



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

## DISEÑO MÉCANICO DE UN MONOCICLO ELÉCTRICO

---

PRESENTAN:

ÁVILA CONTRERAS BALAM VLADIMIR  
ORTIZ ESTRADA FRANCISCO JAVIER

TUTOR:

DR. ALEJANDRO C. RAMÍREZ REIVICH

MÉXICO D.F. 2014

## RESUMEN

El presente trabajo describe el desarrollo del diseño de un prototipo virtual de Monociclo Eléctrico de Péndulo Invertido, el cual se plantea como una opción de movilidad o transporte personal. Su funcionamiento toma de base la tecnología de los sistemas de control de auto-balance, la cual se encuentra actualmente en desarrollo en diversas universidades y empresas automotrices. El reto planteado fue desarrollar un prototipo virtual por alumnos de la Facultad de Ingeniería.

El desarrollo del proyecto se basó principalmente en la metodología de diseño aplicada al desarrollo de productos *Design Thinking*, en la cual fue necesario realizar distintas actividades de investigación, recolección de datos, creación de prototipos, análisis de datos, además de trabajo en laboratorio y taller, la cual llevó a constantes iteraciones de todas estas etapas. Se partió de la identificación de un problema o necesidad a resolver en la sociedad, mediante la recolección de datos por medio de encuesta y entrevistas. Se realizó una investigación acerca de los vehículos que cuentan con esta tecnología del auto-balanceo en un sistema de péndulo invertido; de la cual se obtuvieron ideas del tipo de mecanismo que emplean, las aplicaciones para las que fueron diseñados, así como de los distintos sistemas de control utilizados para su funcionamiento. Por otra parte no se encontraron normas ni restricciones en cuanto al uso y seguridad de este tipo de vehículos.

La información recabada sirvió de base para generar alternativas de solución, las cuales ayudaron a formular distintos diseños conceptuales. Para seleccionar el concepto más apto se elaboraron físicamente distintos prototipos rápidos en los que se pudo probar los conceptos básicos propuestos, mediante la realización de pruebas en espacios públicos. En donde se recabó información mediante observación y llenado de encuestas, eligiendo el concepto de diseño con el que se continuaría el desarrollo del proyecto.

Con base en los requerimientos y especificaciones del concepto de diseño se estableció la arquitectura del monociclo y configuración del prototipo virtual, se elaboraron los modelos en CAD de las partes comerciales y componentes diseñados.

Así mismo realizó la selección preliminar de materiales.

Finalmente se evaluó la resistencia de los elementos estructurales del vehículo por medio del CAE. Se realizó una caracterización dinámica del vehículo con la finalidad de establecer límites operacionales, con los componentes seleccionados para la generación y transmisión de potencia. De acuerdo con los datos obtenidos de los análisis se complementó la información del diseño y se elaboró la documentación necesaria para la construcción y ensamble del prototipo.

<b>Índice</b>	
<b>Resumen</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo 1 “Introducción al Proyecto”</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Metas del Proyecto</b>	<b>8</b>
<b>1.3 Alcances de la Tesis</b>	<b>8</b>
<b>Capítulo 2 “Antecedentes”</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Introducción</b>	<b>11</b>
<b>2.2 Vehículos similares</b>	<b>12</b>
<b>2.3 Ventajas y desventajas de motor eléctrico vs motor de combustión</b>	<b>14</b>
<b>2.4 Estado del Arte</b>	<b>15</b>
<b>Capítulo 3 “Definición del Problema”</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Planteamiento del Problema</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Presentación del proyecto</b>	<b>22</b>
<b>Capítulo 4 “Metodología”</b>	<b>24</b>
<b>4.1 <i>Design Thinking</i></b>	<b>25</b>
<b>Capítulo 5 “Desarrollo del Trabajo”</b>	<b>27</b>
<b>5.1 Definiendo las necesidades</b>	<b>28</b>
<b>5.2 Requerimientos</b>	<b>30</b>
<b>5.3 Diseño conceptual</b>	<b>32</b>
<b>5.4 Prototipo de función crítica</b>	<b>37</b>
<b>5.5 Prototipos Dark Horse</b>	<b>39</b>

<b>5.6 Diseño mecánico y selección de piezas comerciales</b>	<b>41</b>
<b>5.6.1 Motor</b>	<b>41</b>
<b>5.6.2 Rin</b>	<b>43</b>
<b>5.6.3 Cálculo de transmisión de potencia</b>	<b>44</b>
<b>5.6.4 Selección de engranes y poleas</b>	<b>47</b>
<b>5.6.5 Cálculo del ángulo de volcadura</b>	<b>50</b>
<b>5.6.6 Cálculo de longitud de banda</b>	<b>53</b>
<b>5.6.7 Cálculo del eje</b>	<b>56</b>
<b>5.6.8 Selección de rodamientos</b>	<b>65</b>
<b>5.6.9 Diseño de soportes y cuerpo del monociclo</b>	<b>67</b>
<b>5.7 Análisis por elementos finitos</b>	<b>71</b>
<b>5.7.1 Análisis del rin</b>	<b>73</b>
<b>5.7.2 Análisis de la base</b>	<b>76</b>
<b>5.7.3 Análisis del soporte del motor</b>	<b>79</b>
<b>5.7.4 Análisis del eje</b>	<b>82</b>
<b>Capítulo 6 “Resultados”</b>	<b>85</b>
<b>6.1 Análisis y discusión de resultados</b>	<b>91</b>
<b>6.2 Trabajos futuros</b>	<b>92</b>
<b>Conclusiones</b>	<b>93</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>94</b>
<b>Referencias</b>	<b>95</b>
<b>Anexos</b>	<b>97</b>

# **Capítulo 1**

## **Introducción al proyecto**

El monociclo eléctrico es un proyecto que tiene la finalidad de desarrollar una alternativa de transporte personal, basado en la tecnología de los sistemas de control de auto-balanceo. Con esta se intenta dar solución a los problemas de transporte en distancias cortas a medianas que existen en diferentes ciudades alrededor del mundo, como ya se ha visto, el automóvil está dejando de ser una buena forma de transportarse a través de la ciudad en distancias relativamente cortas gracias a la sobrepoblación de este tipo de vehículos, causando que la gente empiece a utilizar formas alternas de transporte como la motocicleta, la bicicleta, el transporte público, etc.



*Figura 1.1 Tráfico excesivo en la ciudad [Ref.17].*

De esta problemática nace la inquietud por desarrollar nuevos e innovadores medios de transporte para la ciudad, con los cuales, los transeúntes puedan llegar a sus destinos de una forma rápida, segura, sin complicaciones y con acceso a espacios reducidos.

Debido a que esta nueva categoría de transporte, aún se encuentra en la infancia, los diseñadores se enfrentan a la problemática de explorar y experimentar en prácticamente todas las fases del diseño.



*Figura 1.2 Laboratorio de diseño. [Ref. 18]*

Empresas y universidades en el mundo ven con buenos ojos el desarrollo de este tipo de vehículos eléctricos y compactos en donde se han generado interesantes ideas en diversas versiones respecto al diseño e innovación de éstos. Bajo este contexto es que surgió el interés por generar una nueva versión del

vehículo descrito, cuya tecnología sea reconocida por y para la UNAM.

El desarrollo del Monociclo Eléctrico involucra las disciplinas de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica y Diseño Industrial, debido a que el vehículo lo conforman distintos sistemas como eléctricos, electrónicos, mecánicos, software, etc.; además de tomar en cuenta los factores estéticos y humanos para lograr un diseño completo, en la figura 1.3 se muestra la forma en que se entrelazan estas disciplinas en nuestro diseño. Para poder llevar esto a cabo se tomó como base el proceso de diseño de productos, apoyándose también en las herramientas auxiliares del diseño mecánico como el CAD, CAE y FEM; en la realización de prototipos, bocetos y paquetería para el análisis y recopilación información.

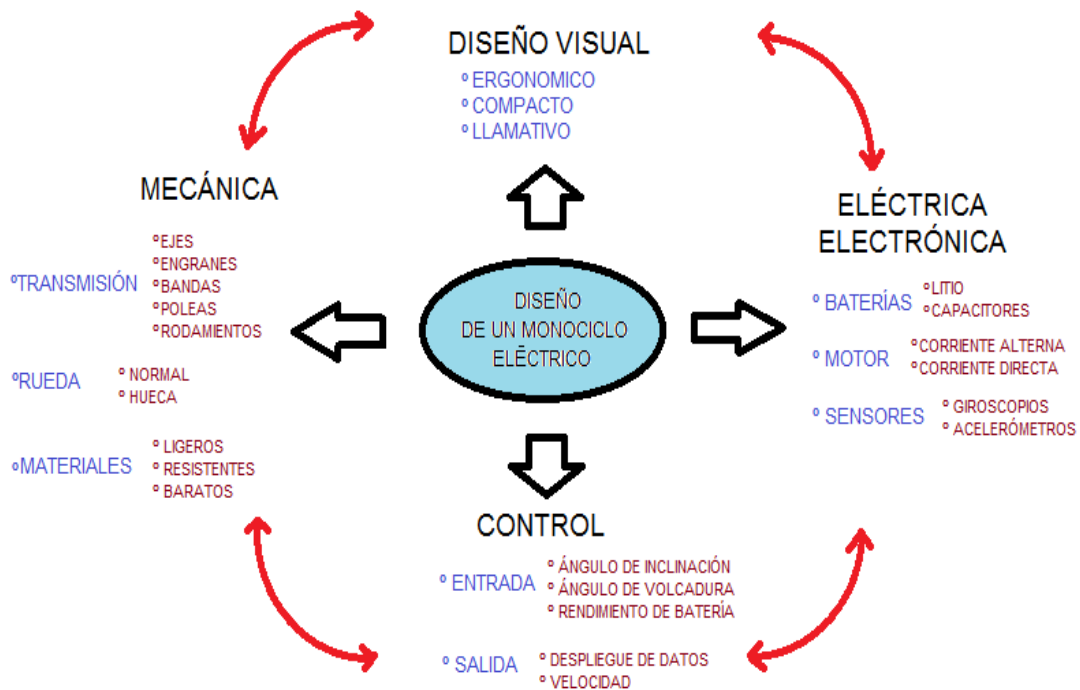


Figura 1.3 División del trabajo de Diseño.

Fue así como los autores de la presente tesis encontraron interés por resolver dicho reto, involucrándose en el desarrollo e innovación de la parte mecánica de un vehículo eléctrico, de una llanta, auto-balanceado por el principio del péndulo invertido. Aplicando así sus conocimientos de mecánica adquiridos a lo largo de su preparación académica en la construcción de un prototipo experimental. Por lo cual los objetivos principales de la tesis son:



### **1.1 Objetivos:**

*Diseñar el prototipo de un monociclo eléctrico de péndulo invertido a nivel conceptual para la realización de pruebas.*

*Aplicar los conocimientos adquiridos en diversas disciplinas y aprender nuevos temas para desarrollar un producto innovador con avances tecnológicos, el cual revolucione la manera de transportarse.*

### **1.2 Metas del proyecto:**

Lograr el diseño de un monociclo que cuente con las bondades de aquellos que hoy en día se comercializan en todo el mundo, quitando las desventajas y dándole un valor agregado haciendo innovaciones en el sistema mecánico, con ayuda del uso de las tecnologías como el Diseño, Manufactura e Ingeniería Asistidos por Computadora (CAD, CAE) y el Análisis por Elementos Finitos (FEM), así como la optimización de los sistemas electrónicos y el diseño visual.

Revolucionar la forma en que la gente se desplaza en la calle y lugares públicos con un vehículo innovador, cómodo, compacto y a la vez divertido de manejar, entre otros atributos dándole la oportunidad a dicha gente de llegar más rápido y de una forma más eficiente a sus destinos.

### **1.3 Los alcances de la tesis son:**

- Análisis y selección de necesidades y requerimientos del diseño.
- Elaboración de un diseño conceptual que satisfaga los requerimientos.
- Elaboración de prototipos de función crítica y *DarkHorse*.
- Diseño del prototipo funcional y selección de piezas comerciales.
- Evaluar analíticamente el desempeño de la transmisión de potencia.

-Analizar por Elementos Finitos las partes con mayores solicitaciones en la estructura del vehículo.

En el capítulo 1 se da una introducción a lo que viene siendo el *background* del proyecto, de tal forma que el lector se va sumergiendo en el pensamiento de los diseñadores quienes participaron en el desarrollo de este producto, se describe el objetivo de esta tesis, la meta del proyecto y lo que el equipo quiere llegar a desarrollar.

En el segundo capítulo se hace un acercamiento a los antecedentes que ayudaron en el desarrollo del monociclo, es decir, se analiza toda la tecnología, conocimientos y vehículos similares que ya han sido desarrollados de tal forma que se da un poco la idea de en qué nivel ha avanzado y se encuentra la tecnología hasta este punto donde se empieza a desarrollar este nuevo producto, el cuál debe tener mejores cualidades que los ya existentes.

En lo que viene siendo el capítulo 3 se explica y se plantea el problema que se está intentando resolver con el desarrollo de este nuevo vehículo eléctrico, se da también una presentación del proyecto en donde se describe como el proyecto surge de una necesidad de la sociedad debido a la problemática explicada en este mismo capítulo.

En el cuarto capítulo se describe la metodología seguida por el equipo a lo largo del desarrollo del producto, el cual como se describe es un método nuevo pero muy utilizado en la actualidad por universidades alrededor del mundo que ha resultado en una gran cantidad de productos innovadores.

En lo que respecta al capítulo 5 se explica todo lo que tuvo que ver con el desarrollo del monociclo, desde la definición de las necesidades y requerimientos, la creación de prototipos, los cálculos de los componentes mecánicos, hasta los análisis por elementos finitos hechos en las piezas sujetas a mayores solicitaciones.

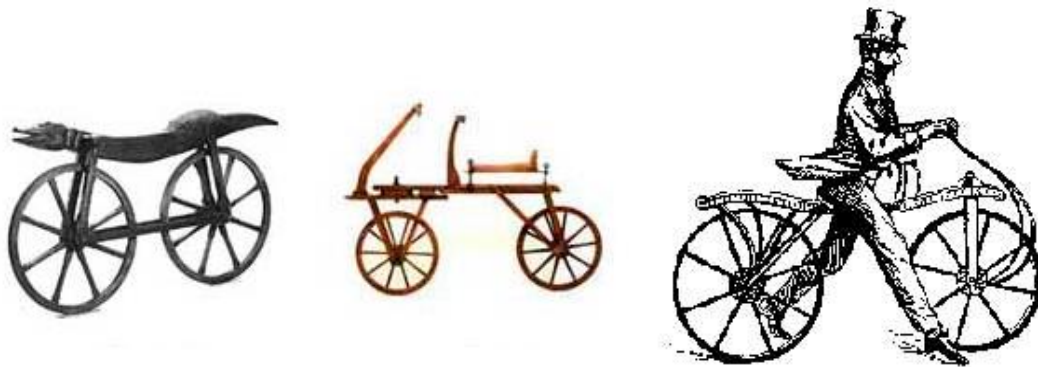
Los resultados son lo que se escribe en el sexto capítulo, presentando el prototipo virtual definitivo al cual se llegó aplicando todo lo descrito en este trabajo de tesis, analizando dichos resultados y explicando las posibles mejoras y trabajos futuros que el equipo observo al final del diseño del monociclo.

# **Capítulo 2**

## **Antecedentes**

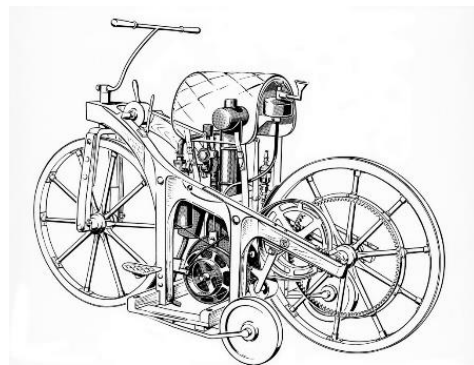
## 2.1. Introducción

Desde tiempos remotos, los humanos han tenido que desplazarse para lograr sobrevivir, muchas veces siendo largas distancias y condiciones climáticas desfavorables, es así como empezaron a buscar formas alternas de transporte como el uso de caballos, tal preocupación ha llevado al invento de la rueda. El uso de la rueda reinvento el desplazamiento de la gente con el que vinieron cientos de formas de utilizarla como parte fundamental de un medio de transporte, después de años descubriendo nuevas aplicaciones, surge uno de los más populares en la antigüedad y aún vigente que es la bicicleta la cual se ha multiplicado su uso en los últimos años. Esto significa un avance, ya que en la actualidad, 600 millones de coches en todo el mundo queman toneladas de combustible y el número de vehículos aumenta continuamente, y con ello, los problemas generados por la contaminación.



*Figura 2.1 Invención de la bicicleta. [Ref. 19]*

En parte de esta rama se encuentran las motocicletas (que surgen de las bicicletas) las cuales tienen una historia más nueva ya que nacen en la segunda mitad del siglo XIX. Al igual que las bicicletas estos vehículos utilizan dos ruedas, lo que las hace diferentes es el hecho de contar con un motor que impulsa la rueda trasera que al ser más potentes y alcanzar mayores velocidades, su diseño tiene que ser más robusto lo que causa una dificultad pues es más pesada y peligrosa. Actualmente, las motocicletas tienen bastantes avances



*Figura 2.2 Primer motocicleta. [Ref. 20]*

tecnológicos y son muy comunes alrededor del mundo y no sólo en ciudades si no que su uso se ha trasladado a poblaciones que incluso no cuentan con asfalto.

El monociclo es otra variación de la bicicleta que surgió casi a la par de la misma y aunque hubo una gran fascinación por él, rápido se fue el interés en 1915, cuando el primer vehículo de cuatro ruedas fue patentado. En su momento este vehículo perdió gran popularidad por la gran complejidad de su manejo, dejando así de lado su desarrollo tecnológico, fue hasta hace unas décadas cuando resurgió el interés por universidades y empresas de retomar estos vehículos pues se ha descubierto que puede ser una buena alternativa a las diferentes formas de transporte que ya se mencionaron, gracias a las nuevas tecnologías que existen en la actualidad. Gracias al surgimiento de controles electrónicos y la invención de micro sensores, los vehículos eléctricos compensan el peso y logran el equilibrio, lo que podría ofrecer una solución real a los problemas de movilidad en las mega-ciudades. Son eficaces, fáciles de manejar, pequeños y respetan el medio ambiente, debido a sus motores eléctricos. Cada día, nacen conceptos que tratan de resolver el problema de transporte ajustándose lo mejor posible al estilo de vida de los clientes.

