



**Diseño e implementación de un robot móvil esférico controlado inalámbricamente
para pruebas de movilidad en distintos terrenos sin inclinación**

Guerrero Vélez, Edgar Mateo

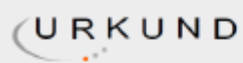
Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería en Mecatrónica

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Mecatrónica

Dr. Aguilar Castillo, Wilbert Geovanny

20 de agosto del 2021



Urkund Analysis Result

Analysed Document: Tesis_Guerrero Vélez.pdf (D111447834)
Submitted: 8/19/2021 6:13:00 AM
Submitted By: emguerrero1@espe.edu.ec
Significance: 2 %

Sources included in the report:

TESIS BAEZ LARREA Capitulo12345.pdf (D78897346)

Instances where selected sources appear:

6

Firma:



Escanea el código QR para verificar la firma.
WILBERT GEOVANNY
AGUILAR CASTILLO

Aguilar Castillo, Wilbert Geovanny
DIRECTOR



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

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, “Diseño e implementación de un robot móvil esférico controlado inalámbricamente para pruebas de movilidad en distintos terrenos sin inclinación” fue realizado por el señor Guerrero Vélez, Edgar Mateo el cual ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 20 Agosto 2021

Firma:



.....
Aguilar Castillo, Wilbert Geovanny

C. C. 0703844696



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

RESPONSABILIDAD DE AUTORÍA

Yo, **Guerrero Vélez, Edgar Mateo**, con cédula de ciudadanía n°0802227132, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Diseño e implementación de un robot móvil esférico controlado inalámbricamente para pruebas de movilidad en distintos terrenos sin inclinación** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 20 Agosto 2021

Firma

Guerrero Vélez, Edgar Mateo

C.C.: 0802227132



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA EN MECÁTRONICA**

AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN

Yo **Guerrero Vélez, Edgar Mateo**, con cédula de ciudadanía n°0802227132, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Título:** Diseño e implementación de un robot móvil esférico controlado inalámbricamente para pruebas de movilidad en distintos terrenos sin inclinación en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 20 Agosto 2021

Firma

.....
Guerrero Vélez, Edgar Mateo

C.C.: 0802227132

Dedicatoria

Le dedico el siguiente trabajo a todos los que me han acompañado a lo largo de estos años para conseguir la meta que muchos nos proponemos en la vida, la cual es conseguir un título que nos permita desenvolvemos a nivel profesional en algo que amamos.

Se lo dedico especialmente a mi madre quien lucho incansablemente por darme todas las herramientas para poder lograr mis metas. A mi padre quien me apoyo en todo momento durante el tiempo que pase estudiando.

Se lo dedico a mis hermanos que me ayudaron en todo lo que pudieron y me dieron fuerzas para seguir tratando de lograr mis objetivos a pesar de las adversidades.

Se lo dedico a mi familia, a mis abuelos, a mis tíos, primos por todo el apoyo que me brindaron durante años. Y, por último, se lo dedico a mis amigos con quienes pase los mejores momentos de mi vida y me ayudaron a llegar hasta el final.

Agradecimientos

Siempre he creído que todos tenemos un héroe en nuestro interior, nos da fuerza, nos mantiene en el camino correcto, y cuando caemos, nos ayuda a levantarnos con orgullo y seguir caminando a nuestro futuro, aunque a veces quisiéramos volver al pasado junto a quien más queremos.

De esta forma agradezco a mi madre, Lorena Vélez por ser mi héroe y la razón que me hace seguir caminando todos los días hacia al futuro a pesar de que algunas veces solo quiera volver al pasado donde ella se encuentra.

A mis padres tengo que agradecerles todos los sacrificios que hicieron para poder completar mis logros junto a todo el amor que me brindaron.

Le agradezco a mis hermanos Amy y Fabricio por todo el cariño que me han dado a pesar de mi rareza y aunque no los vea tan seguido como quiero siempre los llevo conmigo en el corazón.

Agradezco a mi abuela María por todas sus enseñanzas y consejos que me han ayudado a lo largo de mi vida, a mis tíos por todo su apoyo y cariño, a mis primos especialmente a Anto, Mica y Fiona que como ellas bien dicen me permitieron mejorar en cada oportunidad de enseñanza brindada.

Agradezco al doctor Wilbert Aguilar y al ingeniero David Loza por todo su apoyo y guía durante el desarrollo del proyecto.

Le agradezco a la familia que forme en mis años de universidad, Gabo, Victor, David, Anahi, Edwin J, Tibu, Walter, Canty, Erick, Serge, Cris, Fabro, Alexei, Tony, Sebas, Chino y Jisus quienes me acompañaron en mis mejores momentos y también en los más oscuros.

Tabla de contenido

<i>Dedicatoria</i>	6
<i>Agradecimientos</i>	7
<i>Tabla de contenido</i>	8
<i>Índice de tablas</i>	12
<i>Índice de figuras</i>	14
<i>Resumen</i>	17
<i>Abstract</i>	18
<i>Capítulo I</i>	19
<i>Generalidades</i>	19
<i>Antecedentes</i>	19
<i>Justificación e importancia</i>	24
Área de influencia	25
<i>Objetivos</i>	25
Objetivo general.....	25
Objetivos específicos.....	25
<i>Alcance del proyecto</i>	26
<i>Estructura del documento</i>	27

Capítulo II	28
Estado del arte.....	28
Robótica	28
Robótica Móvil.....	28
Robot Esfera	29
Centro de masa y centro de gravedad	32
Clasificación de los robots esfera según su mecanismo interno de locomoción.....	33
Cuerpo Central con muelle.....	33
Coche interno o rueda de hámster	34
Masa Pendular con eje fijo.....	35
Masas Móviles.....	36
Aplicaciones.....	38
Sphero	38
GroundBot.....	39
Motores para el desplazamiento del robot.....	39
Servomotores.....	39
Motor DC.....	40
Capítulo III	42
Diseño del sistema mecatrónico	42
Introducción	42

Identificación de subsistemas	43
Subsistema mecánico	43
Componentes del subsistema mecánico.....	45
Selección del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.....	46
Modelado del prototipo.....	49
Diseño de la esfera del modelo.....	52
Dimensionamiento del actuador.....	55
Selección del actuador.	58
Diseño CAD y distribución de los elementos.....	61
Corrección del centro de masa del prototipo	63
Análisis de cargas y esfuerzos.	66
Subsistema Electrónico.....	70
Componentes del subsistema electrónico.	70
Selección de Sensores para Control de Velocidad.	70
Selección de Sensores para Sistema Estabilizador.	71
Selección de Tarjeta de Adquisición de Datos.	72
Selección de Alimentación.	76
Subsistema Tics.....	79
Componentes del subsistema de Tics.	79
Análisis del Control de Variables.....	80
Análisis de Comunicación.....	82
<i>CAPITULO IV</i>	<i>87</i>

PRUEBAS Y RESULTADOS	87
Hardware del Robot Esfera.	87
Software del Robot Esfera.....	91
Identificación y Controlador.....	92
Pruebas de Trayectoria	96
 <i>CAPITULO V</i>	<i>101</i>
 <i>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</i>	<i>101</i>
Conclusiones	101
Recomendaciones	102
 <i>BIBLIOGRAFÍA</i>	<i>103</i>
 <i>ANEXOS</i>	<i>106</i>

Índice de tablas

Tabla 1. <i>Parámetros del Sistema Físico Mecánico.</i>	43
Tabla 2. <i>Parámetros de diseño del subsistema mecánico.</i>	44
Tabla 3. <i>Criterios de selección para la configuración del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.</i>	46
Tabla 4. <i>Conceptos para selección de la configuración del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.</i>	46
Tabla 5. <i>Matriz de selección para la configuración del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.</i>	49
Tabla 6. <i>Criterios de selección de material de la esfera</i>	53
Tabla 7. <i>Matriz de Características y Propiedades de la Estructura Externa del Robot Esfera.</i>	53
Tabla 8. <i>Matriz de decisión para la selección de material de la esfera</i>	54
Tabla 9. <i>Parámetros y Ponderaciones para la Selección del Actuador.</i>	59
Tabla 10. <i>Matriz de Propiedades y Características para Selección de Actuadores.</i> ...59	
Tabla 11. <i>Ponderaciones y Criterios de la Selección de Actuadores.</i>	61
Tabla 12. <i>Tabla de distribución de cada componente del sistema.</i>	62
Tabla 13. <i>Coordenadas de centro de masa de todos los elementos del sistema.</i>	64
Tabla 14. <i>Especificaciones Técnicas Encoder</i>	71
Tabla 15. <i>Especificaciones Técnicas Unidad Inercial</i>	72
Tabla 16. <i>Requerimientos de Selección de DAQ</i>	73
Tabla 17. <i>Opciones de DAQ para la Aplicación</i>	74
Tabla 18. <i>Matriz de Selección de DAQ para Robot Esfera</i>	76
Tabla 19. <i>Prueba de Tiempo de Funcionamiento del Prototipo</i>	90

Tabla 20. Variación en Trayectorias a Diferentes Distancias de Prueba98

Tabla 21. Análisis de Variación Máxima en Trayectoria en Superficie Lisa Promedio
.....99

Índice de figuras

Figura 1. <i>Prototipo de robot esfera con péndulo suspendido.</i>	20
Figura 2. <i>Lampara de acrílico de 25cmde diámetro utilizada para la carcasa del prototipo.</i>	20
Figura 3. <i>Estructura interna ensamblada.</i>	21
Figura 4. <i>Bola de hámster utilizada para la carcasa del prototipo.</i>	22
Figura 5. <i>Unidad interna de locomoción.</i>	23
Figura 6. <i>Rueda de hámster utilizada como carcasa del robot.</i>	24
Figura 7. <i>Tipos de locomoción en un robot móvil.</i>	29
Figura 8. <i>Primer Prototipo de esfera.</i>	30
Figura 9. <i>Unidad interna de locomoción (UIL).</i>	31
Figura 10. <i>Esquema de un robot esfera tipo cuerpo central con muelle (Bariantos, 2014).</i>	33
Figura 11. <i>Prototipo coche interno desarrollado por J. Alves y J. Días.</i>	34
Figura 12. <i>Mecanismo interno de locomoción denominado masa pendular con eje fijo.</i>	36
Figura 13. <i>Mecanismo interno de locomoción de masas móviles.</i>	37
Figura 14. <i>Sphero SPRK+.</i>	38
Figura 15. <i>GroundBot.</i>	39
Figura 16. <i>Servomotor Hitec HS-31.</i>	40
Figura 17. <i>Motor DC 12-36 V 3500 - 9000 RPM.</i>	41
Figura 18. <i>Norma VDI 2206 para el diseño de prototipos mecatrónicos</i>	42
Figura 19. <i>Componentes del subsistema mecánico.</i>	45
Figura 20. <i>Prototipo del modelo Masa Pendular con eje fijo.</i>	50

Figura 21. CAD del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.	51
Figura 22. Sistema de transmisión del péndulo.	52
Figura 23. Diagrama de cuerpo libre del sistema.	56
Figura 24. Distribución de cada elemento del sistema.	62
Figura 25. Centro de masa de la esfera.	63
Figura 26. Cargas representativas en el eje fijo de la esfera.	66
Figura 27. Representación de cargas y apoyos en el eje fijo de la esfera.	67
Figura 28. Simulación de análisis de esfuerzo de Von Mises.	68
Figura 29. Desplazamientos máximos del eje fijo.	68
Figura 30. Prototipo final del subsistema mecánico.	69
Figura 31. Componentes del subsistema mecánico.	70
Figura 32. Fuente de Alimentación Batería Lipo 3C 2200 mAh.	77
Figura 33. Integración del Subsistema Electrónico.	78
Figura 34. Subsistema de Tics.	79
Figura 35. Funcionamiento del Control en el Subsistema de Tics.	80
Figura 36. Lazo de Control de rotación respecto al Angulo Pitch.	81
Figura 37. Lazo de Control de rotación respecto al Angulo Roll.	82
Figura 38.	83
Figura 39. Modelo de Interfaz HMI para Control de Esfera.	84
Figura 40. Diagrama de Funcionamiento del Sistema.	85
Figura 41. Mecanismo de Movimiento Lateral de Robot Esfera.	88
Figura 42. Ensamble de Estructura Externa de Robot Esfera.	89
Figura 43. Análisis Comparativo Diseño – Construcción de Robot Esfera.	90

Figura 44. <i>Interfaz HMI para Control de Robot Esfera.....</i>	92
Figura 45. <i>Identificación de planta de Motor DC y su respuesta escalón.....</i>	93
Figura 46. <i>Controlador de Motor DC para ángulo Pitch con perturbación.....</i>	94
Figura 47.	95
Figura 48. <i>Controlador de Motor DC para ángulo Pitch con perturbación.....</i>	96
Figura 49. <i>Ejemplo Planteamiento de Experimento y Análisis de Trayectorias en Software Tracker.....</i>	97
Figura 50. <i>Ejemplo de Análisis de Variación de Trayectoria en Software Tracker. ...</i>	98
Figura 51. <i>Máxima Variación en Trayectoria a Diferentes Superficies.....</i>	100

Resumen

En la presente tesis se ha planteado el diseñado y, construido con éxito, una esfera robótica que puede ser controlada de forma remota. El diseño de la esfera robótica se da a partir de la aplicación de la norma VDI 2200, la cual mantiene un enfoque en el diseño por subsistemas. El proceso de diseño del robot se ha desarrollado en función del subsistema mecánico relacionado directamente con la estructura, aparte, también se relaciona directamente con el análisis de esfuerzos existentes, el subsistema electrónico relacionado a la selección de componentes, el análisis de la autonomía energética del prototipo, el subsistema de tics y su desarrollo en función de la algoritmia implementada para la integración y, por último, la sinergia de los subsistemas mencionados.

El sistema presenta, por lo tanto, cuenta con una correcta funcionalidad para superficies de diferentes materiales, no obstante, esto se aplica siempre y cuando no presenten inclinación, esto posterior a mostrar un análisis comparativo en función de la variación en trayectoria del prototipo. Además, se brinda una mención al funcionamiento del control y estabilidad de la esfera, aparte, también cabe mencionar su comunicación con la interfaz HMI encargada de dar la ordenes al prototipo de forma remota con total eficacia.

- Palabras clave:

- **ROBOT ESFERA**
- **CONTROL ESTABILIDAD**
- **COMUNICACIÓN BLUETOOTH**
- **CONTROL REMOTO**

Abstract

In this degree work, the design and construction of a sphere robot is presented based on the application of the VDI 2200 standard focused on the design by subsystems. The robot design process has been developed based on the mechanical subsystem directly related to the structure and the analysis of existing stresses, the electronic subsystem related to the selection of components and the analysis of the energy autonomy of the prototype, the subsystem of tics and its development based on the algorithm implemented for the integration and synergy of the aforementioned subsystems.

The system presents a correct functionality for surfaces of different materials as long as they do not present inclination, showing a comparative analysis based on the variation in the trajectory of the prototype. In addition, a mention is given of the operation of the control and stability of the sphere and its communication with the HMI interface in charge of giving the orders to the prototype remotely.

- Key words:

- **SPHERE ROBOT**
- **STABILITY CONTROL**
- **BLUETOOTH COMMUNICATION**
- **REMOTE CONTROL**

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

Trabajos Nacionales

La Escuela Politécnica Nacional del Ecuador en el 2012 fue testigo de la presentación del trabajo de titulación de Cañadaz y Nazate relacionado con la creación de un robot esférico con la adquisición de visión artificial en un periodo de tiempo corto mediante la aplicación de conceptos físicos de cinemática, centro de gravedad para permitir el desplazamiento de la estructura robótica.

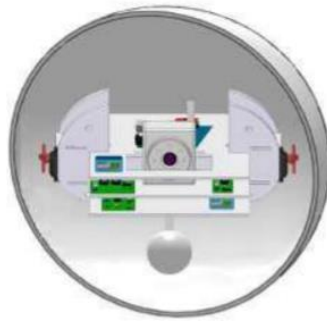
La masa del robot es concentrada gracias a que se colocó una esfera en el interior, además, concentra dos servomotores trucados que permitirán el movimiento hacia adelante o atrás. Para generar el movimiento hacia la izquierda o la derecha se colocó un servomotor estándar que moverá el péndulo en dichas direcciones, para controlar los servomotores se utilizó una placa Arduino Duo.

Para la aplicación de monitoreo del robot se incluye una cámara de video IP que permite transmitir en periodos cortos de tiempo el entorno por el cual se desplaza el prototipo.

