



UNIVERSIDAD UTE

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

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO
AUTO-ESTABLE (SEGWAY) CON DOS RUEDAS PARALELAS.**

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

JEFFERSON EDGAR VILLARREAL ENRIQUEZ

DIRECTOR: ING. MIGUEL SANCHEZ

Quito, agosto 2020

© Universidad UTE 2020.

Reservados todos los derechos de reproducción

FORMULARIO DE REGISTRO BIBLIOGRÁFICO

PROYECTO DE TITULACIÓN

DATOS DE CONTACTO	
CÉDULA DE IDENTIDAD:	0401135306
APELLIDO Y NOMBRES:	Villarreal Enríquez Jefferson Edgar
DIRECCIÓN:	Manuel Valdiviezo, N49.75 y Mariscal Sucre
EMAIL:	jeffersonvillarreal91@gmail.com
TELÉFONO FIJO:	022 277190
TELÉFONO MOVIL:	0984082332

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO AUTO-ESTABLE (SEGWAY) CON DOS RUEDAS PARALELAS.
AUTOR O AUTORES:	JEFFERSON EDGAR VILLARREAL ENRIQUEZ
FECHA DE ENTREGA DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	04-08-2020
DIRECTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN:	ING. MIGUEL SANCHEZ
PROGRAMA	PREGRADO <input checked="" type="checkbox"/> POSGRADO <input type="checkbox"/>
TÍTULO POR EL QUE OPTA:	Ingeniero Mecatrónico
RESUMEN:	<p>El proyecto busca implementar de manera conjunta conocimientos de electrónica, mecánica, control y eléctrica para diseñar un sistema mecatrónico. Mediante el cálculo del modelo matemático, el diseño mecánico de elementos de máquina, el estudio de elementos finitos y el análisis de maquinado se conformó el diseño total el vehículo eléctrico auto-balanceado, cuyo objetivo final es servir como medio de transporte alternativo dentro de la ciudad de Quito. Para el estudio del producto y su viabilidad se utilizó la evaluación de conceptos, diagramas de flujo de la metodología mecatrónica y de procesos, y por último rutas de diseño para establecer las características físicas y mecánicas del sistema. Estrategias que facilitan de manera objetiva el desarrollo, selección de alternativas y métodos de fabricación, permitiendo cumplir funciones y requisitos del vehículo propuesto. El prototipo debe ser diseñado en base a las características del lugar donde será usado, ofreciendo al cliente un vehículo seguro y de fácil uso.</p>

PALABRAS CLAVES:	Mecatrónico, segway, vehículo, eléctrico, diseño, modelo 3D
ABSTRACT:	<p>The project shows the way to implement in a joint working, knowledge about electronic, mechanical, control and electrical for the design of a mechatronic system. By the calculation of the mathematical model, the mechanical design of machine elements, the study of finite elements and the analysis of machining, conformed the overall design of the self-balancing electric vehicle, whose ultimate goal is an alternative transport means within the city of Quito. For the study of the product and the viability, the evaluation of concepts, flowcharts of mechatronics methodology and process, and finally routes of design was used to establish the physical properties of the system. Strategies that make easier in an objective way the development, the selection of alternatives and methods of manufacture, allowing accomplish the functions and requirements of the proposed vehicle. The device should be designed on the base of the properties of the place where will use, offering guests a vehicle safe and easy to use.</p>
KEYWORDS	Mechatronics, segway, vehicle, electric, design, 3D model

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



f: _____

Villarreal Enríquez Jefferson Edgar
0401135306

DECLARACIÓN Y AUTORIZACIÓN

Yo, **Jefferson Edgar Villarreal Enríquez**, CI 0401135306 autor del proyecto titulado: “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO AUTO-ESTABLE (SEGWAY) CON DOS RUEDAS PARALELAS.**” previo a la obtención del título de **Ingeniero en Mecatrónica** en la Universidad UTE.

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

Quito, 4 de agosto del 2020



f: _____

Jefferson Edgar Villarreal Enríquez
CI 0401135306

DECLARACIÓN

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

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



Jefferson Edgar Villarreal Enríquez

C.I.: 0401135306

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo que lleva por título “**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO AUTO-ESTABLE (SEGWAY) CON DOS RUEDAS PARALELAS.**”, que, para aspirar al título de **Ingeniero en Mecatrónica**, fue desarrollado por **Jefferson Edgar Villarreal Enríquez**, bajo mi dirección y supervisión, en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería e Industrias; y cumple con las condiciones requeridas por el reglamento de Trabajos de Titulación artículos 19, 27 y 28.



ING. MIGUEL SANCHEZ

DIRECTOR DEL TRABAJO

C.I.: 1804277158

INDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
RESUMEN	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUCCIÓN	3
1.1. PROYECTOS RELACIONADOS	4
2. METODOLOGÍA Y DISEÑO	6
2.1. METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO	6
2.1.1. METODOLOGÍA EN V	6
2.1.2. ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE CIRCULACIÓN	6
2.1.3. ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO	6
2.2. FUNCIONES DEL SISTEMA	7
2.2.1. ELÉCTRICAS Y ELECTRÓNICAS	7
2.2.2. SISTEMA MECÁNICO	8
2.2.3. SISTEMA DE CONTROL	8
2.3. DISEÑO MECÁNICO	8
2.4. MODELO MATEMÁTICO DE ESTABILIDAD	9
2.5. CENTRO DE GRAVEDAD Y CENTRO DE MASA	11
2.6. DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO	11
2.7. DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR	12
2.8. DISEÑO DE EJES	13
2.9. RODAMIENTO	14
2.9.1. DISEÑO DEL CHASIS PRINCIPAL	15
2.9.2. DISEÑO DE LA VIGA PRINCIPAL	15
2.9.3. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE CARGAS	17
2.9.4. DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE	17
2.9.5. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR	17
2.10. DISEÑO DE LA VIGA SECUNDARIA	20
2.10.1. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE CARGAS	21
2.10.2. DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE	21
2.10.3. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR	22
2.10.4. POR EL MÉTODO DE GOODMAN	23
2.10.5. DISEÑO DE LA COLUMNA	25
2.10.6. CARGA CRÍTICA	25
2.10.7. LA LONGITUD DE LA COLUMNA ES DE:	25
2.10.8. CONSTANTE DE COLUMNA	25
2.10.9. MOMENTO DE INERCIA	34
2.11. DISEÑO DE VOLANTE	27
2.11.1. CARGA CRÍTICA	27
2.11.2. LA LONGITUD DE LA COLUMNA ES DE:	28
2.11.3. CONSTANTE DE COLUMNA	28

2.11.4. MOMENTO DE INERCIA	28
2.12. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN RUEDAS	31
2.13. ESPECIFICACIONES	31
2.14. TRANSMISIÓN DE MOTOR A RUEDA	32
2.15. PARTES DEL SEGWAY MODELADAS	33
2.15.1. CHASIS O SOPORTE PRINCIPAL	33
2.15.2. VOLANTE	34
2.15.3. PLACAS PROTECTORAS	35
2.15.4. TAPA SUPERIOR	35
2.15.5. TAPA PROTECTORA DE LA PARTE ELECTRÓNICA	36
2.15.6. FACTOR DE SEGURIDAD	37
2.16. DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO	37
2.16.1. DIMENSIONAMIENTO DEL DRIVER DE CONTROL	37
2.16.2. SELECCIÓN DE LA PLACA CONTROLADORA	38
2.16.3. PLACA CONTROLADORA	38
2.16.4. SELECCIÓN DEL ACELERÓMETRO Y EL GIROSCOPIO	39
2.16.5. GIROSCOPIO:	40
2.16.6. ACELERÓMETRO	40
2.17. DISEÑO PLACA PCB DE CONTROL	41
2.18. TIEMPO DE DESCARGA DE LA BATERÍA	42
2.19. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL	43
2.19.1. BLOQUES UTILIZADOS	43
2.20. PROGRAMA DE CONTROL	46
2.21. CALIBRACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN PARA LA VELOCIDAD	50
2.22. PRUEBAS DE MANEJO	51
2.22.1. PRUEBAS DE CONTROL	51
2.22.2. PRUEBAS DE GIRO	51
2.22.3. PRUEBAS DE PESO A TRANSPORTAR	53
2.22.4. PRUEBAS DE SISTEMA MECÁNICO, ELÉCTRICO Y DE CONTROL	53
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	56
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
CONCLUSIONES	54
RECOMENDACIONES	55
BIBLIOGRAFÍA	56
ANEXOS	59

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1 Características de motor	13
Tabla 2 Rodamiento 6207	15
Tabla 3 Características del chasis de soporte	33
Tabla 4 Características del volante	34
Tabla 5 Características de placas protectoras	35
Tabla 6 Características de la tapa superior	35
Tabla 7 Características de la tapa protectora	36
Tabla 8 Pruebas de control	51
Tabla 9 Velocidad vs Radio de giro	52
Tabla 10 Peso vs Velocidad	53
Tabla 11 Tiempo de estabilización	54
Tabla 12 Tiempo de descarga	55

ÍNDICE DE FIGURAS

	PÁGINA
Figura 1 Modelo en V del segway	6
Figura 2. Diagrama de fuerzas del segway	9
Figura 3. Centro de masa.	11
Figura 4. Inclinación de segway.	12
Figura 5. Motor DC.	12
Figura 6. Esquema del eje.	13
Figura 7. Dibujo de viga lateral.	15
Figura 8. Perfil en L de acero.	16
Figura 9. Diagrama de distribución de cargas, viga lateral.	17
Figura 10. Diagrama de momento cortante, viga lateral.	17
Figura 11. Diagrama de momento flector, viga lateral.	18
Figura 12. Diagrama de viga secundaria.	20
Figura 13. Diagrama de distribución de cargas, viga frontal.	21
Figura 14. Diagrama de momento cortante, viga frontal.	22
Figura 15. Diagrama de momento flector, viga lateral	22
Figura 16. Llanta de carretilla usada en el proyecto.	32
Figura 17. Brida.	32
Figura 18. Chaveta.	33
Figura 19. Buje del segway.	33
Figura 20. Esquema del chasis de soporte.	34
Figura 21. Esquema del volante.	34
Figura 22. Esquema de la placa protectora.	35
Figura 23. Esquema de la placa protectora superior.	36
Figura 24. Esquema de la caja protectora de circuitos.	36
Figura 25. Factor de deformación.	37
Figura 26. Driver control dual L283N.	38
Figura 27. Placa MCU STM32F407VG.	38
Figura 28. MPU6050.	40
Figura 29. Circuito simulado.	41
Figura 30. Circuito en PCB.	42
Figura 31. Características de la batería.	42
Figura 32. Controlador lógico difuso.	43
Figura 33. Interior del controlador lógico difuso.	44
Figura 34. Bloque saturación	44
Figura 35. Bloque ganancia.	44
Figura 36. Bloque derivada discreta.	45
Figura 37. Bloque zona muerta.	45
Figura 38. Bloque, filtro discreto.	45
Figura 39. Bloque, función de transferencia discreta.	46
Figura 40. Entradas y salidas del sistema.	47
Figura 41. Diagrama de bloques de control del segway.	47
Figura 42. Grados de inclinación.	48

Figura 43. Graficas de funcionamiento.	49
Figura 44. Reglas difusas programadas.	50
Figura 45. Máxima inclinación delantera.	50
Figura 46. Máxima inclinación trasera.	51
Figura 47. Radio de giro del segway.	52
Figura 48. Gráfica Giro vs Velocidad.	52
Figura 49. Pruebas de peso.	53
Figura 50. Esquema de Mediciones con Multímetro.	54
Figura 51. Esquema de prueba de descarga de la batería.	55
Figura 52. Pruebas con usuario.	53

RESUMEN

El proyecto busca implementar de manera conjunta conocimientos de electrónica, mecánica, control y eléctrica para diseñar un sistema mecatrónico. Mediante el cálculo del modelo matemático del péndulo invertido, el diseño mecánico de elementos de máquina dinámicos y el análisis de maquinado se conformó el diseño total el vehículo eléctrico auto-balanceado, cuyo objetivo final es servir como medio de transporte alternativo dentro de la ciudad de Quito. Para el estudio del producto y su viabilidad se utilizó la evaluación de conceptos, diagramas de flujo de la metodología mecatrónica y de procesos, y por último rutas de diseño para establecer las características físicas y mecánicas del sistema. Estrategias que facilitan de manera objetiva el desarrollo, selección de alternativas y métodos de fabricación, permitiendo cumplir funciones y requisitos del vehículo propuesto. El dispositivo fue diseñado en base a las características del lugar donde será usado, se ofreció al cliente un vehículo seguro y de fácil.

Palabras Clave: Mecatrónico, segway, vehículo, eléctrico, diseño, modelo 3D

ABSTRACT

The project seeks to jointly implement electronic, mechanical, control and electrical knowledge to design a mechatronic system. Through the calculation of the mathematical model of the inverted pendulum, the mechanical design of dynamic machine elements and the machining analysis, the total design of the self-balancing electric vehicle was formed, whose final objective is to serve as an alternative means of transport within the city of Quito. For the study of the product and its viability, the evaluation of concepts, flow charts of the mechatronic and process methodology, and finally design routes were used to establish the physical and mechanical characteristics of the system. Strategies that objectively facilitate the development, selection of alternatives and manufacturing methods, allowing to fulfill functions and requirements of the proposed vehicle. The device must be designed based on the characteristics of the place where it will be used, offering the customer a safe and easy vehicle.

Key words: Mechatronics, segway, vehicle, electric, design, 3D model

1. INTRODUCCIÓN

El segway es un vehículo auto-balanceado que proporciona una estabilidad al conductor generando mayor control tanto en los giros como en el control de la velocidad (segway(PT), 2016).

Cuenta con dos dispositivos que realizan la adquisición de datos que llegan a la tarjeta donde se controla el sistema. El primero es el acelerómetro, que permite medir la aceleración con la que el segway se inclina con relación al espacio. El segundo es el giroscopio que mide el giro que da el aparato respecto a las tres dimensiones, es decir, el dispositivo va fijo en el segway y mediante la inclinación y los giros envía datos para ser analizados, medidos generalmente en radianes.

La tarjeta madre tiene características esenciales para el uso de este tipo de programas, como son sus cristales y su procesador que permiten testear el procesamiento en tiempo real.

La parte estructural del segway se divide en:

- Estática: momento donde el segway se encuentra sin movimiento o con velocidad constante.
- Dinámica consiste en el cálculo de los ejes y del movimiento tanto en los motores como en el segway completo.

Alrededor del mundo el segway se ha convertido en un vehículo muy popular por lo que algunas ciudades como Barcelona, España comenzaron a dictar normas y regulaciones; una de ellas fue prohibir la circulación de segways en varios lugares dado que la afluencia de los mismos fue excesiva (Blanchar, 2016).

La población de Quito está creciendo de forma exponencial, por consiguiente, también aumenta la contaminación por la utilización de combustibles fósiles como energía para los medios de transporte públicos y privados. La cantidad de autos genera un aumento en los tiempos recorridos según la calle en la que se transita, por lo que, en horas pico lo que normalmente tomaría 10 minutos en llegar se vuelve hasta 40 minutos (Consejo del Distrito Metropolitano, 2019).

El objetivo es diseñar y construir un vehículo auto-estable (segway) con dos ruedas paralelas

Los pasos que nos permitirán alcanzar el objetivo son:

Diseñar un sistema de control para la estabilización.

Diseñar y construir el sistema mecánico y circuitos electrónicos.

Ensamblar el segway y calibrar los dispositivos.

Realizar las pruebas necesarias para garantizar el buen funcionamiento del segway.

El diseño se realizará por medio un análisis sistemático, se procederá a diseñar el área mecánica, electrónica y de control con sus respectivas evaluaciones en cada punto del proceso.

El vehículo será controlado mediante una placa que codificará los datos enviados por los diferentes sensores, mediante los actuadores se producirá el movimiento y se repetirá el proceso periódicamente.

1.1. PROYECTOS RELACIONADOS

¿El fin de Grin y Movo? Chinos presentaron un scooter con IA que regresa solo a su estación de carga (Meza, 2019).

El proyecto busca generar un sistema de carga automática en todos sus vehículos eléctricos por medio de plataformas de carga rápida las cuales se encontrarán en el piso y por medio de una inteligencia artificial los dispositivos se dirigirán a las plataformas de carga más cercanas.

Fortaleza: el sistema podrá general un nivel de eficiencia mayor y a la vez recorrer distancias mayores a base del sistema de carga planificado.

Debilidades: no es un sistema que se pueda adaptar a Ecuador dado que las calles y veredas cuentan con mapas dedicados a vehículos eléctricos por lo que se incurriría en otro gasto. La delincuencia en la ciudad no permite dejar vehículos de alto precio en las aceras.

El nuevo S-Pod en forma de huevo de Segway es un motor de personas futurista

(Neto, 2020)

Segway a destina una sección de su personal a crear trasportes dirigidos para turistas. El nuevo S-Pod es una silla autobalanceada que permite al visitante tener una experiencia futurista en sus paseos.

Fortalezas: el diseño está basado en películas como Jurrasic World O Star Wars lo que hará que el visitante tenga una gran experiencia

Debilidades: el vehículo no tiene la capacidad de bajar o subir pendientes por lo que solo puede realizar trayectos conocidos.

Uniciclo eléctrico autobalanceado

(Martin, 2018).

La moto adaptada a un monociclo para crear el nuevo uniclo es la creación del ingeniero John Dingley este nuevo modelo de segway te permite ir sentado y balanceado.

Fortaleza: posee un diseño innovador y sofisticado, el tamaño del vehículo es sumamente reducido.

