.parseFloat();
            break;
        case 'A':
            Ka = Serial3.parseFloat();
            break;
        case 'S':
            sp = Serial3.parseFloat();
            break;
        case 'M':
            PWM_M = Serial3.parseInt();
            break;
        case 'U':
            U_11 = Serial3.parseInt();
            break;

    } // end Case
    if (Serial3.read() == '\n') {
        Kp = Kp; Kd = Kd; Ki = Ki; Ka = Ka;
    }
} //End SERIAL available

} // End IF Flag

///_____IMPRIMIR_____
// Serial.print(CH2F);
// Serial.print(" ");

```

```

// Serial.print(PWM2*100/255);
// Serial.print(" ");
// Serial.println(tiempo);

}
//_____ *End Loop Principal* _____

//_____ FUNCION CONTROL RC _____

void LeerControlRC(){

//CH1 = pulseIn(A2,HIGH,pulseInDelay);
CH2 = pulseIn(A3,HIGH,pulseInDelay);
//CH3 = pulseIn(A4,HIGH,pulseInDelay);
CH4 = pulseIn(A5,HIGH,pulseInDelay);
CH5 = pulseIn(A6,HIGH,pulseInDelay);

///// Calcular filtro CH1
// CH1F = (double)d1*y1n_1+n1*x1n_1;
// x1n_1 = CH1;
// y1n_1 = CH1F;
// CH1F = (int) CH1F;
// Calcular filtro CH2
// CH2F = (double)d1*y2n_1+n1*x2n_1;
// x2n_1 = CH2;
// y2n_1 = CH2F;
// CH2F = (int) CH2F;
///// Calcular filtro CH3
// CH3F = (double)d1*y3n_1+n1*x3n_1;
// x3n_1 = CH3;
// y3n_1 = CH3F;
// CH3F = (int) CH3F;
// Calcular filtro CH4
// CH4F = (double)d1*y4n_1+n1*x4n_1;
// x4n_1 = CH4;
// y4n_1 = CH4F;
// CH4F = (int) CH4F;

/////CH1 Funcion -100 a 100
//if(CH1F>1610) { //POSITIVO
// o_ch1 = (double)(CH1F*0.002571-4.11054)*100;
//} else if (CH1F<1547){ //NEGATIVO
// o_ch1 = (double)(CH1F*0.002257-3.492099)*100;
//} else {
// o_ch1 = 0;
//} o_ch1 = (int) o_ch1;

//CH2 Funcion -100 a 100
if(CH2F>1600) { //POSITIVO
o_ch2 = (double)(CH2F*0.0024-3.8)*100;
} else if (CH2F<1500 && CH2F>=1135 ){ //NEGATIVO
o_ch2 = (double)(CH2F*0.002387-3.718377)*100;
} else if (CH2F<1135){
o_ch2 = -100;
} else {
o_ch2 = 0;
} o_ch2 = (int) o_ch2;

/////CH3 Funcion -100 a 100
//if(CH3F>=1150) { //POSITIVO
// o_ch3 = (double)(CH3F*0.00238-3.73809)*100;
//} o_ch3 = (int) o_ch3;

```

```

//CH4 Funcion -100 a 100
if(CH4F>1620) { //POSITIVO
    o_ch4 = (double) (CH4F*0.002544-4.061069)*100;
} else if (CH4F<1500){ //NEGATIVO
    o_ch4 = (double) (CH4F*0.002188-3.374179)*100;
} else {
    o_ch4 = 0;
} o_ch4 = (int) o_ch4;

//CH5 1 OR 0
//if(CH5<1000) { /* CERO
//  o_ch5 = 0;
//} else if (CH5>=1000){ /* UNO
//
//  o_ch5 = 1;
//}

if(CH5_A >= 1000 && CH5 >= 1000){
    o_ch5 = 1;
}
else if(CH5_A >= 1000 && CH5 < 1000){
    o_ch5 = 1;
}
else if(CH5_A < 1000 && CH5 < 1000){
    o_ch5 = 0;
}
else if(CH5_A < 1000 && CH5 >= 1000){
    o_ch5 = 1;
}
CH5_A = CH5;

} //End
////_____ *END LeerControlRC* _____

////_____ FUNCIONES DEL MOTOR _____

void ModoManual() { // MODO MANUAL
//// MOTOR 1
// if (o_ch2>0 && o_ch22==0){ //Flanco subida desde cero Pos
//     PWM2 = 65;
// }
// else if(o_ch2<0 && o_ch22==0){
//     PWM2 = -65;
// }
// else if(o_ch4>0 && o_ch11==0){
//     PWM1 = 65;
// }
// else if(o_ch4<0 && o_ch11==0){
//     PWM1 = -65;
// }
// else{
//     PWM1 =(o_ch4*255)/100;
//     PWM2 =(o_ch2*255)/100 + PWM_CTRL;
// }
// o_ch22 = o_ch2; //Actualizacion Señal antigua
// o_ch11 = o_ch4;

//Lmites 100%
if(PWM2>255){
    PWM2 = 255;
}
if(PWM2<-255){
    PWM2 = -255;
}

```

```

}
if(PWM2*100/255 < U_11 && PWM2*100/255 > -U_11){
  PWM2 = 0;
}

  if(PWM2 > 0 && o_ch4 == 0){ //Mover Adelante
    Mover_Adelante();
  }
  else if(PWM2 < 0 && o_ch4 == 0){ //Mover Atras
    Mover_Atras();
  }
  else if(o_ch4 > 0 && o_ch2 == 0){ //Mover Derecha
    Mover_Derecha();
  }
  else if(o_ch4 < 0 && o_ch2 == 0){ //Mover Izquierda
    Mover_Izquierda();
  }
  else if(PWM2 == 0) { //STOP
    Mover_Stop();
  }
  i=0;
} // End Modo Manual

void Mover_Adelante()
{
  digitalWrite(mot2_izq,LOW); //MOTOR IZQ GIRA ADELANTE
  digitalWrite(mot2_der,HIGH);
  analogWrite(analog_write2,PWM2);
//  delay(1000);
  digitalWrite(mot1_izq,LOW); //MOTOR DER GIRA ADELANTE
  digitalWrite(mot1_der,HIGH);
  analogWrite(analog_writel,PWM2);
}

void Mover_Atras()
{
  digitalWrite(mot2_izq,HIGH); //MOTOR IZQ GIRA ATRAS
  digitalWrite(mot2_der,LOW);
  analogWrite(analog_write2,-PWM2);
//  delay(100);
  digitalWrite(mot1_izq,HIGH); //MOTOR DER GIRA ATRAS
  digitalWrite(mot1_der,LOW);
  analogWrite(analog_writel,-PWM2);
}

void Mover_Derecha(){
  digitalWrite(mot2_izq,LOW); //MOTOR IZQ GIRA ADELANTE
  digitalWrite(mot2_der,HIGH);
  analogWrite(analog_write2,PWM1);
  delay(100);
  digitalWrite(mot1_izq,HIGH); //MOTOR DER GIRA ATRAS
  digitalWrite(mot1_der,LOW);
  analogWrite(analog_writel,PWM1);
}

void Mover_Izquierda(){
  digitalWrite(mot2_izq,HIGH); //MOTOR IZQ GIRA ATRAS
  digitalWrite(mot2_der,LOW);
  analogWrite(analog_write2,-PWM1);
  delay(100);
  digitalWrite(mot1_izq,LOW); //MOTOR DER GIRA ADELANTE
  digitalWrite(mot1_der,HIGH);
}

```

```

        analogWrite(analog_write1,-PWM1);
    }

void Mover_Stop()
{
    digitalWrite(mot1_izq,LOW); //MOTOR DER APAGADO
    digitalWrite(mot1_der,LOW);
    analogWrite(analog_write1,0);
    delay(100);
    digitalWrite(mot2_izq,LOW); //MOTOR IZQ APAGADO
    digitalWrite(mot2_der,LOW);
    analogWrite(analog_write2,0);
}

//// _____ *END FUNCIONES DEL Motor* _____

//// _____ FUNCIONES DEL IMU _____

void updateFiltered(){

    dt = (millis() - tiempo_prev) / 1000.0;
    tiempo_prev = millis();

    //Calcular los ángulos con acelerometro
    float accel_ang_x = atan(ay / sqrt(pow(ax, 2) + pow(az, 2)))*(180.0 / 3.14);
    float accel_ang_y = atan(ax / sqrt(pow(ay, 2) + pow(az, 2)))*(180.0 / 3.14);

    //Calcular angulo de rotación con giroscopio y filtro complementario
    ang_x = (T/(T+dt))*(ang_x_prev + (gx / 131)*dt) + (1-(T/(T+dt)))*accel_ang_x;
    ang_y = (T/(T+dt))*(ang_y_prev + (gz / 131)*dt) + (1-(T/(T+dt)))*accel_ang_y;

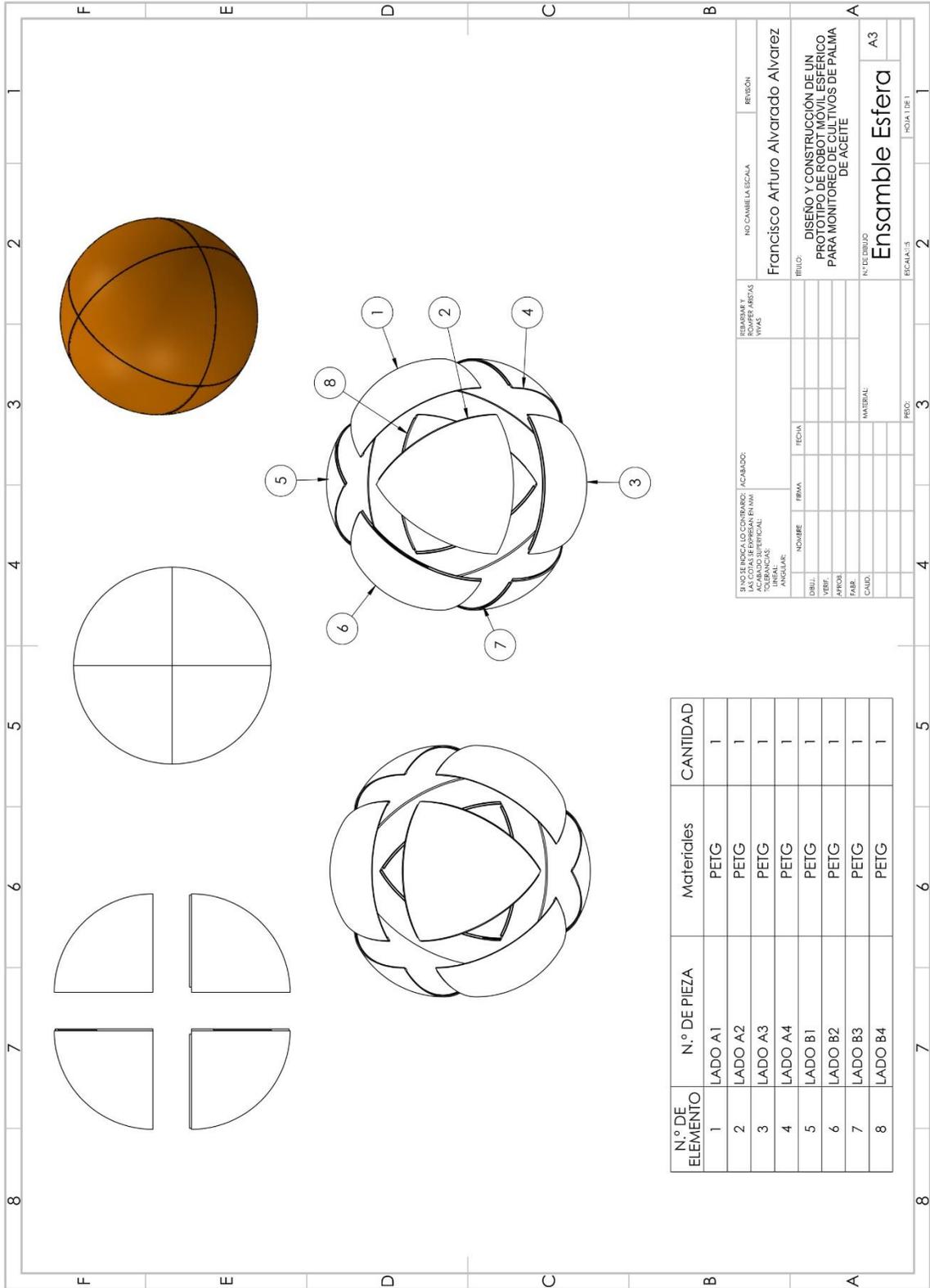
    ang_x_prev = ang_x;
    ang_y_prev = ang_y;
    ang_y = -ang_y;
}