Por último, se implementó una aplicación para celulares como interfaz gráfica que permitió controlar el desplazamiento y dirección del prototipo a distancia y a su vez visualizar el video transmitido en tiempo real todo mediante comunicación WIFI la cual es permitida por el escudo Wishield de Asynclabs que es compatible con Arduino (Cañadas Betancourt & Nazate Burgos, 2012, págs. 151-154).

Figura 1.

Prototipo de robot esfera con péndulo suspendido.



Nota: Figura obtenida de (Cañadas Betancourt & Nazate Burgos, 2012).

Figura 2.

Lampara de acrílico de 25cmde diámetro utilizada para la carcasa del prototipo.



Nota: Figura obtenida de (Cañadas Betancourt & Nazate Burgos, 2012).

En 2017, Pérez diseñó un robot móvil esférico controlado de manera remota con el objetivo de apoyar en la ejecución de proyectos de investigación formativa y generativa para la institución.

El robot cuenta con una carcasa esférica externa de aproximadamente 245 mm de diámetro la cual es activada por unidad interna de locomoción (véase en la Figura 8).

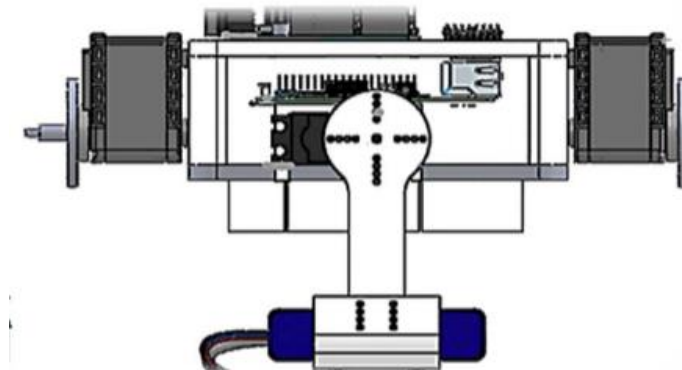
Con el fin de alcanzar algún destino, el centro de masa del prototipo y de los servomotores inteligentes permiten la movilidad tanto adelante como atrás.

Para el control inalámbrico se desarrolló una aplicación web que podía ser utilizada en un teléfono inteligente o un ordenador. Aparte, para la construcción de los componentes internos del robot se tomó especialmente en cuenta la Masa Pendular con el fin de demostrar que al final, el robot puede efectivamente seguir la orientación fijada y estabilizarse en su estado de reposo.

Como conclusión del trabajo Danny Pérez acoto “El robot esférico tuvo una correcta funcionalidad con la capacidad de realizar desplazamiento en ambientes que presenten un nivel de dificultad moderado, demostrando una habilidad de restablecimiento por su mecanismo basado en un péndulo. Al analizar el controlador, ha presentado un correcto funcionamiento antes perturbaciones externas de la superficie. (Pérez Camejo, 2017, pág. 85).

Figura 3.

Estructura interna ensamblada.



Nota: Figura obtenida de (Pérez Camejo, 2017).

Figura 4.

Bola de hámster utilizada para la carcasa del prototipo.



Nota: Figura obtenida de (Pérez Camejo, 2017).

Trabajos Internacionales

En el año 2012, Juan Hernández para su trabajo de Masterado en Automática y Robótica para la Universidad Politécnica de Madrid se planteó diseñar y construir una esfera robótica que estaría compuesta de una coraza externa de forma esférica y un mecanismo interno que le permitirá autoinducir movimiento.

Para la unidad de locomoción se optó por un mecanismo interno pendular de dos grados de libertad con el fin de permitir un desbalance en el sistema y, así, inducir el movimiento del prototipo.

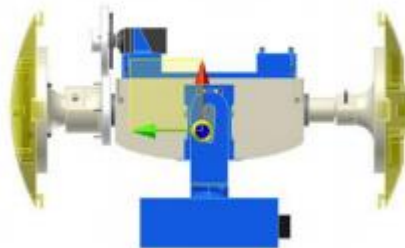
El diseño de la estructura interna presenta un eje de forma cilíndrica, el cual cuenta en sus extremos con soportes para fijar el eje al cuerpo esférico. En el centro se coloca

una pieza con forma de caja que tiene un servomotor con el cual puede girar libremente alrededor del eje.

Como conclusión el autor acoto “ROSPHERE ha demostrado ser un robot móvil versátil, el cual puede cambiar de terrenos durante el desarrollo de una tarea, sin necesidad de la interrupción de esta o la modificación de su sistema de tracción, a diferencia de otros tipos de robots móviles que pueden requerir adaptaciones para desempeñarse en diferentes terrenos” (Vega, 2012, págs. 77-78)

Figura 5.

Unidad interna de locomoción.



Nota: Figura obtenida de (Vega, 2012)

Figura 6.

Rueda de hámster utilizada como carcasa del robot.



Nota: Figura obtenida de (Vega, 2012)

Justificación e importancia

El estudio de la robótica y su aplicación en nuestro país y en el mundo es cada vez más importante debido a todas las nuevas tecnologías que salen a la luz cada día que brindan mayores oportunidades de solucionar problemas o necesidades comunes de las personas en la actualidad.

Como se puede observar en los trabajos preliminares la estructura (esfera) ha sido adquirida comercialmente no diseñada y manufacturada por los autores, se ha implementado lazos abiertos de control para generar el movimiento del robot a través de los servomotores lo cual puede llevar a errores de desplazamiento ya que no existe retroalimentación.

El presente trabajo propone una diseñar y manufacturar una estructura robótica no convencional (robot esfera) que realizara pruebas de movilidad en distintos terrenos sin inclinación utilizando un control de estabilización y velocidad ambos en lazo cerrado

con retroalimentación para evitar errores de trayectoria o desplazamiento ante fuerzas externas.

Área de influencia

Este proyecto está enfocado principalmente a continuar con el desarrollo de la robótica en Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, con el diseño de un robot de tipo esfera para estudiar el movimiento del mismo a través de distintos terrenos. Con esto se podría dar paso a futuros trabajos de implementación de cámaras para el reconocimiento de terrenos o zonas de difícil acceso, para aplicaciones militares de búsqueda, etc.

Objetivos

Objetivo general

- Diseñar e implementar un robot móvil esférico controlado inalámbricamente para pruebas de movilidad en distintos terrenos sin inclinación.

Objetivos específicos

- Diseñar la estructura esférica que permita el desplazamiento del robot.
- Desarrollar el diseño electrónico para seleccionar los componentes necesarios para el robot.
- Dimensionar la estructura interna que servirá de base para los componentes electrónicos.
- Analizar el centro de masa del robot y los modelos matemáticos para el movimiento de este.

- Desarrollo del algoritmo de control de movimiento, velocidad y estabilización del robot esfera y comunicación inalámbrica.
- Implementar el robot y realizar pruebas de movilidad en distintos tipos de terrenos sin inclinación para observar su comportamiento.
- Analizar los resultados de las pruebas de movilidad.

Alcance del proyecto

El proyecto el diseño e implementación de un robot de tipo esfera que innova en cuanto a movilidad, se plantea utilizar el sistema de locomoción de tipo péndulo para general el desplazamiento de la esfera.

El prototipo contará con una estructura externa (esfera) cuyo material será seleccionado dependiendo del diseño previo, contará con motores que permitan el movimiento hacia adelante - atrás y un motor acoplado al péndulo que permita el movimiento de izquierda – derecha.

Se implementará un control de velocidad para los motores y además se utilizará una IMU para la estabilización del prototipo en caso de que un agente externo perturbe su trayectoria, utilizando un lazo de control cerrado en ambos casos.

El sistema de control de movimiento será de tipo inalámbrico para poder manejar la esfera por medio de una HMI.

Una vez terminada la construcción y conexión inalámbrica se dará paso a las pruebas de movimiento en superficies o terrenos distintos, por ejemplo, visualizar diferencias en cómo se desplaza la esfera en un terreno liso a como se desplaza en un terreno irregular con pequeñas rocas, y así ver su comportamiento con respecto a dichos cambios de terreno.

Estructura del documento

El presente documento consta de 5 capítulos: Generalidades, Estado del arte, Diseño, Pruebas y Conclusiones. En el capítulo 1 se detalla la importancia y justificaciones de realizar el siguiente proyecto de titulación, además de los antecedentes, trabajos previos y los objetivos que se desea cumplir al finalizar el prototipo.

En el capítulo 2 se presenta la información respectiva a los tipos de sistemas de locomoción de los robots esfera, sus aplicaciones, los mecanismos de suspensión utilizados para la estabilidad y los componentes que permitirán el movimiento del robot. En el capítulo 3 muestra el proceso de diseño del robot, la elección de materiales adecuados para las partes mecánicas, la elección de motores mediante un análisis dinámico en base al peso de la esfera y la programación de los motores y sensores utilizados. En el capítulo 4 se muestra los resultados obtenidos en las pruebas de desplazamiento en diferentes superficies comprobando así el funcionamiento del robot. Por último, el capítulo 5 indicará las conclusiones y recomendaciones obtenidas en el trabajo.

Capítulo II

Estado del arte

Robótica

Es una rama que se dedica al diseño que combina distintas áreas del conocimiento y ciencias para el desarrollo de nuevos prototipos que buscan satisfacer necesidades específicas, por lo cual ha alcanzado un rol importante en nuestra sociedad, en gran parte por su papel fundamental en el desarrollo industrial (Gonzalez, 2017).

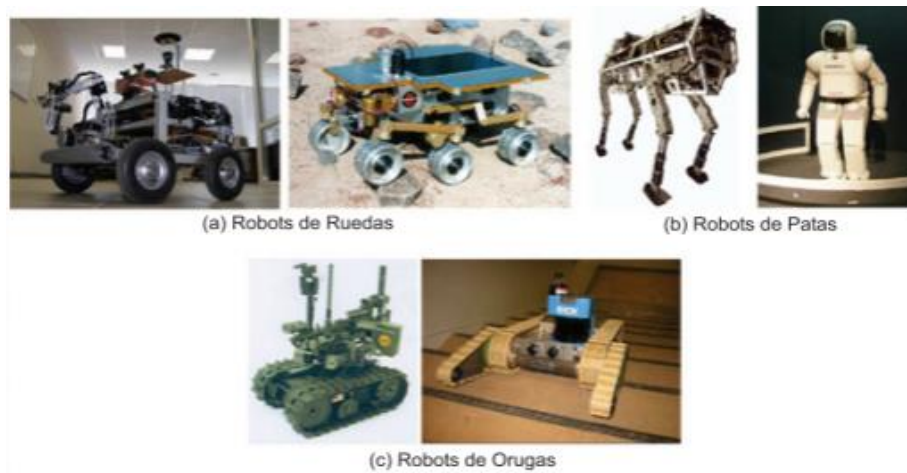
Se pueden resaltar 4 beneficios de los sistemas robotizados: aumento de la productividad, alta flexibilidad, excelente calidad y mejora de la seguridad. Como resultado, la robotización permite mejorar las condiciones de trabajo al sustituir tareas aflictivas por tareas con mejores condiciones. Pero, además, la irrupción de la automatización en los servicios y el ocio permite mejorar la calidad de vida de los ciudadanos (Arranz, y otros, 2006).

Robótica Móvil

Se define como un prototipo con partes mecánicas electrónicas y de control capaz de desplazarse sin estar sujeto físicamente a un solo punto. Posee sensores que permiten monitorear a cada momento su posición relativa a su punto de origen y a su punto de destino. Su desplazamiento es proporcionado mediante dispositivos de locomoción los cuales se observan en la Figura 7. (Barrientos Sotelo, García Sánchez, & Silva Ortigoza, 2007).

Figura 7.

Tipos de locomoción en un robot móvil.



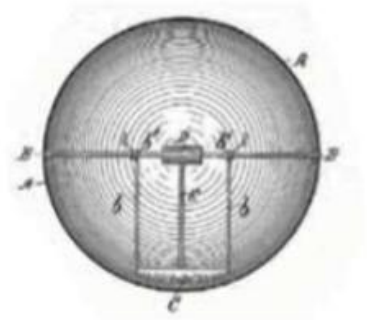
Nota: Figura obtenida de (Barrientos Sotelo, García Sánchez, & Silva Ortigoza, 2007).

Robot Esfera

Estos dispositivos tienen una historia que nace con JL Tale en 1893, quien patentó el primer diseño el cual se puede observar en la Figura 8 que internamente la esfera lleva un eje central, un contrapeso, un mecanismo de rotación y un resorte (Deepak Pokhrel, 2013).

Figura 8.

Primer Prototipo de esfera.



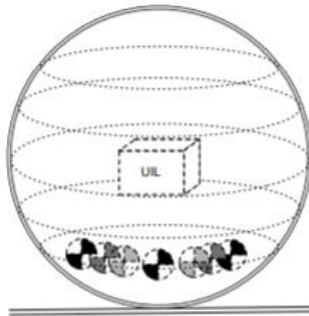
Nota: Figura obtenida de (Deepak Pokhrel, 2013).

Con el paso del tiempo se ha desarrollado nuevos prototipos de robot esfera y mecanismos de estabilidad que se han ido patentando continuamente.

Los robots esfera no se acoplan completamente a ninguno de los tipos de locomoción de la Figura 7 (Oruga, ruedas, extremidades o patas) el sistema de locomoción que utiliza la esfera para poder moverse es la inestabilidad de la misma, la cual se logra a través de la variación de la ubicación del centro de masa general de la misma como se observa en la siguiente ilustración (Vega, 2012).

Figura 9.

Unidad interna de locomoción (UIL).



Nota: Este tipo de sistema permite modificar la posición del centro de masa de la esfera para inducir movimiento de esta, Figura obtenida de (Vega, 2012).

- Los robots esfera presentan las siguientes características:
- Alta maniobrabilidad.
- Baja resistencia con pérdidas mínimas de energía por fricción.
- Poseen dos grados de libertad (atrás-adelante o izquierda-derecha).
- Rodamiento omnidireccional.
- La estructura esférica proporciona protección a los componentes electrónicos que se encuentran al interior del robot.

El torque y la tracción que puede alcanzar el robot dependerá del diámetro de la esfera, con una relación directamente proporcional entre el diámetro del robot y su torque, la relación mientras mayor sea permitirá superar obstáculos como piedras o terrenos irregulares.}

Centro de masa y centro de gravedad

El centro de gravedad es el punto de equilibrio respecto al cual las fuerzas que la gravedad ejerce sobre los diferentes puntos materiales que constituyen al cuerpo producen un momento resultante nulo, dicho centro no corresponde necesariamente a un punto material del cuerpo (Albornoz Salazar).

Para calcular el centro de gravedad de un cuerpo R.A Serway en su libro de física denota la siguiente formula:

$$\text{Ecuación 1. } x_{c.g.} = \frac{\sum m_i g_i x_i}{\sum m_i g_i} \text{ (Serway, 1991)}$$

Donde $x_{c.g.}$ representa la coordenada del centro de gravedad en el eje X; x_i , m_i y g_i representan la coordenada en x, la masa y la gravedad que afecta a cada partícula respectivamente. Las ecuaciones para encontrar las coordenadas en el eje Y, y en el eje Z del centro de gravedad serian iguales solo reemplazando x_i por y_i o z_i .

Con respecto al centro de masa es el punto en el que se concentra toda la masa del sistema por lo cual Serway denota la siguiente formula:

$$\text{Ecuación 2. } x_{c.m.} = \frac{\sum m_i x_i}{\sum m_i} \text{ (Serway, 1991)}$$

Donde $x_{c.m.}$ representa la coordenada del centro de masa en el eje X, con esto nos podemos dar cuenta que el centro de gravedad estará localizado en el centro de masa si es que la gravedad que actúa sobre el cuerpo es uniforme en todos los puntos. De modo que el término g_i en la Ecuación 1 se simplificara y se obtendría la Ecuación 2.

Clasificación de los robots esfera según su mecanismo interno de locomoción

Como se indicó anteriormente los robots esfera no se acoplan a los tipos de locomoción mostrados en la Figura 7, sino que induce el movimiento a través del cambio de posición del centro de masa mediante un sistema mecánico conocido como Unidad Interna de Locomoción (UIL). Existen diferentes UIL para los robots esféricos a continuación se explican los más comunes (Saeed Moazami, 2019).