Debilidades: posee problemas de estabilidad al pasar por las curvas, no brinda la estabilidad necesaria ya que al ir sentado tu capacidad de reacción es limitada

2. METODOLOGÍA Y DISEÑO

2.1. METODOLOGÍA DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

2.1.1. METODOLOGÍA EN V

La metodología en V es un proceso que busca la mejora del diseño y fabricación. Este modelo es una variación de la metodología en cascada como se muestra en la Figura 1. Posee verificaciones y validaciones en cada punto, volviéndose una metodología segura y para no realizar reprocesos.

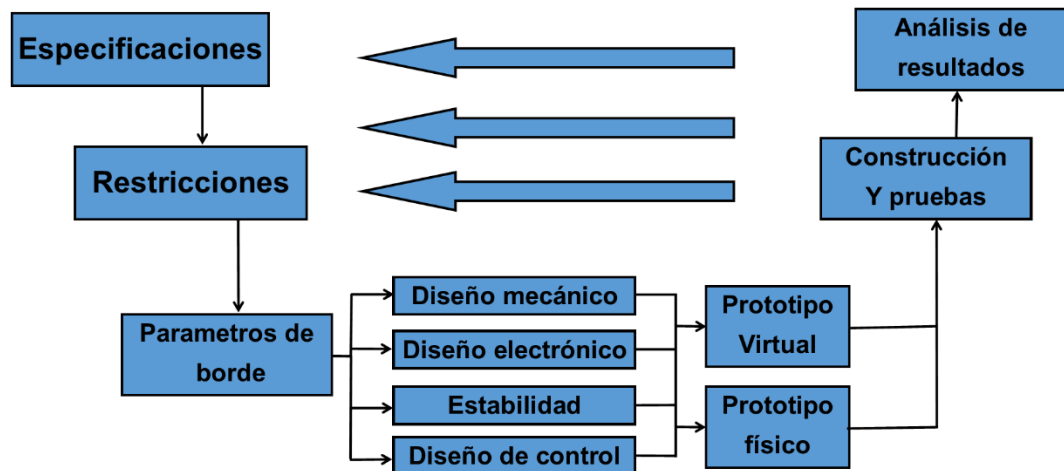


Figura 1 Modelo en V del segway

Fuente: Cedia (2019).

2.1.2.ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE CIRCULACIÓN

- Podrán circular en los mismos espacios que los peatones y bicicletas según la ordenanza publicada por el CONSEJO METROPOLITANO DE QUITO en el 2018
- Tendrán la obligación de dar prioridad a los peatones.
- No podrán ser utilizados por menores de 16 años.
- Obligación de uso de luces y franjas reflectantes.
- Velocidad máxima 20 km/h.

2.1.3. ESPECIFICACIONES Y RESTRICCIONES DE DISEÑO

El segway será diseñado bajo las siguientes especificaciones:

- Segway de dos ruedas
- Segway con manubrio
- Curva de aprendizaje accesible
- Todo segway debe poseer regulación de velocidad.

El segway será diseñado bajo las siguientes restricciones:

- El peso deberá ser proporcional al torque de los motores.

- El diseño de la estructura debe ser sencillo.
- Los elementos del segway deberán estar protegidos contra golpes.
- El segway debe ser desmontable y transportable.

El proyecto está orientado a la implementación de un vehículo de dos ruedas cuya velocidad máxima será de 20 km/h en rectas, sus dimensiones serán de máximo 75 centímetros de ancho, su peso máximo a soportar será de 100 kilogramos y podrá subir pendientes de hasta 45°. Mediante estos datos se obtendrá el peso del segway y el dimensionamiento de los motores.

El diseño mecánico se realiza del esqueleto del segway como un bastidor tipo chasis, el cual brindara soporte y seguridad.

Los ejes deben estar diseñados acorde a los datos obtenidos en el análisis de los elementos. Se calculará los mayores puntos de esfuerzo para así modelar el software CAD.

El diseño electrónico y de potencia se realizó bajo las características de diversos componentes.

El diseño del control se realizó bajo la premisa que los tiempos de refresco deben estar acorde al cambio que exista en los elementos de medición que son el acelerómetro y el giroscopio, tomando en cuenta la sensibilidad de las personas para lograr un control eficiente.

La implementación se realizó mediante la unificación de las partes diseñadas con anterioridad. La combinación de los elementos tendrá como característica generar la mayor eficiencia para el vehículo.

El protocolo de pruebas fue realizado por medio del modelo en V como se muestra en la Figura 1, que tiene la flexibilidad de generar pruebas en cada proceso realizado por lo cual al terminar el proyecto se asegura de la fiabilidad del segway. Las pruebas son:

- Simulación del sistema electrónico y de control
- Testeo de los valores de los dispositivos electrónicos.
- Pruebas de peso del sistema mecánico.
- Pruebas de arranque.
- Pruebas de velocidad.

2.2.FUNCIONES DEL SISTEMA

2.2.1. ELÉCTRICAS Y ELECTRÓNICAS

- Las características de los motores, sensores y su sistema de control generan consumo energético con el cual se calculó la cantidad de voltaje y corriente que se necesita.
- La elección de materiales eléctricos y electrónicos con sus debidas protecciones generan un sistema robusto que permite dar protección a todo el sistema.

- Para generar el mejor rendimiento de los sensores se debe tomar en cuenta su posición y su afectación con el entorno.

2.2.2. SISTEMA MECÁNICO

- La estructura es funcional mediante el cálculo de cargas, de geométrica, el dimensionamiento de dispositivos y la selección de materiales para generar un diseño preliminar mediante el software para después realizar el modelo real.
- El movimiento del sistema se genera por medio de la selección de los motores, el sistema mecánico y el diseño del programa.
- Para que el segway genere la velocidad y el torque se realizó el cálculo de los motores y realizar el dimensionamiento de la caja reductora.

2.2.3. SISTEMA DE CONTROL

- Los datos que se obtendrán de los sensores dependen del tipo de sensores a ser utilizados, de los tiempos de respuesta tanto de la placa como de los sensores y de las características de los transductores.
- La placa controladora fue elegida dependiendo del número de entradas, de la capacidad de procesamiento y memoria del microcontrolador y de la facilidad de acoplamiento con los sensores.
- Para obtener el mejor rendimiento del motor se analizó las características del driver que lo controlará, de la caja reductora y de las características del proceso.
- La interfaz hombre máquina será sencilla y para esto se debe analizar las características del sistema mecánico y de control para dar la mayor facilidad de manejo.

2.3. DISEÑO MECÁNICO

Se realiza principalmente de los ejes que transmiten la fuerza rotacional que generen los motores hacia las llantas, está complementado con la caja reductora que permite modificar la velocidad y el torque. La estructura será la base del segway y se diseñó para que soporte el peso del usuario, motores, batería, volante y elementos electrónicos. El volante deberá ser fabricado con una altura estándar para los diferentes usuarios (Budynass y Keith, 2018).

2.4. MODELO MATEMÁTICO

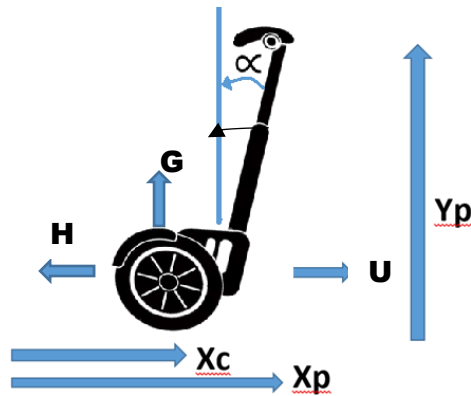


Figura 2. Diagrama de fuerzas del segway

U : Fuerza traccionante de salida del sistema

X : desplazamiento del segway

θ : ángulo de inclinación del segway

M : masa de la caja

m : masa del volante

l : longitud del volante

G : reacción vertical carro sobre el volante

H : reacción horizontal del carro sobre el volante

I : inercia

w : peso volante

Ecuaciones del volante

- Ecuación de rotación

$$I\ddot{\theta} = G * l * \text{sen } \theta - H * l * \text{cos } \theta \quad (1)$$

Cuando θ está en equilibrio: Cuando no hay cambio de posición o cuando la velocidad es constante, se obtiene:

$$I\ddot{\theta} = G * l * \theta - H * l \quad (2)$$

- En el eje de las abscisas

$$m \frac{d^2(x+l*\text{sen } \theta)}{dt^2} = H \quad (3)$$

Cuando θ está en equilibrio

$$m \frac{d^2(x + l * \theta)}{dt^2} = H$$

$$m(\ddot{x} + l * \ddot{\theta}) = H \quad (4)$$

- En el eje de las ordenadas

$$m \frac{d^2(l * \cos \theta)}{dt^2} = G - w$$

$$G = m \frac{d^2(l * \cos \theta)}{dt^2} + w \quad (5)$$

Donde: $w = mg$

Sin embargo, para el caso particular en el que θ tiende a 0, se obtiene:

$$0 = G - mg$$

$$G = mg \quad (6)$$

- **Ecuación del carro**

De acuerdo al diagrama de fuerzas mostrado en la figura 2, se tiene que:

$$M\ddot{x} = u - H \quad (7)$$

- Ecuación del carro y ecuación en las abscisas

$$m(\ddot{x} + l\ddot{\theta}) = -M\ddot{x} + u$$

$$M\ddot{x} + m\ddot{x} + lm\ddot{\theta} = u$$

$$(M + m)\ddot{x} + lm\ddot{\theta} = u \quad (8)$$

- Ecuación de rotación y ecuación del carro

$$I\ddot{\theta} = mgl\theta - m(\ddot{x} + l\ddot{\theta})l$$

$$(I + ml^2)\ddot{\theta} + ml\ddot{x} - mgl\theta = 0 \quad (9)$$

(Castaños, 2017)

Finalmente, el modelo matemático representativo del sistema es el siguiente:

$$\left\{ \begin{array}{l} I\ddot{\theta} = G * l * \theta - H * l \quad (2) \\ m(\ddot{x} + l * \ddot{\theta}) = H \quad (4) \\ G = m \frac{d^2(l * \cos \theta)}{dt^2} + w \quad (5) \\ (M + m)\ddot{x} + lm\ddot{\theta} = u \quad (8) \\ (I + ml^2)\ddot{\theta} + ml\ddot{x} - mgl\theta = 0 \quad (9) \end{array} \right.$$

2.5. CENTRO DE GRAVEDAD Y CENTRO DE MASA

El segway es un vehículo que basa su diseño en la estabilidad y el equilibrio por lo tanto es necesario que el centro de gravedad y el centro de masa se encuentren nivelados, esto afectará directamente a la velocidad, aceleración e impulso que tengan que generar los motores para realizar una determinada instrucción.

El centro de gravedad es la suma de todas las fuerzas aplicadas sobre un cuerpo. Lo que se busca a través de este estudio es generar un centro de gravedad igual a cero en sus fuerzas o que se acerque a este número dado que de este modo el vehículo será estable por sí mismo.

El centro de masa de un sistema es un punto geométrico el cual cambiará si el objeto se encuentra en movimiento dependiendo su velocidad y aceleración como se muestra en la Figura 3 con objeto en equilibrio. En el segway el centro de masa varía dependiendo la inclinación que muestre el vehículo y su velocidad, buscando el estado de reposo que el centro de masa y el de gravedad se encuentren muy cerca o sean el mismo.

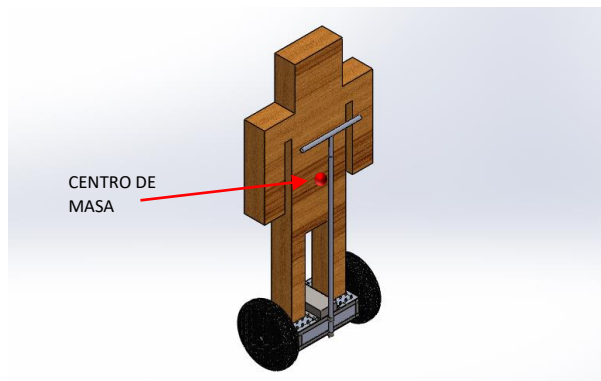


Figura 3. Centro de masa.

2.6. DISEÑO DEL SISTEMA MECÁNICO

El cálculo se realizó tomando en cuenta que el vehículo podrá llevar un peso de 100kg de una persona, más el peso de la estructura y los materiales internos que serán de 50kg.

Para realizar cualquier cálculo se debe tomar en consideración las condiciones extremas que el segway va a soportar.

La velocidad máxima a la que podrá ir el segway es 20 km/h o 5.56 m/s y el tiempo necesario para llegar a esa velocidad será de 10 segundos.

ACELERACIÓN

$$V_f = V_o + a \cdot t \quad (10)$$

$$a = \frac{V_f - V_o}{t}$$

$$a = \frac{5,56 \frac{m}{s} - 0}{10 s} = 0,556 \frac{m}{s^2}$$

(Mott, 2019)

a= aceleración

Pm= potencia mínima que debe tener el motor

F= Fuerza

V= velocidad

$$Pm = F \cdot V \tag{11}$$

$$F = m \cdot a \tag{12}$$

(Hibbeler, 2016)

Factor de seguridad = 2

$$F = 150 kg * 2$$

$$F = 300 kg \cdot 0,556 \frac{m}{s^2}$$

$$F = 166.8 N$$

$$P = 166.8 N \cdot 5.56 \frac{m}{s}$$

$$P = 927.4 N \frac{m}{s}$$

$$P = 927.4 W$$

$$P = 1,24 HP$$

Dado que son dos motores la potencia se divide

$$P = 0,62 HP$$

Calculo necesario para la medición en pendiente

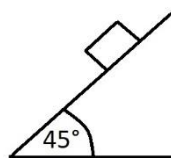


Figura 4. Inclinación de segway.

$$Pm = F \cdot V / \text{sen } 45^\circ \tag{13}$$

$$F = m \cdot a \tag{14}$$

(Hibbeler, 2016)

Se cambia la ecuación 13 por el diagrama de cuerpo libre que se muestra en la Figura 4.

Factor de seguridad = 2

$$F = 150 \text{ kg} * 2 / \text{sen } 45^\circ$$

$$F = 424.26 \text{ N}$$

$$F = 424.26 \text{ kg} \cdot 0,556 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$F = 235.89 \text{ N}$$

$$P = 235.89 \text{ N} \cdot 5.56 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P = 655.7 \text{ N} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P = 1311.55 \text{ W}$$

$$P = 1.311 \text{ hp}$$

Dado que son dos motores la potencia se divide

$$P = 0.6557 \text{ hp}$$

2.7. DIMENSIONAMIENTO DEL MOTOR

Dado que cada llanta se debe mover con libertad al dar los giros se toma el motor con la potencia más cercana que es 1.1 hp

El motor que brindó las características para el funcionamiento del sistema fue el SF7152 que se visualiza en la Figura 5, cuyas características se pueden observar en la Tabla 1.



Figura 5. Motor DC.

Tabla 1. Características de motor.

nombre del producto	PM DC Motor
Modelo	78ZYT12-7715, 78ZYT16-9503T
voltaje	6 ~ 36VDC
Rango de velocidad	21 hp 12v dc motorrpm ~ 81 hp 12v dc motorrpm
Clase de aislamiento	Clase "B" o "F"
Protección del motor	A prueba de goteos
Control de velocidad	Voltaje o PWM (opcional)
Llevando	Bola / manga
Eje OD	8 ~ 12 mm
Dirección de rotación	CW, CCW (Opcional)
Temperatura de funcionamiento / humedad	- 20 oC a + 40 oC / 5% a 95% HR
Toda la vida	50,1 hp 12v cc horas de motor

Especificación							
Código del artículo: 78ZYT12-7715							
voltaje (VDC)	Entrada Poder (W)	Actual (UNA)	Velocidad (RPM)	Factor de potencia (PF)	Esfuerzo de torsión (mN.m)	Salida Potencia (W)	Eficiencia (100%)
24VDC	19.25	0,87	3500	Motor de 1.1 hp 12v dc	3.4	1,25	sesenta y cinco%

2.8. DISEÑO DE EJES

El eje es un elemento utilizado en todo sistema que transmite torque y potencia. El eje como se muestra en la Figura 6 se aloja dentro de los diámetros interiores de cojinetes, engranes, rodamientos, motores, ruedas y bujes los cuales serán utilizados para dar soporte o transmitir potencia.

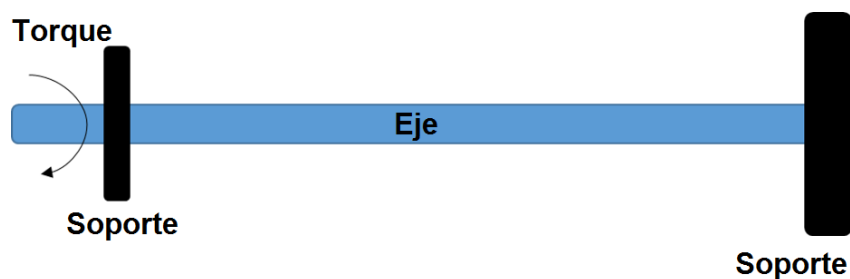


Figura 6. Esquema del eje.