//// _____ *END FUNCIONES DEL IMU* _____

```

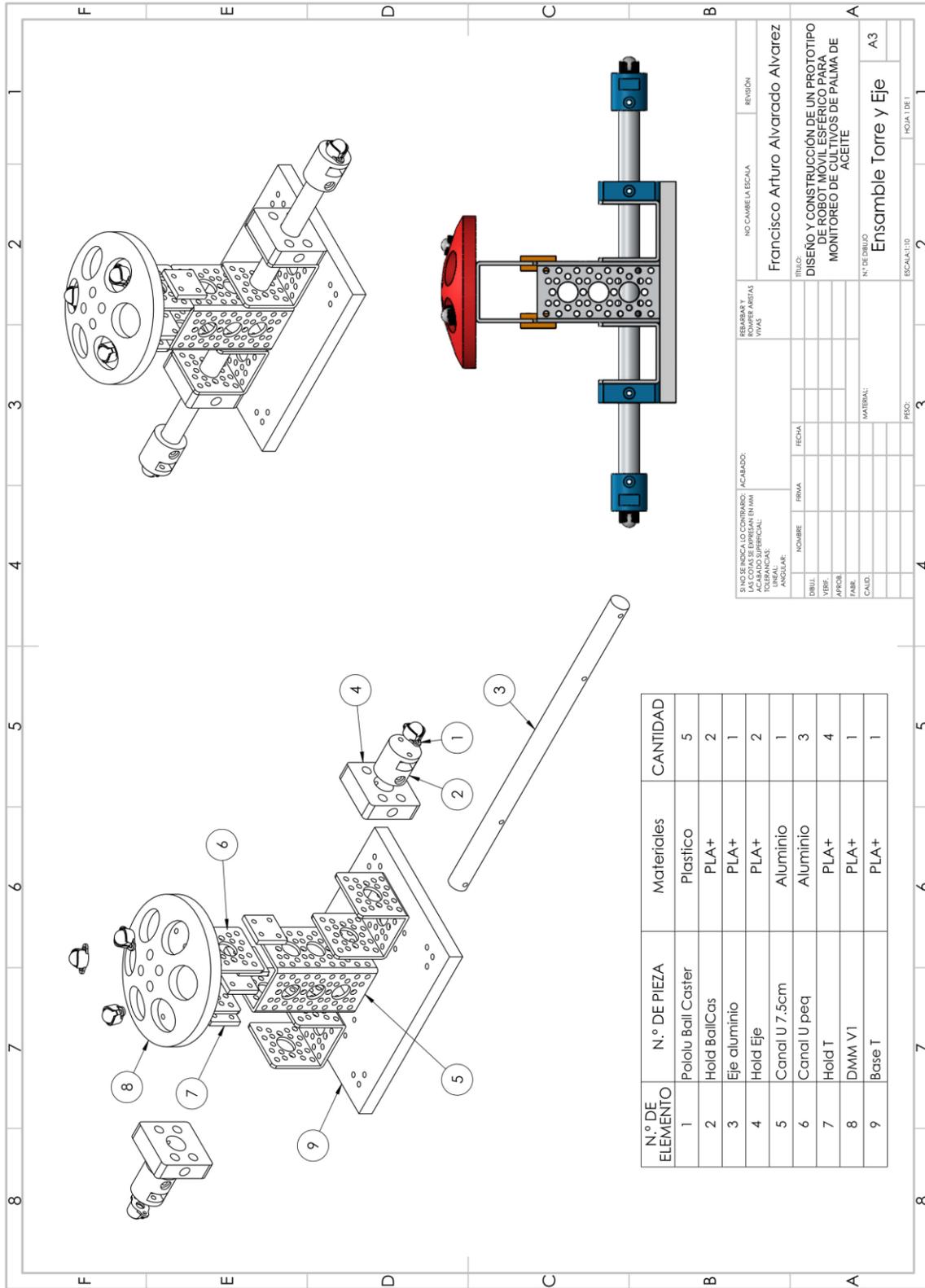
ANEXO C

Planos del prototipo



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	Materiales	CANTIDAD
1	LADO A1	PETG	1
2	LADO A2	PETG	1
3	LADO A3	PETG	1
4	LADO A4	PETG	1
5	LADO B1	PETG	1
6	LADO B2	PETG	1
7	LADO B3	PETG	1
8	LADO B4	PETG	1

TITULO: Francisco Arturo Alvarado Alvarez		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISION	
DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE UN MONITOR PARA MONITOREAR LOS NIVEL DE AGENTE		ESCALA: 1:1		HOJA 1 DE 1	
N.º DE DIBUJO: Ensamble Esfera A3		ESCALA: 1:1		2	
MATERIAL:		PRECISO:		3	
FECHA:		4		5	
FIRMAS:		6		7	
VERIFICACIONES:		8		8	



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	Materiales	CANTIDAD
1	Pololu Ball Caster	Plastico	5
2	Hold BallCas	PLA+	2
3	Eje aluminio	PLA+	1
4	Hold Eje	PLA+	2
5	Canal U 7.5cm	Aluminio	1
6	Canal U peq	Aluminio	3
7	Hold T	PLA+	4
8	DMM V1	PLA+	1
9	Base T	PLA+	1

TÍTULO: Francisco Arturo Alvarado Alvarez
 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL ESFÉRICO PARA MONITOREO DE CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE
 N.º DE DIBUJO: Ensamble Torre y Eje A3
 ESCALA: 1:10

NO CAMBIE LA ESCALA
 REVISIÓN:

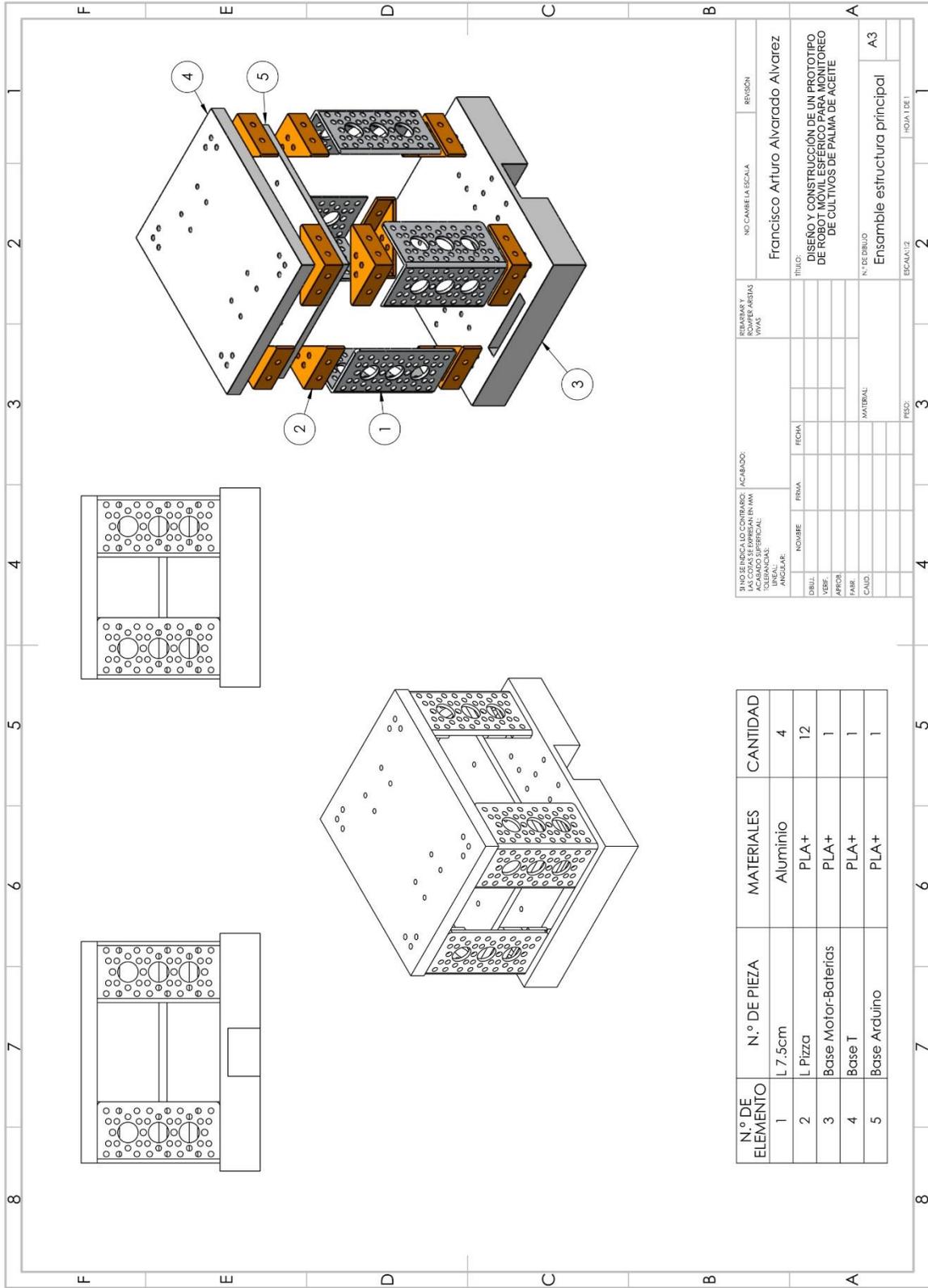
INGENIERO: NO CAMBIE LAS VÍAS
 INGENIERO: NO CAMBIE LAS VÍAS

ACABADO: ACABADO SUPERFICIAL: LINEAL: ANGULAR:

NOMBRE: FECHA:

DIBUJ: VERIF: APROB: CALD: MATERIAL:

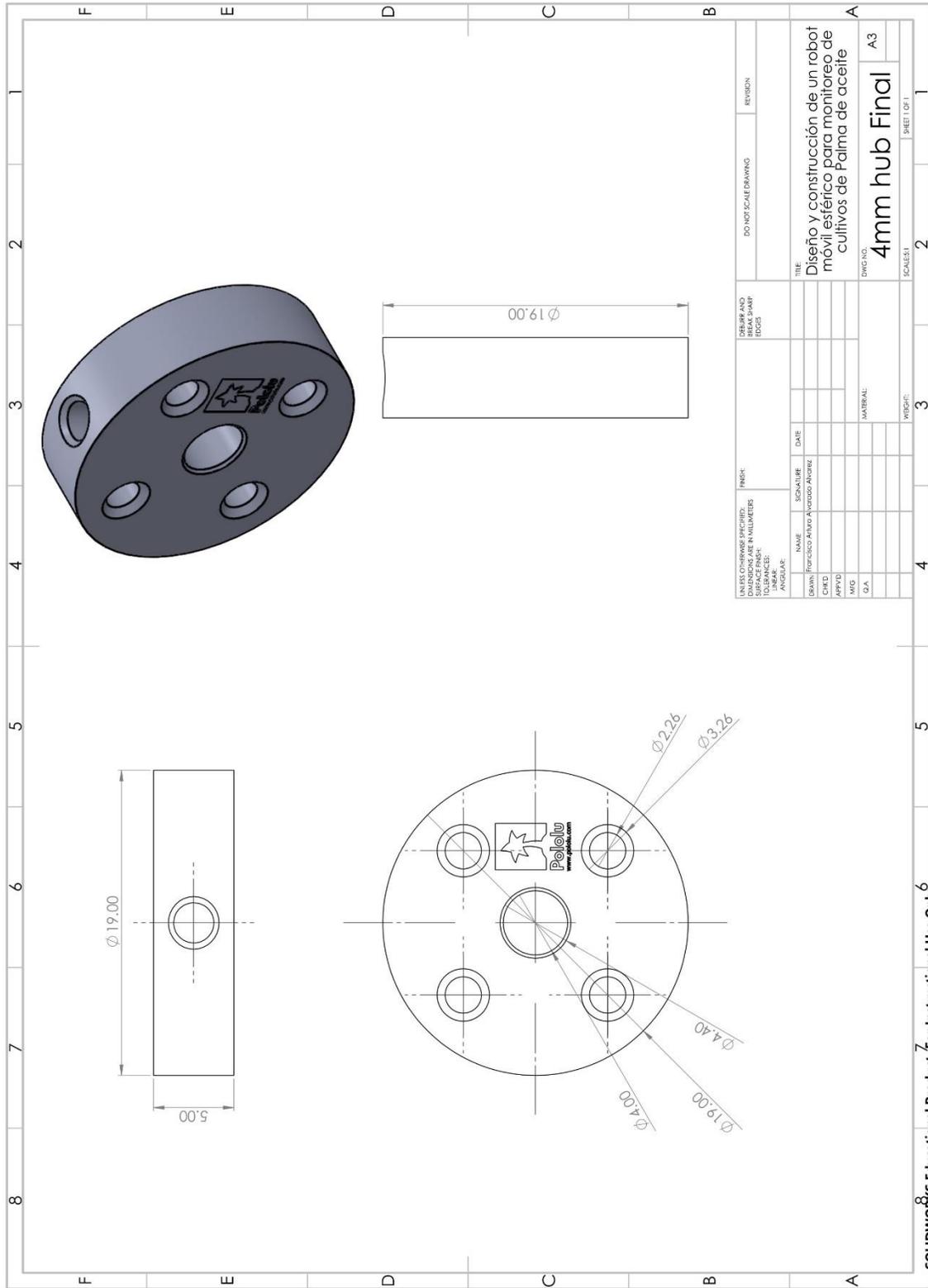
PISO: HOJA 1 DE 1

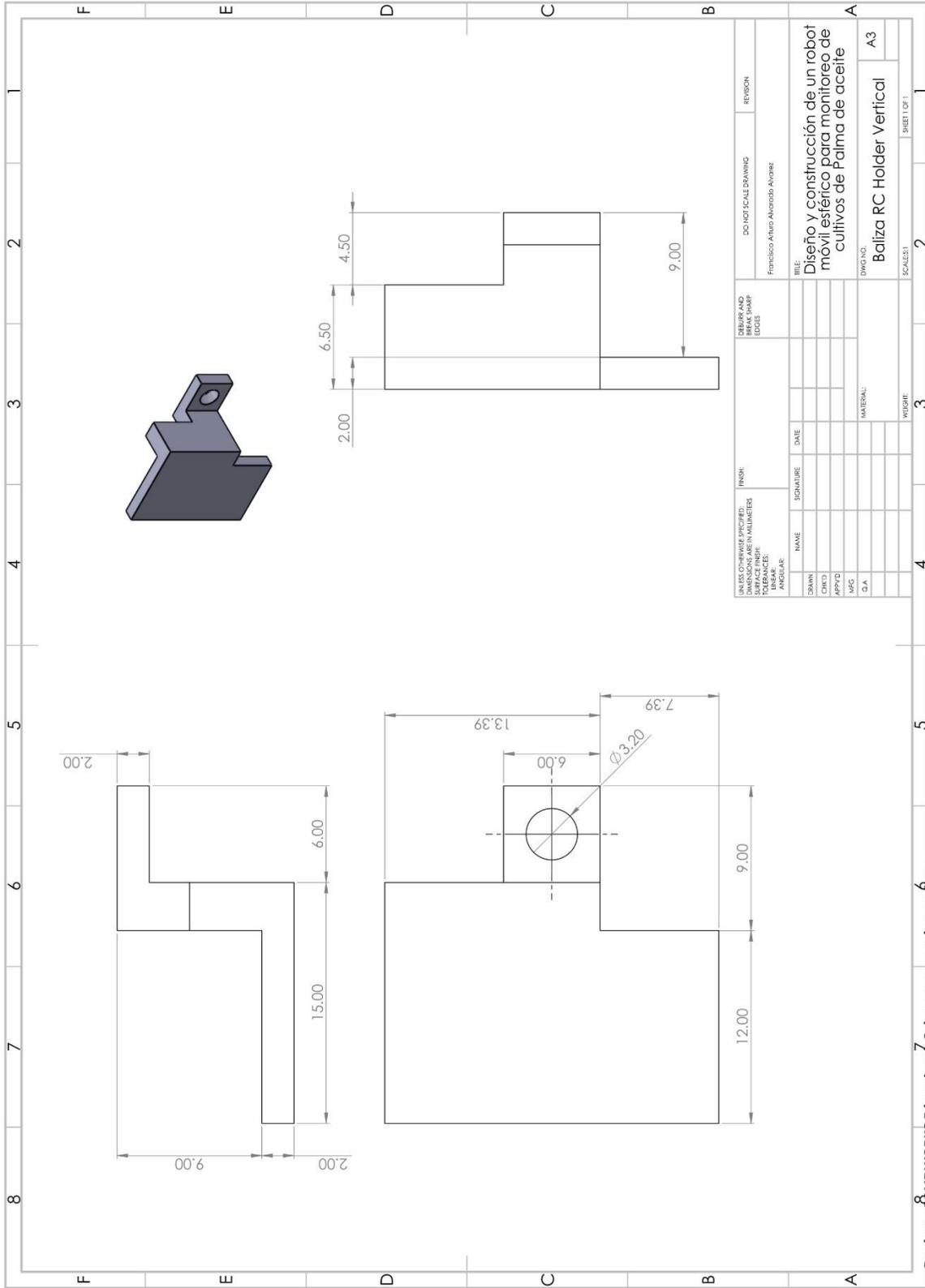


REBAMAR Y ROMPER ARISTAS IVITAS		NO CAMBIE LA ESCALA		REVISIÓN
FRANCISCO ARTURO ALVARADO ALVAREZ				
TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL ESFÉRICO PARA MONITOREO DE CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE				
N.º DE DIBUJO		MATERIAL		A3
Ensamble estructura principal		ESCALA: 1:2		HOJA 1 DE 1

¿HAY ALGUNA MODIFICACIÓN?		JACABADO:	
LAS COSAS DE REPETIR EN MM		UNIDAD	
CUBIERTAS		AUTOMÁTICO	
DIBUJ.		FECHA	
VERIF.		FECHA	
APROB.		FECHA	
CALD.		FECHA	

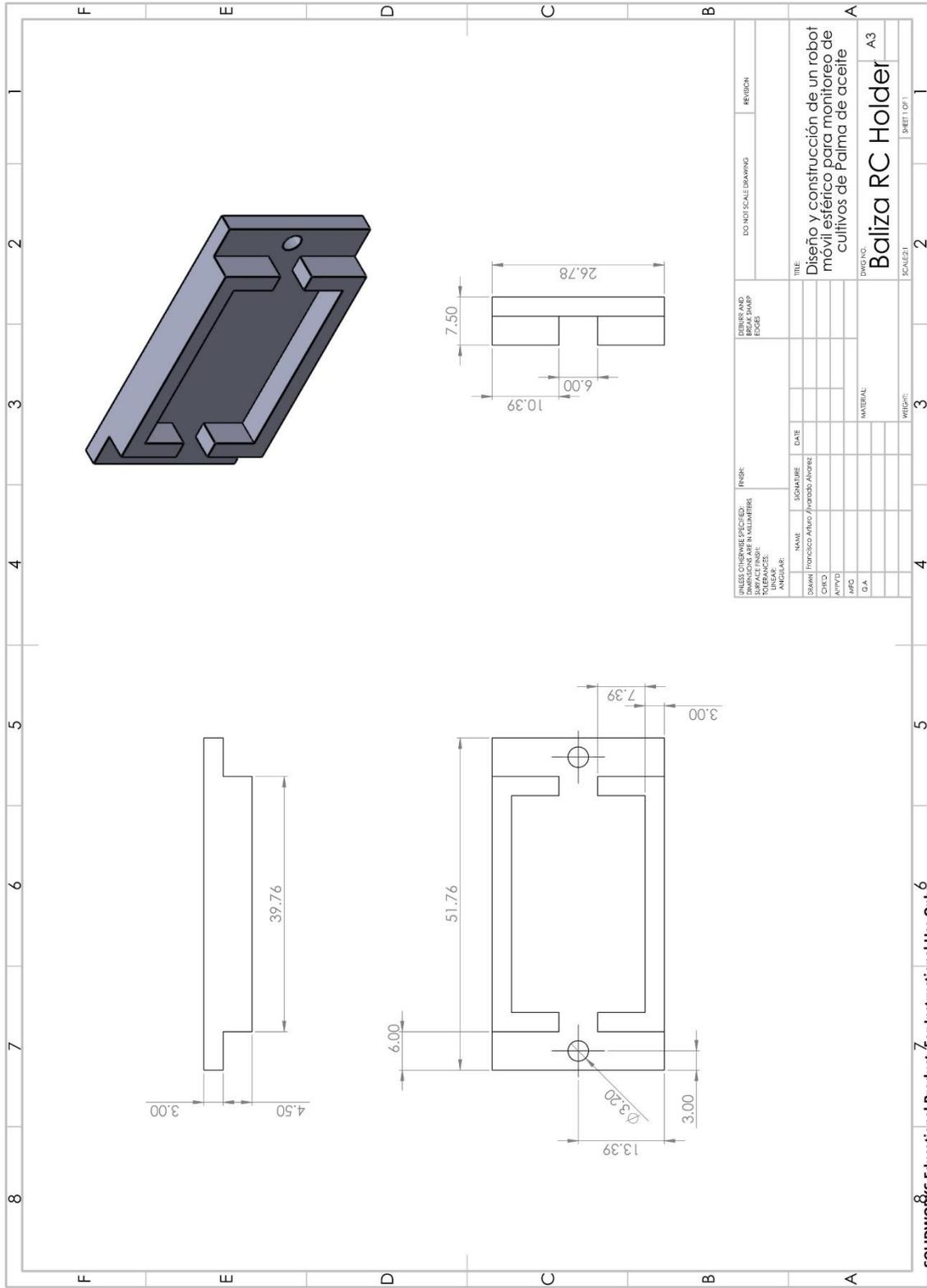
N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	MATERIALES	CANTIDAD
1	L 7.5cm	Aluminio	4
2	L Piza	PLA+	12
3	Base Motor-Baterías	PLA+	1
4	Base T	PLA+	1
5	Base Arduino	PLA+	1



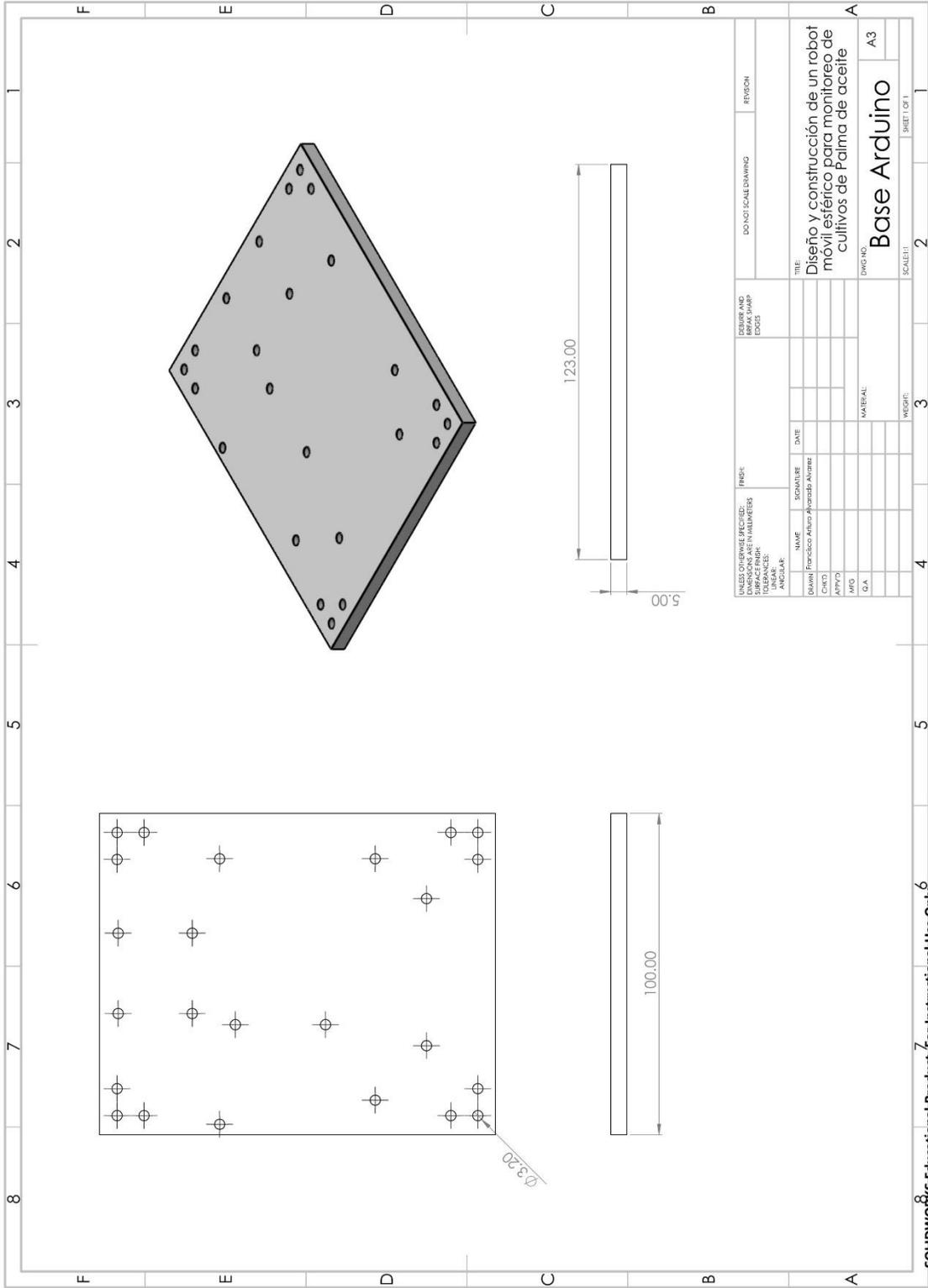


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS IN MILLIMETERS		FINISH		DRAWING AND DIMENSION LINES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
SURFACE FINISH		DATE		DRAWN AND CHECKED		FRANCISCO ARTURO ALONSO ALONSO			
TOLERANCES:		SIGNATURE		DATE		TITLE:			
ANGULAR:		NAME		DATE		Diseño y construcción de un robot móvil esférico para monitoreo de cultivos de Palma de aceite			
		DRAWN				DWG NO.		A3	