## **2.2. Vehículos similares**

Tradicionalmente la fuente de energía para el motor eléctrico han sido baterías, pero el desarrollo de nuevas formas de almacenar energía eléctrica como las pilas de combustible por ejemplo, han dado pauta a diferentes mejoras como reducir el tamaño, el peso y aumentar la eficiencia. Al igual, cada día hay mejores y más eficientes motores eléctricos para diferentes aplicaciones, aunque como ya se sabe la problemática del transporte en las ciudades ha dado paso a desarrollar motores eléctricos hechos especialmente para transporte. Tales avances tecnológicos han proporcionado varios prototipos y vehículos que ya se comercializan alrededor del mundo.

Se cuenta con un sinnúmero de vehículos que han tratado de lograr ya sea una buena alternativa al automóvil o incluso su sustitución, sin embargo no se ha logrado satisfactoriamente. Uno de los más cercanos a nuestro producto es la motocicleta eléctrica que es una motocicleta que utiliza un motor eléctrico como medio de propulsión eléctrica reemplazando el tradicional motor de combustible, el cual emite considerables cantidades de CO<sub>2</sub> al ambiente, existen actualmente varias marcas que ya comercializan la motocicleta eléctrica como es el caso de *Zero Motorcycles*, *Brammo*, *Quantya*, *KTM* entre muchas otras.



Figura 2.3 Motocicleta eléctrica.[Ref. 21]

Existen también los vehículos a 4 ruedas eléctricos como los automóviles que ya se están empezando a comercializar, como es el caso del *Tesla Roadster*, *Mitsubishi i*



Figura 2.4 Automóvil eléctrico. [Ref. 22]

*MiEV* o algunos otros que están por surgir al mercado que son autos que normalmente cuentan con motores MECH como el *Lotus Evora*, *Volkswagen Golf*, *Ford Focus* y *Nissan Leaf*. Sin embargo, como ya se explicó anteriormente, este tipo de transportes disminuyen la contaminación,

pero no dan solución al problema del tráfico en exceso en las ciudades.

La bicicleta eléctrica, así como el *Segway* y el *YikeBike* son los competidores más cercanos al monociclo autobalanceado, pues tienen casi las mismas características, existiendo bicicletas tales como la *E-Cycle* (Figura 2.5) que se puede doblar y reducir su tamaño para caber en cualquier cajuela de automóvil o el *YikeBike* (Figura 2.7), el cual se puede doblar y disminuye su tamaño a tal grado que puede ser llevado con un maletín. En el caso del *Segway* (Figura 2.6), no es tan portátil como los anteriores pero su principio es el mismo que el monociclo eléctrico y su tecnología atrae tanto a las personas que su uso se ha extendido y se ha hecho muy popular en las grandes

ciudades alrededor del mundo, como es el caso de la ciudad de México, donde el personal de seguridad pública utiliza estos vehículos para tener mayor agilidad en los parques y lugares turísticos de la ciudad.



Figura 2.5 E-Cycle. [Ref. 23].



Figura 2.6 Segway [Ref. 24].



Figura 2.7 YikeBike [Ref. 25].

Estos vehículos aumentan su popularidad en la medida en la que aumentan los precios de la gasolina. La tecnología de las baterías mejora de forma continua haciendo más práctico estos medios de transporte.

### 2.3. Ventajas e inconvenientes del motor eléctrico sobre el motor de gasolina

Ventajas:

- Los costos de combustible para el motor eléctrico son aproximadamente el 10% de los costos para el motor de gasolina

- Prácticamente silencioso
- Sin emisiones contaminantes directas
- Se puede utilizar en interiores
- No se necesitan viajes a la gasolinería. Se pueden recargar en cualquier enchufe.
- Mantenimiento reducido y económico. Ejemplo, no es necesario cambiar el aceite.

Inconvenientes:

- Los gastos iniciales son mayores que en el vehículo de gasolina equivalente.
- Menor autonomía.
- Mayor tiempo de recarga.
- Pocos enchufes eléctricos están instalados en las calles o carreteras.

## **2.4. Estado del Arte**

Ya que el monociclo es el vehículo de interés, se prosiguió a la tarea de realizar una mayor investigación a la historia y desarrollo de este vehículo, como se muestra a continuación.

Se dividió el estudio en cuatro grupos principales según su funcionamiento:

1. Monociclos envolventes
2. Monociclos de baja velocidad
3. Monociclos de alta velocidad
4. Monociclos de autobalance



## 1. Monociclos envolventes.

Este grupo contempla todo tipo de monociclos donde el usuario se encuentra dentro de la rueda. Este diseño se remota hasta 1915, cuando el primer vehículo fue patentado.

Kerry Mc Lean es el constructor más popular de monociclos de este tipo, quien los produce desde 1971. El cliente puede elegir entre la versión más pequeña que es accionada por un motor de 5 hp de cortadora de césped *Briggs* y el modelo más grande que es impulsado por un motor *V8 de Buick* (ambas tienen licencia para la carretera en Estados Unidos).

Su último modelo es impulsado por un 40 HP enfriado por agua, con un motor de moto para nieve. El diámetro de la rueda interior es de 36" con un neumático de un tractor remolque de un viñedo francés. Se controla con un embrague de lado izquierdo, el acelerador en el puño y un freno hidráulico de lado derecho. Está alineado un poco inclinado hacia fuera de la rueda, para que sea apto para circular. Está equipado con faros halógenos, luces de freno y su respectiva matrícula de registro vehicular.

Al igual que los monociclos de alta velocidad, este vehículo es un intento de sustitución de un automóvil o una motocicleta. Es demasiado pesado para llevar, pero es rápido y autónomo para las largas distancias. Sin embargo, una desventaja es que en el caso de que el conductor no esté sentado cerca del centro del movimiento, puede catapultar al conductor al momento de frenar con mucha fuerza.



Figura 2.8 Ejemplo de monociclo envolvente.[Ref. 12]

## 2. Monociclos de baja velocidad

Dispositivo de peso ligero y portátil, su intención es recreativa o de transporte a muy cortas distancias combinada con el uso del transporte público.

El representante más famoso de este grupo es el *Honda U3-X* (Figura 2.9). Está alimentado por una batería de iones de litio y pesa menos de 10 kg en total. Es el primer sistema del mundo capaz de manejar movimientos de 360 grados ya que su rueda se compone de muchas pequeñas ruedas que se pueden mover hacia los lados. Sin embargo, esta tecnología sólo permite una velocidad máxima de 4 mph. Honda lo ha tasado en \$ 660 dólares y desea venderlo como un extra para sus coches.

La experiencia de conducirlo es totalmente nueva, pero al ser una tecnología muy delicada, el monociclo sólo puede conducirse en un terreno totalmente plano y en interiores, para que no se ensucien sus mecanismos y se atasquen. Además, el alcance y la velocidad que desarrolla son demasiado limitados.



Figura 2.9 Honda U3-X.

[Ref.11]

Por lo tanto, el *U3-X* es más un *gadget* que un medio útil de transporte. Otro ejemplo destacado, es el tipo patineta, una gran cantidad de vehículos con un diseño similar, contruidos, en su mayoría en las universidades o por ingenieros independientes, como el proyecto desarrollado por

Agustín Rodríguez y Márquez Carter (ingenieros Industriales en Electrónica por la Universidad de Córdoba, Escuela Politécnica Superior), que es un vehículo eléctrico con una rueda que puede mover a una persona de más de 20 km/h con un alcance de al menos 6 kilómetros. Sus desventajas son, por un lado, la apariencia descuidada y por otro, la lentitud de movimiento que se debe a que su ángulo de inclinación es pequeño y limitado.

### 3. Monociclos de alta velocidad

Son más parecidos a una motocicleta, que a un monociclo regular. Tienen luces, manillar, frente, cola y neumáticos anchos. Los ejemplos más famosos son los construidos por la Compañía Ryno (Figura 2.10). Existen tres diferentes tipos de aplicaciones previstas:

- 1) Transporte urbano de baja velocidad.
- 2) Deporte / Recreativo.
- 3) Gobierno / Industria.

Hasta ahora, fue construido el segundo prototipo. Al igual que la versión 2.0 SBU utilizan LiFePO<sub>4</sub> baterías para almacenar energía, lo que permite que se puedan conducir durante 48 km a 40 km/h sin necesidad de recarga. Si las pilas están vacías, sólo se requiere una hora y media para cargarse completamente. El motor y las baterías se acomodan en llantas de 25". En total, el prototipo pesa 56,25 kg. En resumen, los monociclos de alta velocidad son más rápidos y logran mayores distancias sin necesidad de recarga en comparación de los dispositivos más pequeños. Como también son aptos para circular sobre asfalto, pueden ser sustitutos de carros o motocicletas, pero su desventaja es que son muy pesados y no sirven como extensión de un coche o transporte público.



Figura 2.10 Monociclo RYNO [Ref.10]

#### 4. Monociclos de autobalance

Son pequeños dispositivos ligeros que se parecen a un monociclo normal, pero son accionados por un motor eléctrico y controlado por un sistema de equilibrio por el usuario.

El ejemplo más destacado es la versión 2.0 SBU (figura 5). Es impulsado por un motor sin escobillas de imán permanente DC (corriente directa) las ruedas son de tracción variable. La velocidad y dirección son determinadas por la dirección y ángulo de inclinación del conductor. El chasis de la versión 2.0 SBU 's es un cuadro de aluminio 7005.

La suspensión individual para una llanta 20 "x 2.125". Se maneja a una velocidad máxima de 10 mph y tiene un alcance de aproximadamente 12 kilómetros. Para recargar las baterías LiFePO4 38,4 voltios, tiene que estar conectado durante dos horas. En



Figura 2.11 Ejemplo de un monociclo autobalance (SBU V3) [Ref.8].

total tiene una eficacia del 85%, lo que puede ser aún mejorada por un

sistema de frenado regenerativo, que recupera y almacena la energía normalmente se pierde cuando va lento o de bajada.

Los vehículos de autobalance son relativamente sencillos para aprender a usar además de peso ligero, por lo que puede ser transportado cargando en un tren o subiendo unas escaleras. Sin embargo, todavía tienen una imagen de poco atractiva y sobre todo sin un estilo definido. Por otra parte, no hay espacio para guardar el equipaje y el ritmo máximo de movimiento es lento.

## **Capítulo 3**

### **Definición del problema**

### **3.1 Planteamiento del problema:**

Es complicado, lento, cansado y muchas veces tedioso el traslado en lugares que cuentan con pasillos reducidos y constante tránsito de gente; como lo son universidades, oficinas y centros comerciales, en los cuales por obvias razones no es viable utilizar un medio de transporte pesado por los accidentes que se pueden generar, además de ser poco práctico por la falta de instalaciones y muy caro.

Hoy en día los vehículos que más se siguen utilizando en el mundo son los impulsados por combustión de combustibles fósiles, sin considerar que es ésta una de las maneras más cara de trasladarse y menos amigable con el medio ambiente, además de ser tecnología muy vieja.

En el siguiente punto se da una solución hipotética de nuestro problema.

### **3.2 Presentación del proyecto:**

Este proyecto nace de la necesidad de tener un medio de transporte alternativo ya que en la actualidad, el hecho de tener un automóvil o viajar en algún transporte colectivo es muy tedioso, se pierde mucho tiempo y además dichos vehículos tienen un alto impacto en la alteración del medio ambiente. Existen algunos otros medios de transporte que por lo mismo han cobrado popularidad los últimos años como es el uso de la motocicleta y la bicicleta, sin embargo la motocicleta no resuelve del todo el problema de la contaminación ambiental y aunque es mucho más compacta que un automóvil, sigue siendo robusta como para llevarla a cualquier lugar. Analizando el creciente uso de la bicicleta, muchos se refieren a ella como la máquina más eficiente que el hombre ha creado hasta la fecha y aun teniendo razón, tiene sus desventajas, pues viajar en ella al trabajo puede no ser muy cómodo en muchos casos ya que el cansancio toma parte importante en esta discusión, las personas tienen que llegar limpias a sus trabajos y rápido, otras desventajas es que igualmente no se permite el acceso en varios lugares y no en todas partes hay espacios especiales para dichos vehículos, por lo que con el presente proyecto se busca la solución a muchos de estos problemas.

Se pensó en un monociclo eléctrico pues al no ser de combustión interna, las emisiones de gases contaminantes prácticamente desaparecen, en comparación a cualquier vehículo propulsado por combustibles fósiles, aunque esto no significa del todo que no va a contaminar, pues hay que tomar en cuenta que la generación de energía eléctrica para su carga tiene también un fuerte impacto en el ambiente, sin embargo, no es tanto como conducir un automóvil o una motocicleta, además estamos frente a una época donde la generación de energía eléctrica a través de procesos no contaminantes empieza a ser posible.

Se pensó en incluir un freno regenerativo de tal forma que se aprovechara más la energía que normalmente se desperdicia al frenar, logrando una mayor duración de las baterías aumentando el tiempo entre recargas. Al ser un vehículo de una sola ruda, se espera utilizar menos material, lo que conlleva a un menor peso, tamaño y costo, sin embargo esta por analizarse, ya que las cargas al estar concentradas en menor área requerirá de una mayor rigidez del material lo que seguramente llevara a un mayor peso y costo por unidad, sin embargo, se espera que esta reducción de piezas genere menor peso y costo global. Igualmente el sistema de control se simplifica al no tener que controlar dos llantas por separado, con dos motores, como es el caso de los actuales vehículos de péndulo invertido como el *Segway*.

Una de las principales desventajas del uso de la bicicleta como transporte, como ya se mencionaba en párrafos anteriores es el cansancio, ya que el uso de la bicicleta conlleva actividad física en algunas ocasiones demandante, por lo que las personas que tienen que llegar presentables a sus lugares de trabajo se ven en dificultades, pues el sudor y el polvo de la ciudad comprometen su limpieza. Este proyecto es una muy buena solución a este problema, pues al ser un vehículo propulsado con un motor eléctrico y al ser además autobalanceable, la única actividad física que realiza el conductor es; simplemente inclinar el cuerpo un poco hacia adelante para avanzar y hacia atrás para frenar y un ligero balance hacia los lados cuando se desee girar, al menos para los conductores menos experimentados.



# **Capítulo 4**

## **Metodología**

## 4.1 Design Thinking

Este proyecto parte de una técnica de diseño donde se abarcan prácticamente todas las fases en la realización de un producto, se trata de una nueva estrategia de diseño que se está empezando a implementar en muchos proyectos universitarios alrededor del mundo, es un proceso o forma de diseñar llamado *Design Thinking*, en el cual se sigue una estructura muy clara y siempre explícita sobre en qué fase se encuentra el equipo (Figura 4.1), basada en algunas de las técnicas que mayor impacto están teniendo en la gestión actual del proceso de diseño y desarrollo de nuevos productos.

El proceso de diseño *Design Thinking*, suele implicar las siguientes fases [Ref.1]:

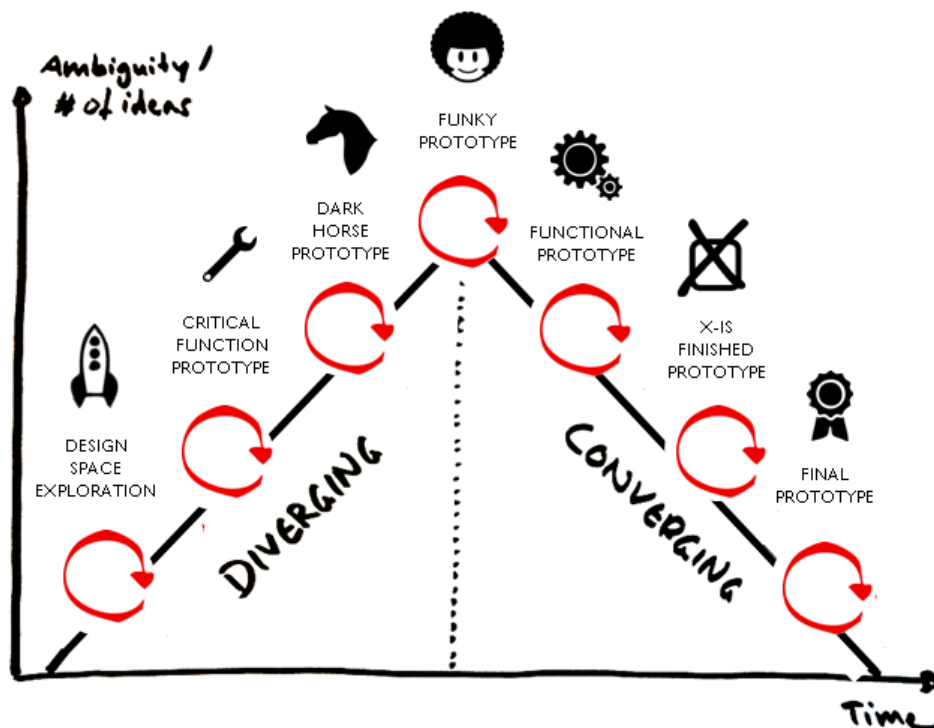


Figura 4.1 Fases del proceso de diseño *Design Thinking* [Ref.13]

1. Exploración del espacio de diseño: Observar y analizar el medio en el cual se desenvuelve el ser humano, descubriendo alguna necesidad y/o problema a solucionar. Esto significa que el equipo lleva a cabo investigaciones sobre los temas relacionados con el ámbito de su desafío. Eso se puede hacer mediante la observación, entrevista de gente común y usuarios en estas áreas en situaciones particulares. Se organizan, mediante la evaluación y prioridad de las necesidades identificadas.

2. Planear y proyectar proponiendo un modo de solucionar esta necesidad, por medio de bocetos y prototipos rápidos que puedan ayudar con la exploración de nuevas ideas e innovaciones como la implementación de un prototipo de función crítica en el cual se muestra si dicha función podrá ser realizada o resuelta para poder continuar con el proyecto, tratando de descubrir la posibilidad y viabilidad de la(s) solución(es).

3. Prototipo Dark Horse: Antes de que el prototipo Dark Horse pueda desarrollarse, hay que hacer un replanteamiento de los supuestos anteriores. El Dark Horse es un prototipo que se hace de las ideas menos factibles o extravagantes, las cuales de alguna forma podrían llegar a funcionar, por lo que se hace este prototipo para evaluar si dichas ideas pueden aplicarse al diseño o pueden servir para aprender algunos hechos que podrían ayudar al desarrollo del producto final.