Datos

Potencia del motor: 1.1 HP

Velocidad rotativa de operación normal: 100 rpm

Torque

$$P = \tau \cdot W \quad (15)$$

(Hibbeler, 2016)

Ahora, sabiendo que la potencia máxima necesaria por motor (obtenida de las ecuaciones 13 y 14), es $P = 0.6557$ HP, que equivale a 484.7 W; y que la velocidad de rotación de 100 rpm equivale a 10.47 rad/s, se despeja y calcula el torque de la ecuación 15.

$$\tau = \frac{P}{W}$$

$$\tau = \frac{484.7 \text{ watts}}{10.47 \frac{\text{rad}}{\text{s}}}$$

$$\tau = 46.29 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

ACERO	CORTANTE MAXIMO	
ASTM A5000	36000	lb/pulg ²

$$\tau_{max} = \frac{\tau \cdot r_{min}}{J} \quad (16)$$

$$J = \frac{\pi}{2} r_{min}^4 \quad (17)$$

$$r_{min} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot \tau}{\pi \cdot \tau_{max}}} \quad (18)$$

r_{min} = radio mínimo

τ_{max} = cortante maximo

τ = cortante

$$r_{min} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 315,186 \text{ lb} \cdot \text{pulg}}{\pi \cdot 36000 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^2}}}$$

$$r_{min} = 0.18 \text{ pulg}$$

$$r_{min} = 4.6 \text{ mm}$$

Se debe tomar en cuenta el factor de seguridad que debe ser mínimo de: $N = 2$

$$\frac{r_{elegido}}{r_{min}} > N$$

$$\frac{1.5 \text{ cm}}{0.46} > 2$$

$$3.26 > 2$$

El radio del eje que existe en el mercado es de 1.5 cm, con lo cual bajo los análisis anteriores podemos decir que hemos elegido el correcto.

2.9. RODAMIENTO

$P = 150 \text{ kg}$ o 330.6 lb

Referencias

L_d = Vida del rodamiento en rev

L_{10} = Factor de duración recomendada

w = Velocidad angular del eje

C_c = Capacidad de carga dinámica del rodamiento en lb

K = Constante que depende el tipo de rodamiento

$$L_d = L_{10} * w \quad (19)$$

$$C_c = P \left(\frac{L_d}{10^6} \right)^{\frac{1}{K}} \quad (20)$$

$$L_d = 30000 * 30$$

$$L_d = 900000 \text{ rev}$$

$$L_d = 0.9 * 10^6 \text{ rev}$$

Para el rodamiento de bolas $K = 3$

$$C_c = 330.6 \left(\frac{0.9 * 10^6}{10^6} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$C_c = 319.2 \text{ lb}$$

Dados los análisis se escogió el rodamiento 6207 con las características técnicas que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Rodamiento 6207.

Rodamiento 6207	
Detalle	Medidas
Diámetro interior	35 mm
Diámetro exterior	72 mm
Ancho	17 mm
Peso del rodamiento	0,3 kg
Capacidad de carga dinámica	27500 N
Capacidad de carga estática	15300 N
Velocidad limite	5700 1/min
Carga límite de fátiga	720

2.9.1. DISEÑO DEL CHASIS PRINCIPAL

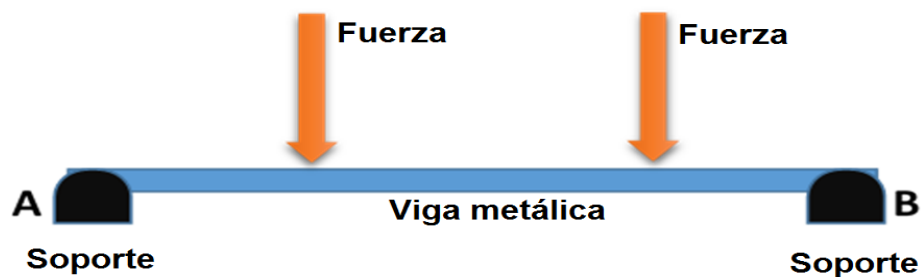


Figura 7. Dibujo de viga lateral.

2.9.2. DISEÑO DE LA VIGA PRINCIPAL

La viga es un elemento destinado a soportar cargas transversales que pueden estar en cualquier punto. El segway cuenta con cuatro vigas que serán las que soporte mayor peso, dos de ellas son más largas por lo cual sus momentos serán más grandes como se muestra en la Figura 7.

El elemento es una viga en L como se muestra en la Figura 8 dado que la parte interior del chasis del segway es la encargada de guardar elementos electrónicos y baterías.



Figura 8. Perfil en L de acero.

$$\text{Peso} = \text{masa} * \text{gravedad} \quad (21)$$

$$\text{Peso} = 50 \text{ kg} * 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso A} = 500 \text{ N}$$

$$\text{Peso B} = 500 \text{ N}$$

$$\text{Longitud} = 0.45 \text{ m}$$

Análisis de fuerzas

$$\sum F_x = 0 \quad (22)$$

$$A_x = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad (23)$$

Dado que se tiene dos puntos de apoyo que son A y B y dos fuerzas de la misma dirección es decir que están bajando los apoyos hacen la resistencia a dichas fuerza como se muestra a continuación.

$$A_y + B_y - 500 \text{ N} - 500 \text{ N} = 0$$

Análisis de momentos

$$\sum M_a = 0 \quad (24)$$

$$0.15 \text{ m} * 500 \text{ N} + 0.30 \text{ m} * 500 \text{ N} - 0.45 B_y = 0$$

$$B_y = \frac{75 \text{ N} + 150 \text{ N}}{0.45}$$

$$B_y = \frac{225 \text{ N}}{0.45}$$

$$B_y = A_y = 500 \text{ N}$$

2.9.3. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE CARGAS

En la Figura 9 se puede apreciar dos cargas que son los puntos de apoyos de la persona que va a utilizar el segway.

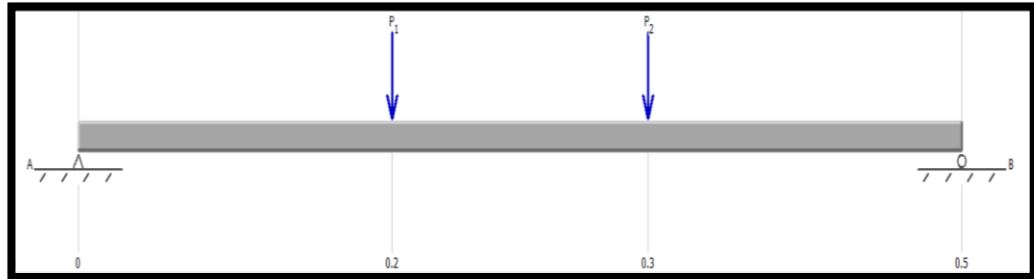


Figura 9. Diagrama de distribución de cargas, viga lateral.

2.9.4. DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE

En el diagrama de fuerza cortante podemos ver que en el espacio que se encuentra en la mitad de las fuerzas no se ejerce presión por ende podemos decir que se debe diseñar para los puntos de apoyo como se muestra en la Figura 10.

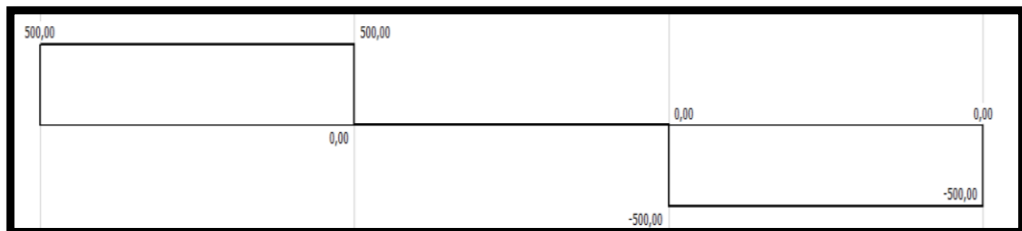


Figura 10. Diagrama de momento cortante, viga lateral.

2.9.5. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR

El diagrama nos muestra que en el centro se encuentra el mayor momento que sufre la viga como se muestra en la Figura 11.

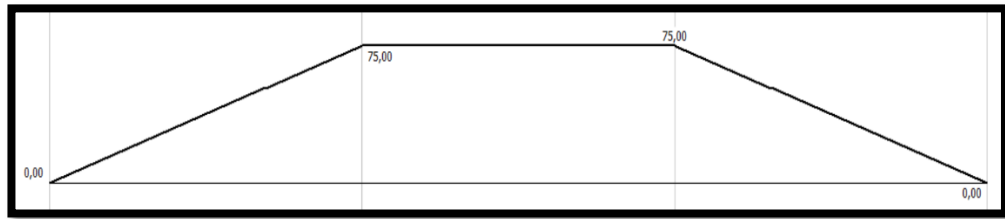


Figura 11. Diagrama de momento flector, viga lateral.

$$M_{max} = 500 \text{ N} * 0.15 \text{ m}$$

$$M_{max} = 75 \text{ Nm}$$

Mediante el cálculo del momento flector se determina el esfuerzo máximo y mínimo, en este caso el esfuerzo mínimo es cero debido a que la viga no soportara ningún peso sin el usuario del segway.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S} \quad (25)$$

$$\sigma_{min} = 0$$

$$\sigma_{max} = \frac{75}{S}$$

Se determina el esfuerzo alternativo:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (26)$$

$$\sigma_a = \frac{75 - 0}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{37.5}{S}$$

Se determina el esfuerzo medio:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (27)$$

$$\sigma_m = \frac{75 + 0}{2}$$

$$\sigma_m = \frac{37.5}{S}$$

El factor de concentración de esfuerzos es:

$$K_t = 1 \rightarrow \text{Dado que no existe concentración de esfuerzos}$$

$$S'n = S_n * C_m * C_{st} * C_r * C_s \quad (28)$$

Para este problema se establece el material Acero inoxidable AISI 304 estableciendo las siguientes constantes:

$S_u = 586 \text{ MPa}$, Resistencia a la tension del acero inoxidable AISI304

$S_n = (0.5)(586) = 293 \text{ MPa}$

$C_m = 1$, Acero forjado

$C_{st} = 1$, Para esfuerzos de tipo flexionante

$C_r = 0.81$, Para 99% de confiabilidad

$C_s = 0.8$, Valor a verificar

La resistencia de fatiga del material bajo condiciones reales para este caso:

$S'n = 293 * 10^6 * 1 * 1 * 0.81 * 0.8$

$S'n = 189.86 * 10^6 \text{ Pa}$

Por último, se determina el factor de seguridad:

$N = 3 \rightarrow$ Para estructuras estáticas, con cargas dinámicas con incertidumbre

Por el método de Goodman

Donde:

K_t = Factor de concentración de esfuerzos

σ_a = Esfuerzo alternativo en Pa

$s'n$ = Resistencia de fatiga del material bajo condiciones reales en Pa

σ_m = Esfuerzo medio en Pa

s_u = Resistencia última de tensión en Pa

N = Factor de seguridad

$$\frac{K_t * \sigma_a}{S'n} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{1}{N} \quad (29)$$

$$\frac{(1) * \left(\frac{37.5}{S}\right)}{(189.86 * 10^6)} + \frac{\frac{37.5}{S}}{586 * 10^6} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{1.98 * 10^{-7}}{S} + \frac{6.4 * 10^{-8}}{S} = \frac{1}{3}$$

$$S = 7.86 * 10^{-7} \text{ m}^3$$

$$S = 0.786 \text{ cm}^3$$

El cálculo realizado es el mínimo para soportar el peso que soporta la viga.

Tomando en cuenta estos valores se sugiere un perfil en L de 25 milímetros por lado y 3.2 milímetros de espesor.

$$S = 0.84 \text{ cm}^3$$

$$I = 0.34 \text{ cm}^4$$

Se procedió a verificar el perfil en L o ángulo seleccionado:

$$0.84 \text{ cm}^3 > 0.786 \text{ cm}^3$$

$$\sigma_a = \frac{37.5}{8.4 * 10^{-7}}$$

$$\sigma_a = 44.64 * 10^6 \text{ Pa}$$

$$\sigma_m = \frac{7.35}{0.67 * 10^{-6}}$$

$$\sigma_m = 44.64 * 10^6 \text{ Pa}$$

Se determina el factor de seguridad:

$$\frac{(1) * (44.64 * 10^6)}{(189.86 * 10^6)} + \frac{44.64 * 10^6}{586 * 10^6} = \frac{1}{N}$$

$$0.311 = \frac{1}{N}$$

$$N = 3.21$$

$$3.21 > 3$$

El factor de seguridad es superior al factor de referencia que es tres por lo tanto la máquina funcionará.

2.10. DISEÑO DE LA VIGA SECUNDARIA

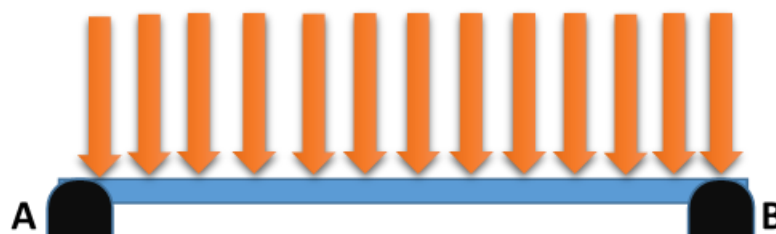


Figura 12. Diagrama de viga secundaria.

Datos

La carga distribuida que se muestra en la Figura 12 se toma en cuenta como una carga puntual en el centro de la viga.

$$\text{Peso} = \text{masa} * \text{gravedad} \quad (21)$$

$$\text{Peso} = 100 \text{ kg} * 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso} = 1000 \text{ N}$$

$$\text{Longitud} = 0.30 \text{ m}$$

Análisis de fuerzas

$$\sum F_x = 0 \quad (22)$$

$$A_x = 0$$

$$\sum F_y = 0 \quad (23)$$

$$A_y + B_y - 1000 \text{ N} = 0$$

Análisis de momentos

$$\sum M_a = 0 \quad (24)$$

$$0.15 \text{ m} * 1000 \text{ N} - 0.3 B_y = 0$$

$$B_y = \frac{150}{0.3}$$

$$B_y = A_y = 500 \text{ N}$$

2.10.1. DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE CARGAS

En el siguiente diagrama se muestra la ubicación de la carga que si bien es una carga distribuida para objeto del cálculo se toma como una carga puntual tras hacerla conversión como se muestra en la Figura 13.

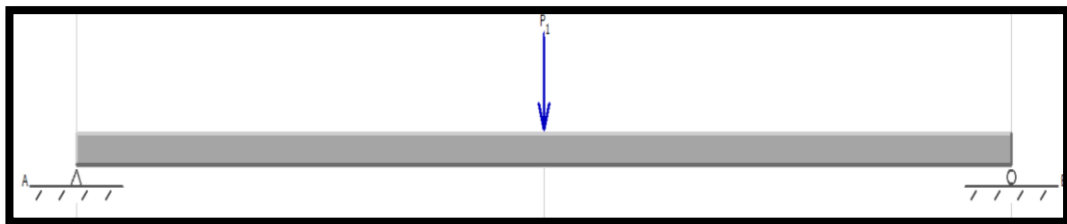


Figura 13. Diagrama de distribución de cargas, viga frontal.

2.10.2. DIAGRAMA DE FUERZA CORTANTE

En el diagrama de esfuerzo cortante se puede ver un cambio brusco de esfuerzo justo en la mitad de la vida producto de la carga como se muestra en la Figura 14.

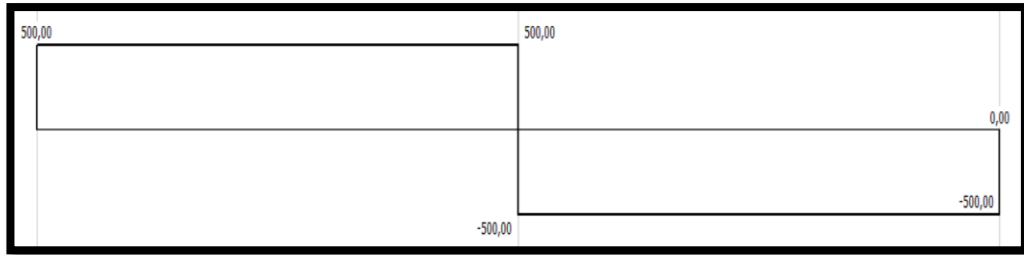


Figura 14. Diagrama de momento cortante, viga frontal.

2.10.3. DIAGRAMA DE MOMENTO FLECTOR

El diagrama nos muestra que mayor momento que sufre la viga se encuentra justo en el centro de la misma como se muestra en la Figura 15.

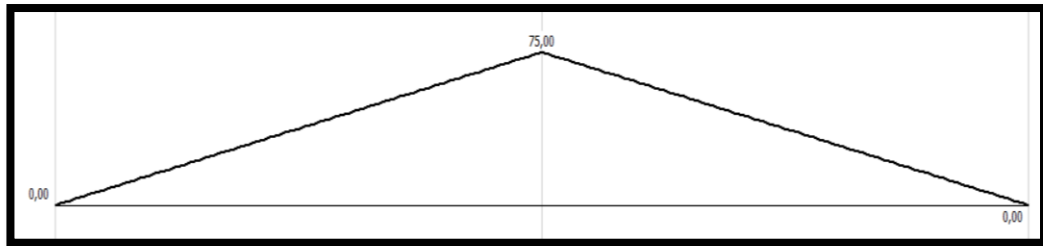


Figura 15 Diagrama de momento flector, viga lateral

$$M_{max} = 500 \text{ N} * 0.15 \text{ m}$$

$$M_{max} = 75 \text{ Nm}$$

Mediante el cálculo del momento flector se determina el esfuerzo máximo y mínimo, en este caso el esfuerzo mínimo es cero por lo que la viga no soportará ningún peso sin el usuario del segway.