		CHECKED				Baliza RC Holder Vertical		SHEET 1 OF 1	
		APPROVED				SCALE(S)		2	
		MISC.				MATERIAL		3	
		D.A.				WEIGHT		4	
								5	
								6	
								7	
								8	

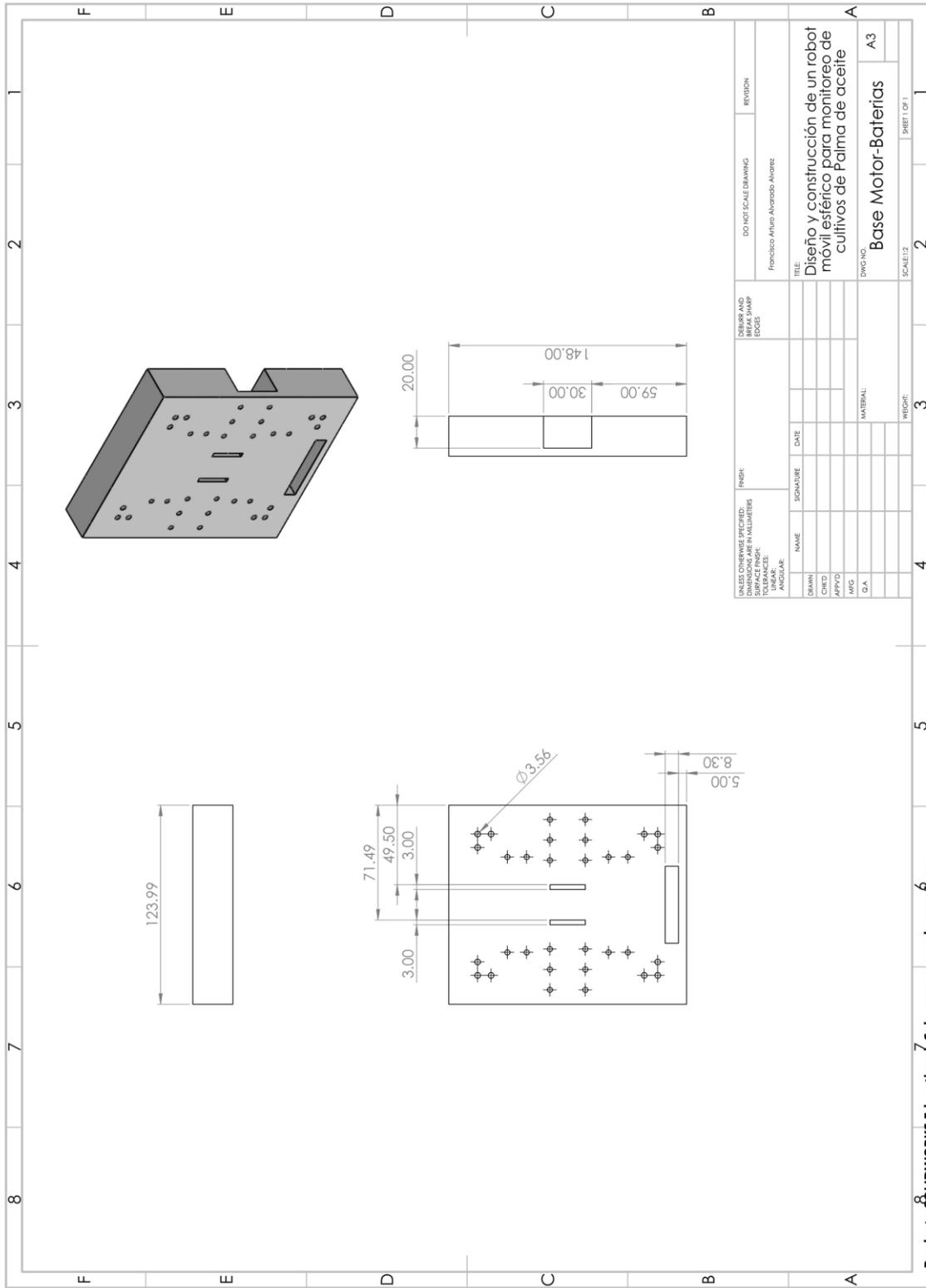
Producto **SOLIDWORKS** Educativa. Solo para uso en la enseñanza.



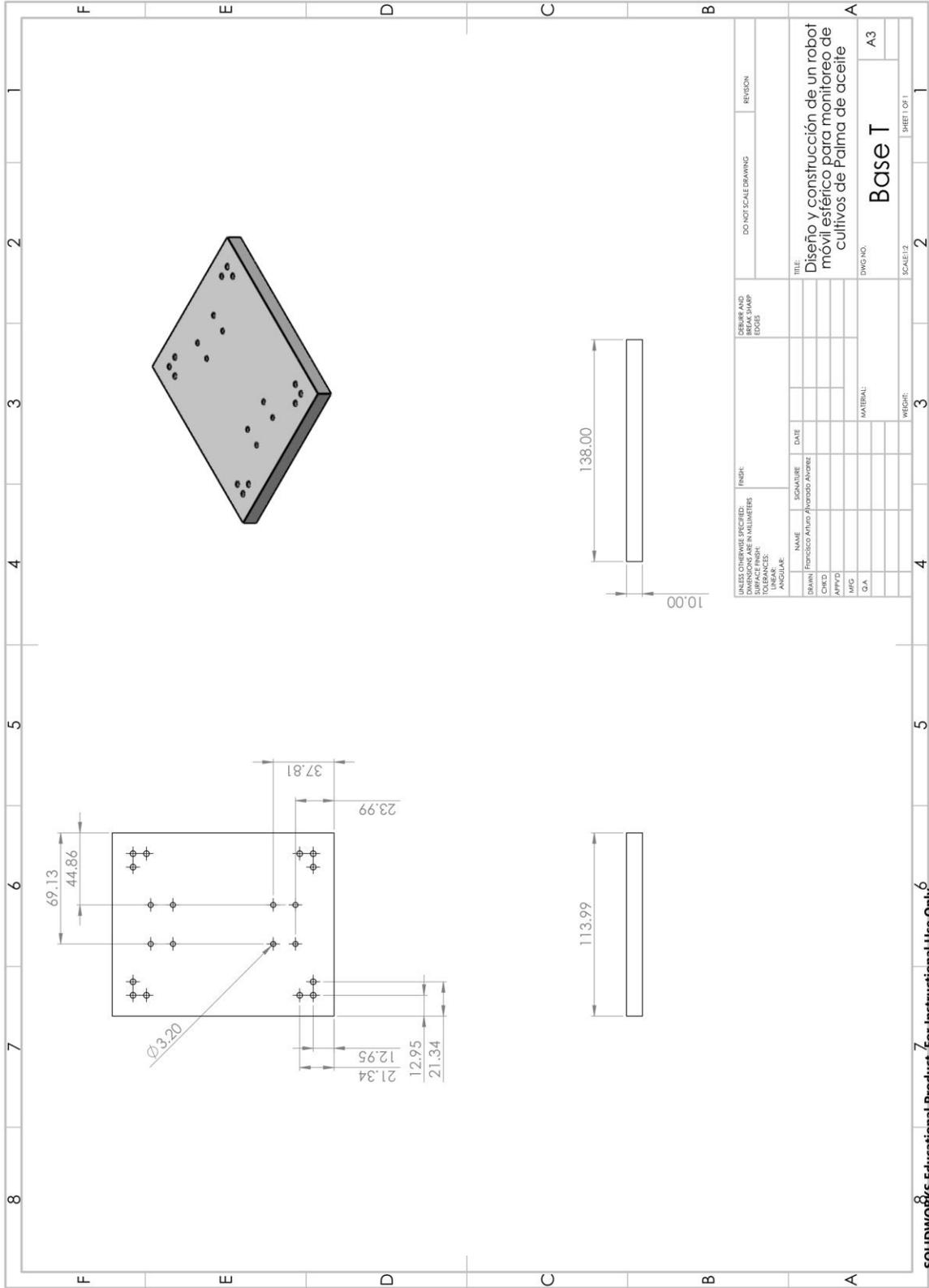
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

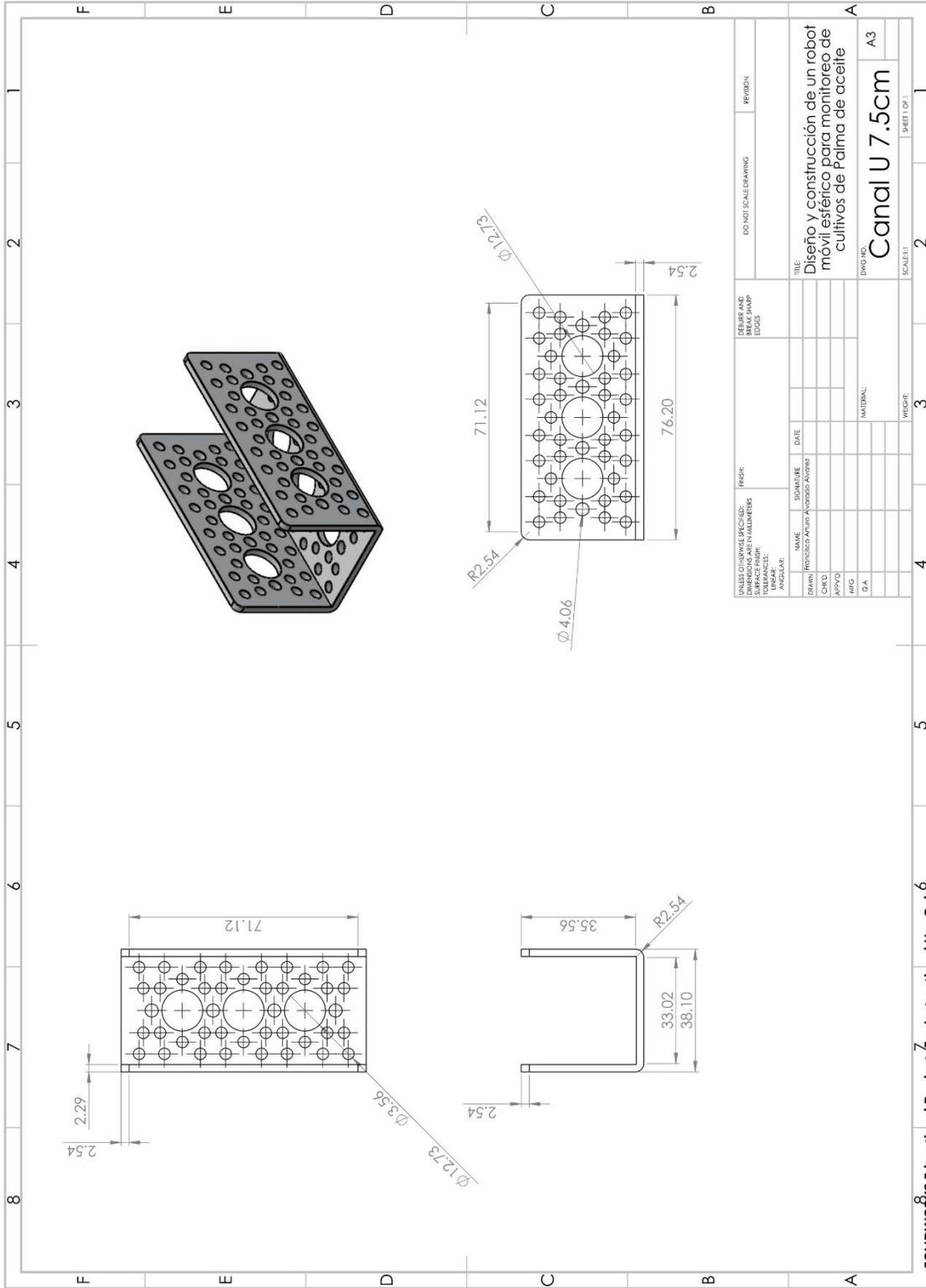


Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

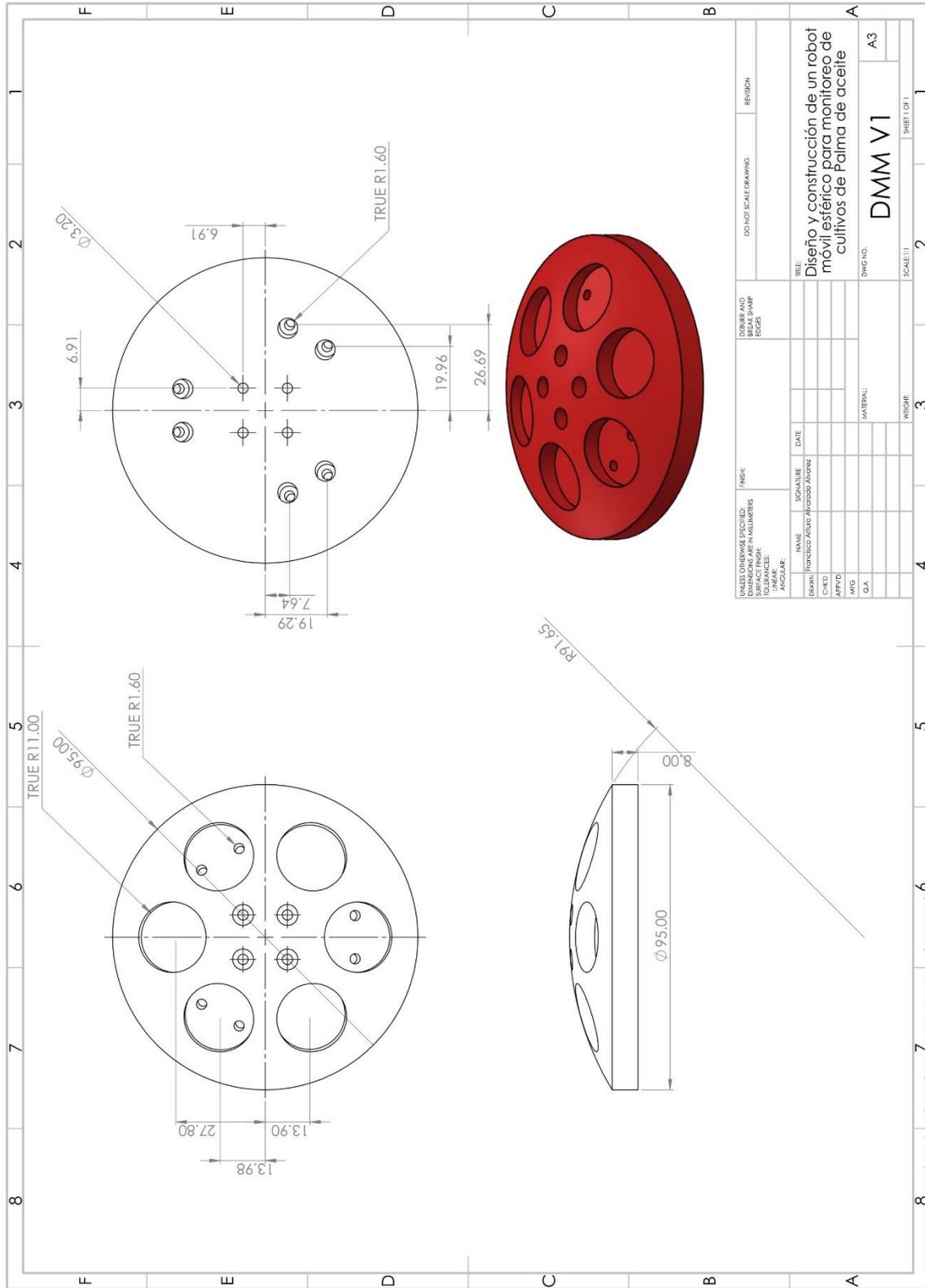


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND CHAMFER EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME	SIGNATURE	DATE							
BRAND	Fabricada Arturo Alvarado Alvarez								
CMO									
APP'D									
MFG									
QA									
TITLE: Diseño y construcción de un robot móvil esférico para monitoreo de cultivos de Palma de aceite				DWG NO:		SCALE: 1:2		SHEET 1 OF 1	
				MATERIAL:		Base T		A3	

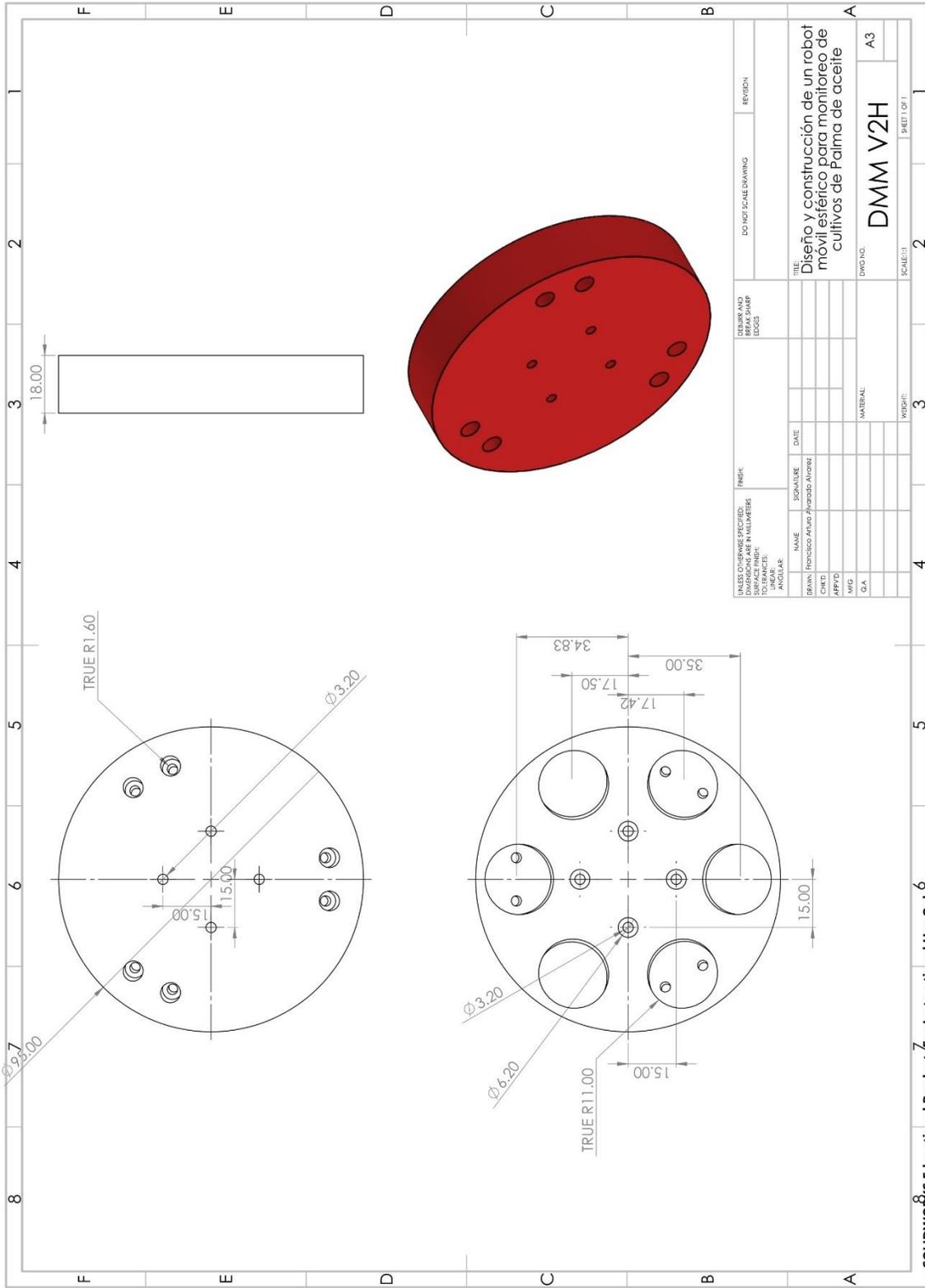
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



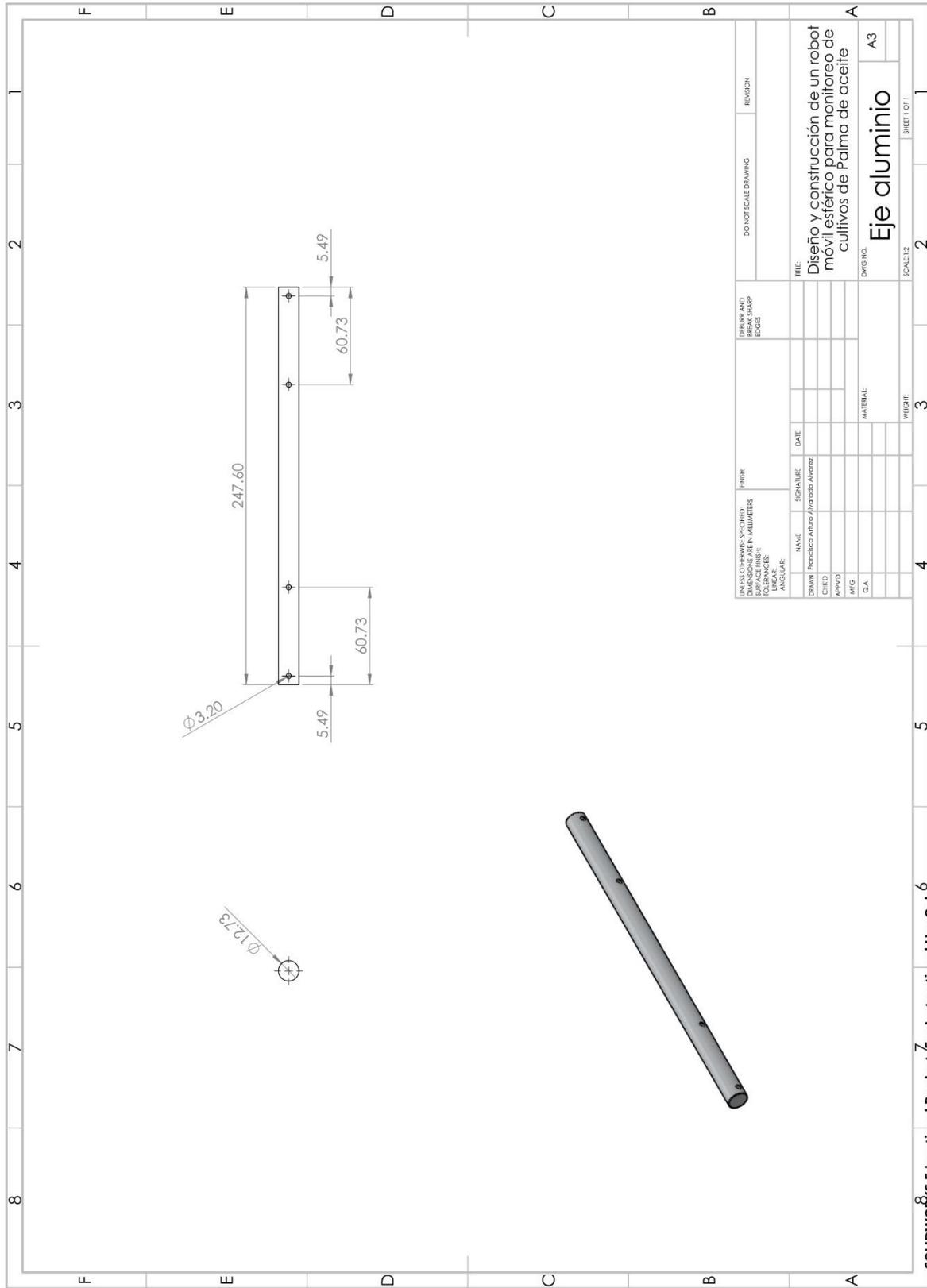
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

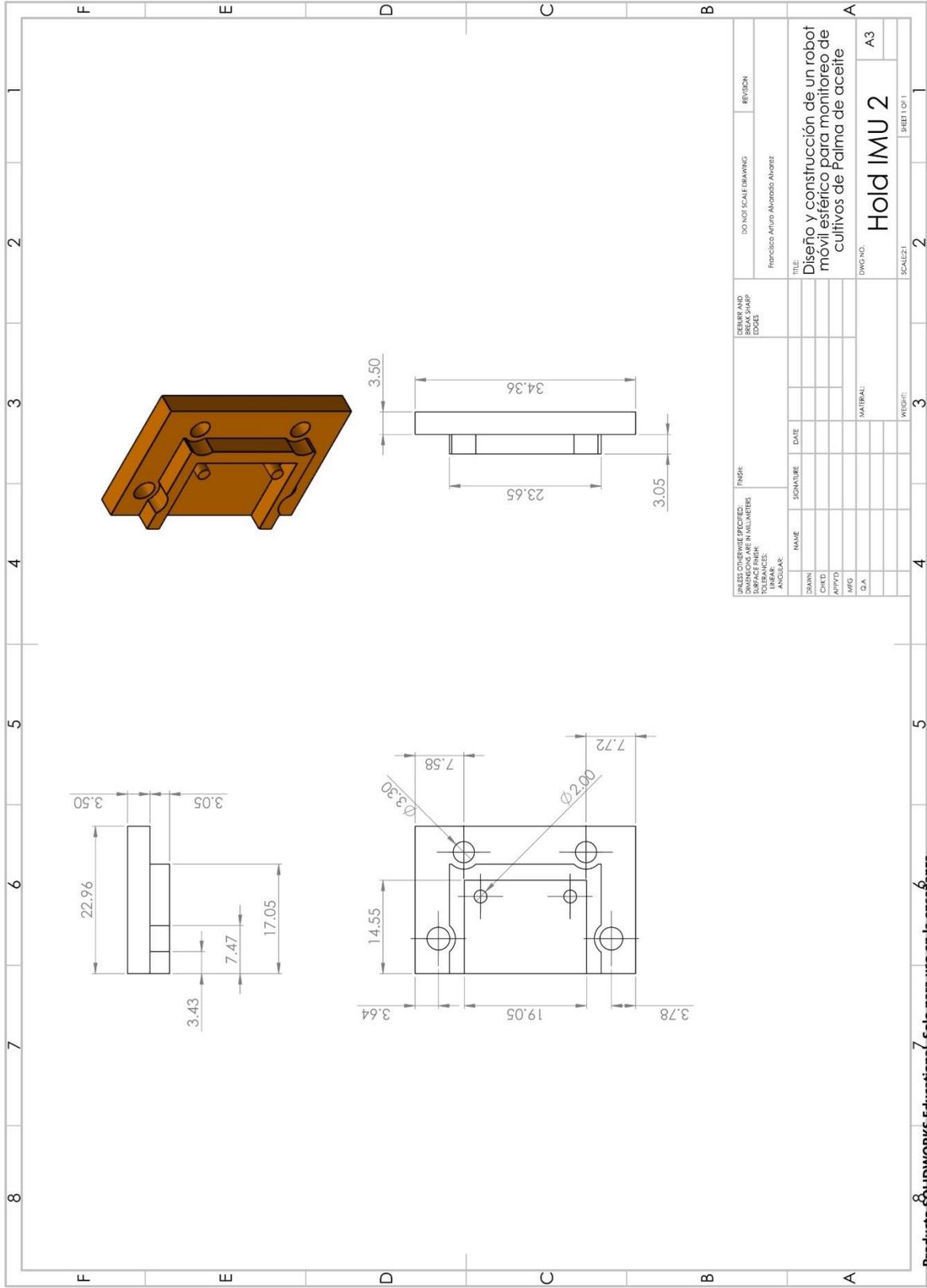


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



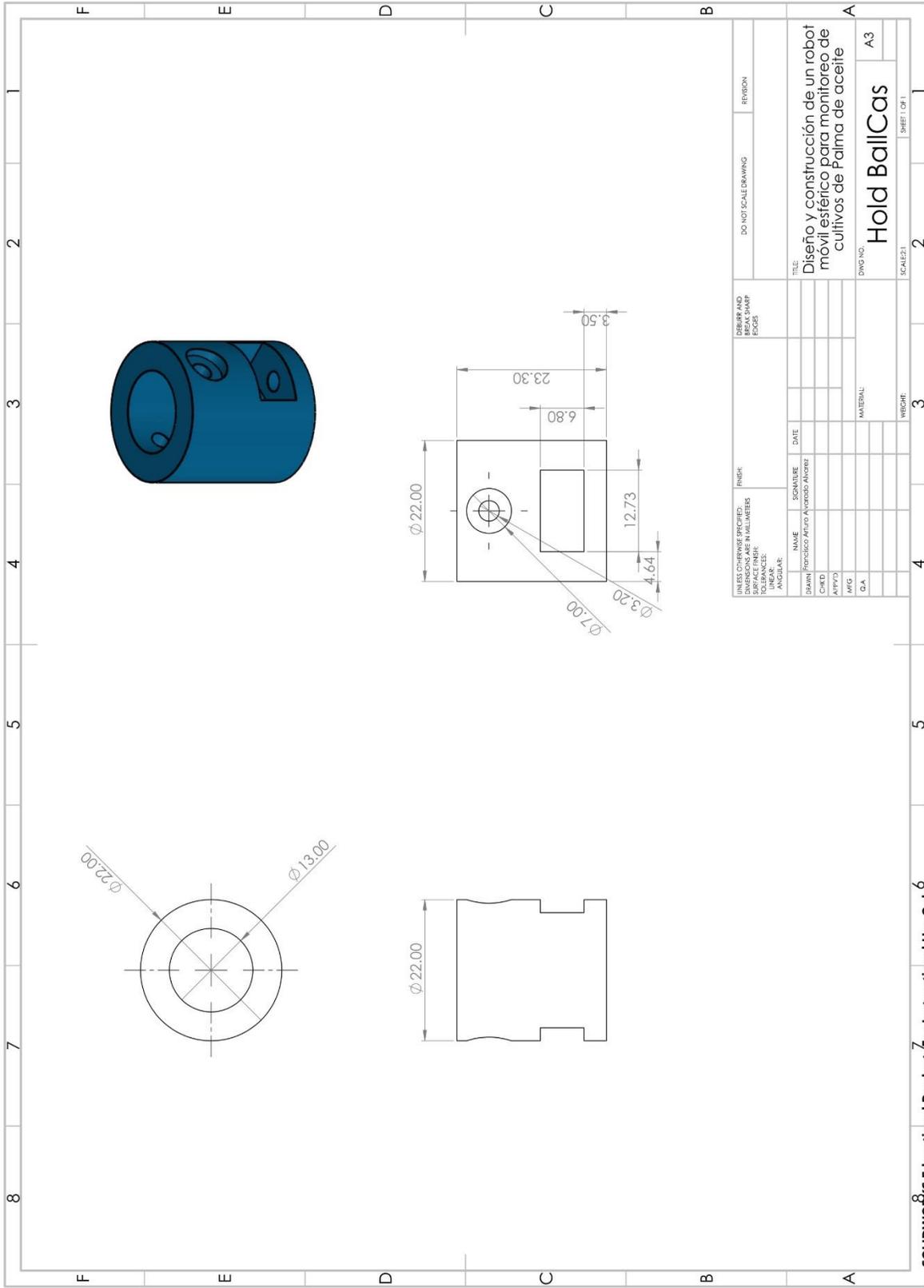
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS. TOLERANCES: FRACTIONS DECIMALS ANGLES		FINISH		DEBUR AND REMOVE SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION			