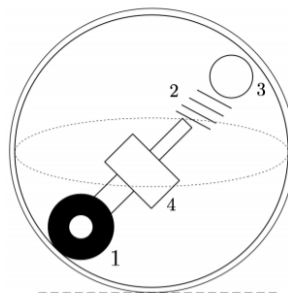
Cuerpo Central con muelle

El primer tipo consiste en un sistema con cuerpo exterior esférico, una UIL que se basa en un cuerpo central rígido que posee una rueda en cada extremo, la rueda actuada es controlada para brindar 2 grados de libertad, el de tracción y dirección. Actuando sobre la superficie interna de la estructura con forma esférica,

Para que la rueda actuada siempre este en contacto con el interior de la estructura se coloca un muelle a continuación del cuerpo central rígido y a su vez se instala una rueda pasiva al extremo diametral opuesto al de la rueda activa (Bariantos, 2014).

Figura 10.

Esquema de un robot esfera tipo cuerpo central con muelle (Bariantos, 2014).



Nota: Rueda activa (1), muelle (2), rueda pasiva (3), hardware de control (4), Figura obtenida de (Bariantos, 2014).

Ventajas:

- Simplicidad de implementación.

Desventajas:

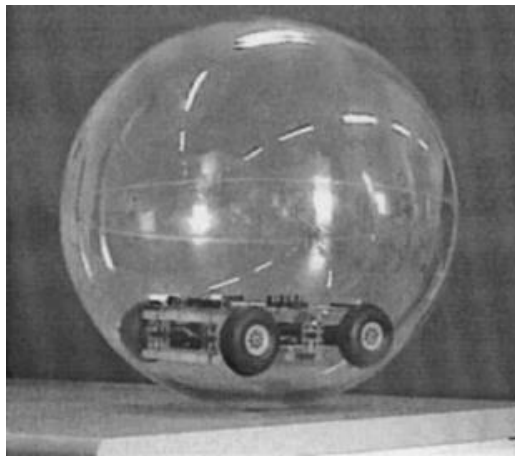
- Ineficiencia energética debido a la fricción de las ruedas con el interior de la estructura.

Coche interno o rueda de hámster

Otro tipo de esfera robótica se conoce como coche interno de locomoción o rueda de hámster consta de un vehículo con ruedas en el interior de la estructura esférica que funciona como UIL. El vehículo desplaza el centro de masa hacia si, cambiando su posición al desplazarse por el interior de la estructura (Suomela, 2005)

Figura 11.

Prototipo coche interno desarrollado por J. Alves y J. Días.



Nota: Figura obtenida de (Alves & Dias, 2003)

Ventajas:

- Facilidad de construcción debido a que el diseño reside en el vehículo.
- Ubicar la posición del centro de masa no representa problema alguno dada la ventaja de la estructura esférica en comparación de la masa del vehículo.
- Al tener el centro de masa alejado del centro de gravedad
- Dado que su centro de masa se encuentra distanciado del centro de gravedad, se da paso a que la estructura cruce obstáculos y suba pendientes.

Desventajas:

- Presenta pérdidas energéticas por fricción entre el vehículo y la parte interna de la estructura.
- Es sensible a perturbaciones ya que el vehículo no está asegurado al interior y podría conllevar a una pérdida del control del robot.

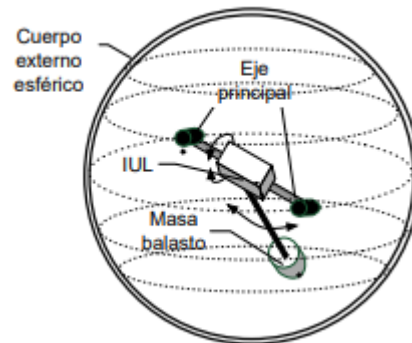
Masa Pendular con eje fijo

El tipo más común de UIL para esferas robóticas, es un sistema que consta de un eje fijo que pasa por el centro de gravedad y que sirve de soporte para un sistema pendular dentro de la estructura (Meenakshipriya, 2012). Dicho sistema posee una masa en el extremo que permite desplazar del centro de gravedad al centro de masa dado el movimiento de la estructura (Bariantos, 2014).

Este sistema posee dos grados de libertad: a) gira alrededor del eje fijo y, b) en sentido perpendicular del primero. La construcción de este tipo de UIL tiene una complejidad en que se fije el péndulo al centro geométrico de la esfera.

Figura 12.

Mecanismo interno de locomoción denominado masa pendular con eje fijo.



Nota: Figura obtenida de (Vega, 2012).

Ventajas:

- No presenta pérdida de energía por fricción entre la estructura y la UIL.
- Se asegura conocer la posición del centro de masa por el péndulo.

Masas Móviles

Este tipo de UIL cuenta con distintos ejes radiales que van desde el centro de gravedad hasta la pared interna de la estructura. En cada eje se dispone de masas que se desplazan a lo largo de los mismos, mediante el movimiento de dichas masas se busca modificar la posición del centro de masa del robot (H.Ghariblu, 2016).

Figura 13.

Mecanismo interno de locomoción de masas móviles.



Nota: Figura obtenida de (Vega, 2012).

Ventajas:

- Movimiento omnidireccional
- Facilidad de superar obstáculos debido a que las masas pueden desplazarse hasta los extremos de los ejes radiales.

Desventajas:

- Complejidad de construcción y de diseño debido al análisis dinámico de las masas sobre el sistema.
- Complejidad de maniobrabilidad.

Los prototipos mencionados únicamente fueron simulados y no presentaron implementación física que valide el grado de eficiencia del sistema. (Bariantos, 2014).

Aplicaciones

Según los elementos adicionales ya sean sensores, micrófonos, luces, cámaras, protectores o case herméticos, que posean los robots esfera pueden tener distintas aplicaciones como de reconocimiento, exploración, entretenimiento, etc.

Sphero

Es un robot esfera fabricado por Sphero empresa fundada en 2010 que se encarga de elaborar robots interactivos basados en herramientas de educación STEAM que busca incentivar a los niños en su camino por la ciencia. El robot puede ser controlado por medio de apps móviles en distintos sistemas operativos, se puede mover a una velocidad de hasta dos metros por segundo y es controlada por vía bluetooth.

Figura 14.

Sphero SPRK+.



Nota: Figura obtenida de (Sphero, s.f.)

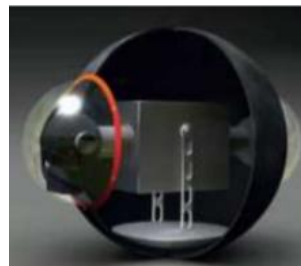
GroundBot

Utiliza un motor para dar vuelta a un péndulo mecanismo interno el cual a partir de su inercia y el centro de masa del prototipo permite el movimiento en la dirección lineal(Cañadas Betancourt & Nazate Burgos, 2012).

Posee dos cámaras laterales y sensores con fines de ser utilizado para labores de reconocimiento, exploración y vigilancia en determinadas locaciones como hogares, empresas, bases militares o aeropuertos.

Figura 15.

GroundBot.



Nota: Figura obtenida de (Cañadas Betancourt & Nazate Burgos, 2012)

Motores para el desplazamiento del robot

Servomotores

Un servomotor es un motor de corriente continua que tiene la capacidad de ser controlado en posición y es capaz de ubicarse en cualquier posición dentro de un rango de operación que generalmente es de 180°, manteniéndose estable en cualquier posición dentro de dicho rango. (Candelas Herías & Corrales Ramón, 2007).

Los servomotores disponen de tres cables de los cuales dos son de alimentación (positivo y negativo) que suministran un voltaje de 4.8 - 6V y un cable de control que

recibirá una señal PWM que le indicará que posición requiere el usuario. Se debe previamente establecer el rango de la señal PWM que equivale al rango de funcionamiento del servomotor es decir 0-180° generalmente para así evitar daños (Candelas Herías & Corrales Ramón, 2007).

Figura 16.

Servomotor Hitec HS-31.



Nota: Figura obtenida de (Cañadas Betancourt & Nazate Burgos, 2012)

Motor DC

Un motor DC es de los sistemas dinámicos más utilizados en las pruebas de algoritmos de control y es un dispositivo económico por lo cual se utiliza ampliamente en los campos de la robótica y la automatización (Rairán Antolines, Sierra Niño, & Iván, 2009).

Un motor DC funciona mediante la interacción entre una corriente eléctrica y un campo magnético, la fuerza generada por dicha interacción se aprovecha para hacer girar el eje del motor transformando la energía eléctrica en energía mecánica de rotación (García Haro, 2011).

Normalmente los motores DC se los puede encontrar de distintos tipos según su voltaje de funcionamiento y solo poseen dos cables de alimentación por lo que requieren

un control aparte utilizando sensores como encoder para estabilizar la velocidad de rotación del eje.

Figura 17.

Motor DC 12-36 V 3500 - 9000 RPM.



Nota: Figura obtenida de (Aliexpress, s.f.)

Capítulo III

Diseño del sistema mecatrónico

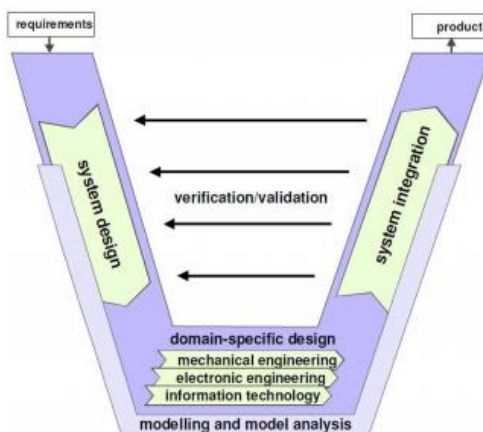
Introducción

En el capítulo 3 se presenta todos los análisis, diseños, esquemas y fundamentos matemáticos que se utilizaron para el desarrollo del sistema mecatrónico.

La metodología implementada en el presente trabajo de titulación se basa en la norma VDI2206 para el diseño de prototipos mecatrónicos, como se visualiza en la Figura 18, este modelo distribuye el diseño en 3 subcategorías principales, estudiarles y diseñarlas individualmente, para finalmente integrarlos en un solo componente, obteniendo como resultado un producto terminado, que cumpla con las especificaciones y objetivos planteados (Gausemeier, Frank, & Donoth, 2009)

Figura 18.

Norma VDI 2206 para el diseño de prototipos mecatrónicos



Nota: Tomado de (Gausemeier, Frank, & Donoth, 2009)

Identificación de subsistemas

Para el desarrollo del prototipo se dividió todo el conjunto en 3 subcategorías principales (mecánico, electrónico y control), con el objetivo de desarrollar correctamente cada uno de los componentes que los conforman e integrarlos finalmente en prototipo final, cada subcategoría tiene sus respectivas especificaciones a cumplir, y que se especificaran en las siguientes secciones.

Subsistema mecánico

Para el estudio y desarrollo del subsistema mecánico se plantearon requerimientos generales que el sistema debe cumplir, se los observan en la Tabla 1

Tabla 1.

Parámetros del Sistema Físico Mecánico.

ítem	Parametro
1	Desplazamiento en distintos terrenos
2	Peso del diseño debe ser ligero, no más 3 Kg
3	Velocidad de funcionamiento de 0.8 a 1 [m/s]
4	Distribución de elementos considerando el centro de masa
5	Fácil adquisición de materiales y partes
6	Fácil ensamble (modular)

Nota: Se considero el modelo esférico planteado en el Capítulo I.

Una vez que se determinan los requisitos de los subsistemas mecánicos, se correlacionan con los parámetros de medición para determinar hasta qué punto se cumple cada requisito.

Para ello, es necesario establecer diferentes indicadores. Pueden ser subjetivos o numéricos, según el grado de medición que se requiera. Además, también se les asigna un grado de importancia, que va de 1 a 5, donde 5 es Importancia máxima, como se muestra en la **Tabla 2.**

Parámetros de diseño del subsistema mecánico. Tabla 2 .

Tabla 2.

Parámetros de diseño del subsistema mecánico.

ítem	parámetro	variable	Importancia	Unidades
1	1,4	Velocidad constante	3	m/s
2	3,6	Costo	4	Dólares
3	1,2,5	Peso del Prototipo	5	Kg
4	1,2,5,7	Dimensiones de espesor mayor	3	mm
5	1,2	Aceleración máxima	4	m/s ²
6	5,7	Complejidad de estructura interna	5	Subjetivo

7	3,5,6	Tiempo de ensamble	3	Horas
---	-------	-----------------------	---	-------

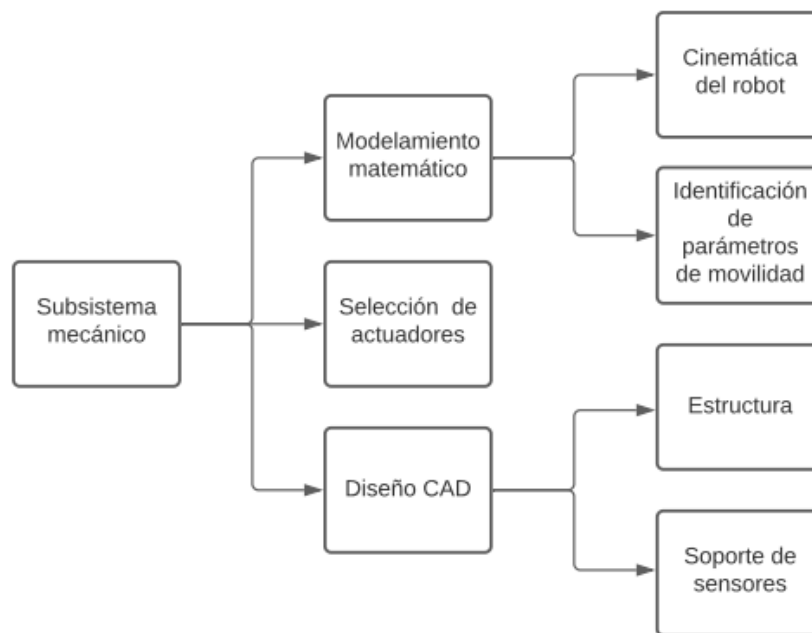
Nota: Se observa que el Peso total de la estructura y la complejidad del diseño de la estructura interna que transmitirá el movimiento a la esfera son las métricas que mayor influencia tienen para el diseño de la parte mecánico.

Componentes del subsistema mecánico.

Para un mejor desarrollo se ha subdividido el subsistema mecánico, tal y como se observa en la Figura 19, para un mejor análisis de cada uno de sus componentes.

Figura 19.

Componentes del subsistema mecánico.



Nota: Diagrama realizado en Lucidchart, versión gratuita.

Selección del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.

En esta sección se detallarán todos los criterios y análisis respectivos, para la elección del sistema de locomoción y transmisión de movimiento basados en los parámetros definidos en secciones previas, para cada métrica un valor o porcentaje ha sido establecido, como se observa en las Tabla 3, Tabla 4, Tabla 5.

Tabla 3.

Criterios de selección para la configuración del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.

	Costo	Ensamblaje	Complejidad	E+1	Ponderación
Costo	--	0.3	0.4	1.7	0.28
Ensamblaje	0.7	--	0.5	2.2	0.36
Complejidad	0.6	0.5	--	2.1	0.35
			TOTAL	6	1

Nota: La métrica relacionada al ensamble del prototipo es el principal en la selección de Matriz de decisión para la selección de la configuración del sistema de locomoción, pero el parámetro “complejidad del sistema de locomoción” también afecta significativamente.

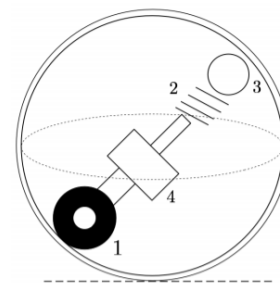
Tabla 4.

Conceptos para selección de la configuración del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.

Concepto	Descripción	Características	Imagen
----------	-------------	-----------------	--------

1 Cuerpo Central con muelle

- Cuerpo central rígido que posee una rueda en cada extremo.
- La rueda es controlada para brindar 2 grados de libertad, el de tracción y dirección.
- Simplicidad de implementación
- Ineficiencia energética debido a la fricción de las ruedas con el interior de la estructura.



2 Coche interno

- Consta de un vehículo con ruedas en el interior de la estructura esférica.
- La posición del centro de masa es sencilla de ubicar dado que la masa de la estructura esférica es despreciable en comparación de la masa del vehículo.
- Al tener el centro de masa alejado del centro de gravedad



permite que la estructura cruce obstáculos y suba pendientes.

- Presenta pérdidas energéticas por fricción entre el vehículo y la parte interna de la estructura.

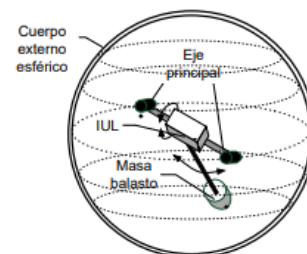
- Dificil adaptación del vehículo a la esfera.