4. Se construye y ejecuta un prototipo funcional llevando a la vida real la idea inicial, por medio de materiales y procesos productivos, con el cual se podrá probar con diferentes medios la función crítica hasta que quede totalmente resuelta.

5. Una vez que la función crítica ha sido atacada exitosamente, se hace el prototipo final, el cual integra todos los elementos exitosos de los diferentes prototipos hechos durante las anteriores fases de este proceso de diseño.

Muchos de estos actos o fases se hacen uno tras otro, y muchas veces simultáneamente. Algunos diseñadores experimentados no ven una jerarquización tan clara, ya que estos actos aparecen una y otra vez en el proceso de diseño (muchas veces llamado iterar).

Hoy por hoy, y debido al mejoramiento del trabajo del diseñador (gracias a mejores procesos de producción y recursos informáticos), podemos destacar otro acto fundamental en el proceso de diseño; Diseñar como acto cultural, implica conocer criterios de diseño como presentación, ergonomía, significación, socialización, costos, mercadeo, entre otros. Estos criterios son muy amplios pero se van acotando a medida que se definen los proyectos del diseño.

# **Capítulo 5**

## **Desarrollo del trabajo**

### 5.1. Definiendo las necesidades:

Una vez habiendo definido el problema y teniendo en claro los trabajos que se han hecho anteriormente, lo cual es un paso importante para comprender y definir bien lo que se va a diseñar, se pueden identificar las necesidades, que son las que nos van a asignar los requerimientos, los cuales se expresan más adelante.

Se dio inicio a la tarea de realizar encuestas para encontrar la forma más viable de satisfacer el problema, buscando una plena solución y aceptación por el usuario. Con lo cual se enlistaron 15 necesidades prioritarias, de las cuales cada persona tendría que seleccionar las cuatro más importantes a su criterio, dicha encuesta se puede encontrar en los anexos de este trabajo de tesis. Los factores que mayor puntuación arrojaron fueron tomados como prioritarios y se creó una tabla para simplificar los resultados obtenidos (Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Matriz de decisión de necesidades

	<b>Necesidades</b>	<b>Suma de puntuación</b>	<b>Calificación de Necesidades en %</b>
1	Que sea eléctrico	<b>7</b>	<b>8.3%</b>
2	Que sea compacto	<b>6</b>	<b>7.1%</b>
3	Que sea ligero	<b>6</b>	<b>7.1%</b>
4	Que sea barato	5	5,90%
5	Que sea cómodo	5	5,90%
6	Que tenga una buena velocidad	<b>6</b>	<b>7.1%</b>
7	Que se equilibre solo	<b>8</b>	<b>9.5%</b>
8	Que tenga una buena autonomía	5	5,90%
9	Agradable a la vista	4	4,70%
10	Fácil de manejar	<b>6</b>	<b>7.1%</b>
11	Que sea innovador	<b>6</b>	<b>7.1%</b>
12	Que sea ecológico	4	4,70%
13	Que pueda transportar buen peso	5	5,90%
14	Que sea seguro	<b>7</b>	<b>8.3%</b>
15	Que sea fácil de recargar la batería	4	4,70%
		<b>84</b>	<b>100.00%</b>

Como se puede ver en la tabla, la necesidad más importante de todas es que sea autobalanceable, lo cual es plenamente comprensible pues la razón de que este tipo de vehículos no se utilizan es justamente por su complejidad de manejo, pues requiere de mucho tiempo de práctica para poderlo dominar. Si este equilibrio tan complicado que es requerido para el manejo de un monociclo, se automatiza con el uso de la electrónica, la dificultad de manejo disminuye considerablemente, ahora tomando menos de un día en aprender a controlar el vehículo que las semanas que se requerían con el modelo sin motor o no autobalanceado.

Sabiendo esto, se puede asumir que la función crítica del monociclo es la estabilidad

<b>Función Crítica</b>
Estabilidad del Monociclo

En segundo lugar de las necesidades más importantes se encuentran que sea un vehículo eléctrico y seguro. El hecho de que sea eléctrico es de los más importantes ya que una de las problemáticas más pesadas en este proyecto fue la contaminación, por lo que hacer el vehículo eléctrico contra uno de combustión interna reduce hasta en un 90% la emisión de gases contaminantes. El hecho de que sea seguro, es también de alta importancia, aunque esto se soluciona con el hecho de que el monociclo sea autobalanceable pues se maneja con mayor facilidad evitando accidentes.

Algo que se tomó mucho en cuenta para este proyecto es que sea compacto, ligero y que tenga buena velocidad, pues esto soluciona la mayor parte de la problemática a la que se está atacando, al ser un vehículo compacto y ligero, se podría llevar a todos lados, desde el salón de clases o la oficina, hasta el teatro o supermercado. El hecho que tenga buena velocidad es importante para poder llegar rápida y ágilmente a un destino, aunque claro está que dicha velocidad compromete también la seguridad del conductor, por lo que tiene que ser una velocidad adecuada para poder rodar ágilmente pero seguro.

Una vez definidas las necesidades, se clasificaron como se muestra a continuación.

Tabla 5.2 Clasificación de las necesidades.

Clasificación de Necesidades
Diseño Visual (2,3,9)
Seguridad(14,10,7,5,6,13)
Costo(4)
Energía (8,12,15)
Innovación (11)

De esta forma, es más fácil referirse a alguna necesidad pues la tabla es más pequeña y efectiva.

## 5.2. Requerimientos

Después de haber identificado plenamente las necesidades del vehículo el equipo se enfocó a darle una solución válida, planteando una serie de posibles requerimientos (Tabla 5.3.) que el monociclo debería tener como mínimo, los cuales ayudarían a dar una solución aceptable a dichas necesidades.

Tabla 5.3 Lista de Requerimientos del monociclo.

Requerimientos	
1	El monociclo tiene unas dimensiones máximas 1x1x.30
2	El monociclo es resistente a impactos
3	El monociclo cuenta con freno de emergencia
4	El monociclo es portátil
5	El monociclo tiene costo máximo de 15 mil pesos
6	El monociclo está fabricado con materiales livianos y resistentes
7	El monociclo cuenta con piezas comerciales
8	Duración mínima de la batería con carga máxima de 2 hr.
9	El monociclo se carga con CA 60Hz. 110~227V
10	El monociclo transporta personas con peso máx. de 100 kg
11	El monociclo tiene un buen diseño visual

12	El monociclo se basa en el principio de péndulo invertido
13	El monociclo cuenta con un control robusto y perfil de velocidad cúbico
14	El monociclo se estabiliza solo
15	El monociclo trabaja con baterías y/o fuentes alternas de energía
16	El monociclo emplea materiales sustentables
17	El monociclo tiene un diseño ergonómico

Una de las necesidades de las más importantes fue que sea compacto, por lo que se le dio como restricción un tamaño máximo de  $1 \times 1 \times 0.3$  [m], es decir, el monociclo no puede exceder dichas dimensiones pues dejaría de ser compacto y perdería su funcionalidad al no solucionar esa necesidad además de que al ser de dimensiones reducidas, se ataca también la necesidad de ligereza pues las piezas componentes son menos y más pequeñas.

Otras de las necesidades fueron que el monociclo sea fácil de manejar y seguro, por lo que se requiere que el vehículo sea resistente a impactos ya que en muchas ciudades las calles no son muy regulares y muchas veces tienen muchos baches y banquetas no adecuadas para vehículos con ruedas, en este tema también se requiere que se estabilice solo (lo cual también satisface nuestra función crítica) para que sea fácil de manejar para el usuario y seguro, al evitar accidentes por equivocaciones o fallas de manejo, también tiene un diseño ergonómico y una velocidad máxima de 25 km/h pues de lo contrario, a velocidades más altas, un accidente sería muy brusco.

La necesidad de que pueda transportar buen peso, se le dio como requerimiento que sea capaz de aguantar a una persona de 100kg pues la mayoría de la gente en este país está por debajo de dicho peso, de hecho, el peso promedio de la población mundial es de unos 62 Kg, además de que si se hace que el monociclo pueda aguantar mayores pesos incrementaría la cantidad de material necesario para soportar tales sollicitaciones por lo que el diseño tendría que ser más robusto y pesado, contradiciendo algunas de las más importantes necesidades que se han planteado y explicado anteriormente.



En fin, cada requerimiento sirve para satisfacer las necesidades para nuestro proyecto y también como guía para saber un poco mejor que es lo que se va a diseñar.

### 5.3. Diseño Conceptual

Una vez teniendo los requerimientos, se hace una lluvia de ideas, la cual es una herramienta de trabajo grupal que facilita el surgimiento de nuevas ideas sobre un tema o problema determinado. En este caso, se hizo una serie de bocetos rápidos los cuales dieron ideas para la implementación de un monociclo que cumpla con todos o al menos los más importantes de los requerimientos y a la vez las necesidades. Se mostraron diferentes prototipos conceptuales y se analizaron los pros y los contras de cada uno, para al final juntar las mejores ideas y crear el mejor diseño posible.

Algunos ejemplos de los bocetos creados se pueden ver a continuación:

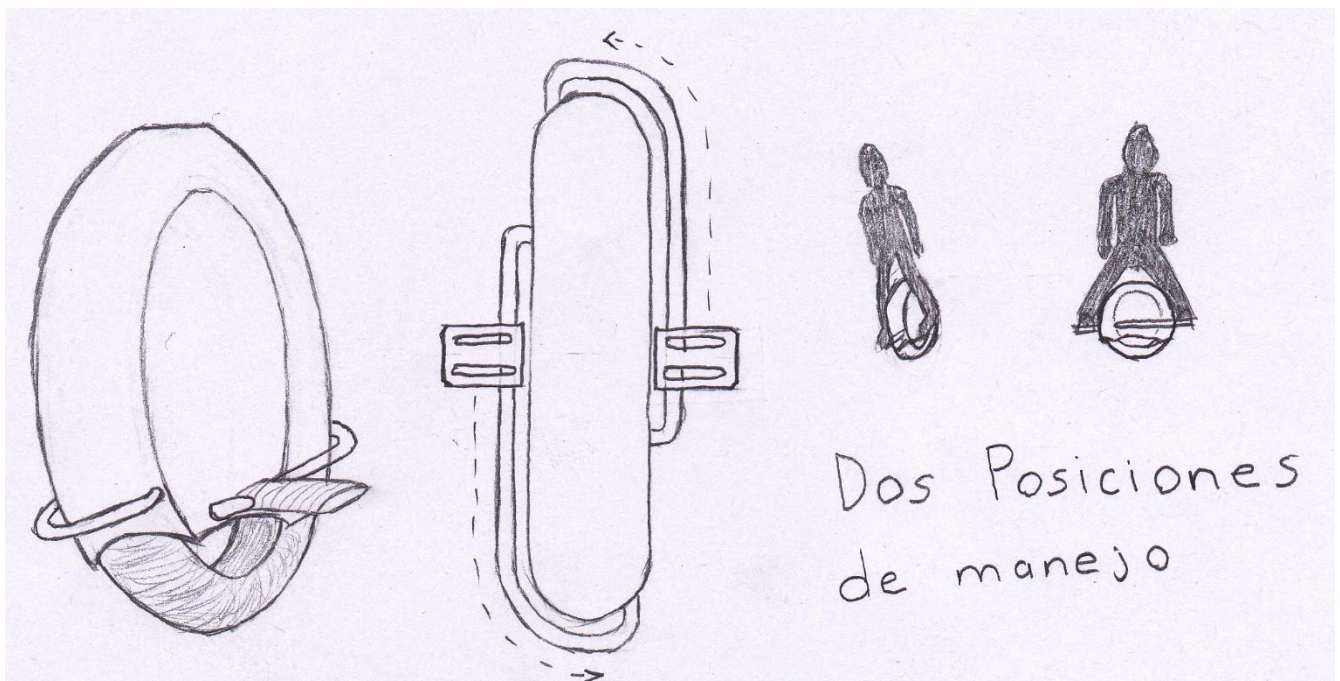
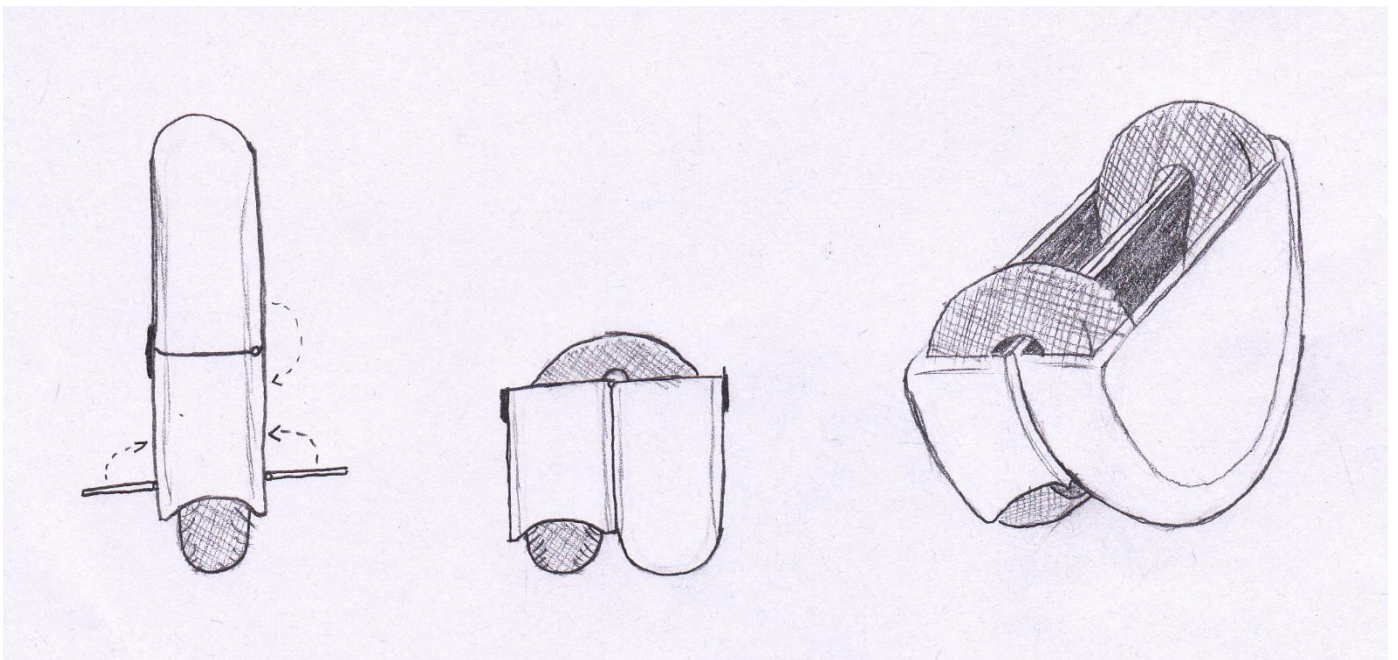


Figura 5.1 Boceto propuesta de monociclo.

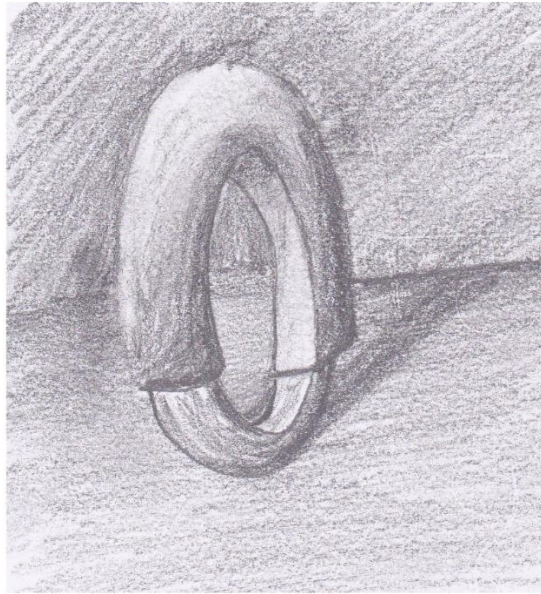
Este boceto es interesante, pues la forma de manejar el monociclo es parado (de pie) y tiene unas correderas de tal forma que se pueden acomodar los pies del conductor de forma frontal como montando una patineta o de forma lateral como ir deslizándose sobre patines. Lo malo de este diseño es que no es fácil de manejar y puede causar muchos accidentes a la hora de aprender a utilizarlo.



*Figura 5.2 Boceto de monociclo con llanta flexible.*

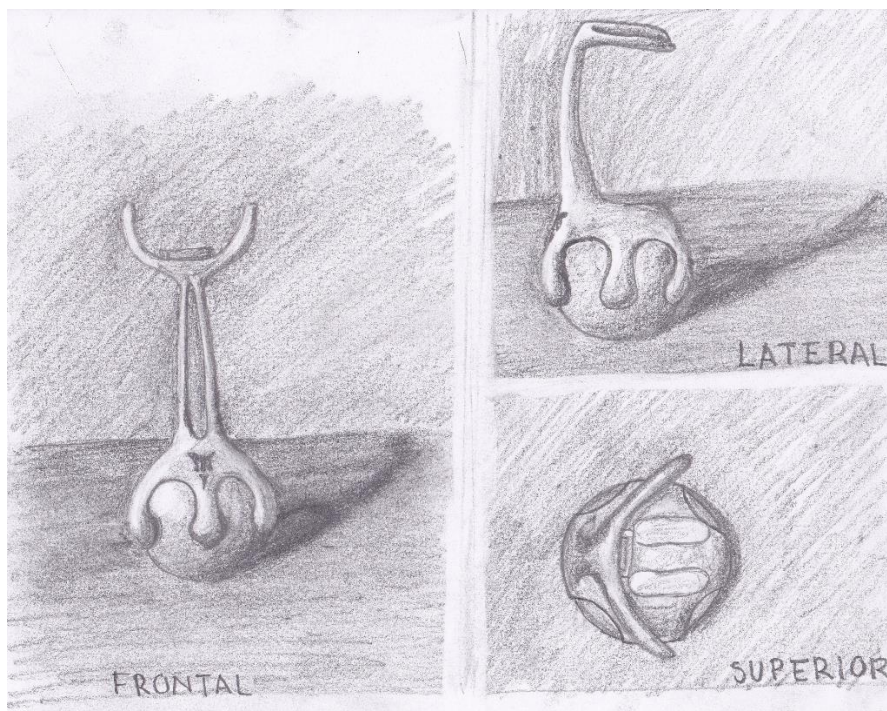
Este concepto es algo un poco fuera de lo común pues es un monociclo con una llanta completamente flexible, la cual permite doblar el vehículo por la mitad para cargarlo más fácilmente, sin embargo, dicha llanta se tendría que mandar a hacer con materiales especiales lo que elevaría el costo en gran medida y dificultaría el diseño de los componentes del monociclo, sin embargo, no es una idea que se pueda desechar tan fácilmente pues con algo de investigación podría llegar a hacerse realidad.