NAME	SIGNATURE	DATE									
DRAWN	Francisco Alvarez /Francisco Alvarez										
CHECKED											
APPROVED											
MFG											
QA											
MATERIAL			TITLE			DWG. NO.			SHEET OF 1		
ALUMINIO			Diseño y construcción de un robot móvil esférico para monitoreo de cultivos de Palma de aceite			A3			SCALE: 1:2		
WEIGHT			SCALE: 1:2			SHEET OF 1			2		

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



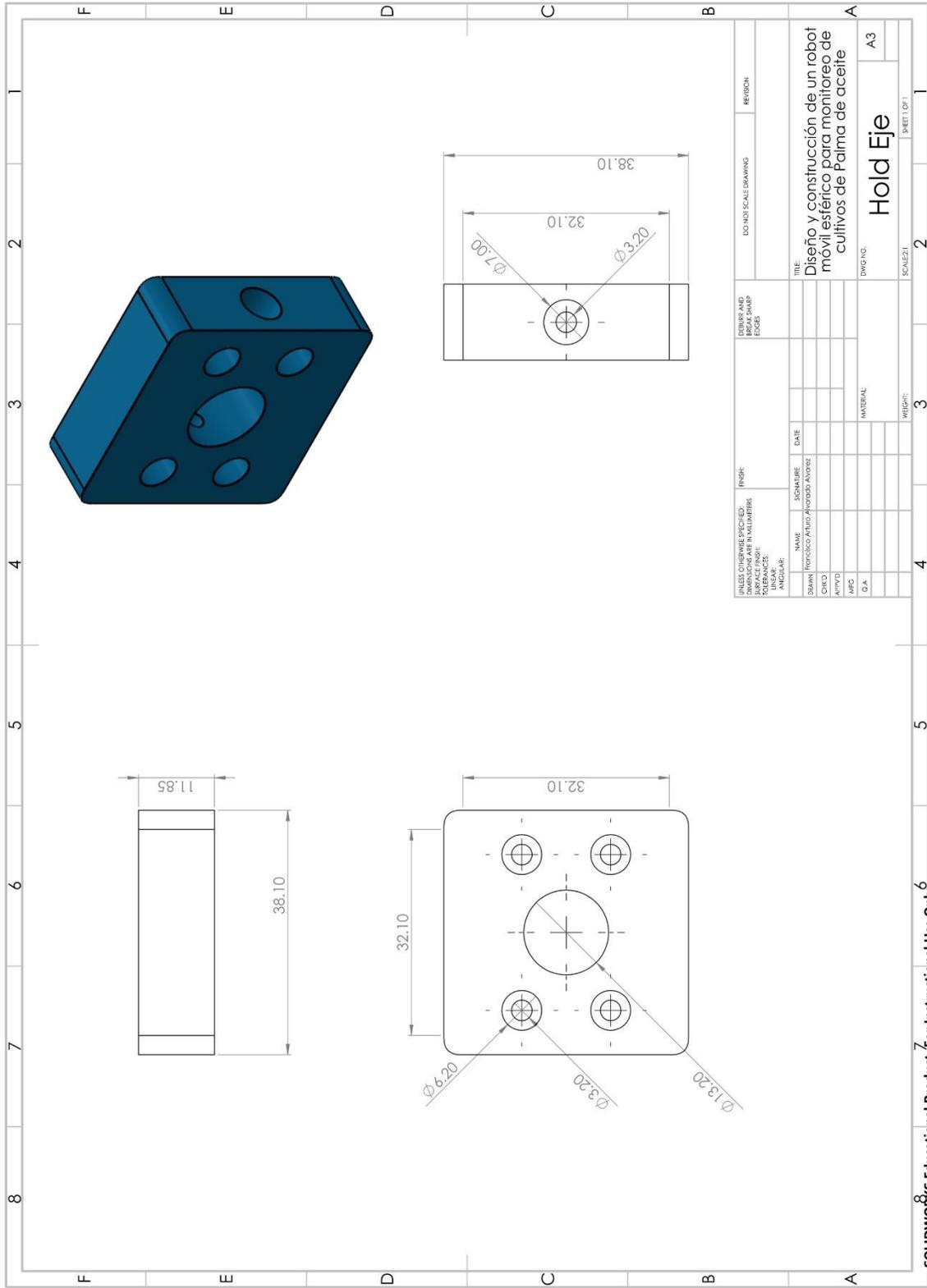
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND EDGE FINISH:		DO NOT SCALE DRAWING		REGION	
NAME	SIGNATURE	DATE							
SAWN									
CHFD									
APPRO									
MFG									
QA									
TITLE:		DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ROBOT		MÓVIL ESFÉRICO PARA MONITOREO DE		CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE		A3	
DWG NO.:		HOLD IMU 2		SCALE: 2:1		SHEET 1 OF 1			

Producto SÓLIDWORKS Educativa. Solo para uso en la enseñanza.



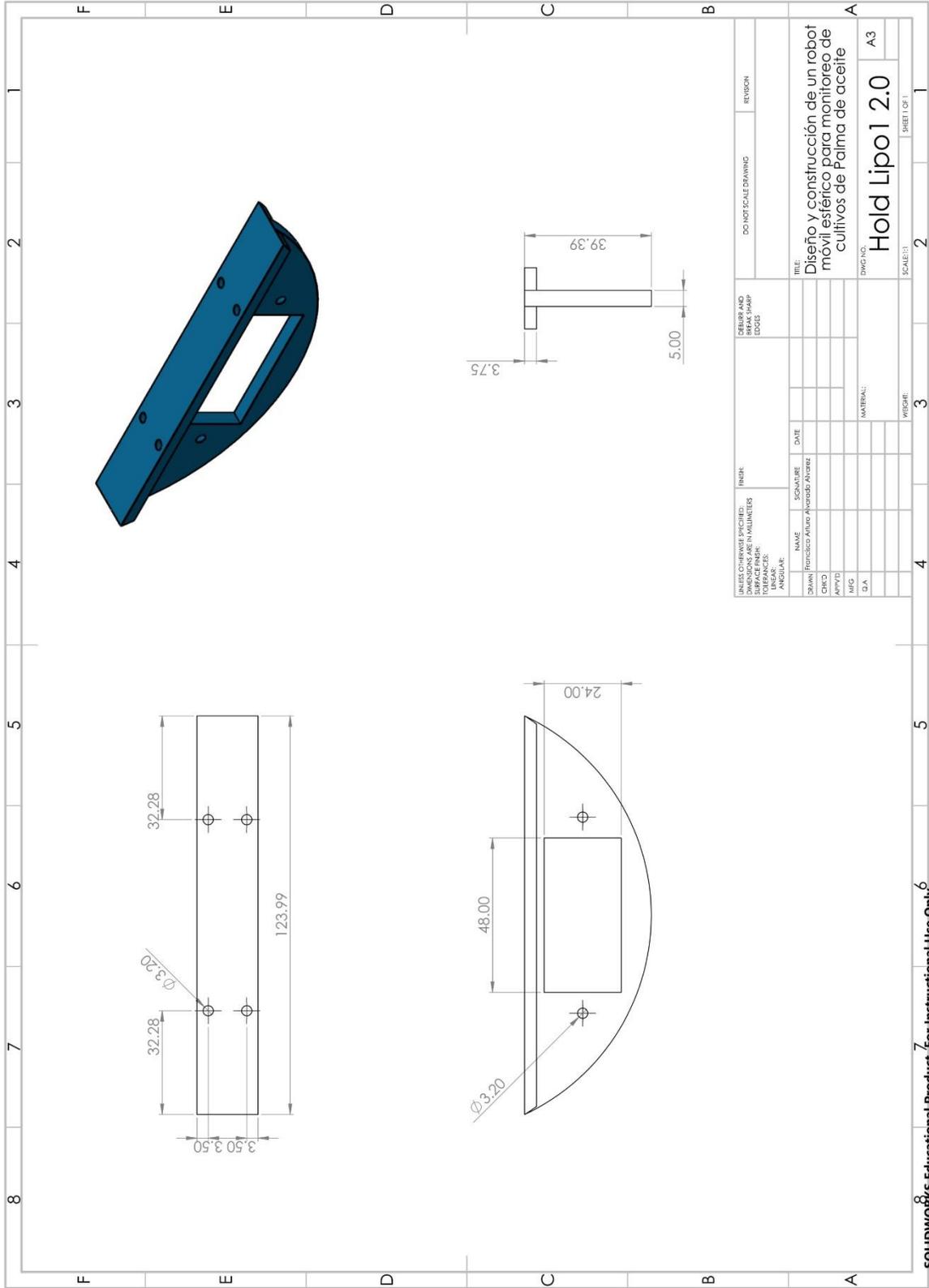
TÍTULO: Diseño y construcción de un robot móvil esférico para monitoreo de cultivos de Palma de aceite		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DWG NO.: Hold BallCas		A3		SHEET 1 OF 1	
MATERIAL:		WEIGHT:		SCALE:	
NAME:		SIGNATURE:		DATE:	
DRAW:		CHECKED:		APPROVED:	
DATE:		MATERIAL:		WEIGHT:	
NAME:		SIGNATURE:		DATE:	