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max}}{S} \quad (25)$$

$$\sigma_{min} = 0$$

$$\sigma_{max} = \frac{75}{S}$$

Se determina el esfuerzo alternativo:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (26)$$

$$\sigma_a = \frac{75 - 0}{2}$$

$$\sigma_a = \frac{37.5}{S}$$

Se determina el esfuerzo alternativo:

$$\sigma_m = \frac{\frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}}{s} \quad (27)$$

$$\sigma_a = \frac{\frac{75 - 0}{2}}{s}$$

$$\sigma_a = \frac{37.5}{s}$$

El factor de concentración de esfuerzos es:

$K_t = 1 \rightarrow$ Dado que no existe concentración de esfuerzos

$$S'_n = S_n * C_m * C_{st} * C_r * C_s \quad (28)$$

Para este problema se establece el material Acero inoxidable AISI 304 estableciendo las siguientes constantes:

$S_u = 586 \text{ MPa}$, Resistencia a la tensión del acero inoxidable AISI304

$S_n = (0.5)(586) = 293 \text{ MPa}$

$C_m = 1$, Acero forjado

$C_{st} = 1$, Para esfuerzos de tipo flexionante

$C_r = 0.81$, Para 99% de confiabilidad

$C_s = 0.8$, Valor a verificar

La resistencia de fatiga del material bajo condiciones reales para este caso:

$$S'_n = 293 * 10^6 * 1 * 1 * 0.81 * 0.8$$

$$S'_n = 189.86 * 10^6 \text{ Pa}$$

Por último, se determina el factor de seguridad:

$N = 3 \rightarrow$ Para estructuras estáticas, con cargas dinámicas con incertidumbre

2.10.4. POR EL MÉTODO DE GOODMAN

Donde:

K_t = Factor de concentración de esfuerzos

σ_a = Esfuerzo alternativo en Pa

s'_n = Resistencia de fatiga del material bajo condiciones reales en Pa

σ_m = Esfuerzo medio en Pa

s_u = Resistencia última de tensión en Pa

N = Factor de seguridad

$$\frac{K_t * \sigma_a}{S_m} + \frac{\sigma_m}{S_u} = \frac{1}{N} \quad (29)$$

$$\frac{(1) * \left(\frac{37,5}{S}\right)}{(189.86 * 10^6)} + \frac{\frac{37.5}{S}}{586 * 10^6} = \frac{1}{3}$$

$$\frac{1.97 * 10^{-7}}{S} + \frac{6.3 * 10^{-7}}{S} = \frac{1}{3}$$

$$S = 7.81 * 10^{-7} m^3$$

$$S = 0.781 cm^3$$

El cálculo realizado es el mínimo para soportar el peso que soporta la viga. Tomando en cuenta estos valores se sugiere un perfil en L de 25 milímetros por lado y 3.2 milímetros de espesor.

$$S = 0.84 cm^3$$

$$I = 0.34 cm^4$$

Se procedió a verificar el perfil en L o ángulo seleccionado:

$$0.84 cm^3 > 0.781 cm^3$$

$$\sigma_a = \frac{37.5}{0.84 * 10^{-6}}$$

$$\sigma_a = 44.64 * 10^6 Pa$$

$$\sigma_m = \frac{37.5}{0.84 * 10^{-6}}$$

$$\sigma_m = 44.64 * 10^6 Pa$$

Se determina el factor de seguridad:

$$\frac{(1) * (44.64 * 10^6)}{(189.86 * 10^6)} + \frac{44.64 * 10^6}{586 * 10^6} = \frac{1}{N}$$

$$0.311 = \frac{1}{N}$$

$$N = 3.21$$

3.21 > 3

El factor de seguridad es superior al factor de referencia que es tres por lo tanto la máquina funcionará.

2.10.5. DISEÑO DE LA COLUMNA

N= 3 factor de diseño para elementos de máquina.

Pa= 1000 N carga soportada por la columna.

2.10.6. CARGA CRÍTICA

$$P_{crit} = Pa * N \quad (30)$$

$$P_{crit} = 1000 * 3$$

$$P_{crit} = 3000 \text{ N}$$

Las características del material en ese caso el acero inoxidable ASTM A5000 son las siguientes: (Mott, 2019)

$$E = 207 * 10^9 \text{ Pa}$$

$$S_y = 270 * 10^6 \text{ Pa}$$

Factor de conexión de los extremos

K= 0.65 esto se aplica cuando la columna es empotrada – empotrada

2.10.7. LA LONGITUD DE LA COLUMNA ES DE:

$$L = 0.12 \text{ m}$$

Cuando son columnas empotradas en los extremos

2.10.8. CONSTANTE DE COLUMNA

$$C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * E}{S_y}} \quad (31)$$

$$C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * 207 * 10^9}{270 * 10^6}}$$

$$C_c = 123.017$$

Se realizará el análisis asumiendo que la columna es corta y se trabajará de esta forma para posteriormente comprobar si el análisis es correcto. Cuando se asume columna larga el método a ser utilizado será la ecuación de Euler y se despeja el momento de inercia del elemento.

2.10.9. MOMENTO DE INERCIA

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 * E * I}{(K * L)^2} \quad (32)$$

$$I = \frac{294 * (0.65 * 0.54)^2}{\pi^2 * 207 * 10^9}$$

$$I = 1.773 * 10^{-11} m^4$$

$$I = 1.773 * 10^{-3} cm^4$$

Este es el momento de inercia mínimo para cumplir con los factores de seguridad y evitar deformaciones que impidan el buen funcionamiento del sistema y hagan que la pieza pierda tiempo de vida útil. Este momento de inercia nos servirá para ceñirnos a los catálogos y elegir el elemento que se adapte a nuestras necesidades.

Perfil en L de 25 mm lado y 3.2 mm de espesor

$$I = 0.34 cm^4 \rightarrow 3.4 * 10^{-9} m^4$$

$$S = 0.48 cm^3$$

$$A = 1.51 cm^2 \rightarrow 15.1 * 10^{-5} m^2$$

(Mott, 2019)

Por medio de la ecuación se determina el radio mínimo.

$$r_{min} = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (33)$$

$$r_{min} = \sqrt{\frac{3.4 * 10^{-9}}{15.1 * 10^{-5}}}$$

$$r_{min} = 0.004745 m$$

Una vez obtenido el radio mínimo se realiza la relación de esbeltez.

$$Re = \frac{K * L}{r_{min}} \quad (34)$$

$$Re = \frac{0.65 * 0.12}{0.004745}$$

$$Re = 16.44$$

Se compara la relación de esbeltez con la constante de columna así podemos determinar si es columna larga o corta.

$$Re < Cc$$

$$16.44 < 123.017$$

Se asumió correctamente por lo cual se identifica que se trata de una columna del tipo corta por lo que para su resolución utilizaremos la fórmula de Johnson para su resolución.

$$P_{crit} = A * S_y * \left[1 - \frac{S_y * ((K * L)/r)^2}{4 * \pi^2 * E} \right] \quad (35)$$

$$P_{crit} = (15.1 * 10^{-5})(270 * 10^6) \left[1 - \frac{270 * 10^6 * ((0.65 * 0.12)/0.004745)^2}{4 * \pi^2 * 207 * 10^9} \right]$$

$$P_{crit} = 40.405 \text{ KN}$$

Por último, se procede a comprar la carga aplicada crítica con la carga crítica que soporta el elemento, el cual se obtuvo a través de los cálculos

$$40.405 \text{ KN} > 294 \text{ N}$$

Se concluye que la operación se ha realizado de forma correcta.

2.11.DISEÑO DE VOLANTE

N= 3 factor de diseño para elementos de máquina

Pa= 98 N carga soportada por la columna

2.11.1.CARGA CRÍTICA

$$P_{crit} = P_a * N \quad (36)$$

$$P_{crit} = 48 * 3$$

$$P_{crit} = 144 \text{ N}$$

Las características del material en ese caso el acero inoxidable ASTM A5000 son las siguientes: (Mott, 2019)

$$E = 207 * 10^9 \text{ Pa}$$

$$S_y = 270 * 10^6 \text{ Pa}$$

Factor de conexión de los extremos (K):

$K= 2.1$ esto se aplica cuando la columna es empotrada – libre (Hibbeler, 2016).

2.11.2. LONGITUD DE LA COLUMNA

La longitud de la columna para este caso es:

$$L= 1.2 \text{ m}$$

2.11.3. CONSTANTE DE COLUMNA

$$C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * E}{S_y}} \quad (31)$$
$$C_c = \sqrt{\frac{2 * \pi^2 * 207 * 10^9}{270 * 10^6}}$$

$$C_c = 123.017$$

Se realizará el análisis asumiendo que la columna es larga y se trabajará de esta forma para posteriormente comprobar si el análisis es correcto. Cuando se asume columna larga el método a ser utilizado será la ecuación de Euler y se despeja el momento de inercia del elemento.

2.11.4. MOMENTO DE INERCIA

$$I = \frac{P_{crit} * (K * L)^2}{\pi^2 * E} \quad (32)$$

$$I = \frac{144 * (2.1 * 1.2)^2}{\pi^2 * 207 * 10^9}$$

$$I = 44.76 * 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$I = 44.76 * 10^{-3} \text{ cm}^4$$

Este es el momento de inercia mínimo para cumplir con los factores de seguridad y evitar deformaciones que impidan el buen funcionamiento del sistema y hagan que la pieza pierda tiempo de vida útil. Este momento de inercia nos servirá para ceñirnos a los catálogos y elegir el elemento que se adapte a nuestras necesidades.

Perfil en L de 25 mm lado y 3.2 mm de espesor

$$I = 0.34 \text{ cm}^4 \rightarrow 3.4 * 10^{-9} \text{ m}^4$$

$$S = 0.48 \text{ cm}^3$$

$$A = 1.51 \text{ cm}^2 \rightarrow 15.1 * 10^{-5} \text{ m}^2$$

Por medio de la ecuación se determina el radio mínimo

$$r_{min} = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (33)$$

$$r_{min} = \sqrt{\frac{3.4 * 10^{-9}}{15.1 * 10^{-5}}}$$

$$r_{min} = 0.004745 \text{ m}$$

Una vez obtenido el radio mínimo realizamos la relación de esbeltez

$$Re = \frac{K * L}{r_{min}} \quad (34)$$

$$Re = \frac{2.1 * 1.2}{0.004745}$$

$$Re = 5.31 * 10^2$$

Se compara la relación de esbeltez con la constante de columna para así poder determinar si es columna larga o corta.

$$Re < Cc \quad (37)$$

$$5.31 * 10^2 < 123.017$$

Se asumió la operación de forma errónea por lo cual ahora estamos seguro que el proceso debe ser realizado por columna corta.

Para la resolución debemos analizar como columna larga, es decir se resolverá por método de Euler

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 * E * I}{(K * L)^2} \quad (35)$$

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 * 207 * 10^9 * 3.4 * 10^{-9}}{(2.1 * 1.2)^2}$$

$$P_{crit} = 1.09 \text{ KN}$$

Por último, se procede a comparar la carga aplicada crítica con la carga crítica que soporta el elemento que se obtuvo a través de los cálculos, cumpliéndose que:

$$1.09 \text{ KN} > 144 \text{ N}$$

2.12. DIMENSIONAMIENTO Y SELECCIÓN RUEDAS

Para la selección de las ruedas debemos buscar aquellas que se acoplen a los siguientes requerimientos:

- Peso de trabajo
- Longitud diametral
- Capacidad de acoplamiento
- Estructura del neumático
- Índice de duración

(ISEV, 2019)

La elección de las ruedas se realizó mediante análisis de diseño y las especificaciones técnicas expuestas anteriormente. Las ruedas son ideales para el segway y muestran gran durabilidad en el tiempo. Se la puede observar en la Figura 16.

2.13. ESPECIFICACIONES

- Diámetro interior de la llanta 200 mm
- Diámetro exterior de la llanta 359 mm
- Dureza de la llanta 65 Shore A
- Diámetro del Rin 1 1/2" (38mm)
- Diámetro del Eje 5/8" (15.8mm)
- Diámetro interior de los baleros 16 mm
- Diámetro exterior de los baleros 35 mm
- Número de balines 12
- Peso total 2.89 kg
- Empaque Granel
- Rin calibre 18 fabricado en acero al carbono con acabado en pintura en polvo poliéster color negro
- Eje fabricado en acero al carbono con acabado galvanizado
- Tiempo de vida útil 3 años en condiciones normales



Figura 16. Llanta de carretilla usada en el proyecto.

2.14. TRANSMISIÓN DE MOTOR A RUEDA

El sistema de transmisión del vehículo segway cuenta con diferentes elementos que permitirán su uso seguro y fiable, además se debe considerar diversos elementos que vienen incluidos tanto en el motor como en las ruedas que vienen prediseñados para el correcto funcionamiento de dichos elementos.

El motor cuenta con un sistema de elementos de sujeción esto permite fijar el motor al chasis fabricada con antelación.

Los elementos de sujeción deberán estar sostenidos en la parte exterior del chasis por una brida que se muestra en la Figura 17, que generará soporte y seguridad a los elementos. Mediante pernos y rodajas de presión el motor permanece estable para proceder al siguiente sistema.



Figura 17. Brida.

El eje del motor cuenta con una chaveta que se muestra en la Figura 18, la cual facilita su manipulación y conjuntamente con un buje se realizó el acople con el eje anteriormente calculado en la sección de diseño.

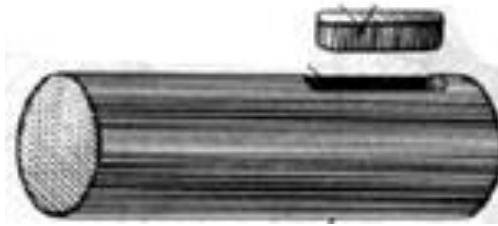


Figura 18. Chaveta.



Figura 19. Buje del segway.

Finalmente se ubicó una brida acoplada con la llanta, las llantas elegidas cuentan con varias facilidades para generar un acople seguro y fiable como se muestra en la Figura 19. La llanta posee con un sistema de fijación que hará factible que la brida se acople mediante un sistema de pernos, además la llanta cuenta para el acople del eje con un sistema roscado que facilitará la unión de dicho elemento. Para generar mayor seguridad la llanta ofrece un sistema de prisioneros, por ende, podemos estar completamente seguros de su correcto funcionamiento.

2.15. PARTES DEL SEGWAY MODELADAS

2.15.1. CHASIS O SOPORTE PRINCIPAL

Tabla 3. Características del chasis de soporte.

Material	ASTM A5000
Masa	3,6 kg
Peso	35,28 N
Volumen	462 cm ³

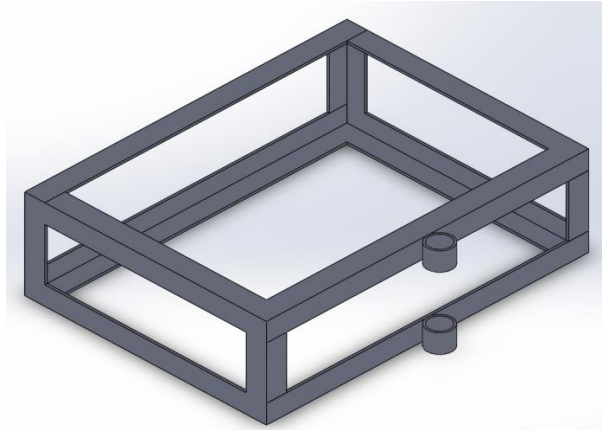


Figura 20. Esquema del chasis de soporte.

Mediante los cálculos realizados podemos construir el chasis que va a soportar al individuo como a los elementos que contendrá que se muestra en la Figura 20. Se realizó el cálculo tomando en cuenta los puntos críticos con ayuda de los datos de la Tabla 3.

2.15.2. VOLANTE

Tabla 4. Características del volante.

Material	ASTM A5000
Masa	1.1 kg
Peso	21,56 N
Volumen	288 cm ³

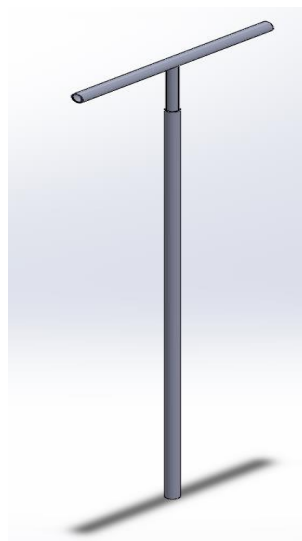


Figura 21. Esquema del volante.

El volante consta de dos partes que regularán la altura para generar mayor comodidad al usuario del segway como se muestra en la Figura 21, en la parte superior se encuentran dos pulsadores que permiten el giro del

segway y está ubicado en el centro un botón ON/OFF para el encendido y apagado del vehículo y sus materiales se pueden evidenciar en la Tabla 4.

2.15.3. PLACAS PROTECTORAS

Tabla 5. Características de placas protectoras.

Material	ASTM A5000
Masa	1.1 kg
Peso	10.78 N
Volumen	140 cm ³

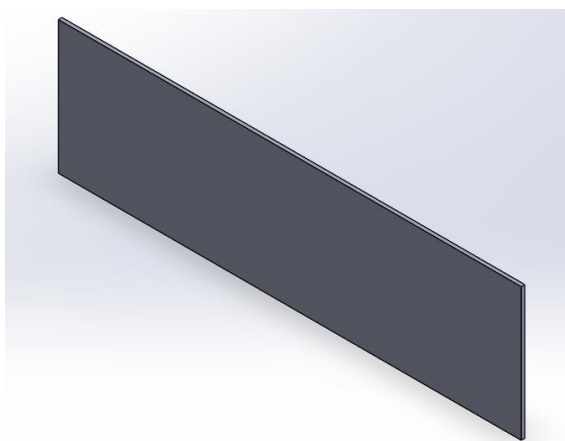


Figura 22. Esquema de la placa protectora.

Estas placas se encuentran en las laterales del chasis y sirven para generar protección al vehículo del exterior por sus condiciones que se muestran en la Tabla 5, pero también le brindan soporte ya que se encuentran hechas de un material muy resistente que le adicionará estabilidad a la estructura principal como se muestra en la Figura 22.