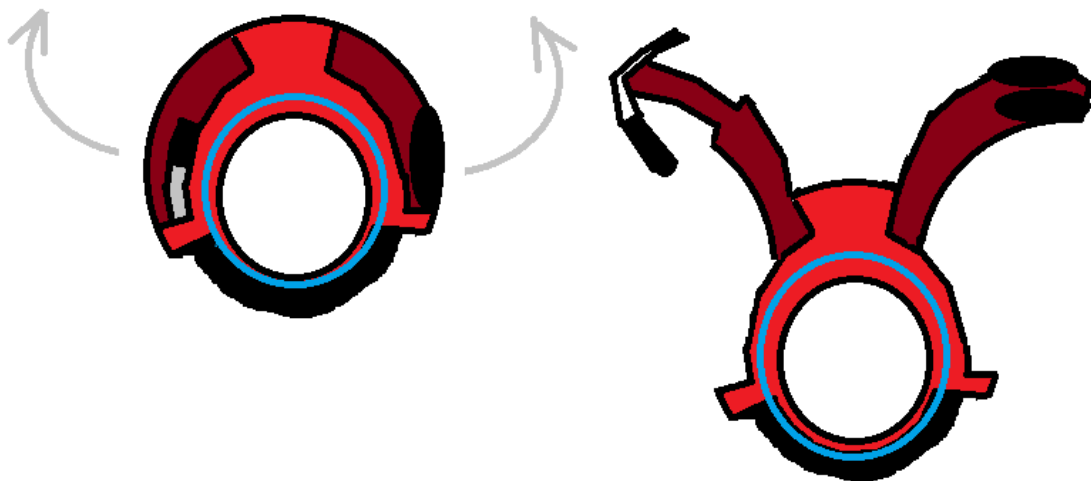
*Figura 5.3 Boceto de monociclo sin eje.*

Este es una de las ideas que llegó para quedarse pues se trata de que sea una rueda hueca, es decir, que el eje no está precisamente en el centro de la rueda. Es una buena idea ya que es algo innovador y ya existe mucha información sobre cómo implementar dicho arreglo.



*Figura 5.4 Boceto de propuesta de esferociclo.*

Por último, este es un monociclo cuya llanta es una esfera y es el único de todos que es bidireccional (se balancea no solo hacia adelante y hacia atrás, si no también hacia los costados) éste es uno de nuestros modelos “Black Horse” que se explicarán más adelante. Básicamente la idea de ser bidireccional es muy buena, sin embargo, la parte mecánica se complica mucho al mover una esfera en vez de una rueda común, al igual que la parte de control, por lo que los costos aumentarían excesivamente y, aunque es algo que se puede implementar y se puede hacer realidad, no cumple con nuestro requerimiento de que su costo sea menor a los \$15,000 pesos.



*Figura 5.5 Boceto del diseño conceptual final.*

Finalmente, uniendo las mejores ideas de todos los conceptos presentados, se llegó a este modelo, el cual consta de una llanta hueca, y dos mecanismos de tal forma que el conductor puede montar el monociclo parado o sentado, según su comodidad y su habilidad al manejar el vehículo.

Al hacer el modelo \*No definitivo\* en 3D, se obtienen los siguientes resultados (Figura 5.6);



*Figura 5.6 Distintas vistas del diseño conceptual en CAD.*

#### **5.4. Prototipo de Función Crítica**

Una vez teniendo la idea de cómo se vería el monociclo, se construyó un prototipo de función crítica con el objetivo de comprobar que el vehículo se podía balancear en una sola llanta con el apoyo de un motor eléctrico.

Tratando de utilizar los materiales disponibles más sencillos y a la mano, se construyó el prototipo utilizando materiales y componentes de un scooter eléctrico que un integrante del equipo tenía a su disposición, integrándole un motor eléctrico con escobillas a medio caballo de potencia, el cual le daba movimiento a una rueda a través de una cadena. Se integró soporte para los pies y un manubrio de tal forma que el usuario lo manejara parado.

Al no tener aún los sensores, el control y todo lo necesario para lograr que el motor estabilice el prototipo, se integró un freno y un mando manual en el puño derecho del manubrio de tal manera que el usuario pudiera controlar el movimiento del motor manualmente.

El prototipo de función crítica se muestra en las imágenes a continuación:





Figura 5.7 Prototipo de función crítica.

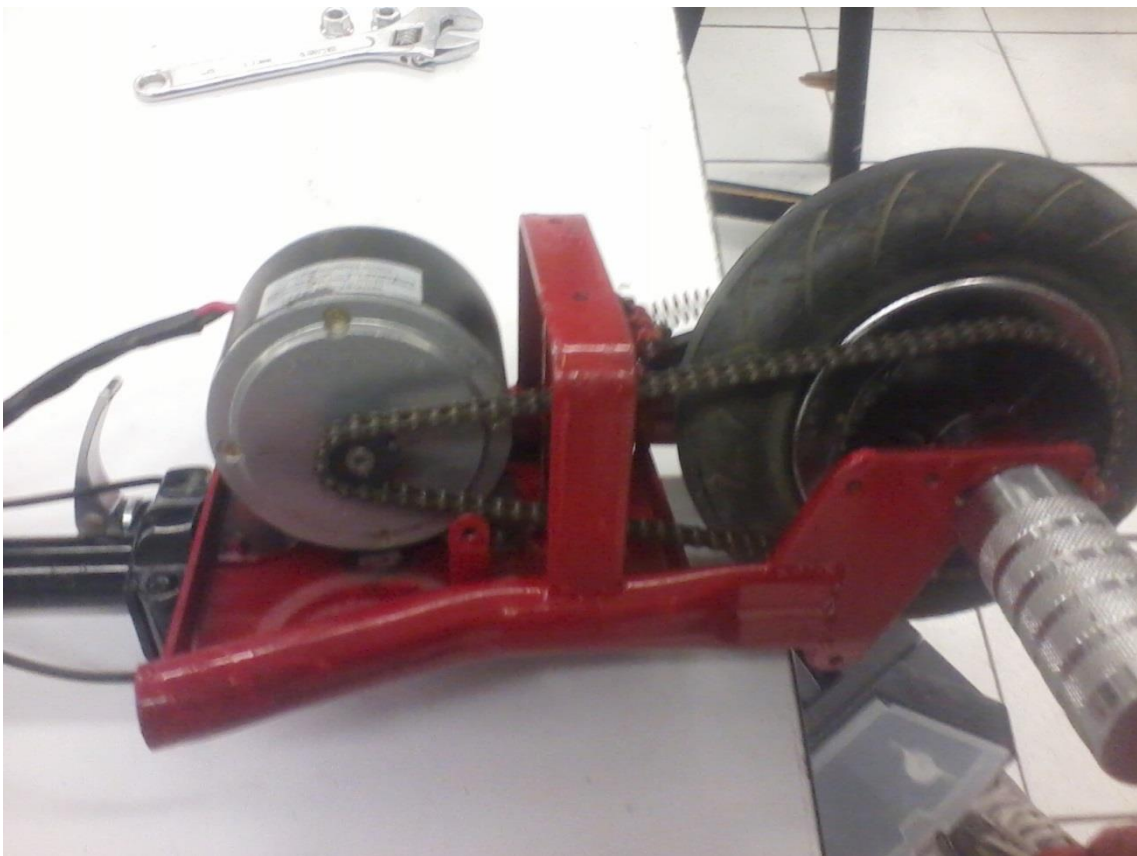


Figura 5.8 Transmisión del prototipo de función crítica.

Con este prototipo se observó que el balance del vehículo en una sola rueda es posible, pues cuando el usuario se inclina hacia enfrente, se acelera el motor logrando que el ángulo se mantenga y el individuo no caiga, mientras que cuando el usuario regresa a la vertical estando en movimiento, basta con frenar la rueda de manera controlada para poder recuperar el ángulo y no caerse. En cuanto al equilibrio lateral se hace solo gracias al momento giroscópico creado por la rueda una vez que está girando. Este análisis fue meramente cualitativo, ya que no se hicieron mediciones de ningún tipo, su único propósito era observar que la estabilidad en una llanta con la ayuda de un motor eléctrico es posible y que es viable continuar con el proyecto.

### **5.5. Prototipos *DarkHorse***

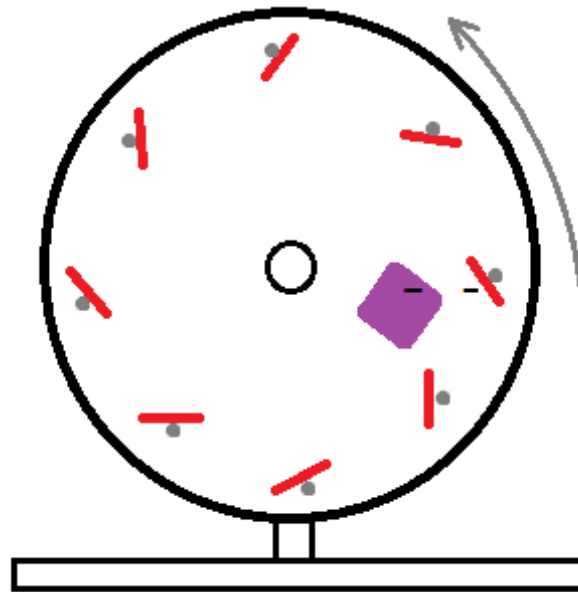
Un prototipo *Dark Horse* es una técnica de diseño no muy popular, pero el cual ha logrado en muchos casos innovaciones y diseños fuera de lo común completamente funcionales, además de transmitir valiosos conocimientos al momento de probar dichos prototipos. Para este proyecto, se plantearon dos prototipos *Dark Horse*, que aunque sólo uno fue el que se llegó a desarrollar por falta de tiempo, le dieron al equipo algunas cuantas ideas interesantes para el proyecto.

El primer prototipo *Dark Horse* fue hacer un monociclo esférico, es decir, que en vez de tener una llanta o rueda convencional, tuviera una esfera, la cual podría moverse en todas direcciones pudiendo estabilizar al usuario hacia todos los sentidos en el plano. La ventaja de esta idea sería que el usuario podría manejarlos con mucha mayor facilidad y seguridad, sin embargo, la construcción de dicho prototipo sería muy tardada y costosa, además de que contradecía las necesidades de que fuera pequeño y ligero. Por estas razones fue que se dejó este prototipo solamente como idea.

El segundo prototipo *Dark Horse* fue con respecto a la idea de que el vehículo no fuera impulsado por un motor eléctrico, si no que el mismo monociclo fuera un motor pero magnético, es decir, que funcionara con puros imanes para que de alguna forma, su uso pudiera ser sin recargas de energía, ya que su autonomía duraría hasta que la vida de los imanes finalizara, lo cual sería mucho tiempo.



Se construyó dicho prototipo para probar el comportamiento de los imanes y probar que movimiento sería requerido para poder crear una fuerza par en un eje. Para esto se consiguieron imanes comunes de uso casero y un imán más potente y se acomodaron de la siguiente manera en un banco de pruebas:



*Figura 5.9 Disposición de Imanes en el prototipo DarkHorse.*

En donde los imanes comunes de baja fuerza son representados con color rojo, mientras que el de mayor fuerza es de color morado, como se puede observar, la pared expuesta de los imanes rojos es el polo negativo, al igual que en el imán morado, creando repulsión entre ellos.

Haciendo pruebas se dedujo que no es fácil hacer funcionar este sistema, sin embargo puede llegar a ser posible moviendo o rotando de alguna forma el imán morado se pudo crear un poco de rotación en la rueda, cuando mucho una vuelta completa, y esto se logró en condiciones nada óptimas pues los imanes no estaban bien sujetos y por un error del equipo, los apoyos para los imanes rojos eran de acero, lo que creaba bastante ruido.

Investigando un poco más se encontraron sistemas magnéticos que si funcionan muy bien, con los cuales incluso se puede llegar a dar energía a un hogar completo, siendo una forma de generar electricidad gratis y por tiempo indefinido. Sin embargo, esta tecnología no está muy avanzada por lo que se encuentran muchas desventajas a la

hora de quererlo aplicar en el monociclo: Para empezar, el tiempo requerido para la investigación y para hacer funcionar el sistema sería más de lo contemplado para este proyecto, por lo visto sería necesario que el imán morado o los rojos tuvieran un movimiento para crear el par, por lo que se necesitarían actuadores o motores eléctricos pequeños extra, el ensamble sería más complicado y pesado, el sistema carecería de sensibilidad, lo que es muy importante pues es necesario que al mínimo cambio de ángulo, el monociclo avance o frene de manera ágil.

## **5.6. Diseño mecánico y selección de piezas comerciales**

### **5.6.1 Motor**

Una de las partes elementales y más importantes del monociclo eléctrico es el motor pues es el que le va a dar movimiento para poder ser equilibrado, por lo que su selección tiene que ser bastante cuidadosa para poder hacer una buena compra que satisfaga las necesidades propuestas. Se pensó en un motor eléctrico sin escobillas ya que son motores más actuales, con mayor eficiencia y menor mantenimiento, los cuales al no tener escobillas no se tiene que limpiar ya que estas dejan residuos con el uso, los cuales afectan también al buen funcionamiento del motor.

Se realizó un estudio de los motores eléctricos utilizados en los vehículos similares y éstos se tomaron como punto de partida para la definición del motor a utilizar. Estos motores por lo general están entre 1.5 y 2 caballos de fuerza, sin embargo, parte de nuestra investigación demuestra que son vehículos que carecen de potencia para calles y pasillos de nuestra ciudad, ya que están diseñados para lugares que cuentan con caminos ideales los cuales son por mucho lejanos a los nuestros, por lo cual nos dimos a la tarea de conseguir un motor que cuente con un mayor par motriz, siguiera siendo eléctrico y que además cumpliera con los requerimientos de velocidad ya planteados.

La búsqueda del motor fue una tarea difícil, ya que como existen una cantidad muy pequeña de vehículos como este, no hay en sí motores para este tipo de aplicación ya que son motores o muy grandes para uso industrial o muy pequeños para uso en la

robótica. Por lo que se optó por conseguir motores lo más parecidos a lo que se estaba buscando que son motores con aplicación para aviones o helicópteros de radio control, los cuales no son óptimos para este proyecto pero se acerca mucho al comportamiento deseado.

Se consideraron y cotizaron varios motores eléctricos y se eligió el siguiente ya que es el que mejor satisface nuestras necesidades:

Motor Brushless Outrunner (Turnigy Rotomax 1.40)

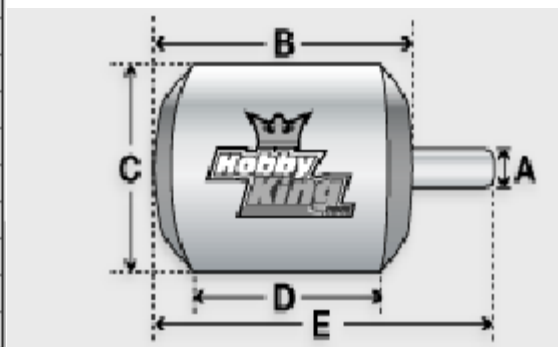


Figura 5.10 Motor Turnigy Rotomax 1.40.

El cual cuenta con las siguientes especificaciones [Ref.2]:

Tabla 5.4 Especificaciones del motor Turnigy Rotomax 1.40.

Kv (rpm/v)	228
Weight (g)	715
Max Current (A)	75
Resistance (mh)	29
Max Voltage (V)	37
Power(W)	2775
Shaft A (mm)	8
Length B (mm)	83
Diameter C (mm)	80
Can Length D (mm)	36
Total Length E (mm)	124



Como se puede apreciar en la tabla, el motor cuenta con 2.7 KW de potencia lo cual es suficiente para ser un vehículo bastante ágil y poder mover una persona pesada sin ningún problema. Además de que cuenta con 228 rpm/V que al ser alimentado con 24V daría una velocidad angular máxima de 5472 rpm. El cálculo para encontrar la

velocidad a la que se desplaza el monociclo con esta configuración se puede consultar más adelante.

### **5.6.2 Rin**

La selección del rin se hizo cuidadosamente pues esta parte sería una de las más importantes en la mecánica del monociclo pues es en él en donde se monta la llanta, el engrane interno y los rodamientos que darán rigidez al sistema, por lo que la llanta definirá el tamaño del vehículo, el engrane interno deberá tener suficiente espacio para ser montado y tener soportes que lo mantengan fijo al rin, mientras que los rodamientos deberán tener su espacio bien definido para su correcto funcionamiento.

Para encontrar el rin adecuado se tuvieron que considerar varios aspectos importantes para que este cumpla con los requerimientos y necesidades antes planteadas, así como el concepto del cual el equipo se basó.

Para empezar, el monociclo debe ser compacto y ligero, por lo que se desea un rin de un material ligero y que no sea tan grande, por lo que se decidió que el rin fuera de 17" de aluminio y para que sus dimensiones y peso no fueran tan grandes se decidió por un rin delantero de motocicleta el cual se muestra con el número 1 en la figura 5.11, con lo que se puede tener un monociclo con tamaño suficiente para poderlo montar con comodidad y seguridad pero sin ser tan robusto para que conserve su portabilidad.

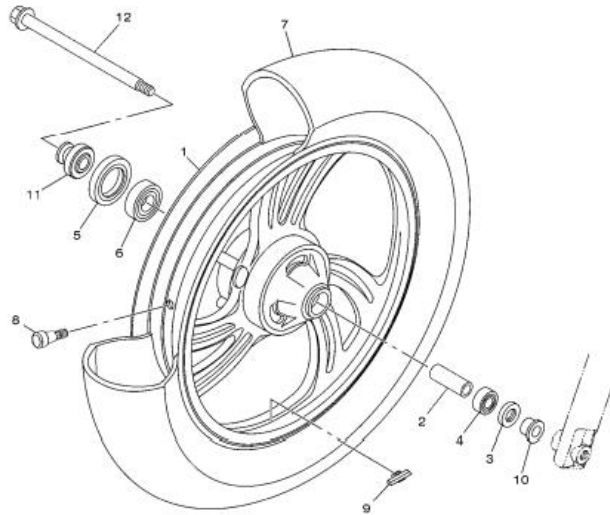


Figura 5.11 Llanta y rin de motocicleta Yamaha FAZER.