-
- Consta de un eje fijo que pasa por el centro de gravedad y que sirve de soporte para un sistema pendular dentro de la estructura movimiento.

- Posee una masa en el extremo que permite desplazar el centro de masa fuera del centro de gravedad de la esfera induciendo el movimiento de la estructura.

- No presenta pérdida de energía por fricción entre la estructura.

- Masa Pendular con eje fijo
- Se asegura conocer la posición del centro de masa por el péndulo.
 - Complejidad para cuadrar el péndulo



Nota: La tabla muestra cada concepto y todas sus características detalladas para que pueda ser analizado en la matriz de decisión de concepto.

Tabla 5.

Matriz de selección para la configuración del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.

Concepto	Costo			Ensamblaje			Complejidad			Total
	P	Cr	T	P	Cr	T	P	Cr	T	
1	0.28	3	0.84	0.36	2	0.72	0.35	3	1.05	2.61
2	0.28	3	0.84	0.36	3	1.08	0.35	4	1.4	3.32
3	0.28	4	1.12	0.36	4	1.44	0.35	3	1.05	3.61

Al analizar la Tabla 5, se determina que el concepto 3 (Masa Pendular con eje fijo) cumple con los requerimientos planteados, con un costo moderado de implementación, un ensamblaje bastante sencillo en comparación a los otros modelos, pero considerando la complejidad, sobre todo en el diseño del péndulo, por lo que será utilizado como el sistema de locomoción y transmisión de movimiento hacia la esfera.

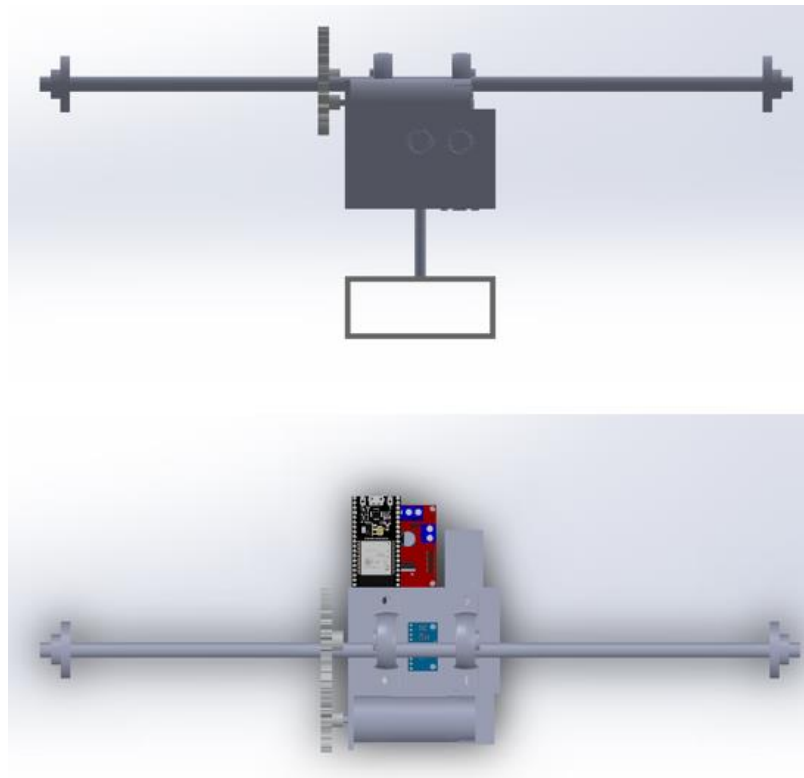
Modelado del prototipo.

Una vez determinado el sistema de locomoción y transmisión de movimiento, se diseñó el prototipado del mecanismo interno, encargado de sostener tanto al eje fijo, el

péndulo de control de centro de masa, actuadores, y a todos los elementos electrónicos, basándonos en el modelo “Masa Pendular con eje fijo”, se realizó el siguiente prototipo que se observa en las Figura 20, cabe recalcar que algunos componentes electrónicos fueron escogidos en las siguientes secciones de estudio y se los detallara más adelante.

Figura 20.

Prototipo del modelo Masa Pendular con eje fijo.



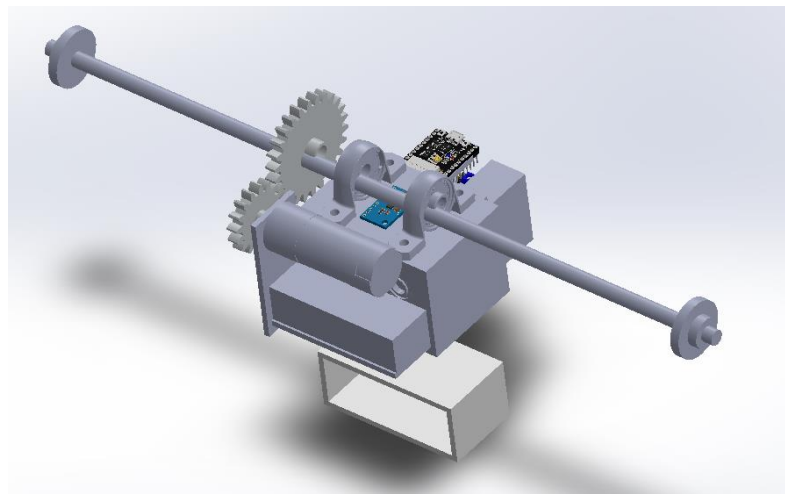
Nota: CAD realizado en SolidWorks, versión estudiantil.

El diseño cuenta con un tren de engranajes los cuales transmitirán el movimiento efectuado por el actuador, directamente hacia el eje fijo, este a su vez, lo transmitirá a la esfera mediante acoples mecánicos situados en los extremos del eje, permitiendo la

rotación de la esfera, tomando en cuenta que el eje se apoya dos rodamientos, el sistema interno no se vera afectado por este movimiento, permaneciendo en su lugar, tal y como se observa en la Figura 21.

Figura 21.

CAD del sistema de locomoción y transmisión de movimiento.

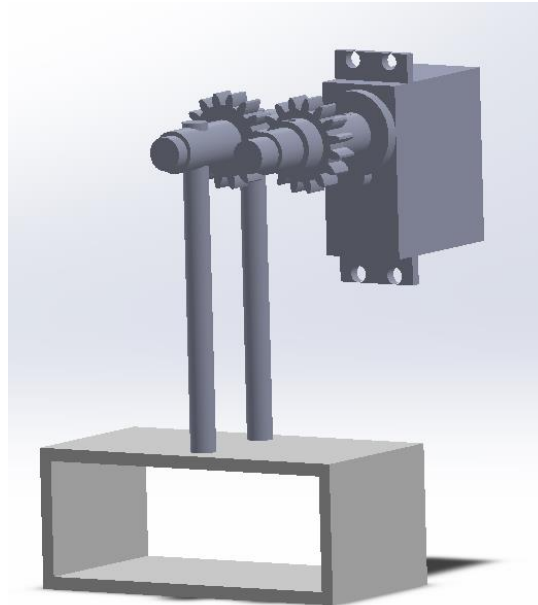


Nota: CAD realizado en SolidWorks, versión estudiantil.

En cuanto se refiere al control de masa del sistema, se colocó un péndulo, que llevara la masa adicional para la corrección de centro de masa de la esfera, el péndulo estará controlado por un actuador (servomotor), que se encargara de todo el control PID, para que la esfera no cambio su dirección y se mantenga estable al momento de realizar su desplazamiento hacia adelante, todo mediante el tren de engranajes que transmitirá las acciones del servomotor, el diseño se lo puedo visualizar en la Figura 22

Figura 22.

Sistema de transmisión del péndulo.



Nota: CAD realizado en SolidWorks, versión estudiantil.

Diseño de la esfera del modelo

Para el diseño de la esfera se requirió utilizar un diámetro externo y un espesor conocidos basados en trabajos previos en los que la esfera fue adquirida comercialmente como los trabajos de (Cañadas Betancourt & Nazate Burgos, 2012) y (Pérez Camejo, 2017). En ambos trabajos se utilizó una esfera de 35 cm de diámetro externo promedio y entre 1 a 4 mm de espesor por lo que se escogió un promedio de 2.5 mm.

Se utilizó el software SOLIDWORKS 2019 para calcular la masa de la esfera con distintos materiales (PLA¹ y acrílico), y se procedió a la selección de conceptos para

¹ Ácido Poli láctico

determinar que material es el más adecuado para la esfera, basándonos en los requerimientos generales antes señalados, tal y como se observa en la Tabla 6,

Tabla 7 y

Tabla 8


Tabla 6.

Criterios de selección de material de la esfera

	Costo	Resistencia	Peso	E+1	Ponderación
Costo	--	0.3	0.2	1.5	0.25
Resistencia	0.7	--	0.4	2.1	0.35
Peso	0.7	0.6	--	2.4	0.4
			TOTAL	6	1

Tabla 7.

Matriz de Características y Propiedades de la Estructura Externa del Robot Esfera.

Concepto	Material	Propiedades	Ilustración
1	PLA (Ácido poli láctico)	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad: 1.21 - 1.25 [g/cm³] • Esfuerzo a la tracción: 21 - 60 [MPa] • Módulo de elasticidad: 0.35 - 3.5 [GPa] • Peso: 601.40 gramos • Costo: 20\$ el kg 	

		<ul style="list-style-type: none"> • Se lo moldea a través de impresión 3D • Frágil frente a golpes y caídas
2	Acrílico	<ul style="list-style-type: none"> • Densidad: 1.20 [g/cm³] • Esfuerzo a la tracción: 120 [MPa] • Módulo de elasticidad: 3 [GPa] • Peso: 577.35 gramos • Costo: 60\$ el kg • Se lo moldea por termoformado • Resistente a golpes y caídas

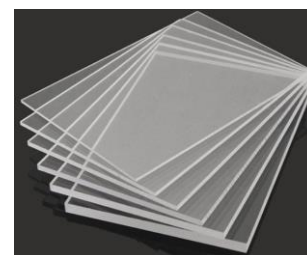


Tabla 8.

Matriz de decisión para la selección de material de la esfera

Concepto	Costo			Resistencia			Peso			Total
	P	Cr	T	P	Cr	T	P	Cr	T	
1	0.25	5	1.25	0.35	3	1.05	0.4	3	1.2	3.5
2	0.25	2	0.5	0.35	4	1.4	0.4	4	1.6	3.6

Se observa que el PLA, a pesar de ser un material mucho mas barato y manejable que el Acrílico, las propiedades físicas de este último, principalmente de dureza, resistencia y ser mas ligero, lo hacen el material más idóneo para la esfera del sistema.

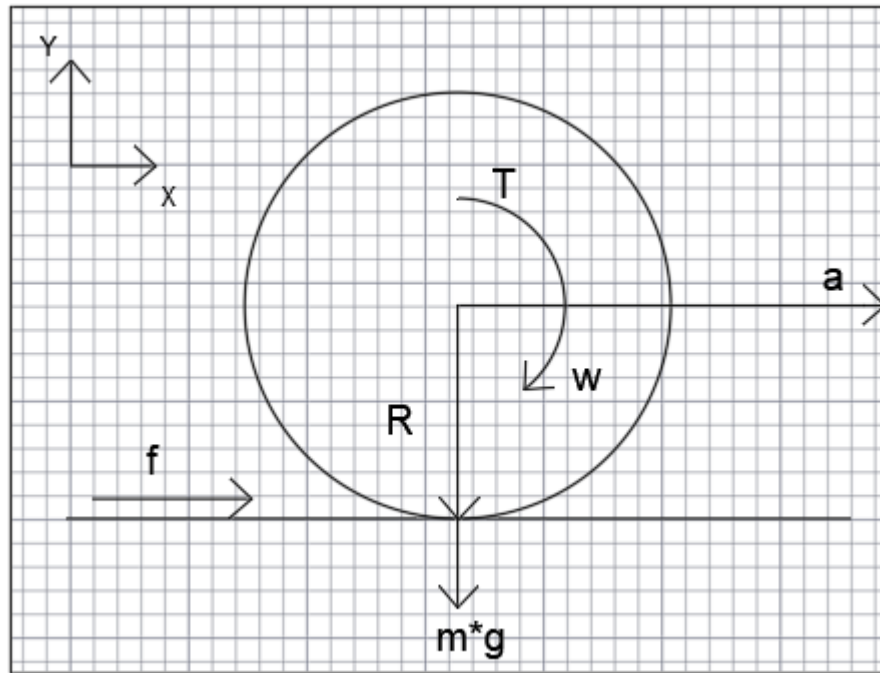
Dimensionamiento del actuador

Para escoger los motores adecuados a utilizar en nuestro robot necesitamos realizar un diseño mecánico previo para conocer la masa del dispositivo esto se lo realiza en la sección Corrección del centro de masa del prototipo, con un total de 1102 gramos, a esto se le debe añadir 577.25 gramos del peso de la esfera, para una masa total de 1682.25 gramos de peso total del mecanismo, cumpliendo con el requerimiento de un peso máximo del sistema de 3kg.

Por lo que para el cálculo del actuador se debe cumplir el requisito de mover mínimo un peso de 3kg y a una velocidad de 0.8 a 1 [m/s], para esto se realiza un diagrama de cuerpo libre del sistema como se observa en la Figura 23.

Figura 23.

Diagrama de cuerpo libre del sistema.



Nota: T: torque, w: velocidad angular, a: aceleración, R: radio de la esfera, m: masa, g: gravedad.

En el diagrama de cuerpo libre se debe tomar en cuenta que la velocidad angular del motor va a ser la misma que se transmite a la esfera, siempre y cuando el tren de engranajes se mantenga en una relación de 1 a 1, para el análisis del torque necesario del motor se empieza el estudio con la sumatoria de fuerzas en el eje x como se observa en la siguiente ecuación, considerando que la fricción (f) y el peso del sistema (W) son aquellas que ejercen la resistencia al movimiento, dando como resultado la ecuación (4).

$$\sum F_x = m * a$$

$$\sum F_x = f - W = m * a \quad (4)$$

Para el calculo del torque utilizamos la ecuación (5)

$$T = f * R \quad (5)$$

Despejamos (f) en la ecuación (4) y la reemplazamos en la ecuación (5)

$$m * a = \frac{T}{R} - W \quad (6)$$

Sabiendo que W es igual a

$$W_x = m * g \quad (7)$$

Reemplazamos (7) en (6), y despejando el torque T obteniendo la ecuación (8):

$$T = m * R * (a + g) \quad (8)$$

Se debe considerar las pérdidas del sistema, ya sea por rozamiento o fricciones, es decir se analizando la eficiencia (e), obteniendo la ecuación mostrada en (9).

$$T_{motor} = \frac{100}{e} * m * R * (a + g) \quad (9)$$

Para el torque del motor deben ser considerados los parámetros mostrados:

- Peso del Prototipo 1.682 kg.
- Radio de la esfera (0.175 m).
- Eficiencia 85%.
- Aceleración 0.5 m/s².

Reemplazamos lo valores en la ecuación (9), y obtenemos el valor del torque del motor:

$$T_{motor} = \frac{100}{85} * 1.682 [Kg] * 0.175[m] * (0.5[m/s^2] + 9.8[m/s^2])$$

$$T_{motor} = 3.49[Nm]$$

Con el torque del motor calculado, se debe considerar conseguir un torque mayor para evitar perdida de eficiencia debido a perturbaciones externas, con este valor se calcula la potencia requerida del motor con la siguiente formula:

$$P = T * \omega \quad (10)$$

Necesitamos calcular la velocidad angular del sistema, como se mencionó la misma velocidad angular se transmite del motor a la rotación de la esfera, y la podemos calcular con la formula, con la velocidad que se especificó en los requerimientos (11)

$$v = R * \omega \quad (11)$$

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{1.0 [m/s]}{0.175[m]}$$

$$\omega = 5.71[rad/s] = 54,52 [rpm]$$

Reemplazamos la velocidad angular en la formula (10) y hallamos el valor de potencia requerido

$$P = 3.49[Nm] * 5.71[rad/s]$$

$$P = 19.92[W]$$

Selección del actuador.

Una vez determinado los parámetros que debe cumplir el actuador, se procede a escoger el que mejor se adecue a estos requerimientos, para ellos utilizaremos la selección de conceptos como se observa en la Tabla 9, Tabla 10, Tabla 11.


Tabla 9.

Parámetros y Ponderaciones para la Selección del Actuador.