2.15.4. TAPA SUPERIOR

Tabla 6 Características de la tapa superior

Material	ASTM A5000
Masa	3,5 kg
Peso	34,3 N
Volumen	443 cm ³

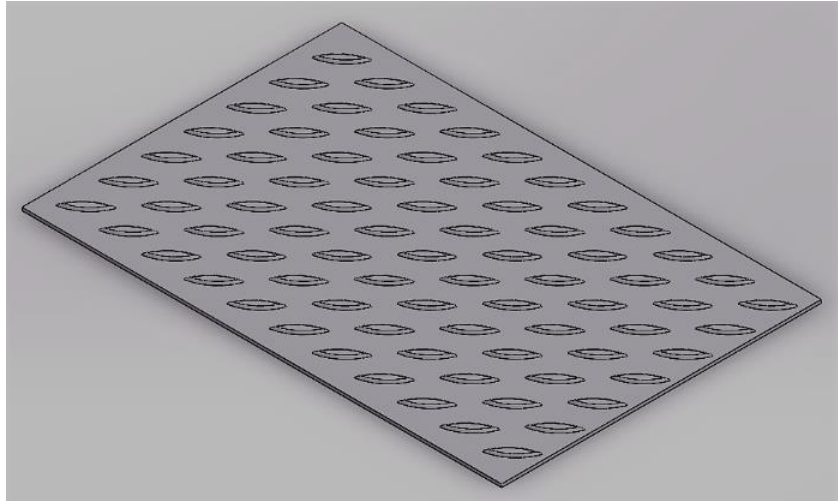


Figura 23. Esquema de la placa protectora superior.

La tapa superior que se muestra en la Figura 23 de aluminio antideslizante y sus características se puede ver en la Tabla 6, lo que proporciona resistencia para soportar al individuo y a su vez genera seguridad por la matriz de elementos romboides que brinda su diseño.

2.15.5. TAPA PROTECTORA DE LA PARTE ELECTRÓNICA

Tabla 7 Características de la tapa protectora

Material	ASTM A5000
Masa	2,2 kg
Peso	21,56 N
Volumen	279 cm ³

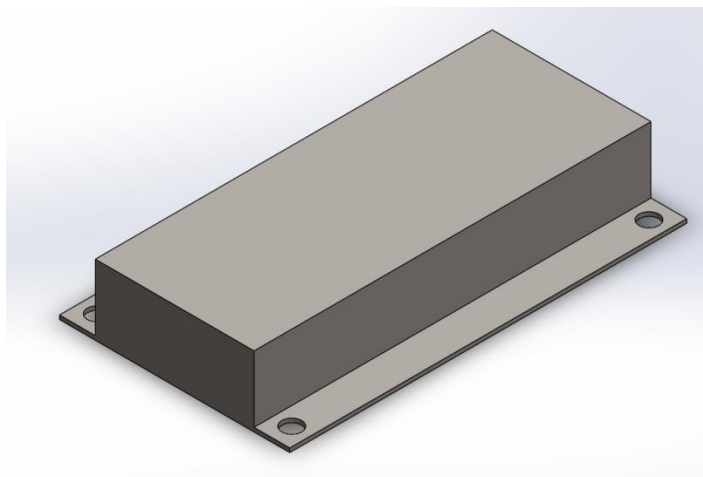


Figura 24. Esquema de la caja protectora de circuitos.

La tapa que se muestra en la Figura 24 debe ubicarse en el centro del vehículo paralelo a las ruedas dado que el acelerómetro y giroscopio tendrán

una mejor recepción de datos. Además, ayudarán con la programación del sistema y sus características están en la Tabla 7.

2.15.6. FACTOR DE SEGURIDAD

Mediante los cálculos de diseño se realizó el dimensionamiento de los materiales necesarios para la fabricación del segway. El diagrama que se muestra en la Figura 25 permite evidenciar que el factor de seguridad es mucho mayor a lo estimado.

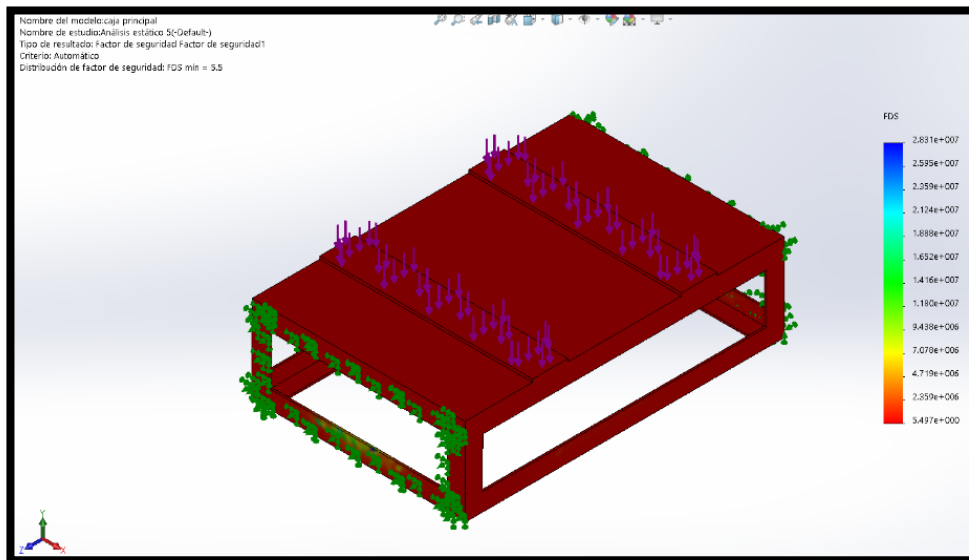


Figura 25. Factor de deformación.

2.16. DISEÑO ELÉCTRICO Y ELECTRÓNICO

2.16.1. DIMENSIONAMIENTO DEL DRIVER DE CONTROL

El driver que se muestra en la Figura 26 fue seleccionado por sus características principalmente por la velocidad y la capacidad de almacenamiento que brindaban la posibilidad de gobernarlo con un programa robusto. Es un elemento electrónico, eléctrico y de potencia que tiene como finalidad escalar los datos que determinen el control para que la placa pueda gobernar los motores según el cambio.

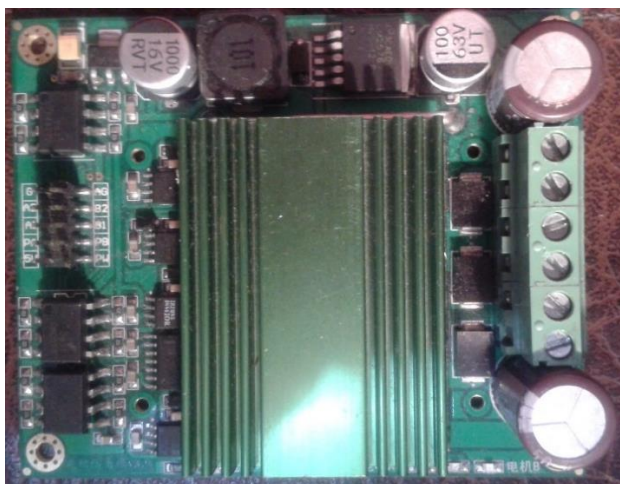


Figura 26. Driver control dual L283N.

Especificaciones

- Salida para 2 motores
- 60 Amperios de trabajo nominal
- 24 voltios de entrada máximo.
- Dos entradas de 5 a 3.3 voltios

2.16.2. SELECCIÓN DE LA PLACA CONTROLADORA

La elección de la placa controladora se la realizó bajo las siguientes consideraciones:

1. La placa controladora debe poseer tiempos de respuestas para la corrección de la aceleración del segway.
2. Su capacidad de almacenamiento debe superar los 4 MB dado que los programas pueden ser de esa capacidad o una capacidad menor.
3. La memoria de procesamiento debe ser mayor a 100 KB, a fin de garantizar el manejo efectivo de la información a procesar.
4. Compatibilidad con diversos programas.

2.16.3. PLACA CONTROLADORA



Figura 27. Placa MCU STM32F407VG.

- Arquitectura de 32 bits, ARM4
- 1MB memoria flash
- 192kB memoria RAM
- Cristal de 168MHz
- Punto flotante por hardware
- 9 puerto GPIO (A-I)
- Controlador de memoria externa FSMC
- Capacidad de manejo EthernetMac
- USB (OTG)
- 2 buses DMA
- 3 módulos ADC (17-AIN)
- 2 DAC
- 14 Timers (12-16 bits, 2-32 bits)
- 6 UART
- 2 CAN
- 3 SPI
- 3 I2C

Las características de la placa controladora que se muestra en la Figura 27 son apropiadas para el control del proyecto segway. Adicional a los dispositivos propuestos cuenta con algunos elementos que se utilizarán para realizar diversas pruebas: como los juegos de leds integrados o el acelerómetro que no cuenta con la mejor precisión pero que puede ser muy útil.

La programación de la placa se la realizó a través de un sistema embebido por medio del complemento de MATLAB llamado WAJUNG que es una librería que permite realizar testeos en tiempo real y embeber código.

2.16.4. SELECCIÓN DEL ACELERÓMETRO Y EL GIROSCOPIO

Para la elección del acelerómetro y giroscopio se tomará en cuenta las siguientes especificaciones:

- Precisión de la medición
- Condiciones de medición
- Condiciones de trabajo óptimo
- Cálculo del error

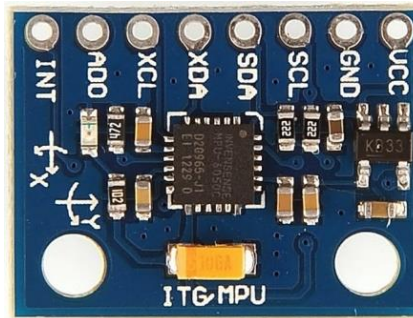


Figura 28. MPU6050.

2.16.5. GIROSCOPIO:

- Sensores de velocidad angular (giroscopios) con salida digital X, Y Z, con un rango de escala total programable por el usuario de ± 250 , ± 500 , ± 1000 y ± 2000 ° / s
- La señal de sincronización externa conectada al pin FSYNC soporta la sincronización de imagen, vídeo y GPS
- Los ADC de 16 bits integrados permiten el muestreo simultáneo de giroscopios
- Mayor estabilidad de polarización y sensibilidad de la temperatura reduce la necesidad de calibración del usuario
- Mejora del rendimiento del ruido de baja frecuencia
- Filtro de paso bajo digitalmente programable
- Corriente de funcionamiento del giroscopio: 5mA
- Corriente en espera: 5 μ A
- Factor de escala de sensibilidad calibrado en fábrica

2.16.6. ACELERÓMETRO

- Acelerómetro de triple eje de salida digital con un rango de escala programable de $\pm 2g$, $\pm 4g$, $\pm 8g$ y $\pm 16g$
- Los ADC de 16 bits integrados permiten el muestreo simultáneo de acelerómetros sin necesidad de multiplexor externo
- Corriente de funcionamiento normal del acelerómetro: 500 μ A
- Corriente de modo de acelerómetro de baja potencia: 10 μ A a 1,25Hz, 20 μ A a 5Hz, 60 μ A a 20Hz, 110 μ A a 40Hz
- Detección y señalización de orientación
- Detección de toque
- Interrupciones programables por el usuario
- Interrupción de caída libre
- Interrupción de alta-G
- Interrupción de movimiento cero / movimiento
- Autotest de usuario

2.17. DISEÑO PLACA PCB DE CONTROL

Mediante el software PROTEUS se realizó el diseño de la simulación como se muestra en la Figura 29 de los elementos para verificar el correcto funcionamiento del sistema, en la parte electrónica y eléctrica se busca conectar los elementos como son: borneras, optoacopladores, acelerómetro y giroscopio. Es importante recordar utilizar protecciones como pueden ser resistencia o elementos que generen seguridad al sistema. Un punto muy importante son las tierras si bien el software genera tierras por defecto en el circuito debemos verificar que las tierras estén conectadas entre sí.

El software posee herramientas de testeo como son las puntas de prueba que generan pulsos de uno o cero que facilitaran el análisis, existen otros dispositivos similares a las puntas de pruebas que nos sirven para verificar si la salida se encuentra en "1" o "0". Se debe tomar en cuenta que el "1" quiere decir activo o que se encuentra pasando energía y el "0" indica que se encuentra cerrado, desactivado o que no existe paso de energía.

PROTEUS posee en su biblioteca gran cantidad de elementos para el análisis del sistema. Se puede tomar los elementos directamente o buscar unos elementos equivalentes que genere los mismos resultados.

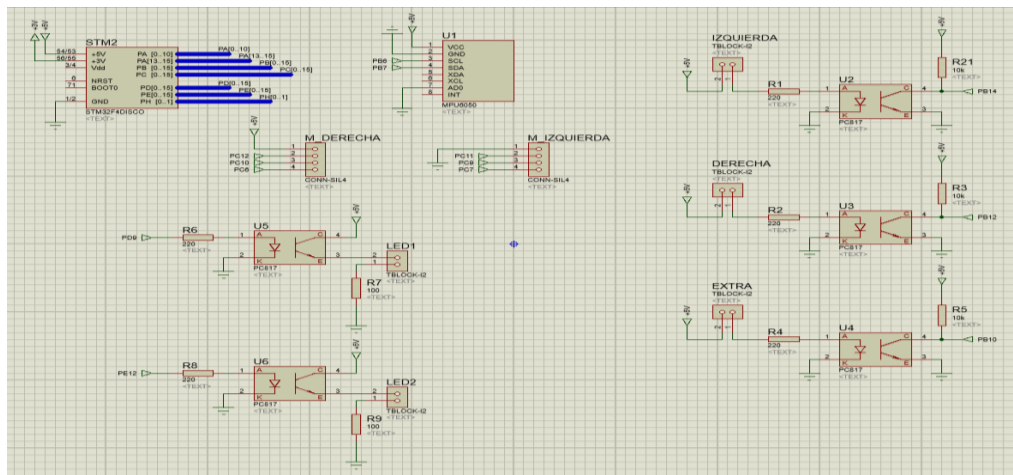


Figura 29. Circuito simulado.

Se realizó el diseño de las pistas en el programa ARES de PROTEUS como se muestra en la Figura 30 tomando en cuenta la ubicación de cada elemento para optimizar los espacios y que la tarjeta pueda ser ubicada de mejor forma. Los elementos que se encuentran en la parte superior izquierda son las borneras de salida y entrada, en la parte interna se encuentran los octoacopladores, en la parte inferior izquierda se encuentra el acelerómetro y el giroscopio con sus respectivas salidas; a la derecha se encuentra la placa controladora.

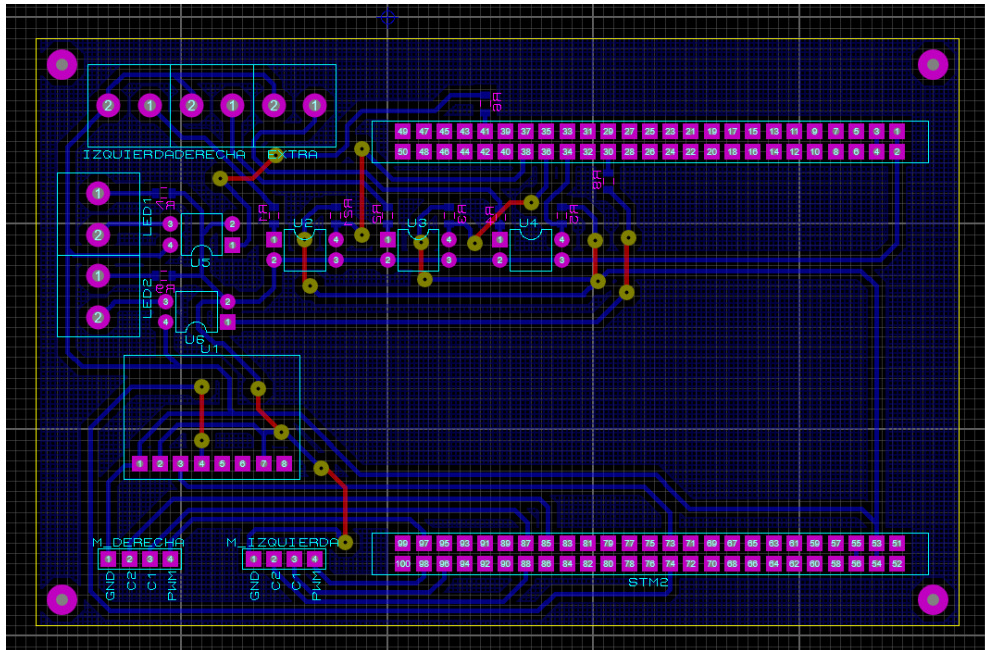


Figura 30. Circuito en PCB.

2.18. TIEMPO DE DESCARGA DE LA BATERÍA

Las características de la batería se muestran en la Figura 31.