Basándose en el concepto de monociclo que se había planteado, el rin debería ser un “Hubless Wheel” que en español significa rin sin maza, lo cual no cumple este rin de motocicleta, sin embargo se tiene la posibilidad de maquinar lo necesario para adaptar las partes mecánicas en él y después cortar la maza para que quede “hueco”.

### 5.6.3 Cálculo de Transmisión de Potencia.

Teniendo ya las especificaciones del motor y las dimensiones del rin a utilizar con su respectiva llanta, se puede hacer el diseño del tren motriz, el cual definirá la velocidad final del monociclo así como su potencia.

Después de incontables iteraciones para encontrar la configuración óptima, se realiza el siguiente arreglo de reducción de velocidad (Figura 5.12) considerando que el motor seleccionado otorga una velocidad angular muy superior a la buscada. En el cual se transmite la potencia del motor al eje secundario a través de una banda síncrona, la cual tiene bastantes ventajas contra el uso de engranes, principalmente el hecho de que los engranes comerciales encontrados no funcionan a tan altas revoluciones, además de que son muy ruidosos, mientras que la banda es silenciosa, puede trabajar a altas velocidades y se tiene más libertad de montaje, sin embargo se complica un poco pues es necesario pensar en una corredera o un tensor extra en el diseño.

El eje secundario que adquiere rotación de la banda le transfiere el movimiento al rin a través de engranes, teniendo un piñón en el eje secundario y un engrane interno montado en el rin. De esta forma se da movimiento a la rueda para poder controlar el monociclo.

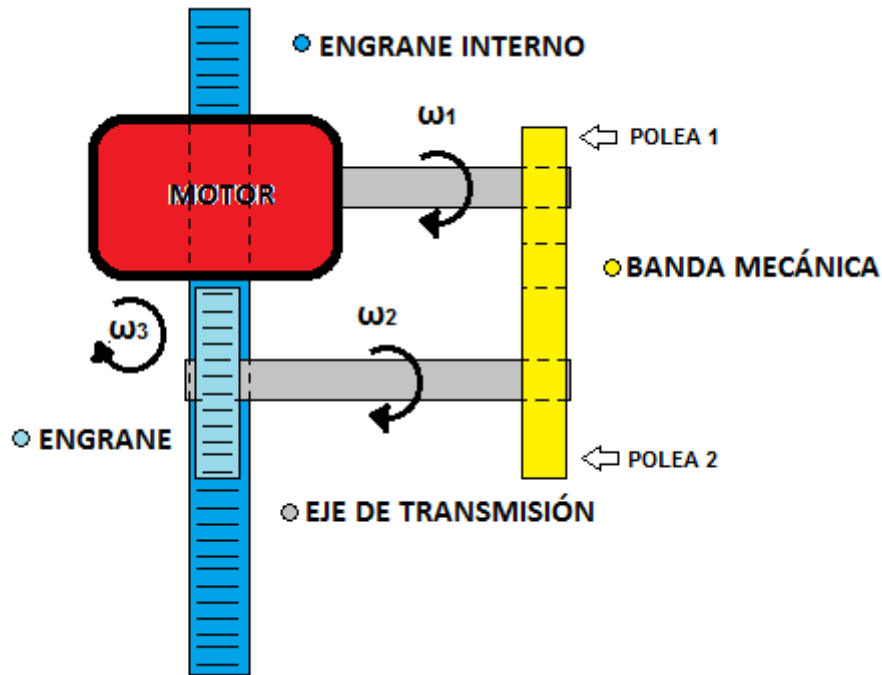


Figura 5.12 Boceto del sistema de trasmisión.

A partir de las especificaciones del motor se procedió a seleccionar y diseñar el resto de los componentes con el fin de aproximar la velocidad de salida a 25 Km/h en la llanta. Tal análisis fue el siguiente.

Por las especificaciones del motor se sabe que dicho motor trabaja a:

$$Kv = 228 \left[ \frac{rpm}{V} \right]$$

Al motor se le piensa alimentar con un voltaje de 24 [V] lo que nos genera una velocidad angular de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$\omega_{mot} = Kv * V_{ent} = \left( 228 \left[ \frac{rpm}{V} \right] \right) (24 [V]) = 5472 rpm$$

Que es la misma velocidad angular de la polea 1 por lo cual

$$\omega_{mot} = \omega_1 \quad \text{_____} \quad (1)$$

que por medio de una banda le trasmite movimiento a la polea 2 por lo cual conservan una misma velocidad lineal, entonces tenemos que:

$$v_1 = v_2 \quad \text{_____} \quad (2)$$

Y para la velocidad lineal se sabe que:

$$v = \omega * r \quad \text{_____} \quad (3)$$

Se sustituye la ec. 3 en la ec. 2 con sus respectivos subíndices:

$$\omega_1 * r_1 = \omega_2 * r_2 \quad \text{_____} \quad (4)$$

se despeja la velocidad angular dos ( $\omega_2$ ) y se tiene que:

$$\omega_2 = \omega_1 * \frac{r_1}{r_2} \quad \text{_____} \quad (5)$$

tanto la polea 2 como el piñón tienen esta velocidad angular ya que como se muestra en la figura ¿? Están conectados al mismo eje, por lo cual se tiene que:

$$\omega_2 = \frac{v_2}{r_2} = \frac{v_3}{r_3} \quad \text{_____} \quad (6)$$

Siendo  $v_3$  y  $r_3$  los componentes de velocidad y radio del piñón respectivamente.

De la ec. 6 se despeja  $v_3$  y se sustituye  $\omega_2$  de la ec. 5 y se obtiene la siguiente ecuación:

$$v_3 = \omega_1 * \frac{r_1}{r_2} * r_3 \quad \text{_____} \quad (7)$$

Como el piñón se encuentra en contacto con el engrane interno, ambos poseen la misma velocidad lineal por lo tanto

$$v_3 = \omega_4 * r_4 \quad \text{_____} \quad (8)$$

Igualamos la ec. 7 con la 8 y despejando  $\omega_4$  se obtiene lo siguiente

$$\omega_4 = \omega_1 * \frac{r_1}{r_2} * \frac{r_3}{r_4} \quad \text{_____} \quad (9)$$

Ya que la llanta gira con la misma velocidad angular que el engrane interno se plantea lo siguiente:

$$\omega_4 = \omega_{sal} \text{ _____ (10)}$$

a su vez se sabe que:

$$\omega_{sal} = \frac{v_{sal}}{r_{sal}} \text{ _____ (11)}$$

Siendo  $r_{sal}$  el radio exterior de la llanta y  $v_{sal}$  la velocidad lineal del exterior de la llanta. Y al fin llegamos a una ecuación que contiene la velocidad lineal de salida que es la que se desea conocer por lo cual se despeja quedando de la siguiente forma:

$$v_{sal} = \omega_{sal} * r_{sal} \text{ _____ (12)}$$

Se sustituye la ec. 9 en la ec. 10 y posteriormente se sustituye en la ec. 12 y se obtiene lo siguiente:

$$v_{sal} = \omega_1 * \frac{r_1}{r_2} * \frac{r_3}{r_4} * r_{sal} \text{ _____ (13)}$$

Y por último se sustituye la ec. 1 en la ec. 13 y se obtiene la siguiente ecuación en términos de la velocidad angular del motor y los radios de los elementos mecánicos:

$$v_{sal} = \omega_{mot} * \frac{r_1}{r_2} * \frac{r_3}{r_4} * r_{sal} \text{ _____ (14)}$$

#### 5.6.4 Selección de Engranés y Poleas

Esta última ecuación fue la utilizada para el proceso de iteración para poder definir las dimensiones de los diámetros y números de dientes de los componentes a utilizar en el sistema, teniendo siempre preferencia por partes comerciales se llegó a las siguientes especificaciones:

Las poleas que se eligieron fueron de la marca Martin Sproket & Gear con los siguientes números de parte y especificaciones [Ref.3, página K-6]:



Tabla 5.5 Lista de poleas seleccionadas.

	No. De Parte	Diámetro de Paso [in]	Número de Dientes [dtes]
Polea 1	14XL037	0.891	14
Polea 2	36XL037	2.292	36



Figura 5.13 ejemplo de poleas seleccionadas. [Ref.15]

En cuanto a los engranes, se llegaron a las siguientes especificaciones:

Tabla 5.6 Engrane y piñón seleccionados.

	Paso [dtes/in]	Diámetro de Paso [in]	Número de Dientes [dtes]
Piñón	12	1.5	18
Engrane Int.	12	15	180



Figura 5.14 Ejemplo de engrane interno.[Ref.14]



Figura 5.15 Ejemplo de piñón. [Ref.16]

En este caso, se encontró el piñón en diferentes proveedores, pero el problema fue que el engrane interior tendría que ser hecho sobre diseño y como siempre es recomendable que los engranes en contacto sean hechos por el mismo proveedor, se optó por mandar a maquinar ambos engranes sobre diseño.

Aprovechando esto, se tiene la libertad de calcular de una forma eficiente el eje secundario y mandar a hacer el piñón con el barreno especial para dicho eje.

De esta forma, al sustituir las medidas de los elementos mecánicos antes descritos, en la ecuación (14) y sabiendo que  $\omega_{mot} = 5472rpm = 573.02 \text{ rad/s}$  y que la llanta

tiene un radio exterior de  $r_{sal} = 0.3m$ , se tiene que la velocidad final en la llanta del monociclo será de:

$$v_{sal} = \omega_{mot} * \frac{r1}{r2} * \frac{r3}{r4} * r_{sal} = 573.02 * \frac{0.4455}{1.146} * \frac{0.75}{7.5} * 0.3$$

$$v_{sal} = 6.7 m/s = 24.1 Km/h$$

Lo cual es un resultado bastante próximo al requerimiento de velocidad final.

### 5.6.5 Cálculo del ángulo de volcadura

Con toda esta información se puede hacer el cálculo para el ángulo de volcadura, apoyándose de la fórmula obtenida al realizar el modelado del sistema de péndulo invertido y fórmulas básicas de mecánica como se muestra a continuación:

Se hacen las siguientes consideraciones para simplificar la solución de la ecuación diferencial que modela el comportamiento del péndulo invertido, sin embargo, dichas consideraciones son solo aproximaciones al modelo real y no deben ser tomadas al pie de la letra al modelar el comportamiento real del monociclo para el control del mismo;

- El peso del usuario se aplica en el centro de gravedad del mismo
- Las fuerzas externas son despreciables
- No hay fricción

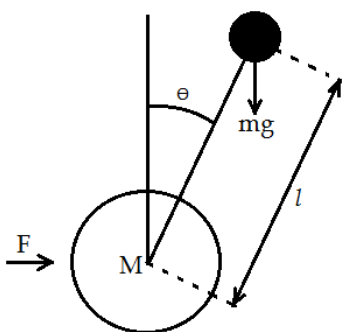


Figura 5.16 Diagrama de péndulo invertido

$$F = \frac{dP}{dt} \quad F = \frac{d(m\bar{v})}{dt} \quad F = m \frac{d^2x}{dt^2}$$

P = Momento Lineal = mv

$$a = \frac{d\bar{v}}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2}$$

$$\sum F_x = 0$$

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + m \frac{d^2}{dt^2}(x + l \text{sen}\theta) = F$$

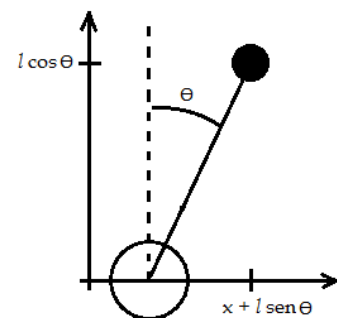


Figura 5.17 Ubicación del centro de gravedad (xg, yg)

$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + m \frac{d^2 x}{dt^2} + ml \frac{d^2}{dt^2} \text{sen}\theta = F$$

Sabiendo que:  $\frac{d^2}{dt^2} \text{sen}\theta = (-\text{sen}\theta) \frac{d}{dt} \theta^2 + (\text{cos}\theta) \frac{d^2}{dt^2} \theta$

$$(M + m)\ddot{x} - ml(\text{sen}\theta)\dot{\theta}^2 + ml(\text{cos}\theta)\ddot{\theta} = F \quad (1)$$

$$\sum F_y = 0$$

$$\left[ m \frac{d^2}{dt^2} (x + l\text{sen}\theta) \right] l\text{cos}\theta - \left[ m \frac{d^2}{dt^2} (l\text{cos}\theta) \right] l\text{sen}\theta = mgl\text{sen}\theta$$

$$m \left[ \ddot{x} + l \frac{d^2}{dt^2} \text{sen}\theta \right] l\text{cos}\theta - m \left[ l \frac{d^2}{dt^2} \text{cos}\theta \right] l\text{sen}\theta = mgl\text{sen}\theta$$

$$m[\ddot{x} + l(-\text{sen}(\theta)\dot{\theta}^2 + \text{cos}(\theta)\ddot{\theta})]l\text{cos}\theta - m[l(-\text{cos}(\theta)\dot{\theta}^2 - \text{sen}(\theta)\ddot{\theta})]l\text{sen}\theta =$$

$$[m\ddot{x} - ml\text{sen}(\theta)\dot{\theta}^2 + ml\text{cos}(\theta)\ddot{\theta}]l\text{cos}\theta + [ml\text{cos}(\theta)\dot{\theta}^2 + ml\text{sen}(\theta)\ddot{\theta}]l\text{sen}\theta =$$

$$m\ddot{x}l\text{cos}\theta - ml^2\text{sen}(\theta)\text{cos}(\theta)\dot{\theta}^2 + ml^2\text{cos}^2(\theta)\ddot{\theta} + ml^2\text{sen}(\theta)\text{cos}(\theta)\dot{\theta}^2 + ml^2\text{sen}^2(\theta)\ddot{\theta} =$$

$$m\ddot{x}l\text{cos}\theta + ml^2\text{cos}^2(\theta)\ddot{\theta} + ml^2\text{sen}^2(\theta)\ddot{\theta} = mgl\text{sen}\theta$$

$$ml[\ddot{x}\text{cos}\theta + l\text{cos}^2(\theta)\ddot{\theta} + l\text{sen}^2(\theta)\ddot{\theta}] = mgl\text{sen}\theta$$

$$ml[\ddot{x}\text{cos}\theta + l\ddot{\theta}] = mgl\text{sen}\theta$$

$$\ddot{x}\text{cos}\theta + l\ddot{\theta} = g\text{sen}\theta \quad (2)$$

De (2):

$$\ddot{x} = g\tan\theta - l\ddot{\theta} \quad (3)$$

Sustituyendo (3) en (1):

$$(M + m)g \tan \theta - (M + m)l\ddot{\theta} - ml \sin(\theta)\dot{\theta}^2 + ml \cos(\theta)\ddot{\theta} = F \quad (4)$$

Para que el monociclo pueda llevar a una persona a una cierta velocidad, el ángulo tiene que permanecer constante, de lo contrario, al intentar estabilizar, el monociclo frenaría hasta pararse, así que se evalúa la ecuación (4) con  $\dot{\theta} = \text{cte}$ , por lo que se eliminan los términos con derivadas y queda lo siguiente:

$$F = (M + m)g \tan \theta \quad (5)$$

En donde  $F$  es la fuerza necesaria para mantener la inclinación de la persona constante,  $M$  es la masa del usuario, que según los requerimientos del proyecto, sería de 100Kg,  $m$  es la masa del monociclo la cual se desconoce por lo que se hace una estimación de 30Kg,  $g$  es la gravedad en  $m/s^2$  y  $\theta$  es el ángulo de inclinación del usuario.

Para conocer el ángulo, se debe saber la fuerza que el motor puede aplicar al sistema y para conocerla se utiliza la siguiente fórmula:

$$F = \frac{\tau}{r_{sal}} \quad (6)$$

El par motor se calcula de la siguiente manera, sabiendo que la velocidad angular final en la rueda del monociclo es:  $\omega_{sal} = 212.72 \left(\frac{2\pi}{60}\right) = 22.27 \frac{rad}{s}$

$$\tau = \frac{P}{\omega_{sal}} = \frac{2775}{22.27} = 124.57 [Nm]$$

Sustituyendo el valor de  $\tau$  en la ecuación (6) se puede conocer la fuerza de la siguiente manera:

$$F = \frac{\tau}{r_{sal}} = \frac{124.57}{0.3} = 415.24 [N]$$

Se despeja el ángulo de la fórmula (5) y se sustituyen los datos obtenidos:

$$\theta = \text{angtan} \left( \frac{F}{(M + m)g} \right) = \text{angtan} \left( \frac{415.24}{(100 + 30)(9.81)} \right)$$

$$\theta = 18.03^\circ$$

Este valor de ángulo obtenido es el ángulo de volcadura del monociclo, es decir, es la mayor inclinación que una persona de 100Kg a nivel del mar puede alcanzar sin caerse ya que si se pasa esta inclinación, la potencia del motor ya no sería suficiente para mantener el equilibrio y la persona caería. Como se puede observar, el ángulo obtenido es bastante bueno, pues el usuario podría inclinarse 18 grados hacia adelante y los mismos hacia atrás e incluso un poco más si el usuario pesa menos de 100Kg, que sería la mayoría.

#### 5.6.6 Cálculo de longitud de banda

Ya definidas las poleas a usar y su colocación, se procede a calcular las dimensiones de la banda. En la siguiente figura se muestra una configuración básica de su arreglo.

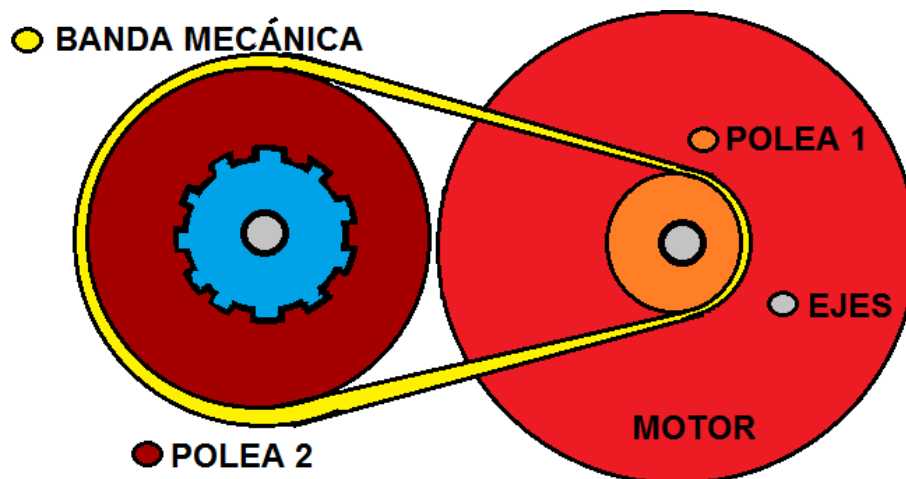


Figura 5.18 Diagrama de la disposición de la Banda Mecánica.