DRAW:		CHECKED:		APPROVED:	
DATE:		MATERIAL:		WEIGHT:	

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only. 6

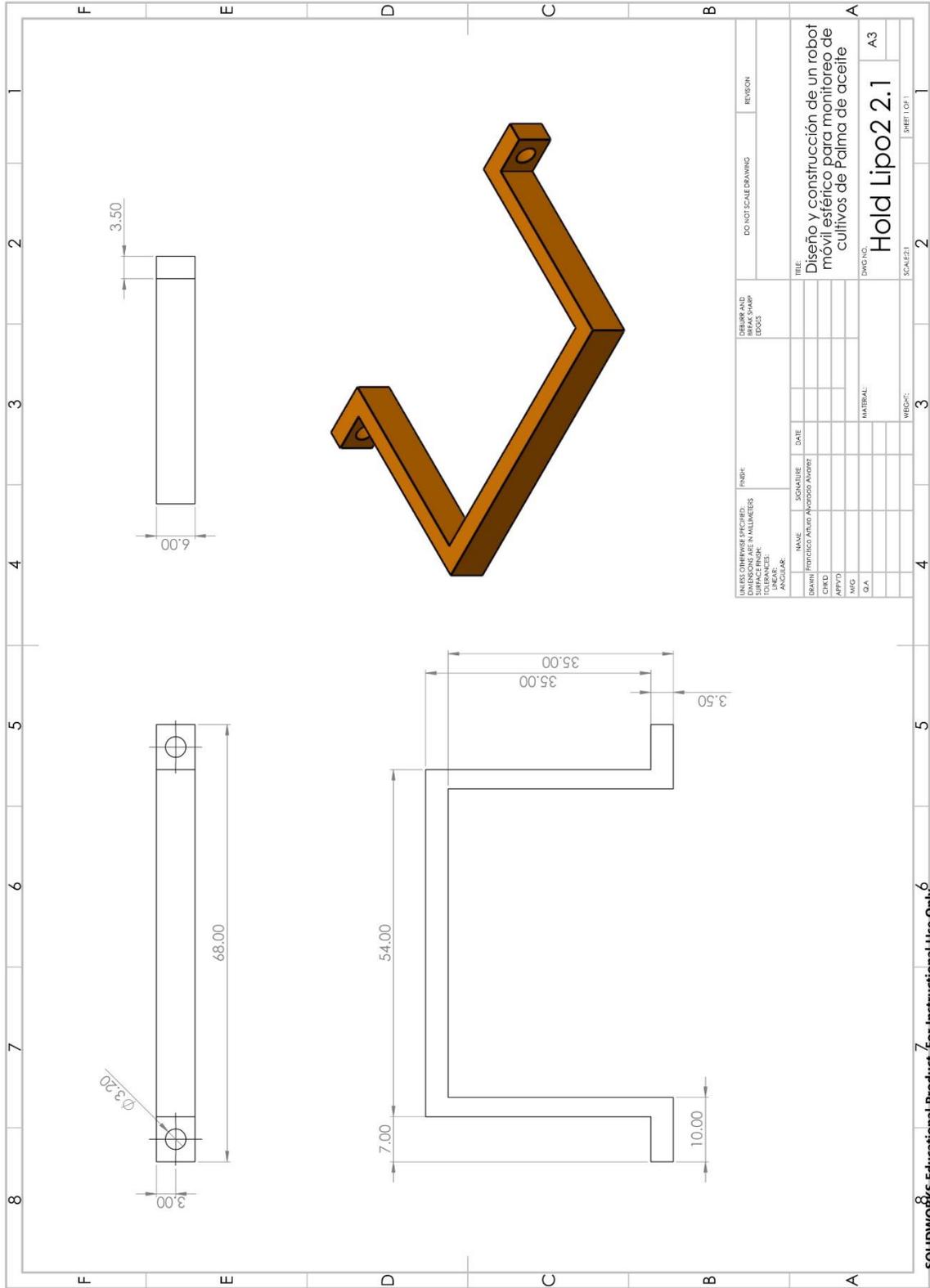


(PLEASE OTHERWISE SPECIFY: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS UNLESS OTHERWISE NOTED) UNITS: ANGULAR:		INCH: DRAWN (INDICATED) PHOTOGRAPHED CHECKED APPROVED MFG D.A.		NAME SIGNATURE DATE		DESIGNS AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
TITLE: Diseño y construcción de un robot móvil estéril para monitoreo de cultivos de Palma de aceite											
DWG NO.:										A3	
SCALE: 1:1										SHEET 1 OF 1	

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

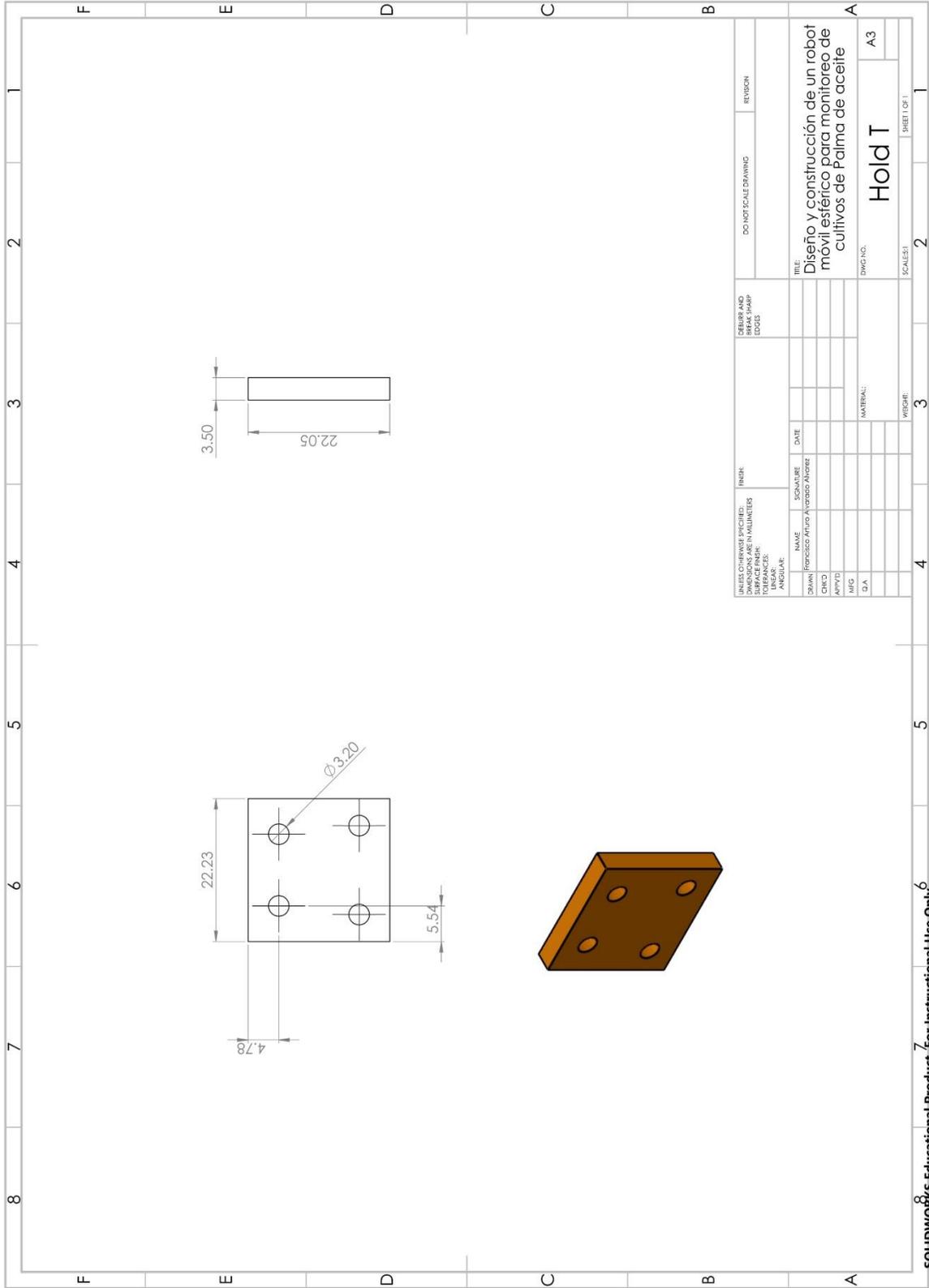


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



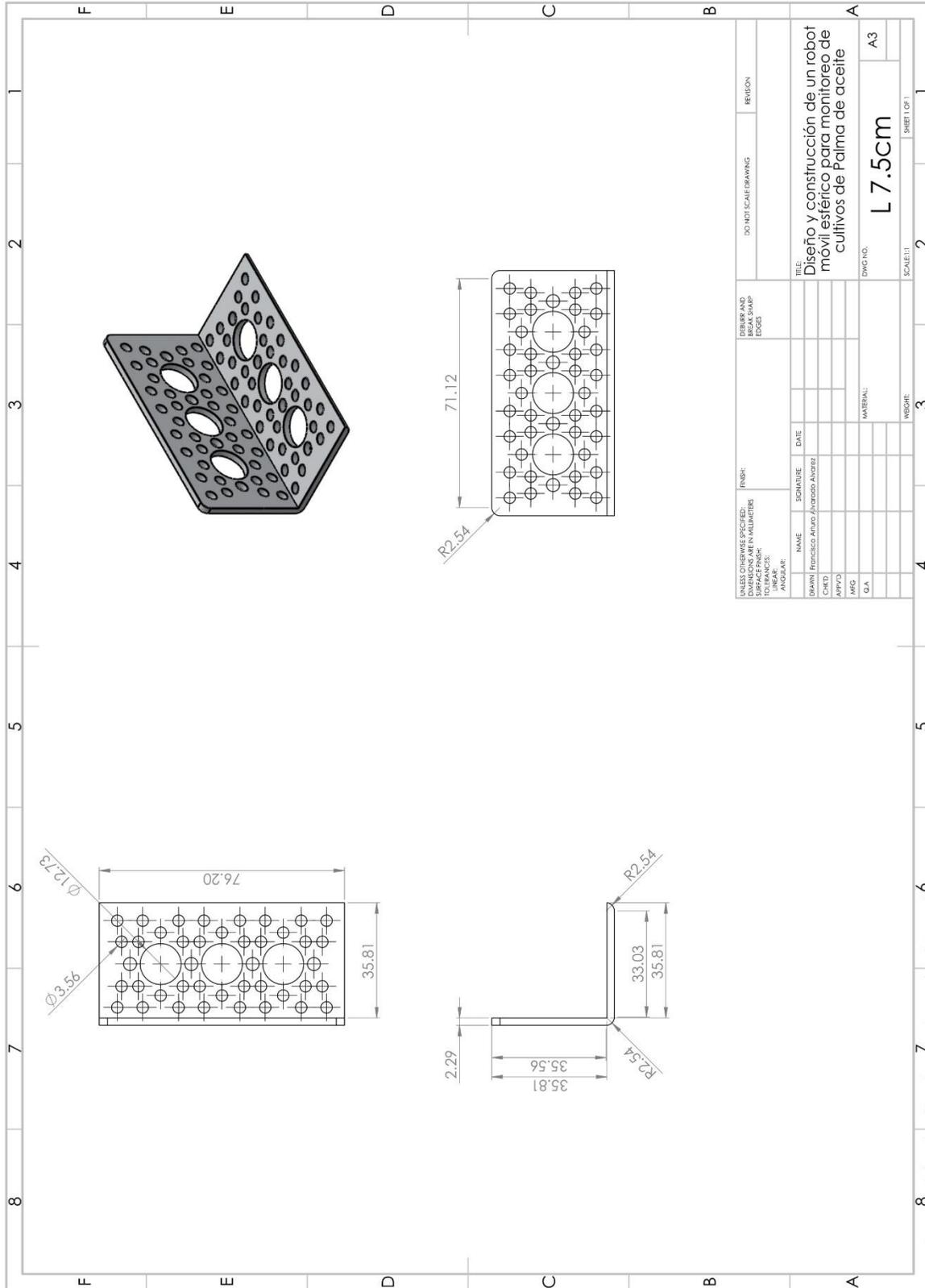
TITULO Diseño y construcción de un robot móvil esférico para monitoreo de cultivos de Palma de aceite		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
DWG NO.: Hold Lipo2 2.1		SHEET NO.: 2		SHEET 1 OF 1	
NAME: Profridico Antonio Avarez		SIGNATURE:		DATE:	
DRAWN:		CHECKED:		DATE:	
APP'D:		MFG:		Q.A:	
MATERIAL:		WEIGHT:		SCALE:	

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only. 6

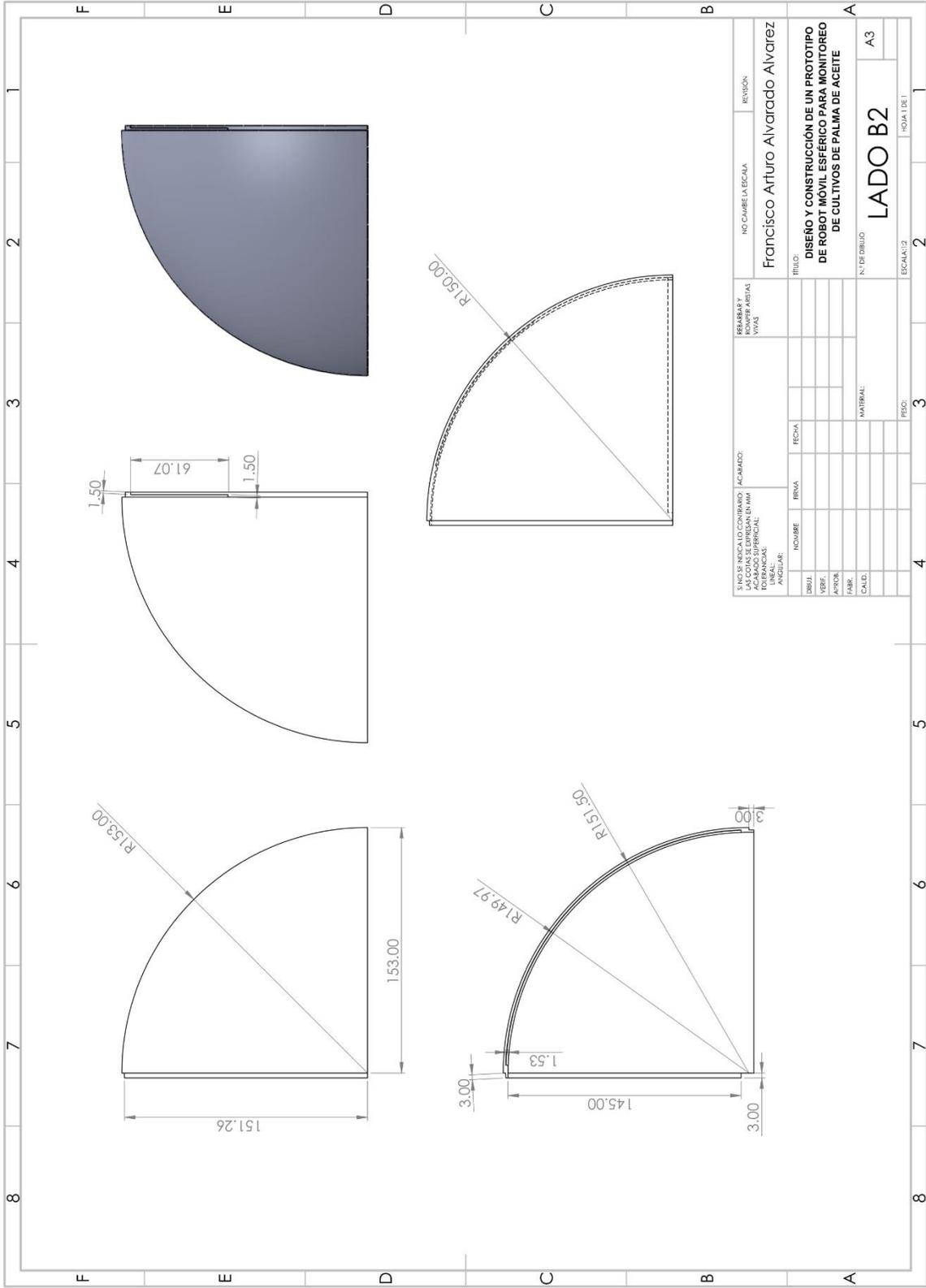


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: ANGULAR:		INCH:		DEBURR AND REMOVE SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE						