Especificación	
Celdas Por Unidad	6
Voltaje por unidad	12 V
Capacidad	12 Ah a velocidad de 20 horas a 1.75 V por celda a 25 ° C (77 ° F)
Peso (kg)	Aprox. 3.67kg. (8.09 libras)
Corriente máxima de descarga (A)	150 / 180A (5 seg.)
Resistencia interna Aprox.	Aprox. 16.7 mΩ
Rango de temperatura de funcionamiento	Descarga: -15 °C ~ 50 °C (5 °F ~ 122 °F) Carga: -15 °C ~ 40 °C (5 °F ~ 104 °F) Almacenamiento: -15 °C ~ 40 °C (5 °F ~ 104 °F)
Rango de temperatura nominal de funcionamiento	25 °C ± 3 °C (77 °F ± 5 °F)
Voltaje de carga del flotador	13.5 a 13.8 VDC / unidad Promedio a 25 ° C (77 ° F)
Límite de corriente de carga máxima recomendada	3.6 A
Servicio de Ecuilización y Ciclo.	14.4 a 15.0 VDC / unidad Promedio a 25 ° C (77 ° F)
Autodescarga	Debe ser más del 75% de la capacidad que antes del almacenamiento después de almacenarse durante 6 meses a temperatura ambiente. 25 °C
Terminal	F1 / F2-Faston Tab187 / 250
Material del contenedor	EI ABS (UL94-HB) y la resistencia a la inflamabilidad de (UL94-V0) pueden estar disponibles a pedido.

Figura 31. Características de la batería.

$$\text{Tiempo de trabajo: } \frac{I_{max}}{\text{Capacidad}} \quad (38)$$

$$\text{Tiempo de trabajo: } \frac{48}{12}$$

$$\text{Tiempo de trabajo: } \frac{36}{12}$$

El rango del tiempo de trabajo de la batería es de 3 horas a 4 horas por lo que se cumple a cabalidad los requerimientos.

2.19. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL

Antes de iniciar a programar en el software MATLAB es necesario instalar el programa VISUAL STUDIO 10, esto permite correr el sistema en tiempo real y analizar el complemento en el SIMULINK para garantizar el correcto funcionamiento del sistema.

2.19.1. BLOQUES UTILIZADOS

- Controlador lógico difuso

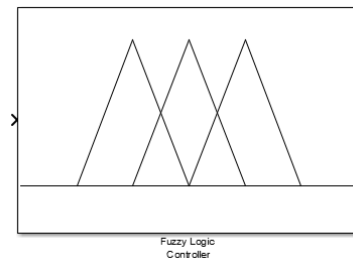


Figura 32. Controlador lógico difuso.

Este elemento que se muestra en la Figura 32. Controlador lógico difuso permite crear diferentes condiciones y actuar según estas. La lógica difusa tiene que ver con la forma en la que los humanos apreciamos el entorno, es decir tomando en cuenta comparaciones.

En el caso del segway se debe ingresar diversas condiciones a este controlador y la velocidad baja cuando el segway este perpendicular al piso y subiendo en caso de que se produzca el proceso contrario. En el caso de la reversa se debe tomar en cuenta el grado de inclinación debe ser mucho menor en un factor de 6 a 1 por la sensibilidad que se tiene al inclinar el segway hacia atrás. La solución se encuentra en la Figura 33.

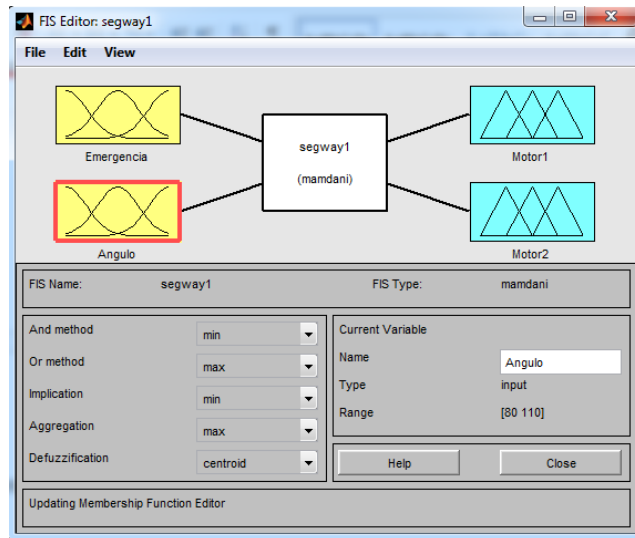
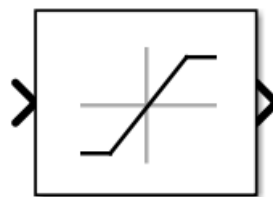


Figura 33. Interior del controlador lógico difuso.

SATURACIÓN

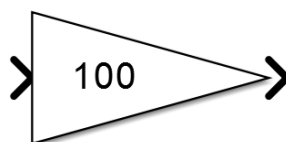


Saturation4

Figura 34 Bloque saturación

El bloque llamado saturación que se muestra en la Figura 34 Bloque saturación permite nivelar la señal que ingresa para codificarla y trabajar según los requerimientos necesarios para la estabilización.

GANANCIA



Gain2

Figura 35. Bloque ganancia.

El bloque que se muestra en la Figura 35. Bloque gananciasirve para multiplicar la señal por un valor constante determinado, tiene la función de amplificador constante.

DERIVADA DISCRETA

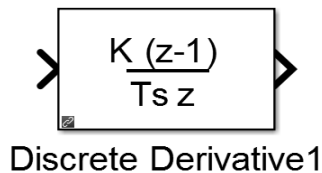


Figura 36. Bloque derivada discreta.

Es una función que se muestra en la Figura 36 que se le da un rango para establecer un análisis sistemático mediante el análisis de la velocidad de cambio de la señal. Es muy útil para este caso, puesto que se trabaja con los datos discretos de velocidad tomados en cada intervalo de tiempo y no con una función continua, lo cual se adapta mejor a la realidad.

ZONA MUERTA

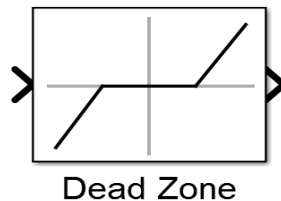


Figura 37. Bloque zona muerta.

Es un espacio donde no se registrarán movimientos como se muestra en la Figura 37 o se estacionarán en un valor fijo para iniciar la estabilización y crear cambios definidos en el proceso. Para el caso analizado del vehículo segway, esto ocurre con mucha frecuencia, por lo tanto es tomado muy en consideración durante el análisis.

FILTRO DISCRETO

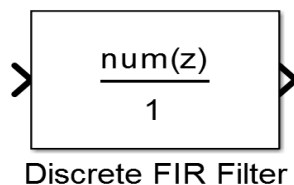


Figura 38. Bloque, filtro discreto.

El filtro discreto que se muestra en la Figura 38 tiene la finalidad de separar el ruido alojado en la señal y generar una onda limpia, dado que durante la operación del segway existe mucha interferencia e introducción de “ruidos” al sistema que deben ser filtrado para dar respuestas más claras. Es de mucha utilidad, dado que la mayor parte de la información es de tipo discreta.

FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA DISCRETA

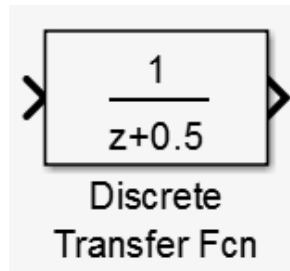


Figura 39. Bloque, función de transferencia discreta.

Los bloques para funciones de transferencia discreta se emplean para implementar sistemas de control discretos; son de utilidad cuando los datos de entrada son de tipo discretos, tal como lo es en el presente caso. Matemáticamente está definida como la relación entre la transformada en Z de la entrada de un sistema y transformada en Z de la salida del mismo.

WAIJUNG

La librería es la encargada de generar la comunicación entre la placa controladora STM32 y los actuadores, estas librerías fueron creadas por AIMAGIN CO.,LTD y son de uso libre. Cuentan con varios bloques de conexión entre la tarjeta y MATLAB. Estos bloques son de entrada y salida tanto de señales tanto analógicas como digitales. La principal razón por la que se usó esta librería en este proyecto se debe a la gran capacidad de procesamiento, almacenamiento y refresco que tiene el microcontrolador, muy superior a los que existen en el mercado, con cual podemos estar seguros de que mediante la librería WAIJUNG no tendremos fallas.

2.20. PROGRAMA DE CONTROL

Mediante la utilización del SIMULINK del software MATLAB como se muestra en la Figura 39 se realizó el programa de control que genera las variaciones de aceleración en las ruedas. El programa cuenta con los bloques explicados en la sección anterior ubicados de tal forma que las señales que ingresan en forma de voltaje de parte del acelerómetro y giroscopio sean escaladas, filtradas para generar un control exacto de las ruedas. Posteriormente se envía señales por medio del controlador lógico difuso. Mientras la inclinación delantera es mayor, la velocidad del vehículo es mayor y viceversa. La señal de salida también pasa por un proceso de limpieza y escalamiento. Se debe tomar en cuenta que, para la correcta elaboración del programa, mientras mejor sea la distribución del centro de gravedad y centro de masa, menos les costará a los motores generar el movimiento deseado y por tanto se realizará menos esfuerzo generando un tiempo mayor de vida útil.

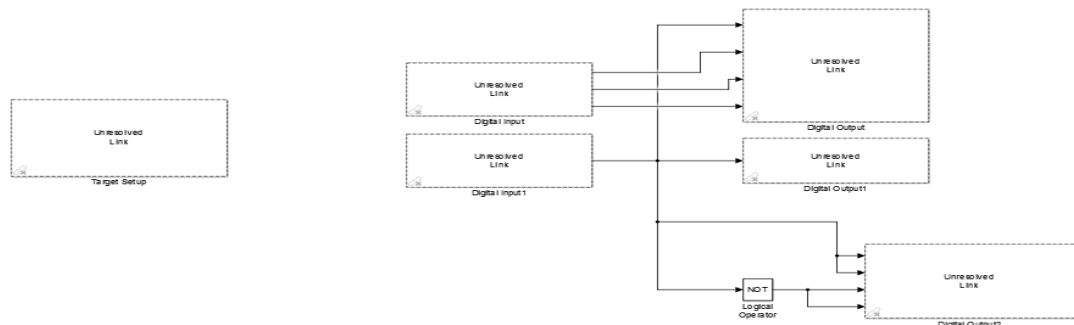


Figura 40. Entradas y salidas del sistema.

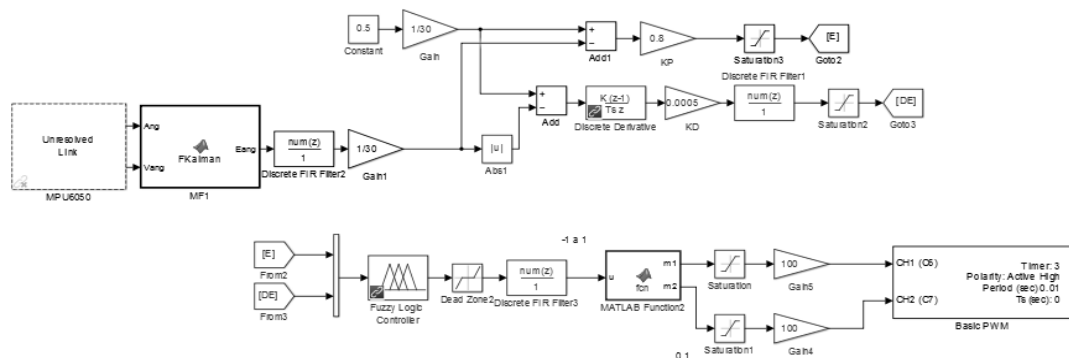


Figura 41. Diagrama de bloques de control del segway.

En la Figura 39 se muestra las entradas y salidas del sistema de la librería WAIJUNG la cual hace funcionar al sistema en tiempo real para el testeó del funcionamiento interno. La Figura 40 muestra la entrada de los datos del sistema el escalamiento de la señal para poder trabajar con ella de forma simple, la estabilización del sistema y su posterior control.

Reglas de funcionamiento

- Cuando el segway tenga una inclinación de 0 a 15 grados la velocidad debe ser 0.
- Cuando el segway tenga una inclinación de 165 a 180 grados la velocidad debe ser 0.
- Cuando el segway incremente su inclinación de 15 a 80 grados la velocidad sube de 0 a 20 km/h.
- Cuando el segway baje su inclinación de 100 a 165 grados la velocidad baja de 20 km/h a 0.
- Cuando el segway tenga una inclinación de entre 80 y 100 grados la velocidad se mantiene en 20 km/h.

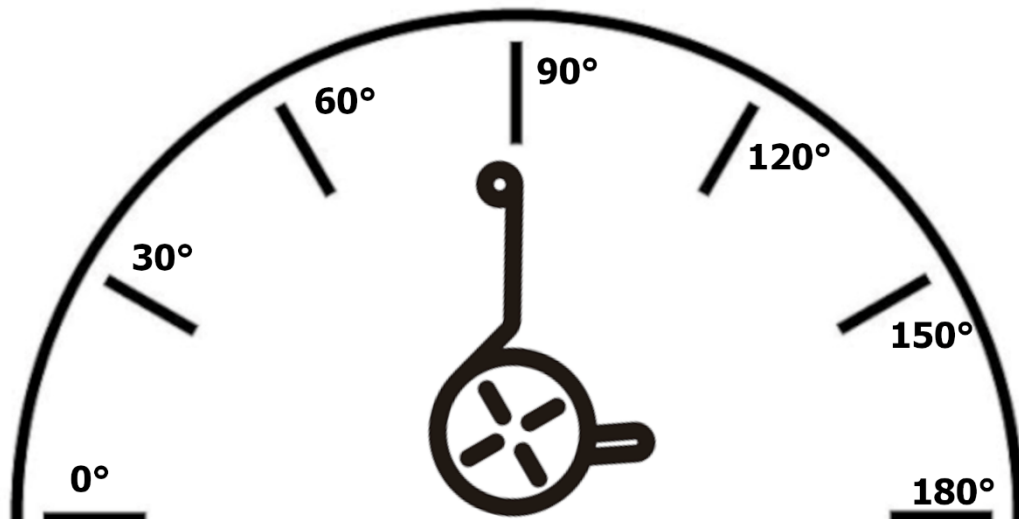
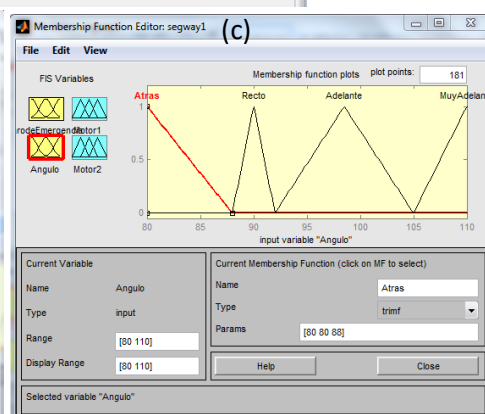
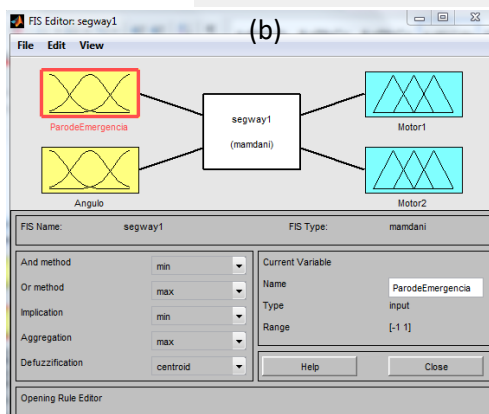
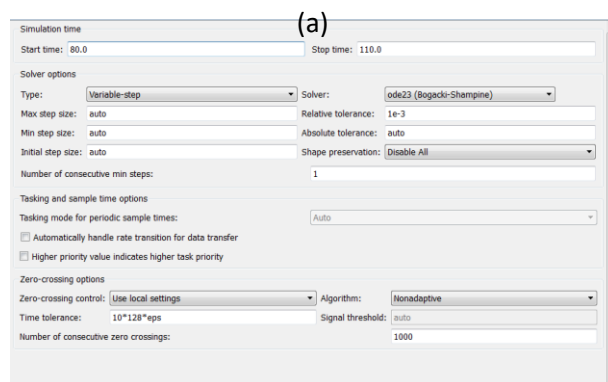


Figura 42. Grados de inclinación .



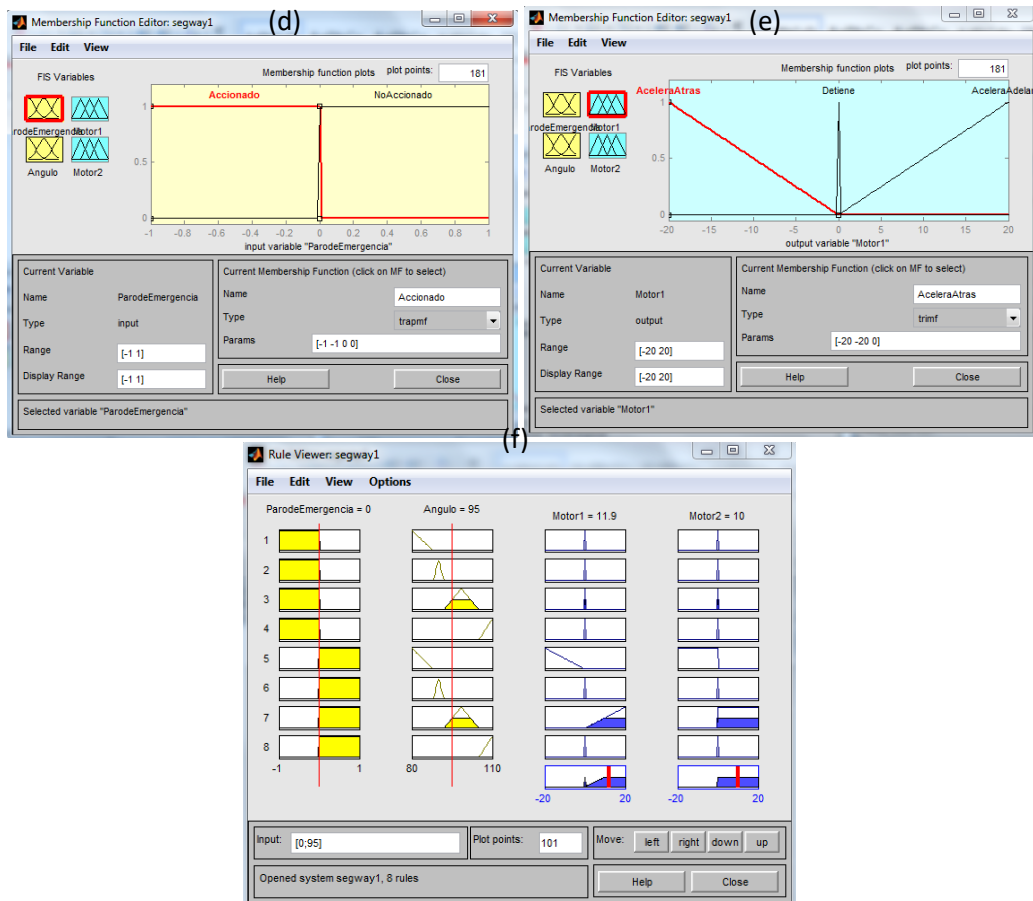


Figura 43. Graficas de funcionamiento.