Para estimar su dimensión se plantea la siguiente condición ideal con el fin de facilitar el cálculo:

La banda tiene contacto con la mitad del perímetro de las circunferencias de las poleas.

Se sabe que esto es probablemente incorrecto, sin embargo es una buena aproximación que ayudara a acercarse bastante a su valor real, sabiendo que no afectara la pequeña variación, ya que la colocación de los elementos mecánicos (banda y poleas) será ajustable.

Ya descrito esto se procede a hacer un rápido cálculo de sus dimensiones apoyándonos de la siguiente figura 5.19.

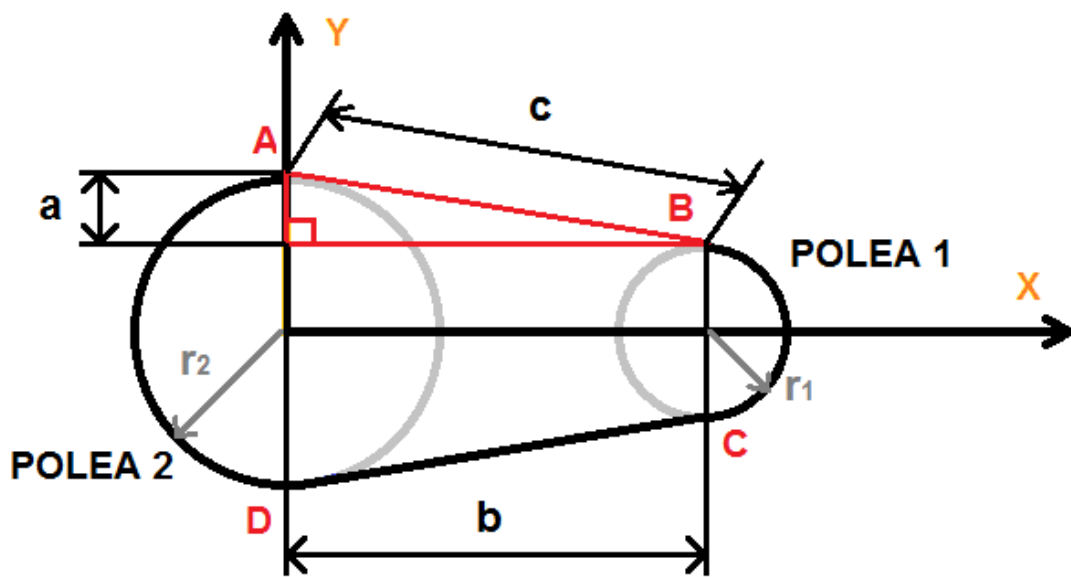


Figura 5.19 Diagrama geométrico de la banda.

Se dividió la longitud de la banda en cuatro secciones, la primera sección es del punto A al punto B, la siguiente del punto B al punto C, así hasta llegar a la sección que va del punto D al punto A, por lo cual la dimensión total  $L_{tot}$  podría describirse de la siguiente forma.

$$L_{tot} = L_{AB} + L_{BC} + L_{CD} + L_{DA} \quad (1)$$

Ya descrita la formula general se procede a desarrollar cada uno de sus términos.

Ya que la banda cubre la mitad de las poleas según las condiciones ideales planteadas anteriormente, se procede a definir inicialmente los perímetros de ambas poleas que se describen según la siguiente formula

$$Pe = D * \pi = 2 (r * \pi) \text{ _____ (2)}$$

Siendo Pe el perímetro, D el diámetro y r el radio de las poleas. Como están en contacto con la mitad de los perímetros tenemos que

$$\frac{Pe}{2} = r * \pi$$

Y es esta fórmula la que describe la longitud de las secciones  $L_{BC}$  y  $L_{DA}$  pero cada una con su respectivo radio de la polea afín.

$$L_{BC} = \frac{Pe_1}{2} = r_1 * \pi \text{ _____ (3)}$$

$$L_{DA} = \frac{Pe_2}{2} = r_2 * \pi \text{ _____ (4)}$$

Posteriormente se realiza el análisis de las partes de la banda que no están en contacto con ninguna de las poleas, que en este caso son dos y describen las longitudes de la sección  $L_{AB}$  y  $L_{CD}$  que en este caso son las mismas en magnitud.

Como se muestra en la figura 5.19. La longitud de la banda que no está en contacto con las poleas se puede analizar con ayuda del principio del triángulo rectángulo de Pitágoras.

$$a^2 + b^2 = c^2$$

Donde el valor de interés es “c” la cual también coincide con la sección  $L_{AD}$  que en magnitud es igual que  $L_{CD}$  por lo cual se despeja obteniendo lo siguiente.

$$L_{AB} = L_{CD} = c = \sqrt{a^2 + b^2} \text{ _____ (5)}$$

Ya definidas las ecuaciones de cada uno de los términos en las ec. 3, 4 y 5, se procede a sustituirlas en la ec. 1

$$L_{TOT} = \sqrt{a^2 + b^2} + r_1 * \pi + \sqrt{a^2 + b^2} + r_2 * \pi$$

Simplificando tenemos

$$L_{TOT} = 2\sqrt{a^2 + b^2} + \pi * (r_1 + r_2) \text{ _____ (6)}$$



Donde  $a = r_2 - r_1$  y  $b$  es propuesta por el diseñador. Por lo cual por ultimo tenemos que:

$$L_{TOT} = 2\sqrt{(r_2 - r_1)^2 + b^2} + \pi * (r_1 + r_2) \quad \text{_____ (7)}$$

Donde sabemos que

$$r_1 = 1.13 \text{ cm}$$

$$r_2 = 2.91 \text{ cm}$$

$$b = 8.52 \text{ cm}$$

Al sustituir datos obtenemos que:

$$L_{TOT} = 2\sqrt{((2.91) - (1.13))^2 + (8.52)^2} + \pi * ((1.13) + (2.91))$$

$$L_{TOT} = 30.1 \text{ cm}$$

### 5.6.6 Cálculo del eje

Para realizar este cálculo se consultó el libro “Diseño de Elementos de Maquinas (DEM)” 2ª ed. del autor Robert L. Mott [véase Ref.4, paginas 289-300] donde se encuentra detalladamente el análisis para ejes de transmisión.

El análisis es el siguiente:

Primero se plantean las condiciones del problema de diseño.

Se desea diseñar un eje que recibe 3.752 HP de potencia en la polea impulsada, el eje gira a una velocidad angular de  $\omega_2 = 2127.2 \text{ rpm}$  . La configuración de la colocación de los elementos mecánicos en el eje se muestra en la siguiente figura.

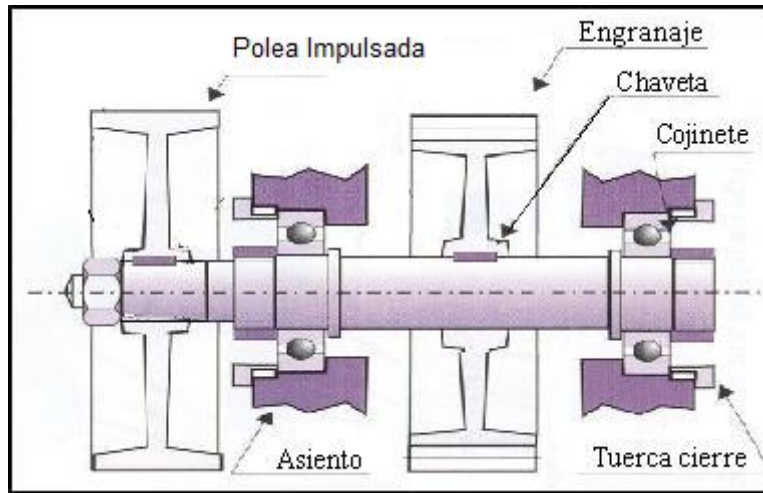


Figura 5.20 Ubicación de los elementos mecánicos en el eje. Imagen modificada [Ref.4].

Para realizar el diseño primero se determinarían las propiedades del material a utilizar, que en este caso se pensó en un acero AISI 1144OQT 1000, maquinado o estirado en frío, ya que es un acero muy común para esta aplicación. De la figura A4-2 del libro DEM, se observa el punto de fluencia  $s_y = 83\ 000\ psi$ , la resistencia a la tensión  $s_u = 118\ 000\ psi$ , y el porcentaje de elongación de 19%. Este último hace ver que el material tiene una buena ductilidad lo cual es muy importante en el diseño de este elemento. Usando la figura 5-8 del libro DEM la cual se muestra en la figura 5.21 [Ref.4 página 145], en donde se encuentra que  $s_n = 42\ 000\ psi$ .

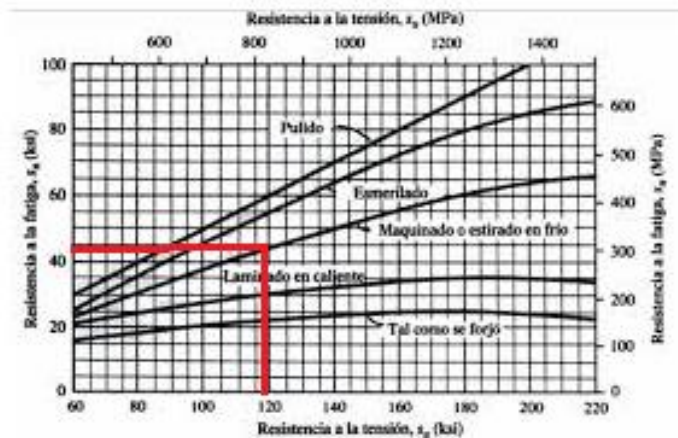


Figura 5.21 Grafica Resistencia a la tensión VS Resistencia a la fatiga del libro DEM. [Ref.4]

Se debe de aplicar un factor por tamaño a la resistencia de fatiga, aunque el eje no será muy grande para transmitir los 3.752 HP, aun así se considera este factor. Aunque no se conoce el tamaño real en este momento, se podría seleccionar  $C_s = 0.90$  de la figura 5.22 [Ref.4 página 297].

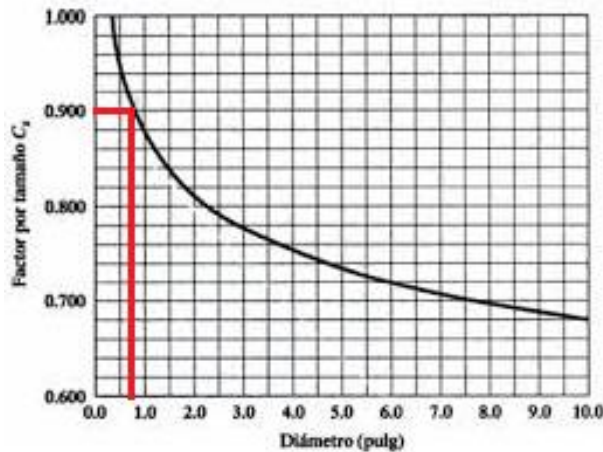


Figura 5.22. Grafica factor por tamaño  $C_s$  VS Diámetro del libro DEM [Ref.4]

También se debe especificar el factor de confiabilidad la cual es una decisión de diseño. Para este problema se considerara un factor de confiabilidad de 0.99 y se manejará  $C_R = 0.81$ . Ahora se puede calcular la resistencia a la fatiga modificada:

$$s'_n = s_n * C_s * C_R$$

$$s'_n = (42000)(0.90)(0.81)$$

$$s'_n = 30618 \text{ psi}$$

El factor de seguridad normalmente considerado para ejes es de  $N = 2$

Ya obtenidos estos datos se calculará el Par en el eje, con la siguiente formula.

$$T = 63000 * \frac{P}{n} = 63000 * \frac{(3.7519)}{(2127.2)} = 110.21 \text{ lb} * \text{pulg}$$

La parte que está sometida a este par torsional es la sección del eje que va de A a C, a la derecha del engrane C hasta el rodamiento D, existe un par torsional igual a cero.

Fuerzas: Se calcularán por separado las fuerzas en cada elemento, y se indicaran los componentes de las fuerzas que actúan en los planos vertical y horizontal.

*Fuerzas sobre la polea:* La figura 5.23 muestra las fuerzas que actúan sobre la polea A. Los valores de ellas se calculan con las siguientes ecuaciones.

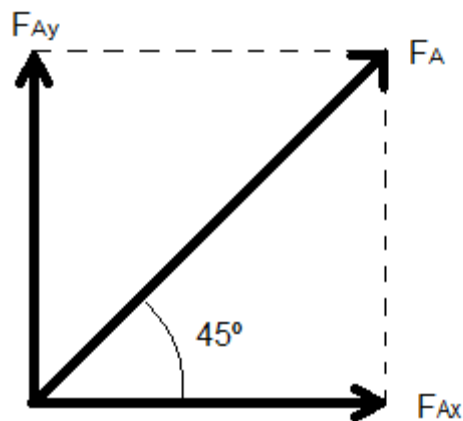
$$F_N = F_1 - F_2 = \frac{T}{\left(\frac{D_A}{2}\right)} = \frac{111.12}{\left(\frac{2.29}{2}\right)} = 96.96 \text{ (Fuerza neta de impulsión)}$$

$$F_A = 1.5F_N = 1.5(96.96) = 145.45 \text{ lb (Fuerza flexionante)}$$

La fuerza de flexión actúa hacia arriba y a la derecha, formando un ángulo de 45 con la horizontal. Como se ve en la figura 5.23, los componentes de la fuerza flexionante son

$$F_{Ax} = F_A \cos(45) = (145.45) \cos(45) = 102.85 \text{ lb} \rightarrow \text{(Hacia la derecha)}$$

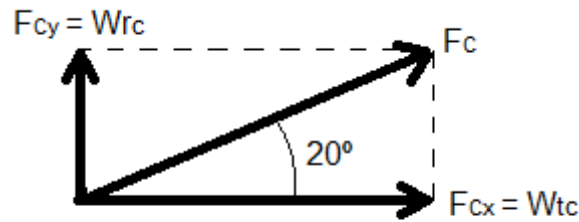
$$F_{Ay} = F_A \sin(45) = (145.45) \sin(45) = 102.85 \text{ lb} \uparrow \text{(Hacia arriba)}$$



Fuerza sobre el eje en la polea A

Figura 5.23. Descomposición de fuerzas generadas por la polea A

*Fuerzas sobre el engrane:* la fuerza transmitida al eje por el engrane C se obtiene de la suma vectorial de la carga tangencial y la carga radial como se muestra en la figura 5.24.



Fuerza sobre el eje en el engrane C

Figura 5.24. Descomposición de fuerzas generadas por el engrane C

La carga transmitida se calcula con la siguiente ecuación

$$F_{C_x} = W_{t_c} = \frac{T}{\left(\frac{D_c}{2}\right)} = \frac{111.12}{\left(\frac{1.5}{2}\right)} = 148.16 \text{ lb} \rightarrow \text{(Hacia la derecha)}$$

Y la carga radial con la siguiente ecuación

$$F_{C_y} = W_{r_c} = W_{t_c} \tan(\phi) = (148.16) \tan(20^\circ) = 53.92 \text{ lb} \uparrow \text{(Hacia arriba)}$$

Se continúa con el diseño mediante el cálculo del diámetro mínimo aceptable del eje, en varios puntos del mismo. En cada punto se observa la magnitud del par torsional y el momento flexionante que allí existe, mostrado en la figura 5.25, y se estimará el valor de los factores de concentración de esfuerzos según sea el caso.

## Diagrama de Par Torcional y Momentos Flexionantes

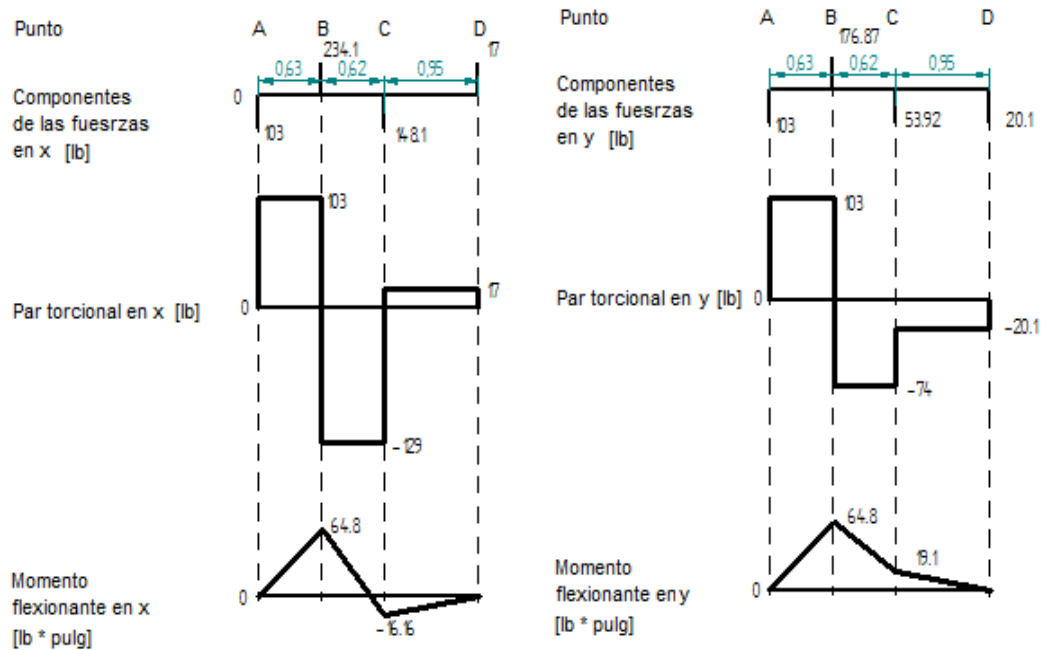


Figura 5.25. Diagrama de Fuerzas, Par Torsional y Momento Flexionante en los puntos de interés.

Y basándose en el libro DEM [Ref.4 pagina 307] si en la cercanía del punto de interés existe más de una concentración de esfuerzos, para el diseño se empleara el valor mayor. Con esto se supone que las discontinuidades geométricas mismas no interactúan, lo cual es una buena práctica.

1. Punto A: La polea A produce torsión en el eje, desde A hacia la derecha. A la izquierda de A no hay fuerzas, ni flexión ni torsión.