SKETCH	Francisco Arturo Alvarez Alavez		Diseño y construcción de un robot móvil esférico para monitoreo de cultivos de Palma de aceite						
CMO			DWG NO. A3						
APPROV			SCALE: 2						
MG			SHEET 1 OF 1						
QA			MATERIAL:						
			VENDOR:						

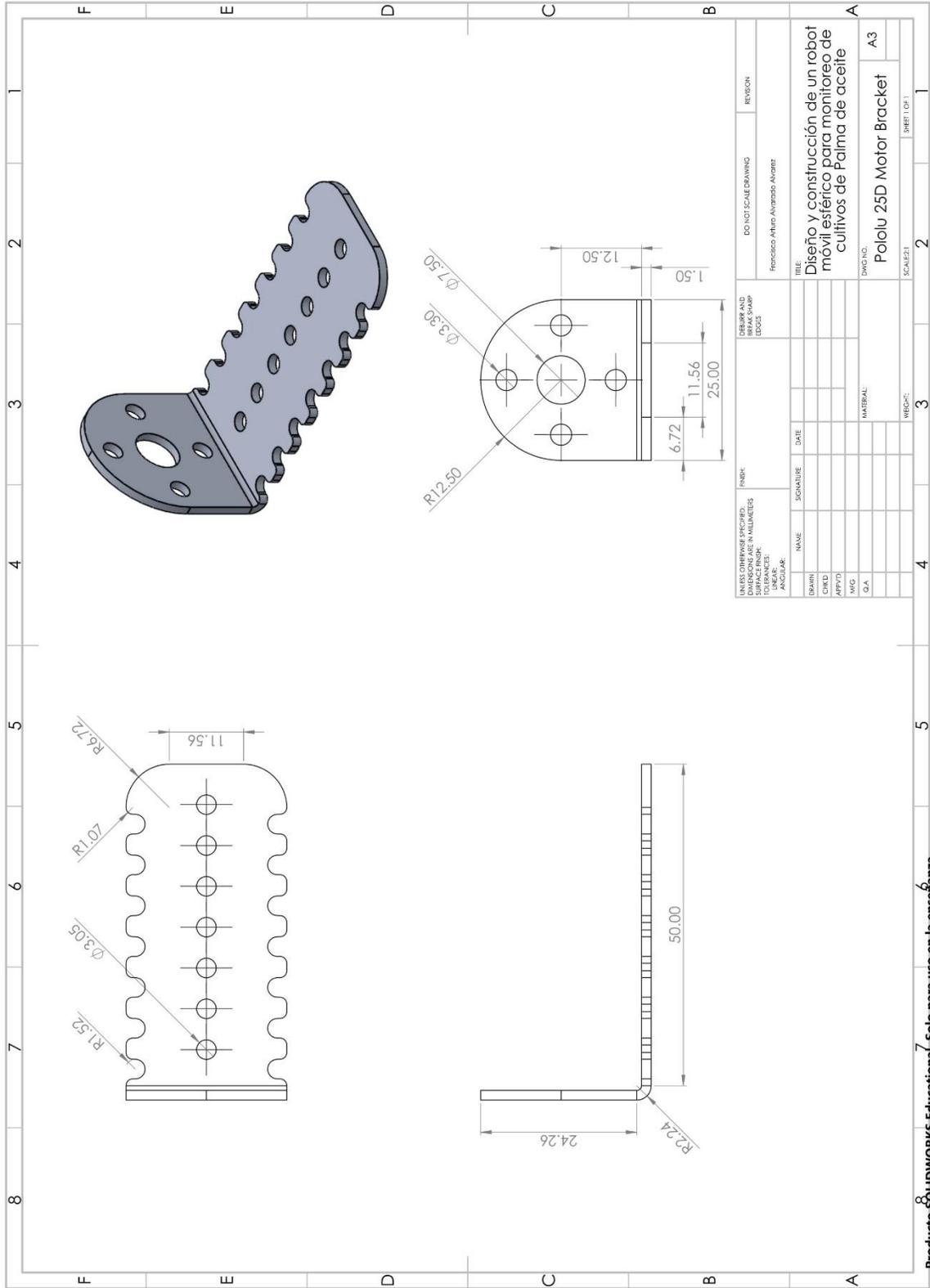
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



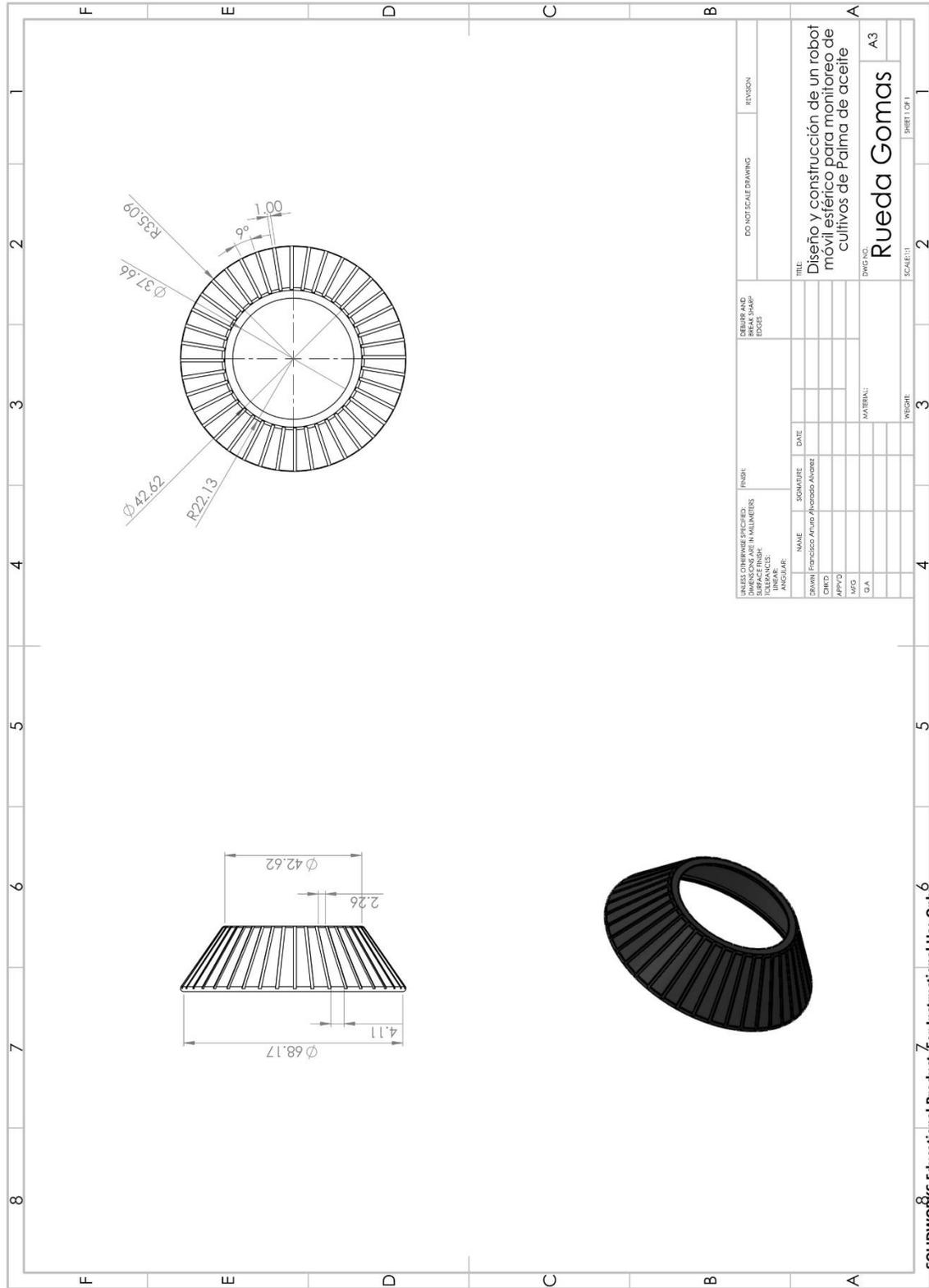
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SIN DE INDICARLO CONVENIR APLICAR LAS NORMAS ACABADO SUPERFICIAL DIMENSIONES ANGULARES		ACABADO: REBARBAR Y VIVAS		NO CAMBIE LA ESCALA REVISIÓN	
Francisco Arturo Alvarado Alvarez					
TÍTULO: DISÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL ESFÉRICO PARA MONITOREO DE CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE					
N.º DE DIBUJO A3				ESCALA: LADO B2	
NOMBRE FRMA FECHA				MATERIAL: PESO:	
DIBUJ. VERIF. AUTOM. FABR. CALD.				ESCALA: 1:1 PÁGINA 1 DE 1	

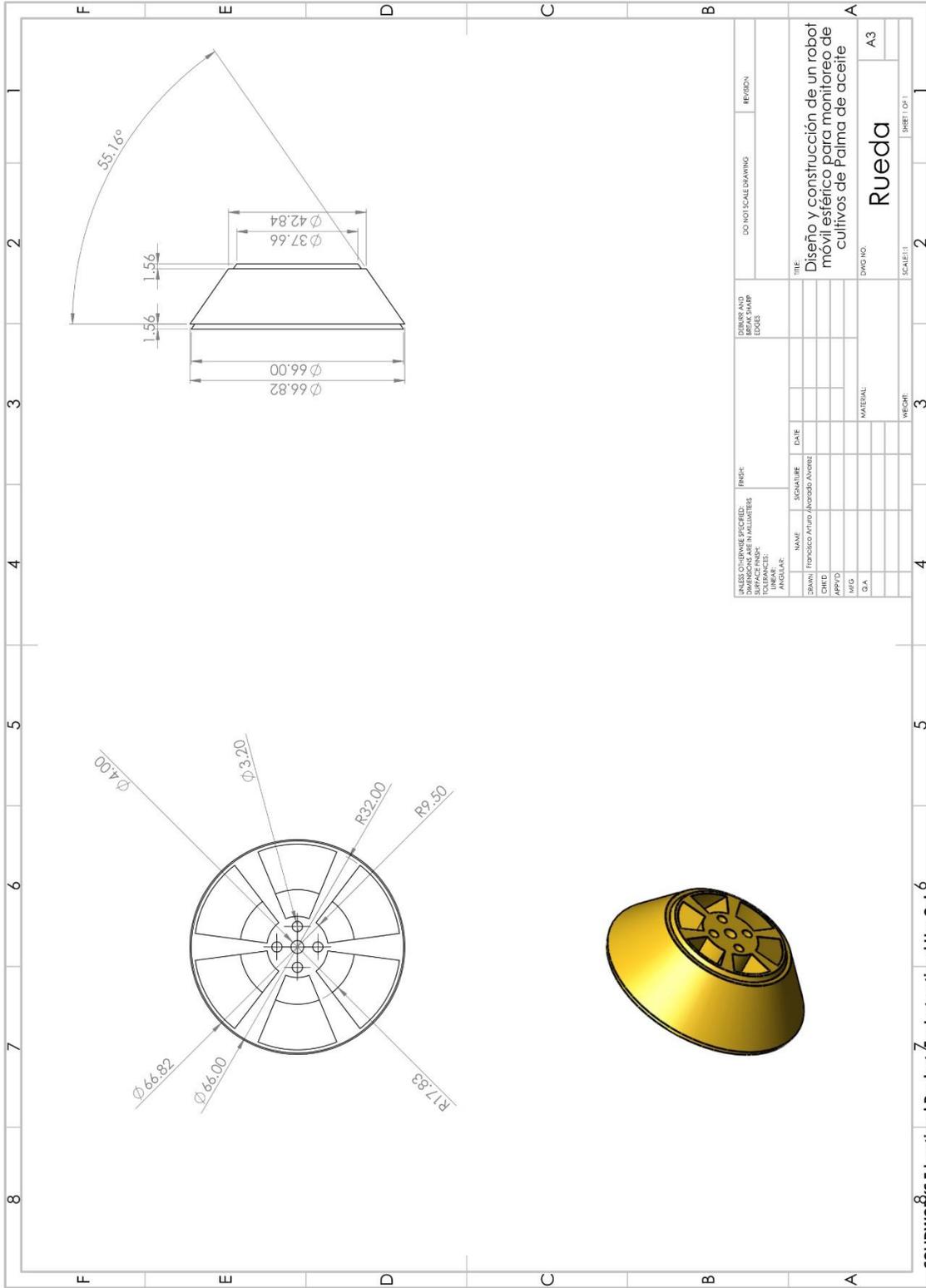


Producto SÓLIDWORKS Educativa. Solo para uso en la enseñanza.



DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING		REVISION	
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS UNLESS OTHERWISE SPECIFIED, DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		P/NR: NAME:		TITLE:	
DESIGNED: DATE:	DRAWN: DATE:	CHECKED: DATE:	APPROVED: DATE:	Diseño y construcción de un robot móvil esférico para monitoreo de cultivos de Palma de aceite	