En la figura 43, se pueden observar las gráficas del controlador difuso diseñado en Matlab, en donde se expone lo siguiente:

- (a) Parámetros de la simulación establecidos en el software Matlab.
- (b) Diagrama general del controlador difuso, donde las entradas son “ParodeEmergencia” (que representa el botón de paro de emergencia) y “Angulo” que representa la inclinación del eje del volante; y, las salidas son las velocidades de salida de los motores (Motor 1 y Motor 2).
- (c) Diagrama difuso de la variable de entrada “Angulo”, establecido de acuerdo a las reglas de funcionamiento antes descritas.
- (d) Diagrama difuso de la variable de entrada “ParodeEmergencia”, el cual sólo posee dos opciones “Accionado” o “No Accionado”.
- (e) Diagrama difuso para el motor 1, establecido de acuerdo a las reglas de funcionamiento antes descritas.
- (f) Diagramas de salida de las reglas difusas establecidas.

En donde las reglas difusas que interviene en este controlador son las mostradas en la figura 44.

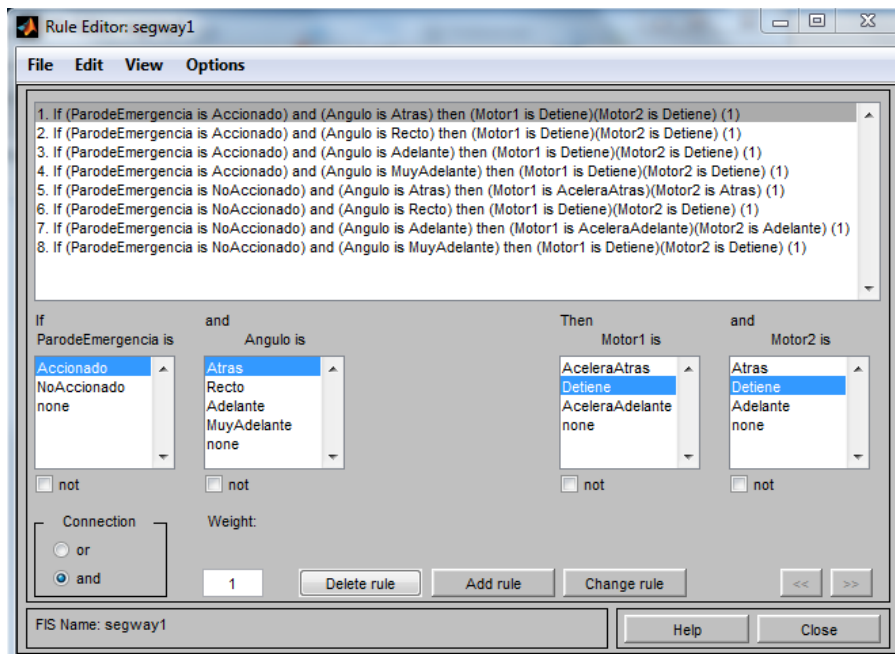


Figura 44. Reglas difusas programadas.

2.21. CALIBRACIÓN DE LOS ÁNGULOS DE INCLINACIÓN PARA LA VELOCIDAD

Los ángulos de inclinación son los que determinarán la velocidad del segway mediante la variación de la aceleración. Mediante el uso del acelerómetro y el giroscopio podemos definir con precisión a qué nivel de inclinación se encuentra el vehículo como se muestra en la Figura 45 y Figura 46, esto facilitará la calibración. El ángulo máximo de inclinación será de quince grados cuando la inclinación sea delantera.

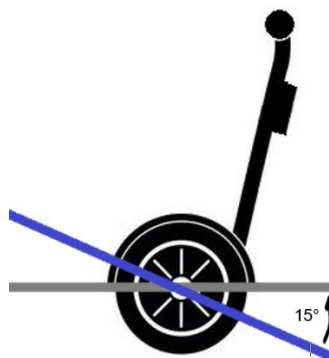


Figura 45. Máxima inclinación delantera.

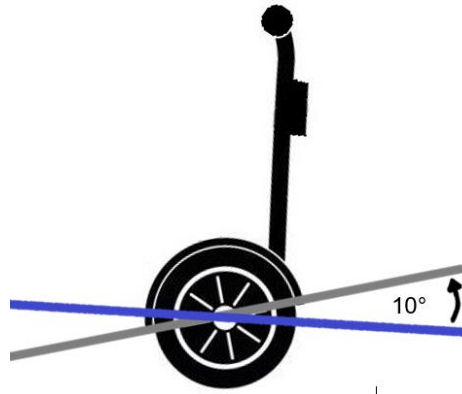


Figura 46. Máxima inclinación trasera.

2.22. PRUEBAS DE MANEJO

Se determinaron varios tipos de pruebas de manejo para generar en el vehículo fiabilidad y seguridad al momento de trasladarse.

2.22.1. PRUEBAS DE CONTROL

La relación que existe entre la velocidad del segway y la inclinación a la que es sometido es directamente proporcional como se muestra en la Tabla 8 donde la velocidad está referenciada en kilómetros sobre hora y la inclinación en grados.

Tabla 8. Pruebas de control.

Pruebas de control	
Inclinación	Velocidad
0	0
3	4
6	8
9	12
12	16
15	20

2.22.2. PRUEBAS DE GIRO

El vehículo gira mediante pulsadores ubicados en los costados del volante que garantizan que el desplazamiento no sea brusco y no se produzcan accidentes. Conforme la velocidad suba, el segway aumentará el radio de giro como se muestra en la Figura 44.

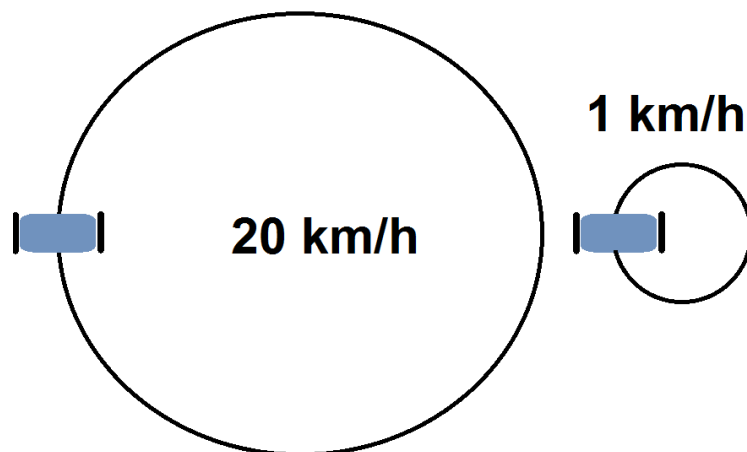


Figura 47. Radio de giro del segway.

Tabla 9. Velocidad vs Radio de giro.

Velocidad		Radio	
3	km/h	32	cm
6	km/h	43	cm
9	km/h	50	cm
12	km/h	32	cm
15	km/h	71	cm
18	km/h	87	cm
20	km/h	110	cm

Con esto se resuelve que el segway tiene velocidad adecuadas ubicadas en los análisis iniciales como se muestra en la Figura 45.



Figura 48. Gráfica Giro vs Velocidad.

2.22.3. PRUEBAS DE PESO A TRANSPORTAR

El vehículo segway fue diseñado para transportar un individuo como se muestra en la Figura 46, sin embargo, con la finalidad de generar fiabilidad se generaron pruebas con diferentes pesos.



Figura 49. Pruebas de peso.

La velocidad del vehículo cambió mínimamente al someterlo a diferentes pesos como se muestra en la Tabla 10. Peso vs Velocidad lo que demuestra que los cálculos del sistema mecánico concuerdan.

Tabla 10. Peso vs Velocidad.

	Peso		Velocidad	
1	90	kg	21	km/h
2	100	kg	20,4	km/h
3	110	kg	20,1	km/h
4	120	kg	20	km/h
5	130	kg	19,8	km/h
6	140	kg	20,1	km/h
7	150	kg	19,6	km/h

El sistema sufre una variación mínima por lo que se concluye que el segway funciona correctamente en un rango de variabilidad aceptable.

2.22.4. PRUEBAS DE SISTEMA MECÁNICO, ELÉCTRICO Y DE CONTROL

Las pruebas mecánicas se realizan únicamente de las características técnicas es decir corroborando que las características ubicadas en las diferentes hojas de datos sean las que corresponden a los diferentes elementos.

Para las pruebas del sistema eléctrico se analizó punto a punto mediante la utilización de un multímetro, se testeó las conexiones y se verificó el paso de corriente. Mediante el multímetro se analizó y midió tanto el voltaje como la corriente (Figura 50).

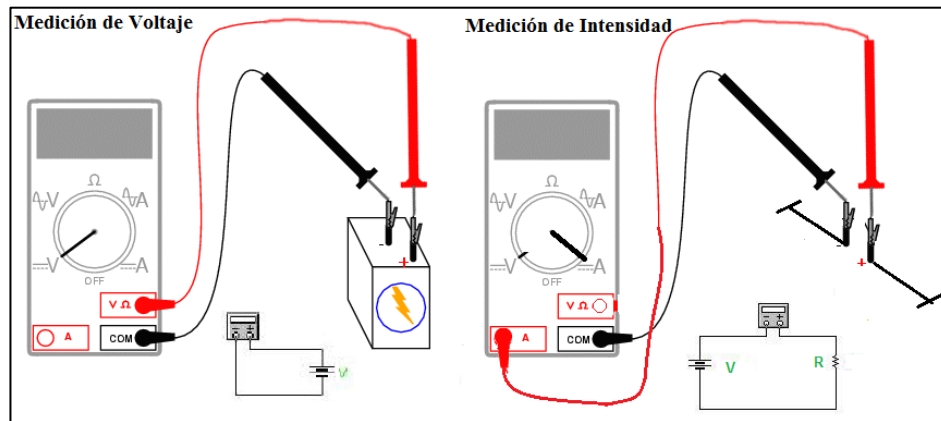


Figura 50. Esquema de Mediciones con Multímetro.

El sistema de control se lo verificó mediante el software de MATLAB utilizando las herramientas de análisis en tiempo real, con esto se verifican los datos del acelerómetro, el osciloscopio, pulsadores e incluso se puede realizar pruebas eléctricas dentro de MATLAB como se muestra en la Tabla 11.

Tabla 11. Tiempo de estabilización.

Grados	Tiempo
3	0,3 s
6	0,6 s
9	0,8 s
12	1 s
15	1,5 s

Con esto se garantiza que el giro sea a una velocidad adecuada para el uso del segway con total seguridad, ya que se puede observar que el tiempo de estabilización no supera los 1,5 s para un giro 15 grados.

Para la prueba de descarga de la batería se tomó en cuenta diversas velocidades de tránsito del segway con valores de peso de carga con aumento graduales y proporcionales entre sí; siendo el esquema representativo de esta prueba el mostrado en la figura 51.

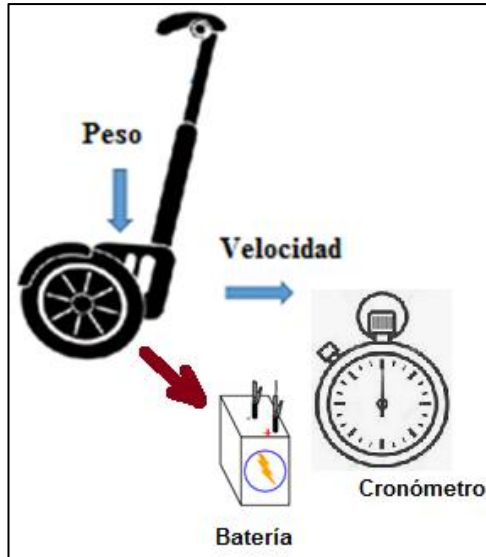


Figura 51. Esquema de prueba de descarga de la batería.

En la Tabla 12 se muestran los tiempos de descarga de la batería a diferentes velocidades de operación y pesos de carga.

Tabla 12. Tiempo de descarga.

Prueba	Velocidad	Peso	Batería
1	15 km/h	100 kg	14,8 h
2	16 km/h	110 kg	13 h
3	17,5 km/h	120 kg	13,1 h
4	18 km/h	130 kg	12,8 h
5	19 km/h	140 kg	12,5 h
6	20 km/h	150 kg	12,3 h

Donde obviamente a mayores condiciones de velocidad y peso el tiempo de descarga se hace cada vez menor; obteniéndose un valor de 12,3 horas para las condiciones más severas de las pruebas (20km/h ; 150kg), y un tiempo de 14,8 horas para las condiciones más favorables (15km/h ; 100kg).

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

2.3. ANÁLISIS DEL SISTEMA DE ESTABILIZACIÓN

El sistema de estabilidad se dividió en dos partes: la mecánica que por la ubicación del centro de masa junto al centro de gravedad generó que el sistema permanezca en equilibrio, la parte de control y la eléctrica permitieron que el sistema pueda ser manipulado mediante la utilización del acelerómetro y el giroscopio.

2.4. ANÁLISIS DE RENDIMIENTO ELÉCTRICO

El rendimiento de la batería es de 3 a 5 años trabajando a alto desgaste durante cinco horas al día, sin embargo, el segway trabaja con un 70% de capacidad de carga de la batería por lo que mediante la regla de tres simple se puede decir que la batería durará de 4 a 6 años. (ANTIVOLS ECLATS, 2015). Se realizaron pruebas de descarga de la batería variando el peso y la velocidad.

2.5. ANÁLISIS DE GIRO DEL SEGWAY

El giro del segway se produce mediante pulsadores. Se evidencia que conforme la velocidad va subiendo el vehículo traza un mayor giro para generar estabilidad y seguridad. En el eje de las abscisas se visualiza la velocidad medida en kilómetros por hora y en el eje de las ordenadas se encuentra el diámetro que traza el giro del segway.

2.6. ANÁLISIS DE PESO

El peso extremo que soporta el segway es de 100 kg, teniendo presente que el factor de seguridad es 3 por lo cual el peso sube a 300 kg. Se efectuó pruebas exactas ubicando el peso por medio de discos en lugares donde irán los pies del individuo y el segway respondió con solvencia, con lo que se indica que el vehículo funciona con pesos iguales o menores a 100 kg.

2.7. ANÁLISIS DE PESO VS VELOCIDAD

Un punto muy importante y en el que muchos vehículos decaen es la velocidad cuando es colocado el peso máximo, en el caso del segway esto no sucede por dos razones:

- El vehículo está diseñado para cumplir los requerimientos de velocidad en cualquier peso, sin superar el peso máximo.
- El vehículo cuenta con motores de alta potencia mediante los cuales el segway puede acelerar hasta los 20 km/h. De acuerdo a lo que se estipuló en el inicio e incluso dado que los motores que se encuentran en el mercado son superiores en potencia a los que se necesitó en cálculos se puede evidenciar que no sufrirá ninguna disminución.

2.8. ANÁLISIS DE SUBIDA EN LUGARES INCLINADOS

Las calles más empinadas de Quito tienen 35° de inclinación en promedio (Zapata, 2014). En esta calle el segway fue puesto a prueba, se

pudo observar que no tuvo problema alguno en superar esta prueba y garantizar seguridad y estabilidad al usuario.



Figura 52. Pruebas con usuario.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- Se logró implementar un vehículo segway de dos ruedas paralelas para el transporte de un individuo.
- Se diseñó un sistema apropiado de estabilización con la ayuda del software MATLAB y del equilibrio mecánico por medio de la librería WAJIUNG que permitían ver el funcionamiento real.
- Se diseñó e implementó una estructura mecánica capaz de soportar las cargas de hasta 100 kg con una geometría que permite circular por las veredas dado su tamaño.
- El driver controlador del motor a más de generar un proceso eficiente al momento de gobernar el sistema también genera protecciones para precautelar la integridad de los circuitos.
- Mediante el sistema de control se eliminó los tiempos muertos de trabajo de algunos elementos del sistema lo que significó un ahorro energético, que puede ser considerable si se aumenta las jornadas de trabajo. Esto a su vez tiene un impacto directo en los costos de producción haciendo el proceso más eficiente.
- Se logró implementar una interface fácil de usar e intuitiva que permite al usuario operar la máquina sin necesidad de conocimientos técnicos con una curva de aprendizaje de fácil adaptación para usar el segway.
- Se consiguió general un protocolo de pruebas que brinda seguridad de uso para el usuario en diferentes condiciones, así como un sistema de respuesta tomando en cuenta diseño y control.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda no utilizar la máquina por más de 4 horas seguidas, y darle un descanso de una hora para generar una baja extrema en la batería.
- Realizar mantenimientos continuos a la máquina en partes críticas como motores, calibración de sensores y revisión visual del desgaste de las llantas de propulsión.
- Se recomienda el uso de equipo de protección personal para evitar inconvenientes en caso de que se genere un mal manejo del vehículo.