El momento flexionante en A es cero, porque es un extremo libre del eje. Ahora se podrá emplear la siguiente ecuación para calcular el diámetro requerido del eje en A, mediante solo el término de la torsión.

$$D_1 = \left( \frac{32N}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} * \left( \frac{T}{S_y} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Sustituyendo datos se tiene:

$$D_1 = \left( \frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\frac{3}{4} * \left( \frac{(111.12)^2}{83000} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.286 \text{ pulg} = 0.73 \text{ cm}$$

2. Punto B: El punto B es el lugar de un rodamiento, y tiene un chaflán agudo a la derecha de B. Es preferible hacer que  $D_2$  sea cuando menos un poco menor que  $D_3$  en el asiento del rodamiento, para permitir que el rodamiento se deslice sobre el eje y llegue al lugar donde entre con prensa a su posición final. En general, entre el barreno del rodamiento y el asiento del eje se deje un ajuste a presión ligera.

A la izquierda de B (Diámetro 2),

$$T = 111.12 \text{ lb} * \text{pulg}$$

El momento flexionante en B es la resultante del momento en los planos  $x$  y  $y$ , de acuerdo con la figura (hh):

$$M_B = \sqrt{M_{Bx}^2 + M_{By}^2} = \sqrt{64.8^2 + 64.8^2} = 91.64 \text{ lb} * \text{pulg}$$

$$k_t = 1.5 \text{ (chaflan bien redondeado)}$$

Se emplea la siguiente ecuación a causa de la condición de esfuerzo combinado,

$$D_2 = \left( \frac{32N}{\pi} \sqrt{\left( \frac{k_t M}{S'_n} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left( \frac{T}{S_y} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$D_2 = \left( \frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left( \frac{(1.5)(91.64)}{(30618)} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left( \frac{111.12}{83000} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.455 \text{ pulg} = 1.15 \text{ cm}$$

En B, y a la derecha de B (diámetro  $D_3$ ) todo es igual, excepto el valor de  $k_t = 2$ , debido al chaflán agudo. Entonces

$$D_3 = \left( \frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left( \frac{(2)(91.64)}{(30618)} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left( \frac{111.12}{83000} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.499 \text{ pulg} = 1.26 \text{ cm}$$

Debido a las condiciones de nuestro diseño en el punto C, el escalón del lado izquierdo del rodamiento no es necesario por el tipo de sujeción que se escogió, descrita más adelante, por lo cual solo se considera el diámetro mayor que es " $D_3$ " que se encuentra a la derecha del rodamiento B.

Como es esperado,  $D_4$  será mayor que  $D_3$ , para poder tener un escalón para el rodamiento. Por consiguiente será seguro. Su diámetro real se especifica después de haber terminado el análisis de esfuerzos, y seleccionado el rodamiento en B. El catalogo del fabricante de rodamientos normalmente especifica el diámetro mínimo aceptable al costado del rodamiento, para tener un escalón adecuado para su correcta colocación.

3. Punto C: el punto C es el lugar del engrane C, con un chaflán bien redondeado a la izquierda, un tornillo prisionero en el mamelón del engrane. El momento de flexión en C es

$$M_B = \sqrt{M_{Bx}^2 + M_{By}^2} = \sqrt{16.16^2 + 19.13^2} = 25.04 \text{ lb} * \text{pulg}$$

A la izquierda de C existe el par torsional de  $111.12 \text{ lb} * \text{pulg}$ . Y con el tornillo prisionero  $k_t = 1.5$ .Entonces

$$D_5 = \left( \frac{32(2)}{\pi} \sqrt{\left( \frac{(1.5)(25.04)}{(30618)} \right)^2 + \frac{3}{4} * \left( \frac{111.12}{83000} \right)^2} \right)^{\frac{1}{3}} = 0.325 \text{ pulg} = 0.83 \text{ cm}$$

4. Punto D: El punto D es el asiento del rodamiento D, y allí no hay momentos torsionales ni flexionantes. Pero sí hay una fuerza cortante vertical, igual a la reacción en el rodamiento. Se empleara la resultante de las reacciones en los planos  $x$  y  $y$  para calcular la fuerza cortante:



$$V_D = \sqrt{V_{Dx}^2 + V_{Dy}^2} = \sqrt{17^2 + 20.1^2} = 26.32 \text{ lb}$$

Se aplica la siguiente ecuación para calcular el diámetro que requiere el eje en este punto:

$$D = \sqrt{(2.94k_t(V_D)N/s'_n)}$$

Para la correcta colocación del rodamiento en este punto del eje existe un chaflán agudo. Por consiguiente, se debe usar un factor de concentración de esfuerzos igual a 2.5:

$$D_6 = \sqrt{\frac{2.94(2.5)(26.32)(2)}{30618}} = 0.112 \text{ pulg} = 0.29 \text{ cm}$$

Este diámetro es pequeño en comparación con los demás diámetros, esto se esperaba por su colocación y funcionamiento. Es común que sea mucho mayor el diámetro utilizado que el calculado por el tamaño de un rodamiento razonable que soporte la carga radial de 26.32 lb.

Los diámetros mínimos calculados son los siguientes:

$$D_1 = 0.286 \text{ in} = 0.73 \text{ cm}$$

$$D_2 = 0.455 \text{ pulg} = 1.15 \text{ cm}$$

$$D_3 = 0.499 \text{ pulg} = 1.26 \text{ cm}$$

$$D_5 = 0.325 \text{ pulg} = 0.83 \text{ cm}$$

$$D_6 = 0.112 \text{ pulg} = 0.29 \text{ cm}$$

Además  $D_4$  debe ser un poco mayor que  $D_3$ , para poder tener escalones adecuados en engrane C y el rodamiento B.

Los diámetros reales del diseño se asignan según los valores de los diámetros mínimos obtenidos en el cálculo y los diámetros internos más cercanos mayores a los valores calculados, de los elementos mecánicos a montar.

### 5.6.8 Selección de rodamientos

Una vez que los diferentes diámetros del eje han sido correctamente definidos, se puede pasar a la selección de los rodamientos, se eligieron rodamientos y no cojinetes por las diferentes ventajas que tienen, como el hecho de que el coeficiente de rozamiento varía poco con la carga y la velocidad, además de que requieren poco lubricante, exigen poco mantenimiento y ocupan poco espacio axial [Ref.5], lo que los hace ser los más indicados para maquinas que arrancan y paran con frecuencia, siendo la opción más viable para su aplicación en este proyecto, sin mencionar que la instalación de cojinetes se complica en este diseño.

Ya que en esta aplicación solo se requiere soporte de carga radial y prácticamente despreciable carga axial, además, el espacio de montaje es adecuado, por lo que se optó por seleccionar rodamientos de una sola hilera de bolas.



*Figura 5.26 Ejemplo de rodamiento de bolas de una hilera. [Ref.3]*

El siguiente paso para la selección de rodamientos, después de haber definido el tipo, es determinar el tamaño de rodamiento adecuado, y es aquí donde se toma como base el diámetro del eje donde serán montados dichos rodamientos para compararlos con el diámetro del anillo interior en los catálogos. Como ya se determinó anteriormente, los diámetros del eje que corresponden al espacio de montura de los rodamientos son de:

$$D_B=0.46'' \quad D_D=0.11''$$

Refiriéndose en el catálogo de rodamientos rígidos de bolas de una sola hilera de SKF [Ref.6] se encuentran con los valores más próximos a dichos diámetros los siguientes números de parte:

Tabla 5.7 Lista de rodamientos.

		Rodamientos		SKF	Explorer	
Disposición	Di [in]	De [in]	B [in]	Carga [lbf]	Rev [rpm]	No. de Parte
RB	0.4724	0.8268	0.1969	321	70000	61801
RD	0.25	0.75	0.2188	632	70000	EE2TN9

Es necesario verificar que la carga radial dinámica de cada rodamiento sea mayor a la carga de diseño calculada de tal forma que los rodamientos elegidos puedan funcionar de forma confiable.

Para comparar se tiene que calcular la carga radial dinámica resultante de cada sección del eje donde irán montados los rodamientos;

Para la sección B, se tiene que  $RB_x=234$  [lbf] y  $RB_y=176$  [lbf] por lo tanto la resultante es:

$$RB = \sqrt{234^2 + 176^2} = 292.8 \text{ [lbf]}$$

Comparando con la carga radial dinámica del rodamiento,  $292.8 \text{ lbf} < 321 \text{ lbf}$  por lo que el rodamiento seleccionado es el adecuado.

Para la sección D se tiene que  $RD_x=17$  [lbf] y  $RD_y=20.1$  [lbf] por lo tanto la resultante es:

$$RB = \sqrt{17^2 + 20^2} = 26.248 \text{ [lbf]}$$

Se compara nuevamente la carga radial de la sección D del eje con la carga radial soportada por el rodamiento,  $26.248 \text{ lbf} < 632 \text{ lbf}$ . Se puede observar que el rodamiento soporta mucha más carga que la solicitada en el diseño, sin embargo, elegir otro rodamiento no sería conveniente ya que se eleva mucho el diámetro del anillo interior y se tendría que aumentar el diámetro a dicha sección del eje, resultando en un mayor peso, lo cual es indeseable.

Ya que los rodamientos están correctamente seleccionados, se tienen que ajustar los diámetros del eje correspondientes a las secciones B y D que es donde irán montados los rodamientos, resultando:

Tabla 5.8 Diámetros finales del eje.

D1 [in]	D2 [in]	D3 [in]	D4 [in]	D5 [in]
0.1562	0.2362	0.2952	0.1562	0.125

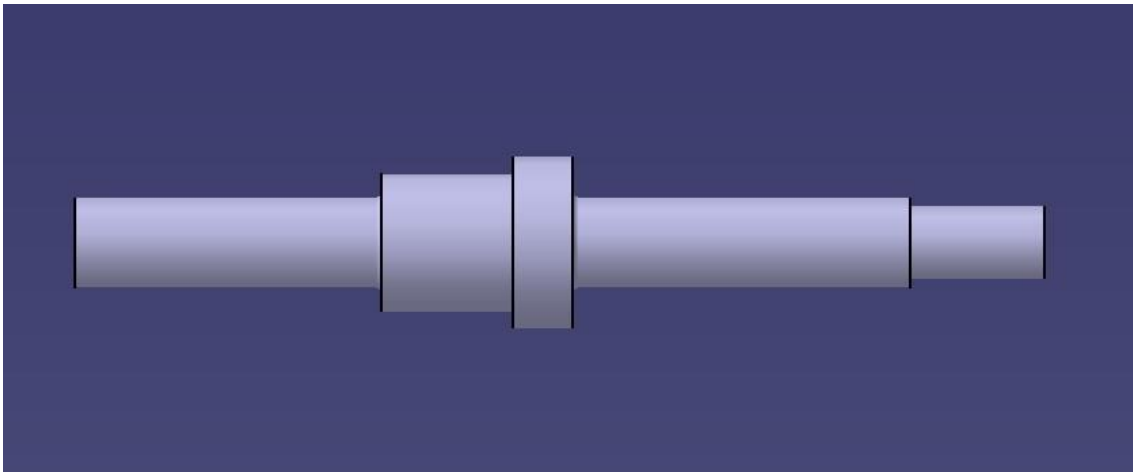


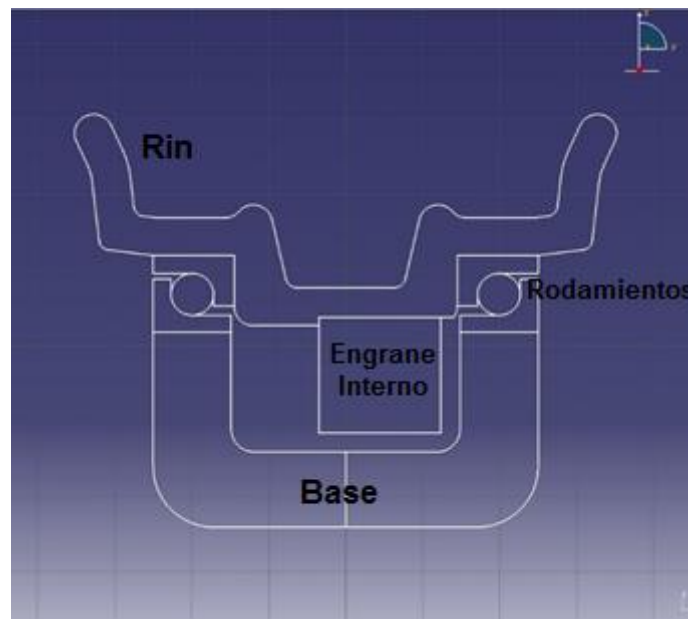
Figura 5.27 Diferentes secciones del eje.

### 5.6.9 Diseño de soportes y cuerpo del monociclo

Para poder montar todos los elementos mecánicos necesarios para hacer funcionar el monociclo, se tuvieron que diseñar diferentes bases y soportes en los cuales se puedan ensamblar con seguridad dichas partes.

Para empezar, se debe tener una base o cuerpo del monociclo, el cual no va a tener movimiento angular, este va a servir para montar los soportes del motor y el eje secundario los cuales le darán movimiento al rin a través del engrane interno, el cual está fijado al rin. Para lograr que esta base no gire junto con el rin y la llanta pero este soportado por los mismos, se utilizaran balines de acero grado 500 cuyo diámetro será de 7/32" y se diseñan sus respectivos conos. Ya que se está construyendo un prototipo de pruebas, la base debe tener espacio suficiente para poder hacer barrenos para montar lo que sea necesario en un futuro, como por ejemplo, bases para los componentes eléctricos, soportes para los mecanismos de asiento y manubrio,

pedales, etc. En la siguiente figura se muestra un croquis de lo que sería un corte transversal de la base montada con los balines sobre el rin.



*Figura 5.28 Corte transversal que muestra bases, rodamientos, engrane interno y rin.*

Como se aprecia en la figura 5.28, hay suficiente espacio para poder barrenar y montar lo que sea.

Esta base se diseñó de forma simétrica, de tal forma que las dos llevaran el mismo procedimiento de manufactura, sin embargo hay pequeñas diferencias entre ellas para el correcto ensamble de las partes mecánicas, como por ejemplo, una base debe llevar cuerda y la otra no para poder ser ensambladas con tornillos.

A esta base se le hicieron diferentes cortes para poder acoplar bien las demás partes, se hizo un corte para poder tener acceso al engrane interior, de tal forma que el piñón pueda tener contacto y así transmitir la rotación, otro corte fue para que el eje secundario no rozara con la base y para montar el soporte del motor y los soportes de los rodamientos que darán soporte a su vez al eje. Estos cortes se muestran en las siguientes imágenes.

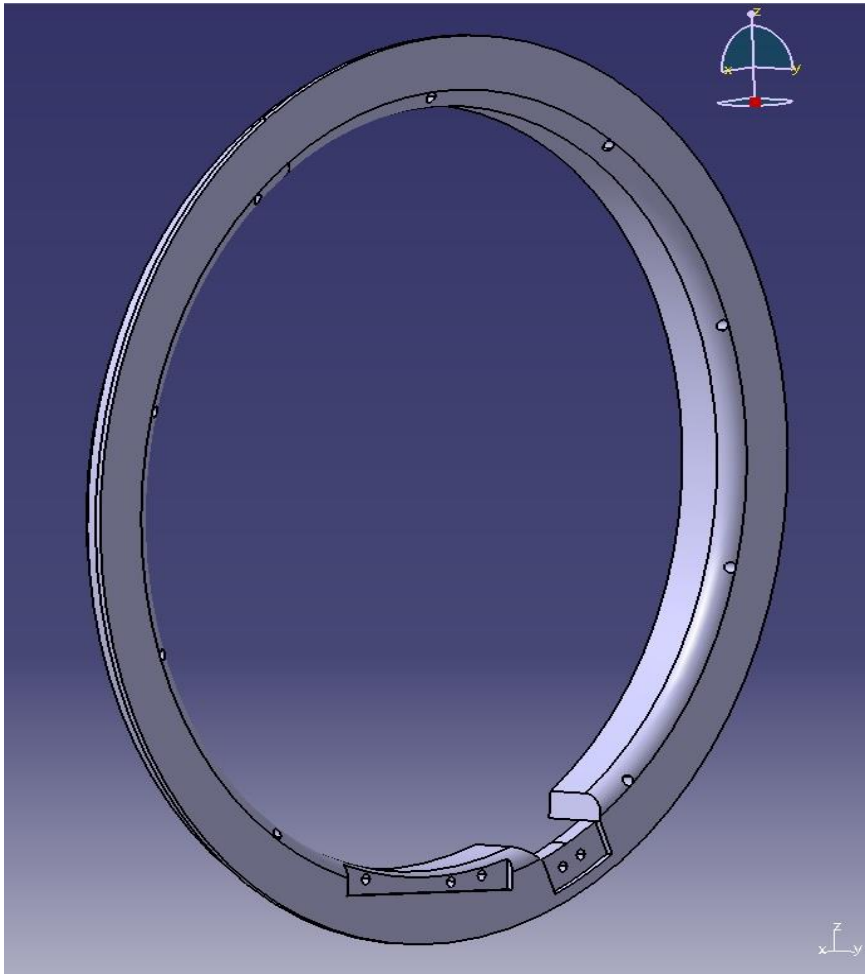
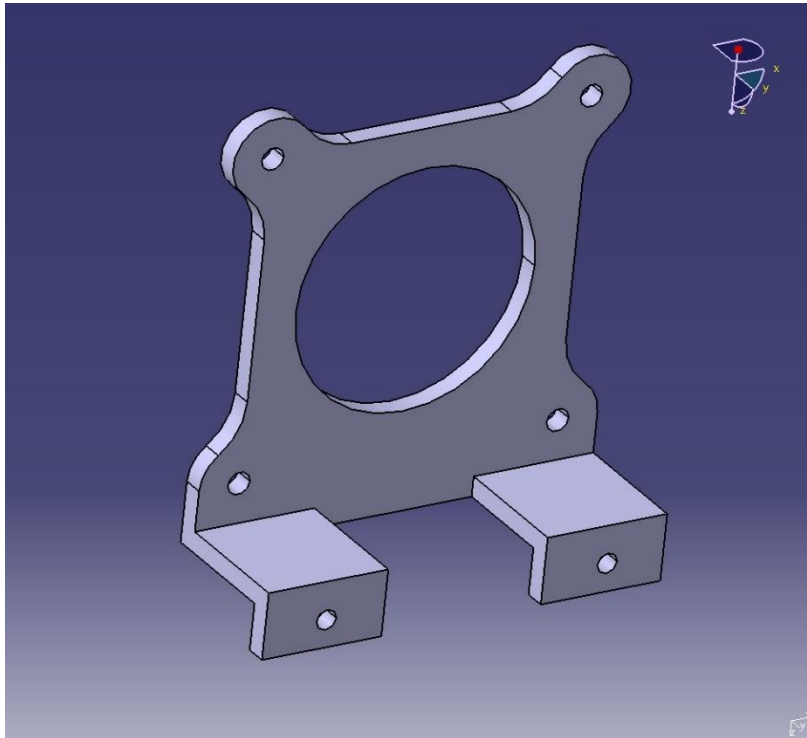


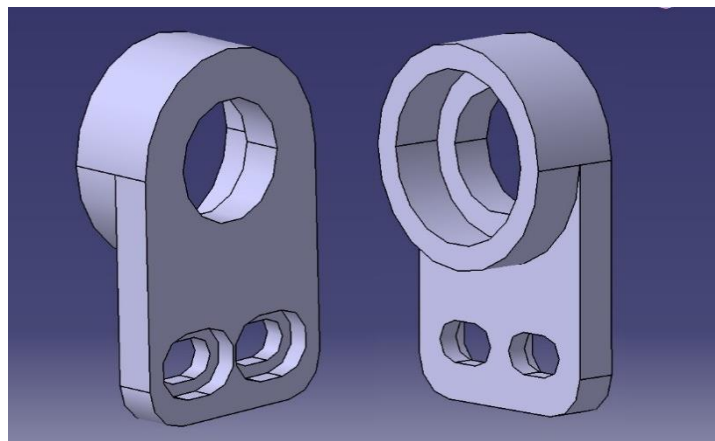
Figura 5.29 CAD de la base del monociclo.