	Tamaño	Coste	Aplicación	E+1	Ponderación
Tamaño	--	0.5	0.3	1.8	0.3
Coste	0.5	--	0.5	2	0.34
Aplicación	0.7	0.5	--	2.2	0.36
TOTAL				6	1

Tabla 10.

Matriz de Propiedades y Características para Selección de Actuadores.

Item	Actuador	Propiedades	Ilustración
1	Servomotor	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de funcionamiento 12-24 V • Engranajes, cajas de cambios de metal de alta calidad • Motor de alto torque • Alto costo • Alta Potencia 	
		<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de trabajo 12V • Encoder bifásico disponible 	


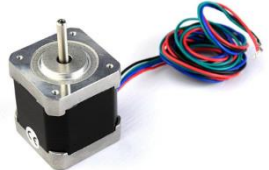
2	Motor DC con caja reductora	<ul style="list-style-type: none">• Alto torque con bajo consumo de corriente• Engranajes de alta calidad en la caja de cambios• Tamaño pequeño• Adecuado para aplicaciones que requieren una precisión media• Potencia baja• Costo medio• Requiere un diseño de acoplamiento con ruedas	
3	Motor a pasos	<ul style="list-style-type: none">• Voltaje de funcionamiento 5-12 V• Motor de alta potencia• Ideal para proyectos que requieren un mecanismo de movimiento muy preciso• Precio muy alto• Rendimiento deficiente de la interferencia de carga• Requiere un diseño de acoplamiento para ser utilizado con ruedas motrices• Control complejo• Alta Potencia	

Tabla 11.

Ponderaciones y Criterios de la Selección de Actuadores.

Concepto	Tamaño			Coste			Aplicación			Total
	P	Cr	T	P	Cr	T	P	Cr	T	
1	0.3	2	0.6	0.34	2	0.68	0.36	2	0.72	2
2	0.3	4	1.2	0.34	3	1.02	0.36	5	1.8	4.02
3	0.3	2	0.6	0.34	2	0.68	0.36	3	1.08	2.36

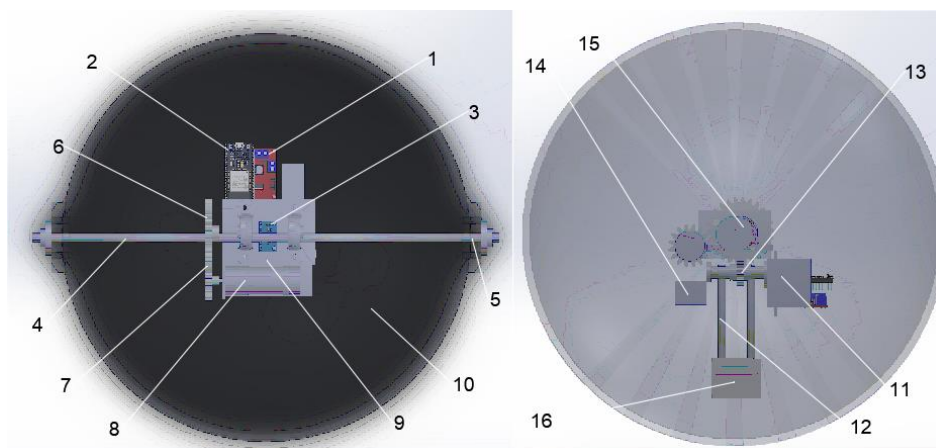
Se observo una clara diferencia entre el motor DC con caja reductora, debido a los requerimientos que debe cumplir el actuador, en especial por la baja potencia y el alto torque que debe transmitir, además de ser de un tamaño pequeño, y de poco peso, afecta levemente al diseño del prototipo y lo hace muy fácil de adaptar, por lo que es el actuador óptimo para el diseño.

Diseño CAD y distribución de los elementos.

En esta sección se muestra el diseño final del prototipo con cada uno de sus elementos colocados dentro del mismo, así como ya incorporados dentro de la esfera como se observa en la Figura 24, se ha considerado como punto importante conseguir un equilibrio basado en el peso de cada uno de los elementos, procurando que se encuentre lo más centrado posible con el centro de masa de la esfera, tema que se estudiara mas adelante,

Figura 24.

Distribución de cada elemento del sistema.



Nota: En la figura de la izquierda se ocultaron algunos elementos para visualizar mejor los componentes ocultos.

Tabla 12.

Tabla de distribución de cada componente del sistema.

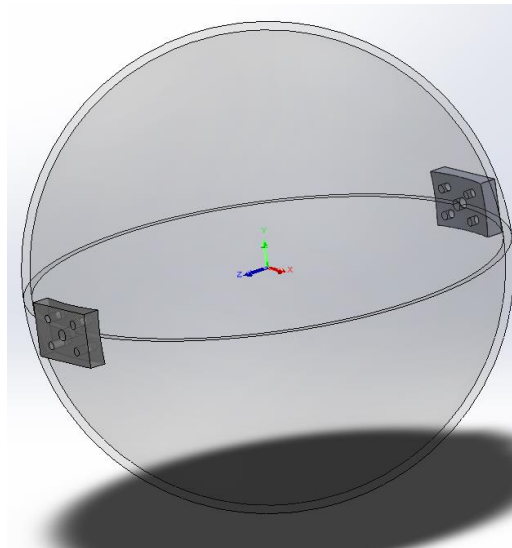
Ítem	Descripción	Cantidad
1	Puente H L298	1
2	Tarjeta ESP32	1
3	Tarjeta IMU	1
4	Eje fijo	1
5	Acople eje-esfera	2
6	Engrane 12 dientes	1
7	Engrane 24 dientes	1
8	Motor DC 12-36 V	1
9	Estructura de soporte	1
10	Esfera	1
11	Servomotor	1
12	Ejes de la porta pesas	2
13	Tren de engranajes de la porta pesas	1
14	Batería Lipo 12 V	1
15	Porta rodamientos	2
16	Porta pesas	1

Corrección del centro de masa del prototipo

Para corregir el centro de masa del sistema, y calcular la masa total que debe llevar el prototipo es necesario ubicar un punto llamado centro de masa dentro de la esfera, que nos sirva como referencia para determinar el centro de masa total del sistema, para esto se utilizó el software SolidWorks como soporte, tal como se observa en la Figura 25, el centro de masa de la esfera se encuentra en las coordenadas 0, 0, 0 de los ejes x, y, z, respectivamente, y se utilizara ese punto como referencia para los demás elementos.

Figura 25.

Centro de masa de la esfera.



Nota: CAD realizado en el software SolidWorks, versión estudiantil.

Se debe considerar que cada uno de los elementos afecta directamente al centro de masa del sistema, debido a su peso, para determinar las coordenadas del centro de masa en cada eje x, y, z, utilizamos la siguiente ecuación.

$$x(mm) = \frac{\sum xm}{\sum m} \quad (12)$$

$$y(mm) = \frac{\sum ym}{\sum m} \quad (13)$$

$$z(mm) = \frac{\sum zm}{\sum m} \quad (14)$$

Donde $\sum m$ representa la masa total de todas las partículas del sistema y $\sum xm$, $\sum ym$, $\sum zm$, representan las coordenadas del centro de masa de cada partícula del sistema, con respecto al centro de masa de la esfera determinado anteriormente, con el soporte del software SolidWorks, se pudo determinar todas estas coordenadas, y se las observa en la Tabla 13.

Tabla 13.

Coordenadas de centro de masa de todos los elementos del sistema.

Elemento	Masa(g)	x(mm)	y(mm)	z(mm)
Motor DC 12-36 V	30	-6.47	18.26	109.5
Estructura de soporte	150	-3.41	-11.12	69.73
Tarjeta IMU	5	-1.71	18.27	71.27
Puente H L298	10	-15.99	-25.48	19.61
Tarjeta ESP32	12	-26.31	.8.41	17.85
Engrane 12 dientes	40	-52.34	18.26	109.5
Engrane 24 dientes	80	-52.50	30.52	68.00
Servomotor	25	19.82	-12.14	28.51
Engranajes de servomotor	10	19.82	-3.48	72.46
Batería Lipo 12V	120	-1.18	-20.48	108.93
Porta pesas	50	-1.18	-91.08	71.00
Contrapeso	500	-1.18	-91.08	71.00
Eje fijo	60	-3.24	27.79	72.89
Varilla roscada izquierda	5	-1.18	-37.48	83.00
Varilla roscada derecha	5	-1.18	37.48	59.00
Total	1102	-128.63	-141.76	1032.25

En la tabla anterior también se determinó el peso de todos los elementos, aproximadamente 500 gramos, por lo que se decidió colocar un contra peso del mismo valor (500 gramos), para equilibrar los centros de masa al momento en el que la esfera se encuentre en movimiento y esta no pierda el equilibrio.

Una vez determinados todas coordenadas x , y , z , de los centros de masa de cada una de las partículas del sistema y su sumatoria $\sum xm$, $\sum ym$, $\sum zm$, procedemos a reemplazarlas en las ecuaciones (12)(13)(14).

$$x(mm) = \frac{-128.63}{1102} = -0.116 \text{ mm}$$

$$y(mm) = \frac{-141.76}{1102} = -0.1286 \text{ mm}$$

$$z(mm) = \frac{1032.25}{1102} = 0.936 \text{ mm}$$

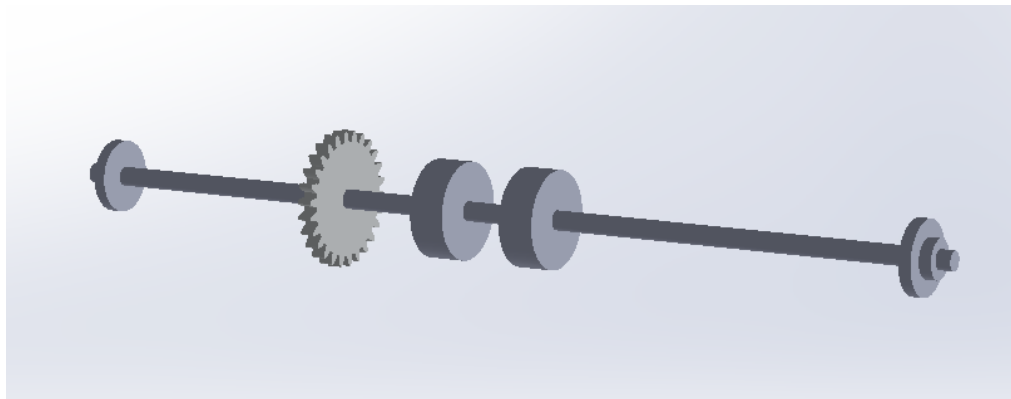
Como se observa las coordenadas del centro de masa del sistema, se encuentran desplazadas de manera casi imperceptible del centro de masa de la esfera, lo cual indica la correcta distribución de los elementos y del peso de 500 gramos, garantizando equilibrio y estabilidad.

Análisis de cargas y esfuerzos.

Una vez determinado los materiales, los componentes y su respectiva distribución dentro del sistema, es necesario realizar un estudio de cargas y esfuerzos para asegurar que el prototipo no tenga ningún defecto cuando trabaje en condiciones extremas, es decir se refiere al esfuerzo máximo a la que esta sometido el eje fijo de la esfera, así como los desplazamientos unitarios que puedan ocurrir, para ello se ubicaron 2 pesos representando a la masa total de la estructura interna, y ubicados en los 2 puntos de apoyos del eje (porta rodamientos), también se ubica el engrane, encargado de transmitir una carga de torsión al eje, y los acoples fijos de la esfera, como se observa en la Figura 26, también se colocaron las respectivas cargas en el eje y sus puntos de apoyo como se observa en la Figura 27.

Figura 26.

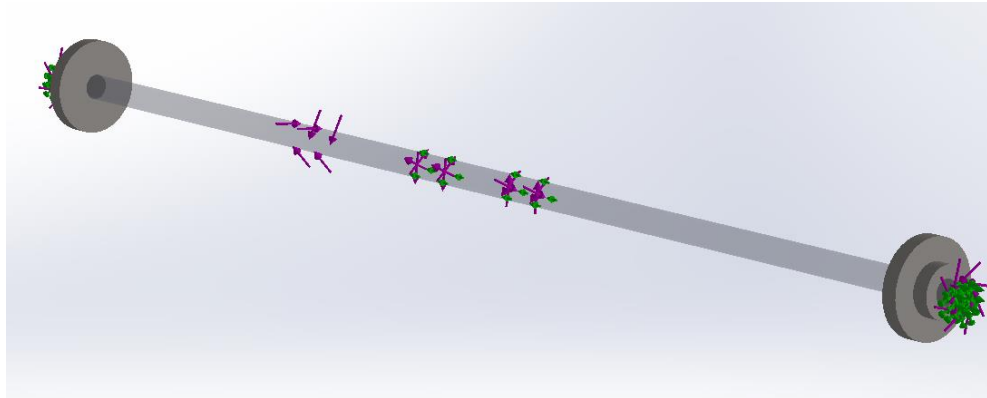
Cargas representativas en el eje fijo de la esfera.



Nota: CAD realizado en el software SolidWorks, versión estudiantil.

Figura 27.

Representación de cargas y apoyos en el eje fijo de la esfera.

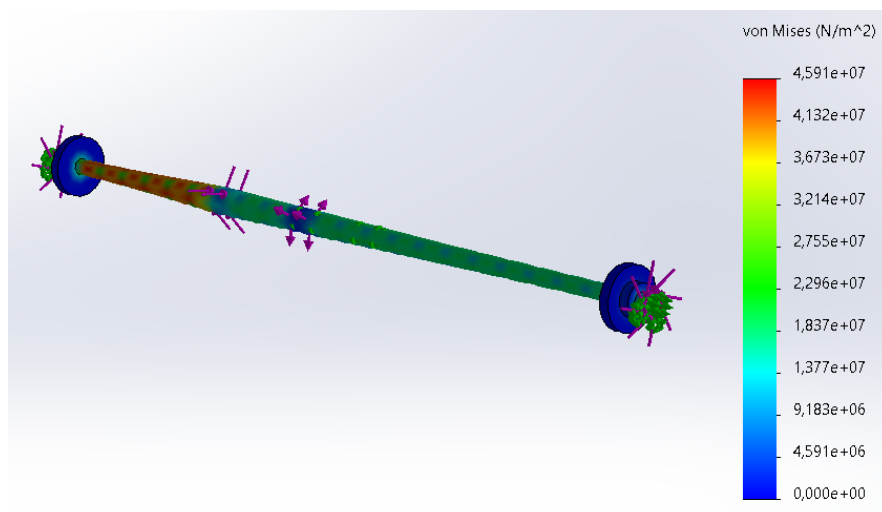


Nota: CAD realizado en el software SolidWorks, versión estudiantil.

Se realizó la simulación en el software SolidWorks, donde podemos observar los resultados en la Figura 28, basándonos en esta gráfica se determinó el esfuerzo máximo presente en el eje fijo es de 41.32 MPa, el valor obtenido es inferior al SUT del Acero 1020 que es 420 MPa, adicionalmente en la Figura 29 se observa que se produce un desplazamiento máximo de 0.04337 mm en el eje fijo.

Figura 28.

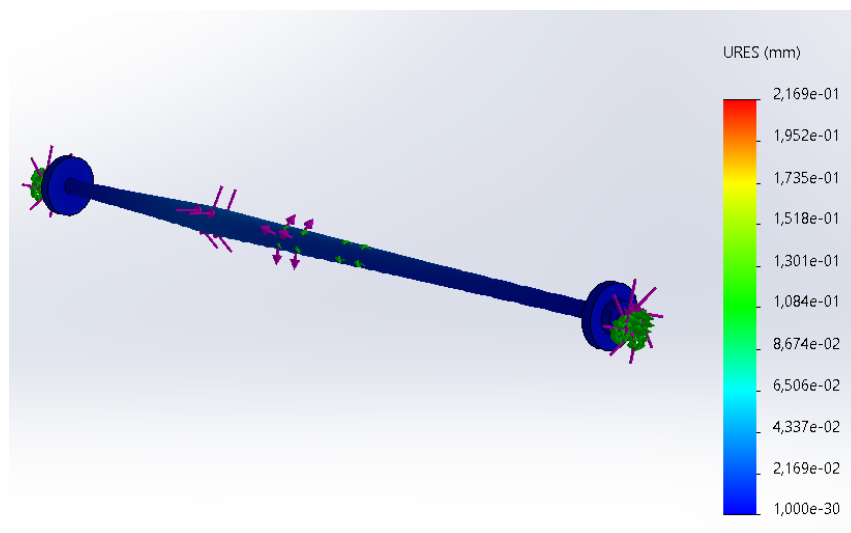
Simulación de análisis de esfuerzo de Von Mises



Nota: CAD realizado en el software SolidWorks, versión estudiantil.