BIBLIOGRAFÍA

- Anne Shumway-Cook, P. (2017). *Control motor, teoría y prácticas*. Maryland: Williams & Wilkins.
- ANTIVOLS ECLATS. (2015). *ECLATS ANTIVOLS*. [Publicación en línea]. Recuperado de: <http://www.eclats-antivols.fr> [Consulta: 2020, febrero 10].
- Automatizados, & industriales, S. (2016). UNE-EN ISO 13482. Francia: AENOR.
- Blanchar, C. (2016, julio 5). Barcelona prohíbe la circulación de 'segways' en el frente marítimo. *EL PAÍS*. [Publicación en línea]. Recuperado de: https://elpais.com/ccaa/2016/07/05/catalunya/1467711157_084245.html [Consulta: 2020, febrero 10].
- Bouziane, H. (2016). *Diseño e implementación de un acelerómetro, velocímetro móvil digital, Controlado por un PIC de MICROCHIP*. Universidad Politécnica de Cataluña, p.112.
- Budynass, R. y Keith, J. (2018). *Diseño en ingeniería mecánica*. (8a. ed.). México: McGraw-Hill.
- Castaños, L. F. (2017). *Balaceo y Estabilización del Péndulo Invertido Empleando Redes Neuronales Artificiales y un Regulador Lineal Óptimo con Criterio Cuadrático*. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- Cedia, E. D. (2019, junio 18). *Escuela de Formación Continua*. [Publicación en línea]. Recuperado de: <https://www.cedia.edu.ec/> [Consulta: 2020, febrero 10].
- Carballar, I. A. (2018). *Libro de Prácticas*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- CEOE (2018). *Normativa de Seguridad Comunitaria*. Francia: Comisión Europea.

- Consegway (2018). *Con segway*. [Publicación en línea]. Recuperado de: <http://www.consegway.es/usos-y-aplicaciones-del-segway-consegway.php>. [Consulta: 2020, febrero 10].
- Consejo del Distrito Metropolitano. (2019). *Ordenanza 001*. Marzo 29 de 2019. Quito: Distrito Metropolitano de Quito.
- Díaz del Castillo, M. I. (2016). *Elementos Electrónicos*. Cuautitlán: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Ecuared. (2016). *Giroscopio*. [Publicación en línea]. Recuperado de: <https://www.ecured.cu/Giroscopio>. [Consulta: 2020, febrero 10].
- Gómez, I. L. (2015). *Incomodidad por tamaño de las aceras*. Latacunga: LA HORA.
- Haring, W. (2015). *Neumática Nivel Básico*. Denkendorf, Alemania: FESTO.
- Hibbeler, R. (2016). *Mecánica de materiales*. Mexico DF: Pearson.
- ISEV. (2019). *¿QUE DEBEMOS SABER SOBRE LOS NEUMATICOS?* Buenos Aires: Consejo Directivo Instituto de Seguridad y Educación Vial.
- López, J. C. (2018). *Ejes*. Tegucigalpa: Universidad Nacional Autónoma.
- Losoya, S. C. (2017). *Introducción a la Simulación de Sistemas Microelectromecánicos y Microfluídos*. Monterrey: Editorial Digital.
- Martin, J. (2018). *Sí, alguien ha creado un unicycle eléctrico autobalanceado en su casa y el resultado es... inquietante*. [Publicación en línea]. Recuperado de: <https://www.motorpasionmoto.com/tecnologia/si-alguien-ha-creado-un-unicycle-electrico-autobalanceado-en-su-casa-y-el-resultado-es-inquietante> [Consulta: 2020, febrero 10].
- Meza, D. (2019). *¿El fin de Grin y Movo? Chinos presentaron un scooter con IA que regresa solo a su estación de carga*. [Publicación en línea]. Recuperado de: <https://www.twaku.com/tag/transporteverde> [Consulta: 2020, febrero 10].
- Mott, R. (2019). *Diseño de elementos de máquinas*. Mexico DF: Pearson.

- Neto (2020). *El nuevo S-Pod en forma de huevo de Segway es un motor de personas futurista*. [Publicación en línea]. Recuperado de: <https://lanetaneta.com/el-nuevo-s-pod-en-forma-de-huevo-de-segway-es-un-motor-de-personas-futurista/> [Consulta: 2020, febrero 10].
- Nieto, A. (2017). *Elementos de Máquinas*. Ciudad Real, España: Universidad de Castilla.
- Rodríguez, F. (2017). *Elementos de máquina*. Cuautitlán Izcalli: Facultad De Estudios Superiores Cuautitlán.
- Romero, H. (2015). *Diseño y Construcción de un Vehículo Autónomo de Dos*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- PTR NINEBOT TM. (2016). *Manual de usuario*. Roma: ARM Company.
- Ruedas y Garruchas. (2019). *Ruedas y Garruchas*. [Publicación en línea]. Recuperado de: <http://www.ruedasygarruchas.com/Catalogo.html>. [Consulta: 2020, febrero 10].
- segway(PT). (2016). *Manual de suso*. E.E.U.U: segway.
- Videla, I. A. (2016). *Manual de Motores Eléctricos*. Argentina: Publicación propia.
- Zapata, J. (2014, Diciembre 4). *Las calles empinadas de Quito*. LA HORA. [Publicación en línea]. Recuperado de: <http://www.ecuavisa.com/articulo/noticias/nacional/91115-calles-empinadas-quito>. [Consulta: 2020, febrero 10].

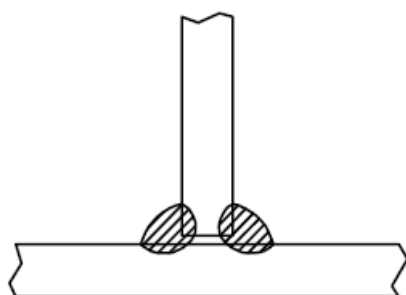
ANEXOS

ANEXO 1.

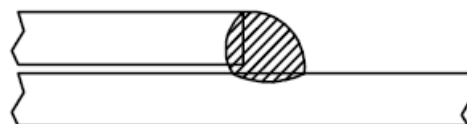
Tipos de soldadura

I. ELECTRODOS PARA SOLDAR ACEROS DE ALTA ALEACION

CARBO 4316 AC 4316 MPR = +/-	E 308L-17 E 19 9 LR 12 E 19 9 LR 23 E 19 9 LR 53 E 19 9 L MPR 23 160	C: <0,03 Mn: 0,9 Ni: 10 Si: 0,9 Cr: 20	Electrodo con recubrimiento de rutilo para soldar aceros inoxidables austeníticos con contenido especialmente bajo en carbono, para temperaturas de trabajo hasta 350° C, tenaz en frío hasta -120° C. homologaciones: TÜV, DB. CARBO 4316 MPR es un electrodo de alto rendimiento de 160% Z = 560 S = 380 D = 40 K = 40
CARBO 4551 AC = +/-	E 347 - 17 E 19 9 Nb R 12 E 19 9 NB R 23	C: <0,06 Mn: 0,7 Ni: 10 Si: 0,9 Cr: 20 Nb: 8x %C	Electrodo con recubrimiento de rutilo para soldar aceros inoxidables austeníticos. Metal depositado de acero Cr-Ni estabilizado para temperaturas de trabajo hasta 400° C. Homologaciones TÜV, DB. Z = 600 S = 400 D = 40 K = 53
CARBO 4430 AC 4430 Fall 4430 MPR = +/-	E 316L-17 E 19 12 3 LR 12 E 19 12 3 LR 23 E 19 12 3 LR 11 E 19 12 3 LR 16 E 19 12 3 LR 53 E 19 12 3L MPR 23 160	C: <0,03 Mn: 0,6 Ni: 12 Si: 0,8 Cr: 19 Mo: 2,8	Metal depositado de acero Cr-Ni-Mo con contenido de carbono especialmente bajo para temperaturas de trabajo hasta 400° C, tenaz en frío hasta 60° C. Homologaciones TÜV, DB, GL. 4430 Fall desarrollado especialmente para cordón vertical descendente. 4430 MPR tiene un rendimiento de 160%. Z = 580 S = 400 D = 32 K = 67
CARBO 4576 AC 4576 B 4576 MPR = +/-	E 318 - 17 E 19 12 3Nb R 12 E 19 12 3Nb R 23 E 318 - 15 E 19 12 3Nb B 22 E 19 12 3Nb R 53 E 19123 Nb MPR23160	C: <0,07 Mn: 0,6 Ni: 11 Nb: 8x%C Si: 0,8 Cr: 19 Mo: 2,6	Metal depositado de acero Cr-Ni-Mo estabilizado para temperaturas de trabajo hasta 400°C; tenaz en frío hasta -60°C. Homologaciones TÜV, DB. II 4576 B es el tipo básico II 4576 MPR tiene un rendimiento de 160% Z = 570 S = 400 D = 32 K = 40



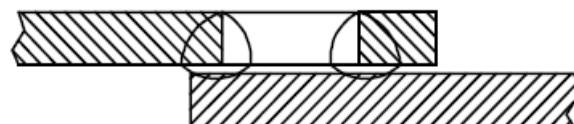
ANGULO EN RINCON



ANGULO EN SOLAPE



ANGULO EN ESQUINA



ANGULO EN RANURA

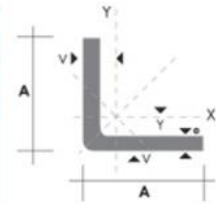
ANEXO 2. Aceros existentes en Ecuador



Especificaciones Generales

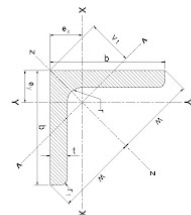
Calidad	ASTM A36 SAE 1008
Otras calidades	Previa Consulta
Largo normal	6.00m
Otros largos	Previa Consulta
Acabado	Natural
Otro acabado	Previa Consulta

Denominación	Dimensiones		Peso		Área
	mm		kg/m	kg/6m	cm ²
	A	e			
AL 20X2	20	2	0.60	3.62	0.76
AL 20X3	20	3	0.87	5.27	1.11
AL 25X2	25	2	0.75	4.56	0.96
AL 25X3	25	3	1.11	6.68	1.41
AL 25X4	25	4	1.45	8.75	1.84
AL 30X3	30	3	1.36	8.13	1.71
AL 30X4	30	4	1.77	10.63	2.24
AL 40X3	40	3	1.81	11.00	2.31
AL 40X4	40	4	2.39	14.34	3.04
AL 40X6	40	6	3.49	21.34	4.44
AL 50X3	50	3	2.29	13.85	2.91
AL 50X4	50	4	3.02	18.33	3.84
AL 50X6	50	6	4.43	26.58	5.64
AL 60X6	60	6	5.37	32.54	6.84
AL 60X8	60	8	7.09	42.54	9.03
AL 65X6	65	6	5.84	35.25	7.44
AL 70X6	70	6	6.32	38.28	8.05
AL 75X6	75	6	6.78	40.65	8.64
AL 75X8	75	8	8.92	54.18	11.36
AL 80X8	80	8	9.14	56.95	11.60
AL 100X6	100	6	9.14	56.95	11.64
AL 100X8	100	8	12.06	74.05	15.36
AL 100X10	100	10	15.04	90.21	19.15
AL 100X12	100	12	18.26	109.54	22.56



También en galvanizado e inoxidable

Perfiles Angulo
 según
IRAM-IAS
U 500-558



- Ag = Área bruta de la sección transversal (E²)
- I = Momento de inercia de la sección (E⁴, X_c, Y_c)
- I_x = Momento de inercia de la sección respecto de los ejes principales (E⁴, X_c, Y_c)
- r = Radio de giro (E², X_c, Y_c)
- S = Módulo resistente elástico de la sección (E³, X_c, Y_c)
- Q = Momento estático de media sección (E³, X_c, Y_c)
- Z = Módulo plástico de la sección.
- J = Módulo de torsión.
- CW = Módulo de alabeo.

Página 1/2

Designación del perfil	Designación Comercial	Dimensiones		Radio de redondeo		Relación		Peso	Distancias al centro de gravedad	X - X _c = Y - Y _c				V - V				Z - Z		J	CW
		b	t	r	r ₁	B	t			Ag	ex _{cy}	w	v ₁	ix=iy	sx=sy	rx=ry	iv	sv	iv		
L 16x 16x 3,2*	L 568 x 568 x 16	15,9	3,2	4	2	5,0	0,84	0,74	0,50	1,13	0,71	0,20	0,18	0,48	0,08	0,12	0,30	0,31	0,57	0,031	0,005
L 19x 19x 3,2*	L 944 x 944 x 18	19	3,2	4	2	5,9	1,13	0,89	0,58	1,34	0,82	0,35	0,38	0,55	0,14	0,18	0,38	0,55	0,70	0,038	0,010
L 22x 22x 3,2*	L 788 x 788 x 18	22,2	3,2	4	2	6,9	1,32	1,04	0,65	1,59	0,92	0,59	0,39	0,65	0,23	0,25	0,42	0,69	0,82	0,045	0,016
L 25x 25x 3,2*	L 1 114 x 118	25,4	3,2	4	2	7,9	1,51	1,19	0,73	1,77	1,03	0,64	0,48	0,75	0,34	0,34	0,48	1,34	0,94	0,052	0,025
L 28x 28x 3,2*	L 1 144 x 114 x 118	28,8	3,2	5	2,5	8,9	1,85	1,3	0,77	1,91	1,09	1,08	0,55	0,80	0,42	0,39	0,51	1,70	1,01	0,059	0,036
L 32x 32x 3,2*	L 1 144 x 114 x 118	31,7	3,2	5	2,5	9,9	1,97	1,55	0,89	2,29	1,28	1,83	0,79	0,98	0,72	0,57	0,61	2,93	1,22	0,068	0,050
L 38x 38x 3,2*	L 1 122 x 112 x 118	38,1	3,2	6	3	11,9	2,37	1,88	1,03	2,69	1,46	3,11	1,12	1,15	1,2	0,82	0,71	5,02	1,48	0,080	0,089
L 45x 45x 3,2*	L 1 344 x 134 x 118	44,4	3,2	7	3,5	13,9	2,83	2,22	1,19	3,18	1,68	5,24	1,58	1,39	1,98	1,18	0,84	8,50	1,73	0,093	0,143
L 51x 51x 3,2*	L 2 x 2 x 118	50,8	3,2	7	3,5	15,9	3,21	2,52	1,34	3,18	1,89	7,78	2,07	1,55	2,95	1,56	0,98	12,58	1,98	0,107	0,217
L 57x 57x 3,2*	L 2 x 2 x 118	57,1	3,2	8	4	17,8	3,61	2,84	1,48	4,03	2,08	10,88	2,58	1,73	4,05	1,85	1,08	17,70	2,21	0,121	0,311
L 64x 64x 3,2*	L 2 x 2 x 118	64	3,2	8	4	19,9	4,17	3,17	1,56	4,03	2,2	15,86	3,84	1,79	4,13	2,79	1,07	25,84	2,20	0,140	0,368
L 70x 70x 3,2*	L 2 x 2 x 118	70,8	3,2	8	4	21,9	4,69	3,59	1,63	4,03	2,3	20,49	5,03	1,72	4,31	3,53	1,08	32,87	2,17	0,142	0,403

ANEXO 4. Coeficiente de fricción

Descripción de la superficie	SECA				HÚMEDA			
	Menos de 50 km/h.		Más de 50 km/h.		Menos de 50 km/h.		Más de 50 km/h.	
	De	a	De	a	De	a	De	a
Cemento								
Nuevo, liso	0.80	1.20	0.70	1.00	0.50	0.80	0.40	0.75
Usado	0.60	0.80	0.60	0.75	0.45	0.70	0.45	0.65
Pulimentado por el tráfico	0.55	0.75	0.50	0.65	0.45	0.65	0.45	0.60
Asfalto o alquitrán								
Nuevo, liso	0.80	1.20	0.65	1.00	0.50	0.80	0.45	0.75
Usado	0.60	0.80	0.55	0.70	0.45	0.70	0.40	0.65
Pulimentado por el tráfico	0.55	0.75	0.45	0.65	0.45	0.65	0.40	0.60
Con exceso de alquitrán	0.50	0.60	0.35	0.60	0.30	0.60	0.25	0.55
Adoquín								
Nuevo, liso	0.75	0.95	0.60	0.85	0.50	0.75	0.45	0.70
Pulimentado por el tráfico	0.60	0.80	0.55	0.75	0.40	0.70	0.40	0.60
Piedra compacta								
Nuevo, liso	0.75	1.00	0.70	0.90	0.65	0.90	0.60	0.85
Pulimentado por el tráfico	0.50	0.70	0.45	0.65	0.30	0.50	0.25	0.50
Grava								
Apisonada, con riego asfáltico	0.55	0.85	0.50	0.80	0.40	0.80	0.40	0.60
Suelta	0.40	0.70	0.40	0.70	0.45	0.75	0.45	0.75
Escorias								
Compactadas	0.50	0.70	0.50	0.70	0.65	0.75	0.65	0.75
Piedra								
Machacada	0.55	0.75	0.55	0.75	0.55	0.75	0.55	0.75
Hielo								
Liso	0.10	0.25	0.07	0.20	0.05	0.10	0.05	0.10
Nieve								
Compactada	0.30	0.55	0.35	0.55	0.30	0.60	0.30	0.60
Suelta	0.10	0.25	0.10	0.20	0.30	0.60	0.30	0.60
Reja metálica								
Con ranuras	0.70	0.90	0.35	0.75	0.25	0.45	0.20	0.35