MFG: DATE:	QA: DATE:	MATERIAL:	WEIGHT:	DWG NO: Rueda Gomas	A3
SCALE: 1:1				SHEET 1 OF 1	

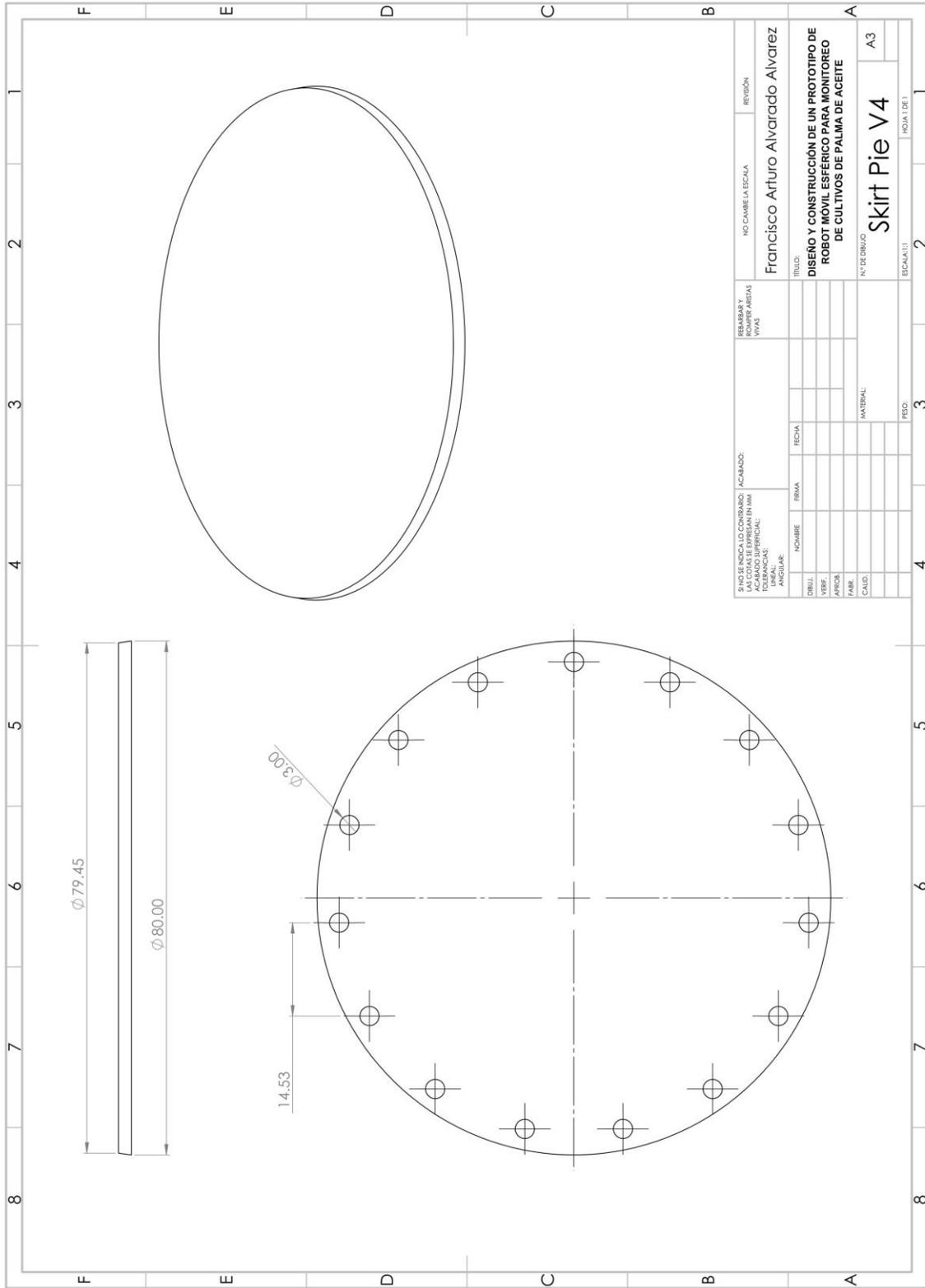
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS TOLERANCES: ANGULAR		FINISH: FRANCO AVANZADO		DATE	
NAME	SCHAEFER	DATE			
DRAWN	FRANCO	DATE			
CHECKED	AVANZADO	DATE			
APPROVED		DATE			
ISO					
ISA					
MATERIAL:			WEIGHT:		
Rueda			2		
DWG NO. A3			SHEET 04		

TITLE: **Diseño y construcción de un robot móvil estéril para monitoreo de cultivos de Palma de aceite**
 DWG NO. **A3**
 SCALE: **1:1**

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SIN INDICAR LO CONTRARIO, TODOS LOS DATOS SE ENTENDEN EN MM. LINEAS FINES Y FINES DE LINEAS ANGULARES.		REVISAR Y ROMPER ARISTAS VIVALE	NO CAMBIA LA ESCALA	REVISOR
TÍTULO: DISÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE ROBOT MÓVIL ESFÉRICO PARA MONITOREO DE CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE		FRANCISCO ARTURO ALVARADO ALVAREZ		
DIBUJ.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	N° DE DIBUJO
VERIF.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	A3
APROB.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	ESCALA: 1:1
FABR.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	HOJA 1 DE 1
CALD.	NOMBRE	FIRMA	FECHA	PESO:
MATERIAL:	NOMBRE	FIRMA	FECHA	Skirt Pie V4