Figura 29.

Desplazamientos máximos del eje fijo.

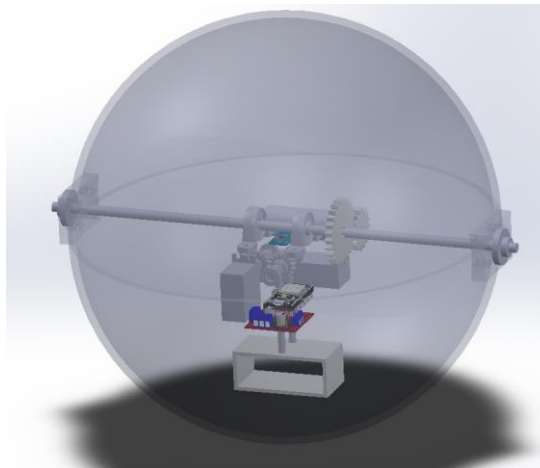


Nota: CAD realizado en el software SolidWorks, versión estudiantil.

Finalmente se observa en la Figura 30, el modelo final del prototipo, cumpliendo con todos los requerimientos planteados al inicio de la sección.

Figura 30.

Prototipo final del subsistema mecánico.



Nota: CAD realizado en el software SolidWorks, versión estudiantil.

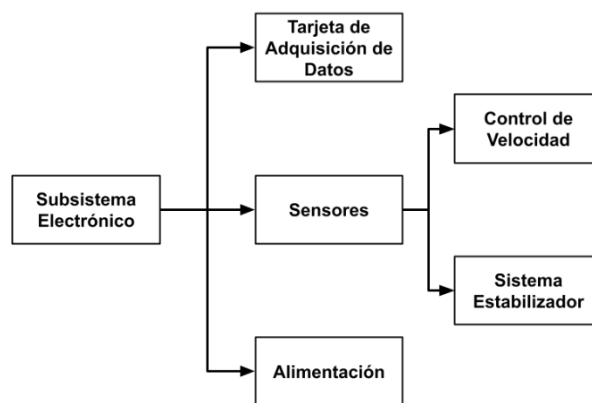
Subsistema Electrónico

Componentes del subsistema electrónico.

Con el objetivo de enfocar de mejor forma el subsistema electrónico se centrará el desarrollo en función de lo que se muestra en la **Error! Reference source not found.**

Figura 31.

Componentes del subsistema mecánico.




Selección de Sensores para Control de Velocidad.

Con el fin de tener un sistema que cumpla con un movimiento constante en velocidad y que evite el desplazamiento sin movimientos bruscos se propone un sistema de control de la variable mencionada. Para el modelamiento del controlador de velocidad es indispensable tener la medición de dicho parámetros el cual se llevara a cabo a partir del encoder que tiene incorporado el motor que fue seleccionado a partir de la Tabla 9,

Tabla 10, Tabla 11. El encoder seleccionado cuenta con las especificaciones técnicas que se muestran en la Tabla 14

Tabla 14.

Especificaciones Técnicas Encoder


Concepto	Descripción	Características	Imagen
1	Encoder de Efecto Hall	<ul style="list-style-type: none"> Voltaje de funcionamiento 3.5-20 V Corriente de alimentación 10 mA 48 CPR Sensor Magnético 	

Selección de Sensores para Sistema Estabilizador.

Por otro lado, para el funcionamiento correcto en la movilidad del robot esfera es necesario establecer un control en cuanto al parámetro de estabilidad relacionado directamente con el ángulo de giro respecto al eje y (pitch). Es necesario conocer el parámetro mencionado pues influirá en la trayectoria del robot generando variación y errores. Con el fin de obtener la variación se procede a incluir en el sistema una Unidad Inercial IMU en este caso la MPU 6050 que cuenta con las especificaciones técnicas que se muestran en la

Tabla 15.

Especificaciones Técnicas Unidad Inercial

Concepto	Descripción	Características	Imagen
1	MPU 6050	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de funcionamiento 2.375-3.46 V • Comunicación I2C • Acelerómetro 3 Ejes • Giroscopio 3 Ejes • Corriente de Funcionamiento 4 mA 	

Selección de Tarjeta de Adquisición de Datos.

Para la selección de la tarjeta de adquisición de Datos hay que tomar en cuenta que como base debe contar con los siguientes requerimientos que se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16.


Requerimientos de Selección de DAQ

Requerimientos
2 Entradas Digitales
Comunicación I2C
2 Salidas Digitales
2 Salidas PWM
Bajo Costo
Tamaño Pequeño
Procesamiento Medio
Comunicación Inalámbrica

En base a las tarjetas existentes en el mercado se plantea la siguiente matriz de selección de concepto como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17.

Opciones de DAQ para la Aplicación

Concepto	Descripción	Características	Imagen
1	Arduino Nano	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de alimentación 5-7 V • 8 Pines Analógicos • 14 Pines Digitales • 5 Pines PWM • Tamaño Pequeño • Costo: Bajo • Procesamiento: Limitado 	
2	ESP32	<ul style="list-style-type: none"> • Voltaje de alimentación 5 V • 24 Pines Digitales • 24 Pines Analógicos- PWM • Comunicación Wifi- Bluetooth • Tamaño pequeño • Costo Bajo 	

-
- Comunicación I2C
 - Procesamiento Medio



-
- Voltaje de funcionamiento 5V
 - 40 Pines Digitales
 - 40 Pines Analógicos
 - Comunicación Wifi-Bluetooth

3 Raspberry Pi
3B+

- Comunicación I2C
- Tamaño: Grande
- Costo: Medio-Alto
- Procesamiento: Alto



En base a los requerimientos mostrados en Tabla 16 y comparándolos con los conceptos generados en la Tabla 17 se analiza y se selecciona la opción más conveniente como se muestra en la Tabla 18

Tabla 18.

Matriz de Selección de DAQ para Robot Esfera

Concepto	Tamaño			Coste			Aplicación			Total
	P	Cr	T	P	Cr	T	P	Cr	T	
1	0.3	2	0.6	0.34	2	0.68	0.36	2	0.72	1.96
2	0.3	4	1.2	0.34	3	1.02	0.36	5	1.8	3.77
3	0.3	2	0.6	0.34	2	0.68	0.36	3	1.08	3.25

Para la presente aplicación se ha seleccionado la tarjeta ESP32 para llevar a cabo el proceso de adquisición de datos y el control del robot esfera ya que cumple con todos los requerimientos solicitados, por otro lado, la segunda opción fue la raspberry pi 3B+ que cumplía con los requerimientos, sin embargo, por su costo alto y su tamaño no puede ser aplicado de forma satisfactoria.

Selección de Alimentación.

Concepto	Consumo de Corriente [mA]
Esp32	70
L298N	40
MPU	3.9
Servo	100
Motor DC	2000

$$I_{Esfera} = 70 + 40 + 3.9 + 100 + 2000$$

$$I_{Esfera} = 2213.9 [mA]$$

Posterior al análisis de la corriente se busca analizar la capacidad que debe tener la lipo para satisfacer el tiempo de funcionamiento continuo de la tesis será de 1 hora

$$Bateria = 2213.9 * 1 = 2213.9 mAh$$

Y a la vez se analiza que el voltaje de alimentación que será de 12 [V] con lo cual la lipo seleccionada será la que se muestra en la **Error! Reference source not found.**, que es una lipo de 3S con una capacidad de 2200 mAh que satisface la alimentación para el correcto funcionamiento del robot.

Figura 32.

Fuente de Alimentación Batería Lipo 3C 2200 mAh.

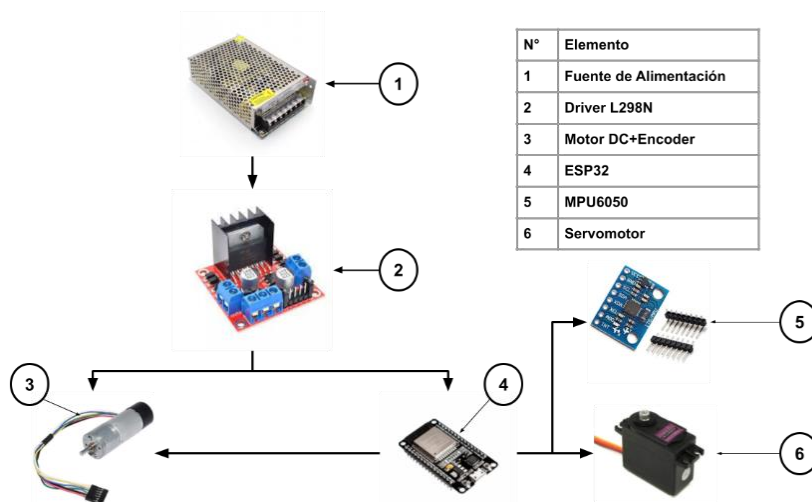


Finalmente, con todos los componentes seleccionados se llega a la integración del subsistema electrónico cuyo funcionamiento se observa en la **Error! Reference source not found.** y con mayor detalle las conexiones se muestran en el Anexo... El funcionamiento interno del subsistema electrónico consiste en la

alimentación a través de una batería lipo la cual se conecta al driver L298N que energiza tanto al motor DC como a la ESP32, por otro lado, la tarjeta se encarga de la adquisición de datos tanto del encoder del motor como de la MPU 6050 y a la vez controla el movimiento del motor DC y del servomotor.

Figura 33.

Integración del Subsistema Electrónico.



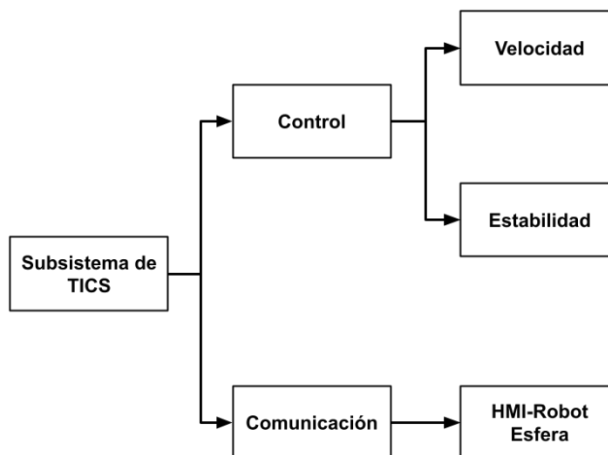
Subsistema Tics

Componentes del subsistema de Tics.

En las dos secciones previas referentes al subsistema mecánico y electrónico, se ha dado la base de los componentes físicos y diseño tangible del robot esfera, sin embargo, es necesaria la implementación de los algoritmos que permitan la correcta funcionalidad del prototipo, el diseño del presente subsistema se ha desarrollado en base a la **Error! Reference source not found.**

Figura 34.

Subsistema de Tics.

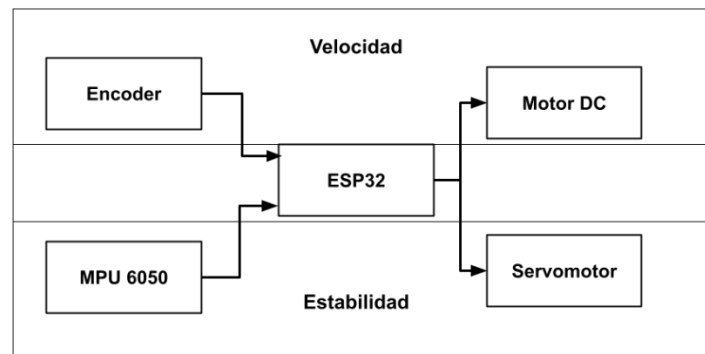


Dentro del subsistema de Tics se detallan 2 puntos importantes el primero referente al control y funcionalidad del sistema para su movimiento a través de

trayectorias. El control viene dado a través de la tarjeta ESP32 y se encargara de mantener constante la velocidad para su desplazamiento evitando de esta forma el balanceo del mecanismo. Por otro lado, se posee el control del ángulo dado a través de la medición de unidad inercial enfocada en la de rotación en el eje y (pitch) que se traduce a su vez a el control de la estabilidad del robot en la **Error! Reference source not found.** se detalla de mejor forma la conexión y funcionamiento del prototipo.

Figura 35.

Funcionamiento del Control en el Subsistema de Tics.



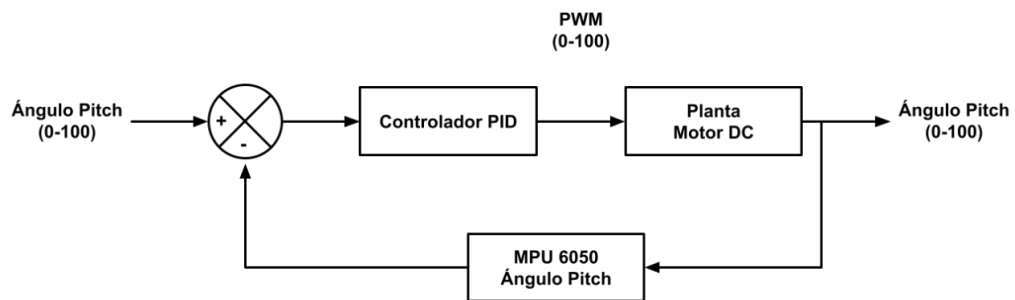
Análisis del Control de Variables.

Como se puede observar el punto común para el funcionamiento del sistema ha sido la ESP32 encargada tanto de la adquisición de datos como del control de los actuadores cuya algoritmia ha sido desarrollado en el software PlatformIO IO (Labs, 2021). El software mencionado es un entorno de programación diseñado para sistemas embebidos, el cual en la aplicación del prototipo ha sido

desarrollada utilizando el lenguaje C++. Dentro la tarjeta ESP se encuentran implementados los controladores en el primer caso el de velocidad que se muestra en la **Error! Reference source not found.**

Figura 36.

Lazo de Control de rotación respecto al Angulo Pitch.

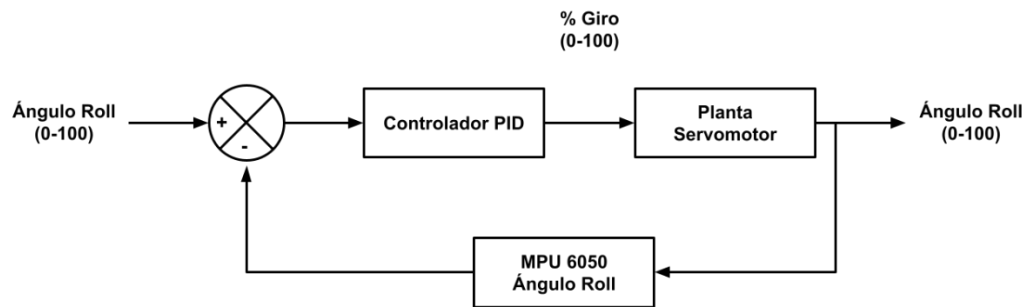


El lazo de control que se da en el sistema de la **Error! Reference source not found.** tiene como objetivo evitar el balanceo del mecanismo en el eje y a través del aumento o disminución de la velocidad del robot. Como muestra el lazo de control se tendrá una retroalimentación generada por la MPU 6050 que indicara el valor del ángulo pitch y lo comparara con la consigna para el posterior envío de una señal al controlador el cual se encargara de dar una salida en valor pwm al motor DC para el aumento o disminución de la variable mencionada reduciendo de esta forma el balanceo.

Por otro lado, para el movimiento lateral existente y el balanceo en el eje x es necesario realizar un control en el ángulo roll relacionado directamente al giro alrededor del eje x que permite darle la correcta dirección al robot y de esta forma reducir el error. El lazo de control para el sistema mencionado se presenta en la Figura 37.

Figura 37.

Lazo de Control de rotación respecto al Angulo Roll.



En el cual al igual que en el control del ángulo pitch en el presente se busca tener control a través de un PID cuyo valor de salida será un valor angular enviado al servomotor que permita a su vez una rotación y calibración en el eje mencionado.

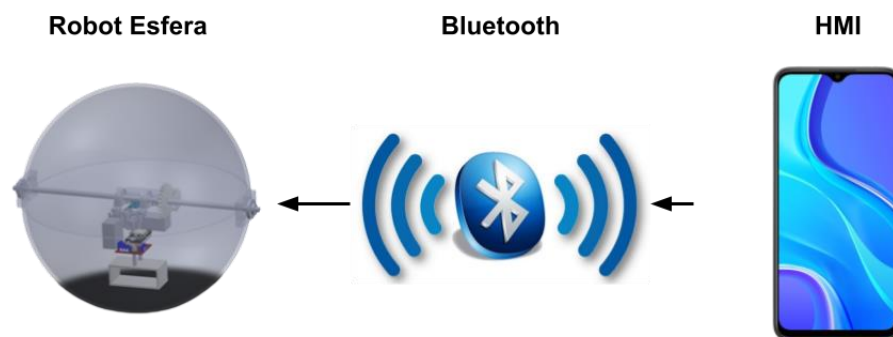
Análisis de Comunicación.

Otro de los factores para el correcto funcionamiento del prototipo es la comunicación existente entre el robot y su sistema de control manual que es el celular dotado con una interfaz HMI, el sistema de comunicación es como se muestra en Figura 38. El intercambio de información entre la interfaz HMI y el robot esfera se da a través de bluetooth en el cual se da una comunicación

unidireccional únicamente para el control manual del robot esfera. Es necesario mencionar que el proceso que se menciona se da gracias a la funcionalidad de la esp32 y su modulo bluetooth.

Figura 38.

Comunicación Esfera-HMI.



La información mencionada que se va a enviar a través de la HMI que se muestra en la Figura 39 permite el envío de datos para el desplazamiento del robot en 4 diferentes direcciones:

- Adelante
- Atrás
- Diagonal Izquierda
- Diagonal Derecha

Cada una de las direcciones pueden ser obtenidas a través del mecanismo del servomotor y los contrapesos que en función de la trayectoria solicitada tendrá una rotación en grados como se mencionó en la sección de control. Además, cuenta con la posibilidad de detener el sistema para evitar colisiones entre la esfera y el entorno.

Figura 39.

Modelo de Interfaz HMI para Control de Esfera.

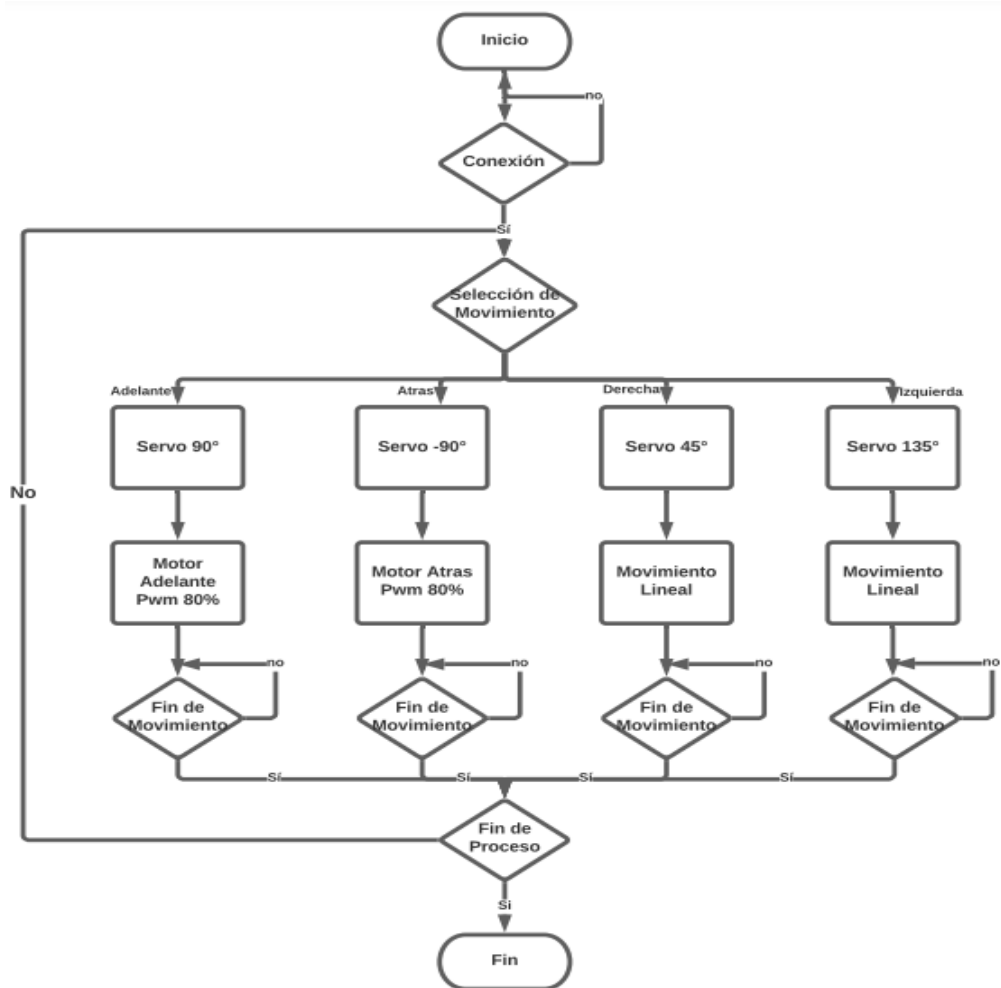


En función de la interacción mostrada entre todos los elementos se puede generar la interacción de todos los elementos del sistema junto con el algoritmo de funcionamiento del sistema como se muestra en la Figura 40. Donde inicialmente se tendrá un análisis que verifica la existencia de conexión posteriormente se espera la llegada del dato para las posiciones solicitadas y finalmente se dará el movimiento hasta que se presione el

botón de paro y así de forma constante para cada proceso de funcionamiento.

Figura 40.

Diagrama de Funcionamiento del Sistema.



CAPITULO IV

PRUEBAS Y RESULTADOS

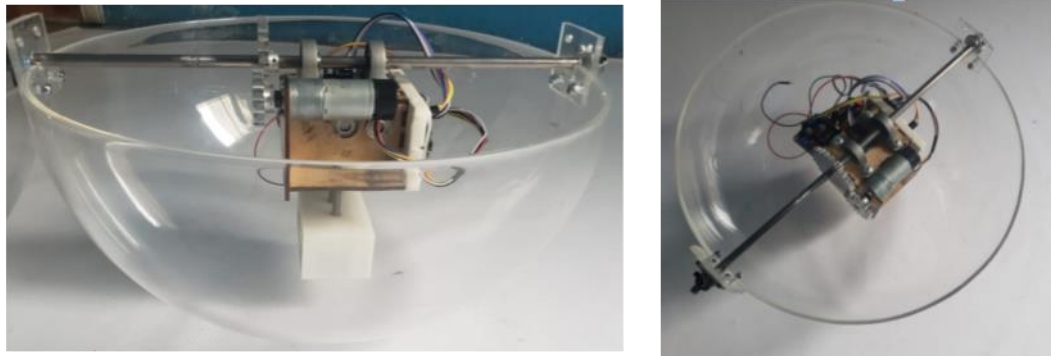
En función de la fase de diseño presentada en la sección pasada se muestra el desarrollo mecánico electrónico y de tics de un robot esfera que ha sido controlado a través de una HMI implementada en un celular común a partir de un sistema de comunicación por bluetooth. En el presente capitulo se detalla la construcción e implementación del prototipo en 2 puntos principales, que son el hardware referente a la construcción del robot y el software que permite su funcionamiento.

Hardware del Robot Esfera.

Se ha construido un robot esfera cuya estructura externa es de acrílico que cuenta con un sistema impulsado por un motor DC para el movimiento lineal que se conecta a un eje de acero a través de un tren de engranes. Por otro lado, posee un mecanismo central que contiene un servomotor que permitirá la estabilidad del prototipo que se muestra en Figura 41.

Figura 41.

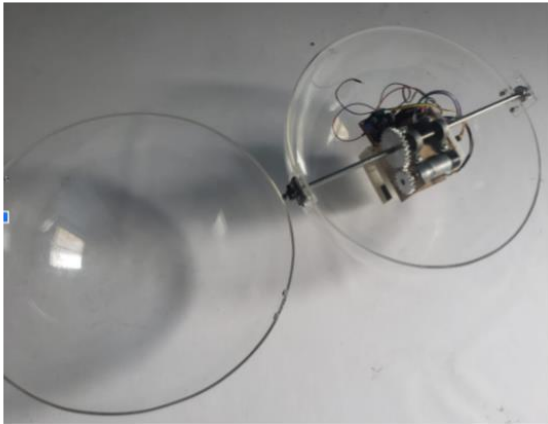
Mecanismo de Movimiento Lateral de Robot Esfera



La estructura externa de la esfera viene dada en 2 semicírculos los cuales se encuentra unidos a partir de pernos que permiten el correcto funcionamiento y dejan en su interior el mecanismo antes mencionado como se muestra en la Figura 42.

Figura 42.

Ensamble de Estructura Externa de Robot Esfera.



Con las premisas indicadas en la figura se muestra la estructura ensamblada del robot esfera en el cual se pudo observar que tiene un radio de 175 mm para más información de las mediciones del sistema se puede verificar en el Anexo... Como se observa en la Figura 43 se establece un análisis comparativo entre el sistema diseñado y el prototipo construido donde se han cumplido con los parámetros de diseño.

Por otro lado, desde el punto de vista electrónico se ha seguido los parámetros de diseño en el cual el sistema cuenta con un lipo de 3s con una capacidad de 2200 mAh que permite el funcionamiento del robot durante 1 hora. Para validar dicha información se ha llevado alrededor de 5 pruebas en la cual

se ha verificado el tiempo de funcionamiento del prototipo y sus resultados se muestran en la Tabla 19.

Figura 43.

Análisis Comparativo Diseño – Construcción de Robot Esfera

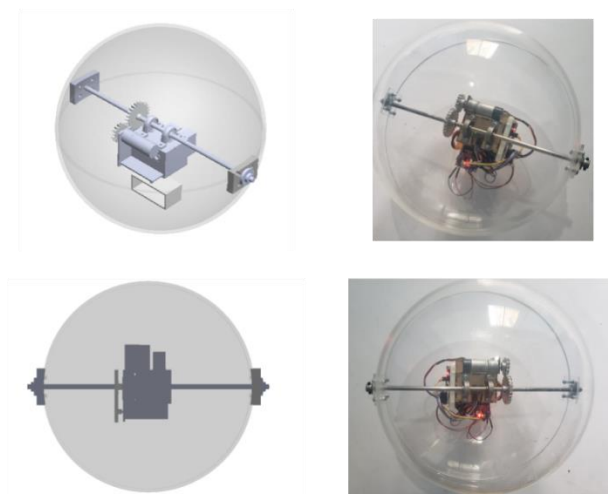


Tabla 19.

Prueba de Tiempo de Funcionamiento del Prototipo

Prueba	Tiempo de Funcionamiento [min]
1	72
2	81

3	76
4	90
5	78

Como se puede observar en Tabla 19 se tiene el tiempo de funcionamiento del robot el cual varía en función de los elementos que funcionaron en forma simultaneo siendo el servomotor y el motor DC aquellos con mayor consumo en función del torque que se genera, en función de los valores obtenido se procede a obtener el valor promedio:

$$T_{Funcionamiento} = \frac{\sum_{i=0}^n t_i}{n}$$

$$T_{Funcionamiento} = \frac{72 + 81 + 76 + 90 + 78}{5}$$

$$T_{Funcionamiento} = 79.4 [min] = 1.32[h]$$

En base a las pruebas realizadas se cumple con el requerimiento de que el sistema debe tener una autonomía energética mínima de una hora.

Software del Robot Esfera.

Para el software del robot esfera se ha llevado a cabo la implementación de una interfaz HMI a través de la aplicación app inventor del MIT que permite la creación de aplicaciones para celular y con la capacidad de desarrollar diferentes funcionalidades. Para el prototipo se ha generado la aplicación que permita el control y movimiento del robot en 4 diferentes direcciones que son las mostradas

en la Figura 44 y la comunicación como se indicó en la fase de diseño se ha llevado a cabo a partir del uso de bluetooth.

Figura 44.

Interfaz HMI para Control de Robot Esfera.



Identificación y Controlador

El sistema se divide en dos plantas para su identificación como se ha mencionado en el capítulo anterior. La recolección de datos es por medio de la excitación de las plantas con un escalón adecuado para su funcionamiento y ayuda del software Matlab con la herramienta de identificación y sintonización de PID.

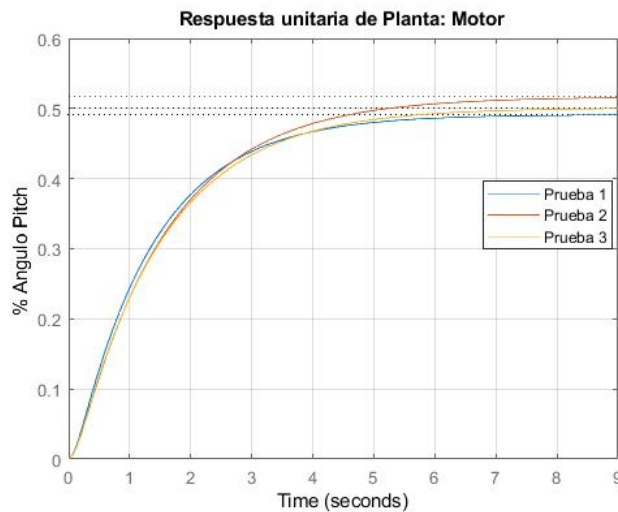
Planta de motor DC para movimiento

La Figura 45 muestra la identificación de la planta con tres repeticiones. Las funciones de transferencias obtenidas tienen un comportamiento similar y su identificación posee en promedio el 93% de confiabilidad por lo que se opta por usar la función de transferencia (15) y mediante sintonización se obtiene el controlador de la Figura 45.

Figura 45.

Identificación de planta de Motor DC y su respuesta escalón.

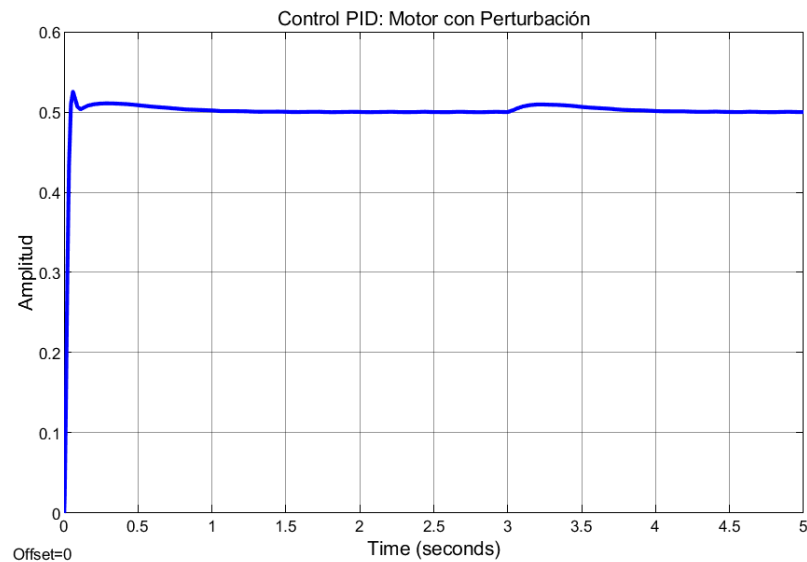
$$F(s) = \frac{2.95}{s^2 + 9.16s + 5.71} \quad (15)$$



La Figura 46 muestra el controlador estabilizándose en 1 segundo con las constantes $K_p = 153.1162$, $K_i = 348.4668$ y $K_d = 16.8198$.

Figura 46.

Controlador de Motor DC para ángulo Pitch con perturbación.



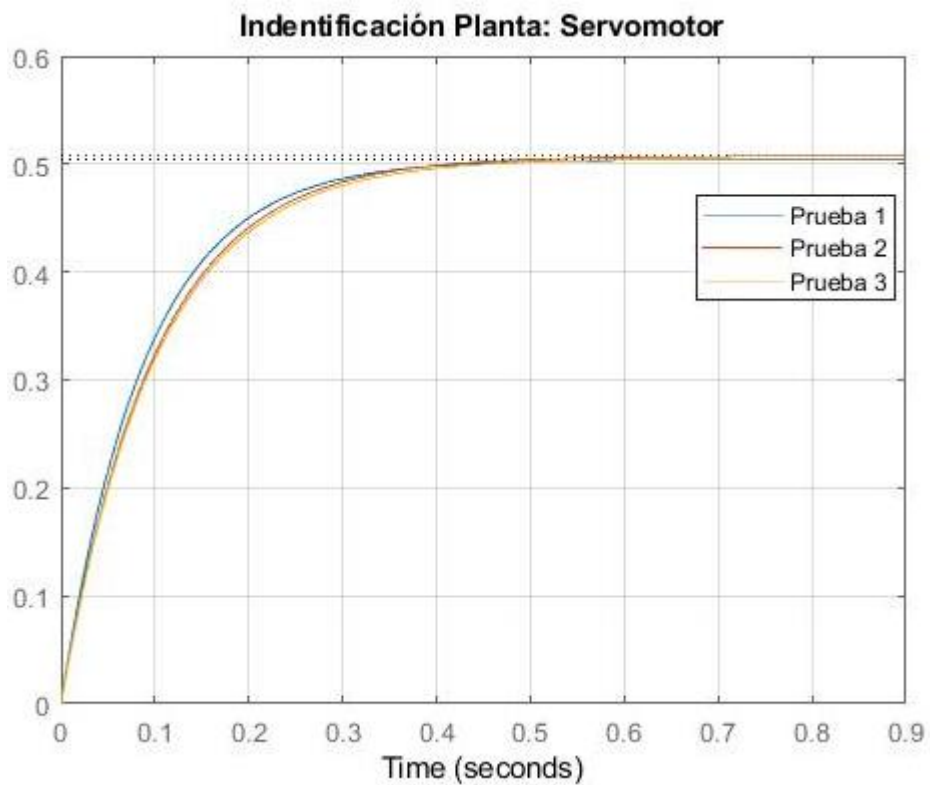
Planta de servomotor para control de ángulo

La Figura 47 muestra la identificación de la planta con tres repeticiones. Las funciones de transferencias obtenidas tienen un comportamiento similar y su identificación posee en promedio el 96% de confiabilidad por lo que se opta por usar la función de transferencia (16) y mediante sintonización se obtiene el controlador de la Figura 47.

Figura 47.

Identificación de planta de servomotor y su respuesta escalón para control de inclinación.

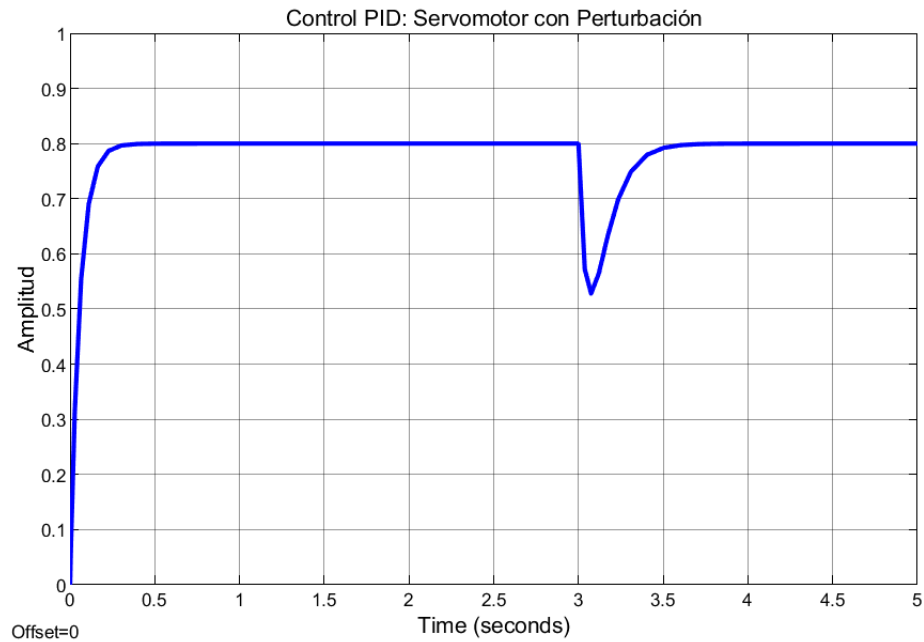
$$F(s) = \frac{5.161}{s + 10.17} \quad (16)$$



La Figura 48 muestra el controlador estabilizándose en 0.5 segundos con las constantes $K_p = 3.5096$, $K_i = 35.6924$ y $K_d = 0$.

Figura 48.

Controlador de Motor DC para ángulo Pitch con perturbación

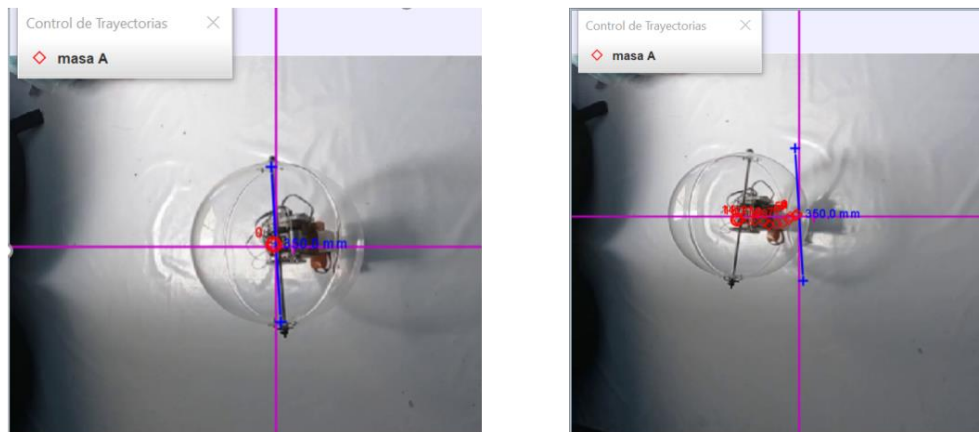


Pruebas de Trayectoria

Con la implementación del controlador en el sistema se tiene la capacidad de llevar a cabo las diferentes pruebas de trayectorias para observar de esta forma la variación existente en el terreno. Para lo cual se ha trazado diferentes trayectorias para el robot en donde se verifica los movimientos que ha tenido por medio de grabaciones, las cuales han sido analizadas por medio del software tracker como se muestra en la Figura 49, para lo cual se ha llevado a un total de 5 pruebas con 3 réplicas cada uno. En la tabla se muestra un valor promedio para cada prueba en una superficie lisa colocando la máxima variación en la trayectoria en línea recta.

Figura 49.

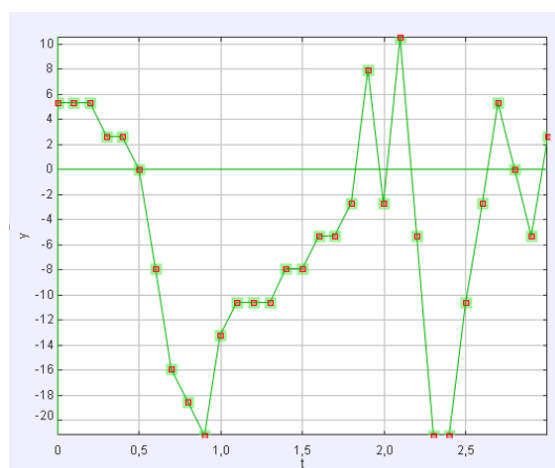
Ejemplo Planteamiento de Experimento y Análisis de Trayectorias en Software Tracker.



Por otro lado, al realizar el análisis del software Tracker se puede observar la variación en trayectoria alrededor del eje recto en 0 por el cual se va a movilizar el robot, como se muestra en la Figura 50, donde t se encuentra en segundos mientras el eje y está en milímetros.

Figura 50.

Ejemplo de Análisis de Variación de Trayectoria en Software Tracker.

**Tabla 20.**

Variación en Trayectorias a Diferentes Distancias de Prueba

Distancia [mm]	Variación en Trayectoria máxima 1 [mm]	Variación en Trayectoria máxima 2 [mm]	Variación en Trayectoria máxima 3 [mm]
200	11.31	14.92	15.11
400	21.17	24.16	22.12
600	25.42	26.91	24.12
800	26.17	27.68	26.81
1000	25.11	24.14	28.97

Por otro lado, en la Tabla 21 se muestra los valores promedio existentes para cada una de las pruebas a diferentes distancias donde se observa que la variación máxima existente durante las trayectorias y a diferente distancia es de 26,89 [mm] en una superficie lisa.

Tabla 21.

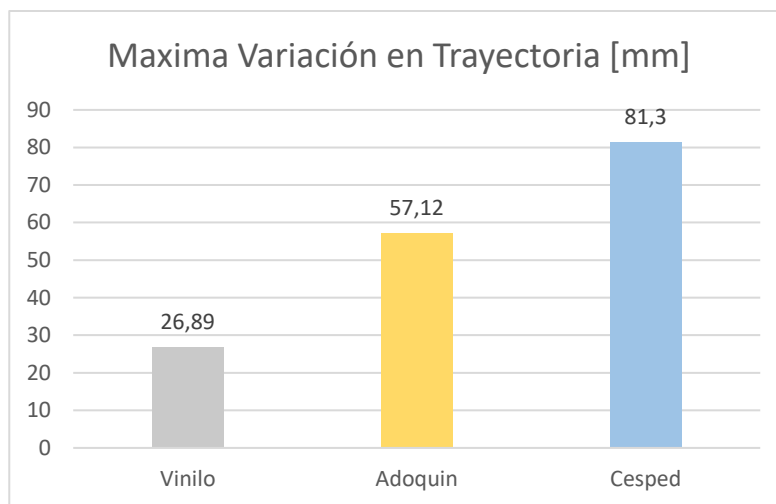
Análisis de Variación Máxima en Trayectoria en Superficie Lisa Promedio

Distancia Recorrida [mm]	Variación Máxima [mm]
200	13,78
400	22,48
600	25,48
800	26,89
1000	26,07

De igual manera se llevado el mismo sistema de pruebas para superficies diferentes de igual manera sin inclinación, pero de diferente material siendo adoquín y césped las seleccionadas. Se estableció el mismo sistema de pruebas mostrado en la sección anterior obteniendo los siguientes valores máximos en desplazamiento que muestra la Figura 51 **Error! Reference source not found.**

Figura 51.

Máxima Variación en Trayectoria a Diferentes Superficies.



Como se muestra en la Figura 51 existe una variación variable en función de la superficie en la cual se está desplazando la esfera, la cual se debe a las diferentes rugosidades y perturbaciones que pueden existir en la superficie de prueba. Sin embargo, dicha variación no permanece constante y como se observa en la **Error! Reference source not found.** a raves del controlador se corrige el error y trata de que el movimiento del robot sea constante y recto evitando desviaciones.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Se ha diseñado y construido un robot esfera de 175 [mm] de radio con una estructura externa de acrílico que posee en su interior un mecanismo para la transmisión de movimiento a un eje de acero a través de un tren de engranes. Además, dispone de un servomotor que permite la estabilidad y los movimientos laterales del prototipo. El control de sistema es realizado a través de una aplicación móvil que se encarga de entregar 4 direcciones de movimiento y el paro total del robot.
- Se ha implementado un circuito electrónico funcional formado por una tarjeta de adquisición de datos (Esp32), sensores (Encoder y MPU 6050) y actuadores (Motor DC y Servomotor) los cuales son alimentados por una batería lipo de 3 celdas con una capacidad de 2200 mAh la cual brinda al sistema una autonomía energética de 79 minutos.
- El sistema cuenta con un controlador PID para regular el ángulo de inclinación con respecto al eje X (Roll) y Y (Pitch) donde se obtiene un tiempo de restitución ante perturbaciones de 0.5 y 1 segundo respectivamente. La combinación de ambos controladores garantiza un error en la estabilización de los ángulos menor a 4° durante el funcionamiento del prototipo.
- El prototipo de robot esfera que se propone en el presente artículo cuenta con la capacidad de desplazarse a través de superficies de diferentes materiales y sin

inclinación, en el cual se puede generar variación o errores de trayectoria con un valor máximo de 81,3 [mm] en una superficie abierta de césped.

- Se ha llevado un análisis comparativo de los resultados del movimiento del prototipo a través de diferentes superficies existiendo una variación en el desplazamiento en la trayectoria llegando a ser la variación de 3 veces mayor entre superficies con rugosidad (césped, adoquín) y perturbación contra entornos con suelo liso (vinilo).

Recomendaciones

- Se recomienda la implementación de diferentes materiales para la estructura del robot y su comparativa de funcionamiento ante distintos terrenos de movimientos y su influencia en la funcionalidad del mismo para encontrar un punto de equilibrio entre estructura y control.
- Se recomienda la implementación de controladores diferentes al PID como el Fuzzy para su comparativa y desarrollo de un controlador robusto combinado, logrando la disminución del error de estabilidad ante perturbaciones o acciones de movimiento de trayectorias complejas.

BIBLIOGRAFÍA

- Albornoz Salazar, J. L. (s.f.). Recuperado el 20 de Septiembre de 2020, de Academia:
https://www.academia.edu/8351538/CENTRO_DE_GRAVEDAD_CENTRO_DE_MASA_Y_CENTROIDE
- Aliexpress. (s.f.). Obtenido de Aliexpress:
<https://es.aliexpress.com/item/32814556057.html>
- Alves, J., & Dias, J. (2003). Design and control of a spherical mobile robot. *Journal of Systems and Control Engineering*, 457-467.
- Arranz, A., Baliñas, J., Bronte, S., Josue, G., Gonzalez, D., Javier, G., & Angel, L. (Noviembre de 2006). *Roboticaeducativa*. Obtenido de www.roboticaeducativa.org
- Barrientos, J. (Abril de 2014). Diseño y desarrollo de un robot esférico. Integración electromecánica y programación del software de control. *Universidad Politécnica de Madrid*, 9. Obtenido de http://oa.upm.es/39527/1/TFG_Jorg_Barrientos_Diez.pdf
- Barrientos Sotelo, V. R., García Sánchez, J. R., & Silva Ortigoza, R. (2007). Robots Móviles: Evolución y Estado del Arte . *Polibits*, 12-16.
- Candelas Herías, F. A., & Corrales Ramón, J. A. (2007). Servomotores. *Universidad de Alicante* , 1-7.

- Cañadas Betancourt, R. S., & Nazate Burgos, P. J. (Octubre de 2012). *Escuela Politécnica Nacional* . Obtenido de Escuela Politécnica Nacional : <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/5152/1/CD-4541.pdf>
- Deepak Pokhrel, N. R. (2013). Design and Development of a Spherical Robot (SpheRobot). 8.
- Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (Diciembre de 2016). Physical and mechanical properties of PLA, and their functions in widespread applications - A comprehensive review. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 107, 367-392.
- García Haro, J. M. (2011). Desarrollo de un controlador para motores DC brushless basado en CompactRIO y LabVIEW de National Instruments para el estudio de nuevos algoritmos de control. *Universidad Carlos III de Madrid* , 21.
- Gausemeier, J., Frank, U., & Donoth, J. (2009). *Research in Engineering Design*, 201-223.
- Gausemeier, J., Frank, U., & Donoth, J. (2019). *Specification Technique for the Description of Self-Optimizing Mechatronic Systems*.
- Gonzalez, A. (2017). Evolución de la Robotica y Nuevas Tendencias. 8.
- H.Ghariblu. (2016). A new mobile ball robot-dynamic modeling and simulation. *ELSEVIER*, 8.
- Labs, P. (18 de 08 de 2021). *pIO labs*. Obtenido de <https://platformio.org/>

- Meenakshipriya, B. (2012). Design and Development of Spherical Robot Using Pendulum Mechanism. *Springer*, 12.
- Pérez Camejo, D. S. (Abril de 2017). *Universidad Técnica de Ambato*. Obtenido de
de
https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/25192/1/Tesis_t1221ec.pdf
- Rairán Antolines, J. D., Sierra Niño, Y. P., & Iván, M. R. (2009). Implementación de dos estrategias de control para la velocidad de un motor DC . *Revista Ingeniería e investigación Vol 29 No. 2*, 100-106.
- Saeed Moazami, H. Z. (2019). Kinematics of Spherical Robots Rolling over 3D Terrains. *Complexity*, 15.
- Serway, R. A. (1991). FISICA. En R. A. Serway, *FISICA* (págs. 252-253). MC GRAW HILL.
- Sphero*. (s.f.). Obtenido de Sphero: <https://sphero.com/products/sphero-sprk-plus>
- Suomela, J. (2005). Ball-Shaped Robots: An Historical Overview and Recent Developments at TKK. 12.
- Vega, J. D. (2012). *Universidad Politécnica de Madrid*. Obtenido de Universidad Politécnica de Madrid:
http://oa.upm.es/19172/2/TESIS_MASTER_JUAN_DAVID_HERNANDEZ_VEGA.pdf

ANEXOS