La base del motor tiene que ser especial ya que el motor elegido es del tipo *outrunner*, es decir que el eje se mueve junto con todo el cuerpo externo del motor, mientras que la base permanece fija junto con las bobinas de la parte interior del motor, de tal forma que su montura es un poco complicada. Como se muestra en la figura 5.30, este soporte se hizo en una especie de “Z” aunque fue necesario un buen análisis por elementos finitos de esta pieza pues la potencia del motor es grande y esta se podría doblar.



*Figura 5.30 Soporte del motor en CAD.*

Finalmente, los soportes de los rodamientos para el eje secundario, que podrían también ser llamadas “chumaceras” tuvieron que ser diseñadas con correderas ya que de alguna forma se le tiene que dar tensión a la banda, por lo que se les hicieron dos barrenos “alargados” para poder montar a la base del monociclo y a la vez poder tensar la banda, Cabe decir que las dos chumaceras son diferentes una de la otra ya que para empezar, los tamaños de los rodamientos varían y, además, no queda mucho espacio entre uno de las chumaceras y la polea por lo que se tuvieron que hundir los tornillos para que no rozaran con la polea.



*Figura 5.31 Soportes de los rodamientos en CAD.*

## 5.7 Análisis por elementos finitos

Para saber si los soportes que se diseñaron en la sección anterior son confiables y se pueden fabricar con la seguridad de que resistirán las solicitudes que se presentaran en ellos una vez estén trabajando, es de gran importancia hacer un análisis por elementos finitos el cual va a arrojar los campos de esfuerzos que se presentaran en las diferentes partes a analizar, los cuales se tienen que comparar con los valores de esfuerzo máximo que puede resistir el material con el que serán construidas dichas piezas, de tal forma que si el valor de esfuerzo máximo que da el análisis es menor que aquel que resiste el material, entonces se puede asegurar que la pieza no fallará en condiciones de uso normal. Para esto se utilizó el software Catia V5 ya que es con el que se ha estado trabajando para generar diseños y prototipos importantes para el proyecto. Ya que esta paquetería tiene cargado el análisis por elementos finitos del tipo estático, es este el que se aplicara en las piezas que más cargas tendrán del monociclo, como el eje, el rin, la base del monociclo y el soporte del motor cuyo comportamiento se puede representar idealmente como estático y se puede analizar así, ya que las demás piezas como los engranes y poleas, el fabricante da diferentes datos sobre el funcionamiento y valores máximos de cargas que pueden resistir, por lo que al elegirlos el equipo se aseguró de que estuvieran dentro de los valores necesarios para funcionar en este vehículo, es por eso que no es necesario analizar todas las piezas.

Los materiales a utilizar en las piezas son tres, siendo acero al carbono AISI 1144 para el eje y Aluminio 6061 T6 en el caso de la base del monociclo, el soporte del motor y en el caso del rin se le asignó como material aluminio, aunque se tendrían que hacer ensayos para definir bien de que aleación de aluminio se compone. Las propiedades de los materiales usados se enlistan a continuación [Ref.7]:



Tabla 5.9 Propiedades de los materiales usados en el análisis de elementos finitos.

AISI 1144				
Módulo de Young [N/m <sup>2</sup> ]	Coef. de Poisson	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Expansión Térmica [1/K]	Límite Elástico [N/m <sup>2</sup> ]
2x10 <sup>11</sup>	0.29	7870	1.17x10 <sup>-5</sup>	5x10 <sup>8</sup>

Al 6061 T6				
Módulo de Young [N/m <sup>2</sup> ]	Coef. de Poisson	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Expansión Térmica [1/K]	Límite Elástico [N/m <sup>2</sup> ]
6.89x10 <sup>10</sup>	0.33	2700	2.36x10 <sup>-5</sup>	2.76x10 <sup>8</sup>

Aluminio				
Módulo de Young [N/m <sup>2</sup> ]	Coef. de Poisson	Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Expansión Térmica [1/K]	Límite Elástico [N/m <sup>2</sup> ]
7x10 <sup>10</sup>	0.346	2710	2.36x10 <sup>-5</sup>	9.5x10 <sup>7</sup>

Para poder asegurar que el análisis es confiable, es necesario tener en cuenta que no se hicieron ensayos de tracción/compresión a los materiales propuestos, únicamente se tomaron los datos basándose en la literatura y tablas de materiales [Ref. 7] por lo que los valores reales de las propiedades de los materiales pueden diferir, el monociclo se usará en la calle por lo que está expuesto a leves y medianos impactos, además de considerar que los análisis por elementos finitos siempre tienen un considerable porcentaje de error, lo que nos lleva a tomar en cuenta un factor de seguridad que nos dé un margen de confianza al momento de analizar los resultados, este coeficiente se seleccionó tomando en cuenta que la información obtenida del material no es totalmente confiable; por otra parte se espera que nuestros elementos sean ligeros y que funcionen adecuadamente bajo condiciones normales de carga y de impacto. Por lo tanto el coeficiente de seguridad se estableció como:

$$C_s = \frac{\sigma_s}{\sigma_{Max\ Diseño}} = 2$$

Por tanto el esfuerzo máximo permisible será  $\sigma_{Max\ Diseño} \leq \frac{\sigma_s}{2}$ .

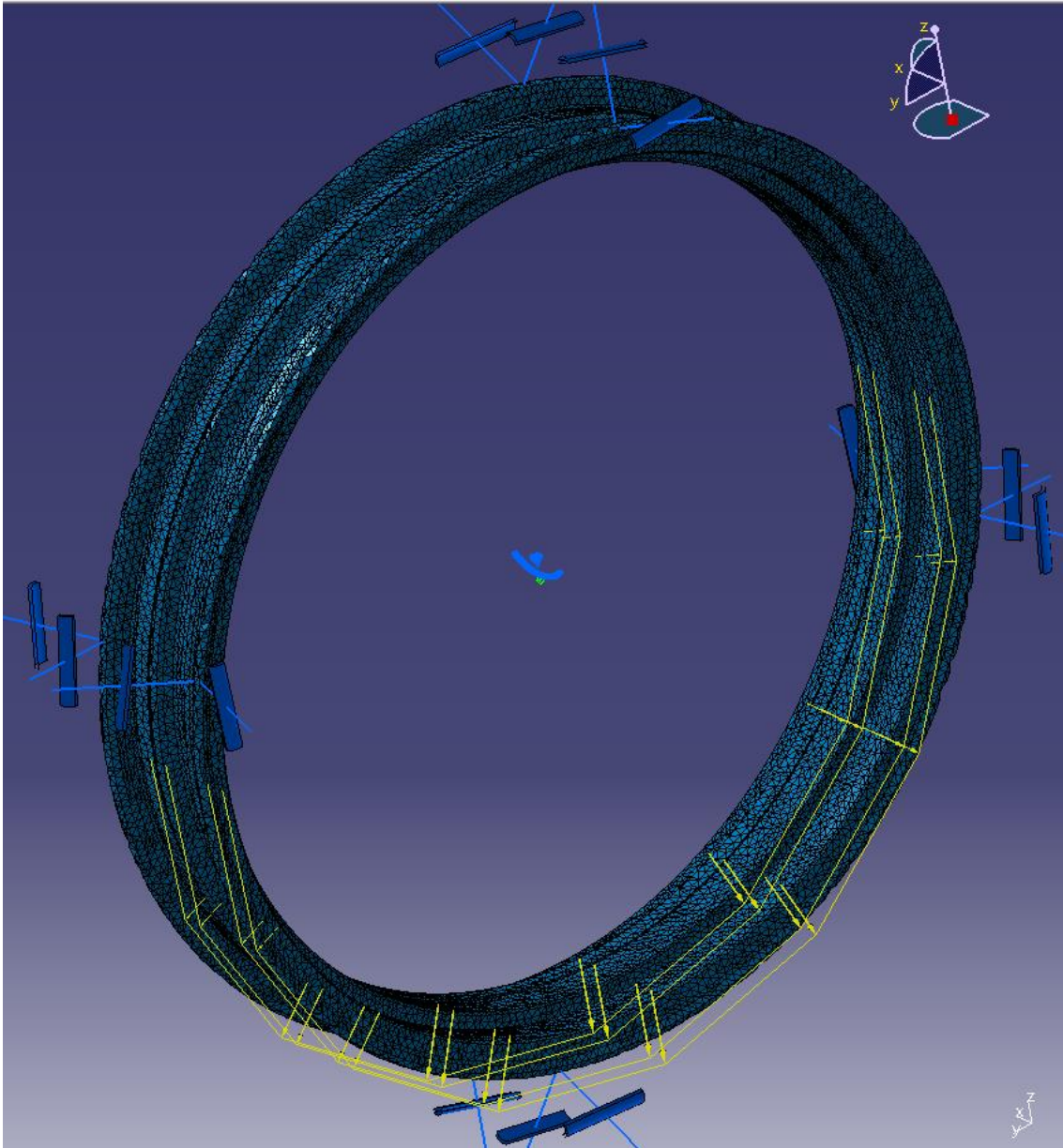
Este factor de seguridad da un margen de confiabilidad al comparar y analizar los resultados obtenidos del FEM y ayudará a definir si el elemento resistirá las solicitaciones.

### **5.7.1 Análisis del rin**

El rin es una de las piezas cuyo análisis es de gran importancia ya que, en su inicio fue un rin de motocicleta, calculado para ser utilizado como tal, sin embargo, para que funcionara para el proyecto del monociclo se le tuvo que quitar la masa interna y los rayos que dan soporte al rin, quedando solo la periferia del mismo, por lo tanto el elemento perderá rigidez, sin embargo, se espera recuperarla al ser apoyado en la base a través de los balines, de igual forma el rin adquirirá rigidez al sujetarse directamente con el engrane interno. Sin embargo es importante hacer un análisis por elementos finitos de esta pieza para asegurarse de que no fallará o tendrá problemas en su funcionamiento.

Lo primero es definir las cargas y las restricciones, por lo que se le da una carga de rodamientos en el lugar donde irían las tazas para los balines, ésta da una carga distribuida en una dirección definida, en este caso hacia abajo, simulando una fuerza creada por rodamientos, se le dio el valor de 1177.2 N ya que sería la fuerza realizada por una masa de aproximadamente 120 Kg, que es la masa al considerar al usuario y los elementos mecánicos que van montados en la base del monociclo.

Como restricción se le dio unos *sliders* o juntas, los cuales restringen movimiento en dos direcciones y permiten la rotación sobre un eje. Esta restricción se colocó la cara donde va montada la llanta.



*Figura 5.32 Rin mallado con cargas y restricciones.*

Como se dijo anteriormente, se le aplicó como material el aluminio que esta sugerido en el programa de análisis. En la Figura 5.32 se muestra el elemento ya mallado y con las cargas y restricciones representadas en color amarillo y azul respectivamente.

Una vez teniendo las cargas, restricciones, material y mallado correcto, se corre la simulación, la cual tardó poco menos de un segundo. En la Figura 5.33 se observa el rin con los colores característicos que muestran la distribución de esfuerzo sobre el mismo, en este caso muestra los valores nodales del esfuerzo de Von Mises.

## Resultados del Análisis del Rin

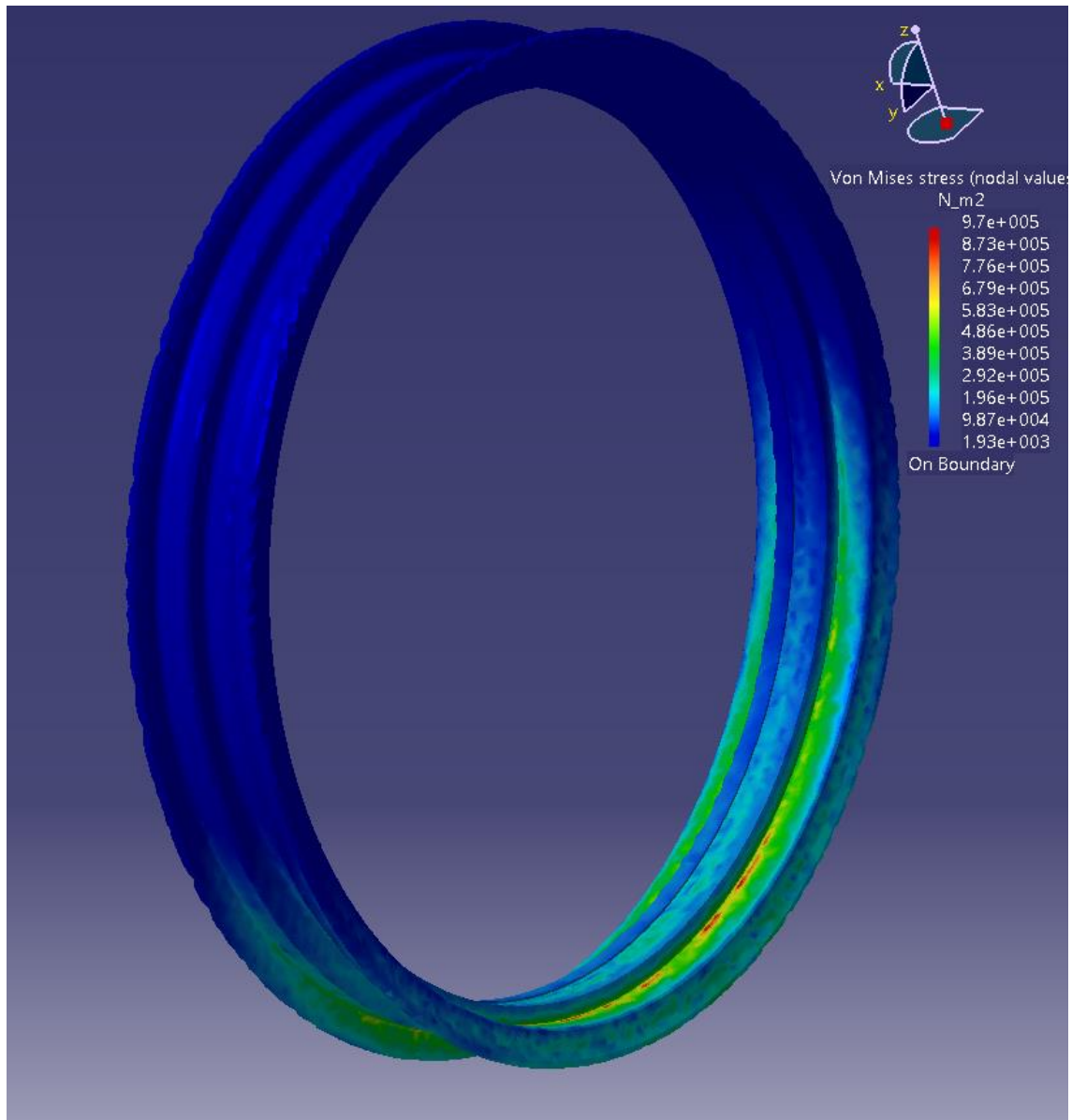


Figura 5.33 Resultado del análisis por elementos finitos del rin.

Como se observa en la imagen, los esfuerzos están distribuidos en la parte inferior del rin, pero hay que asegurar que la pieza puede resistir con el coeficiente de seguridad, el cual se calcula:  $\sigma_{Max\ Diseño} = \frac{9.5 \times 10^7}{2} = 475 \times 10^5 [Pa]$  mientras que el valor del esfuerzo máximo que arrojó el análisis es de  $\sigma_{Max} = 9.7 \times 10^5 [Pa]$  entonces, al ser mayor el valor de esfuerzo máximo de diseño que el obtenido en el análisis se puede asegurar que la pieza fácilmente soportara las cargas solicitadas, además se verifica al observar los desplazamientos que en este caso se encuentra un valor máximo de

0.043mm, el cual es relativamente bajo, por lo que no se encuentra problema alguno, además que se espera que estos valores disminuyan ensamblar todo el monociclo pues la base y el engrane interno le darán mayor rigidez al rin como se describió anteriormente.

### **5.7.2 Análisis de la base**

La base del monociclo es la segunda pieza a analizar, ya que como se dijo en la sección anterior, es una de las partes que le darán rigidez al rin sin masa y es en donde principalmente recaerá el peso del usuario, por lo que se consideró hacerla de un material resistente, pero ligero, es por eso que se eligió el aluminio 6061 T6 el cual es tan ligero como el aluminio pero gracias a los elementos aleados y los tratamientos térmicos a los que es sometido mejora remarcablemente su resistencia, siendo el material adecuado para esta aplicación.

Se le asignó la carga en 4 barrenos que es en donde se piensa montar la tapa y el asiento cuyo valor fue de 981 N distribuida entre los 4 barrenos la cual representaría únicamente el peso del usuario, como un máximo de 100 Kg y como restricción se le puso un *slider* o junta en la superficie donde rodarán los baleros y se fijó la superficie que queda en contacto con el otro lado de la base, la cual es prácticamente la misma geometría. En la figura 5.34 se muestra el elemento ya mallado y sus respectivas cargas y restricciones:

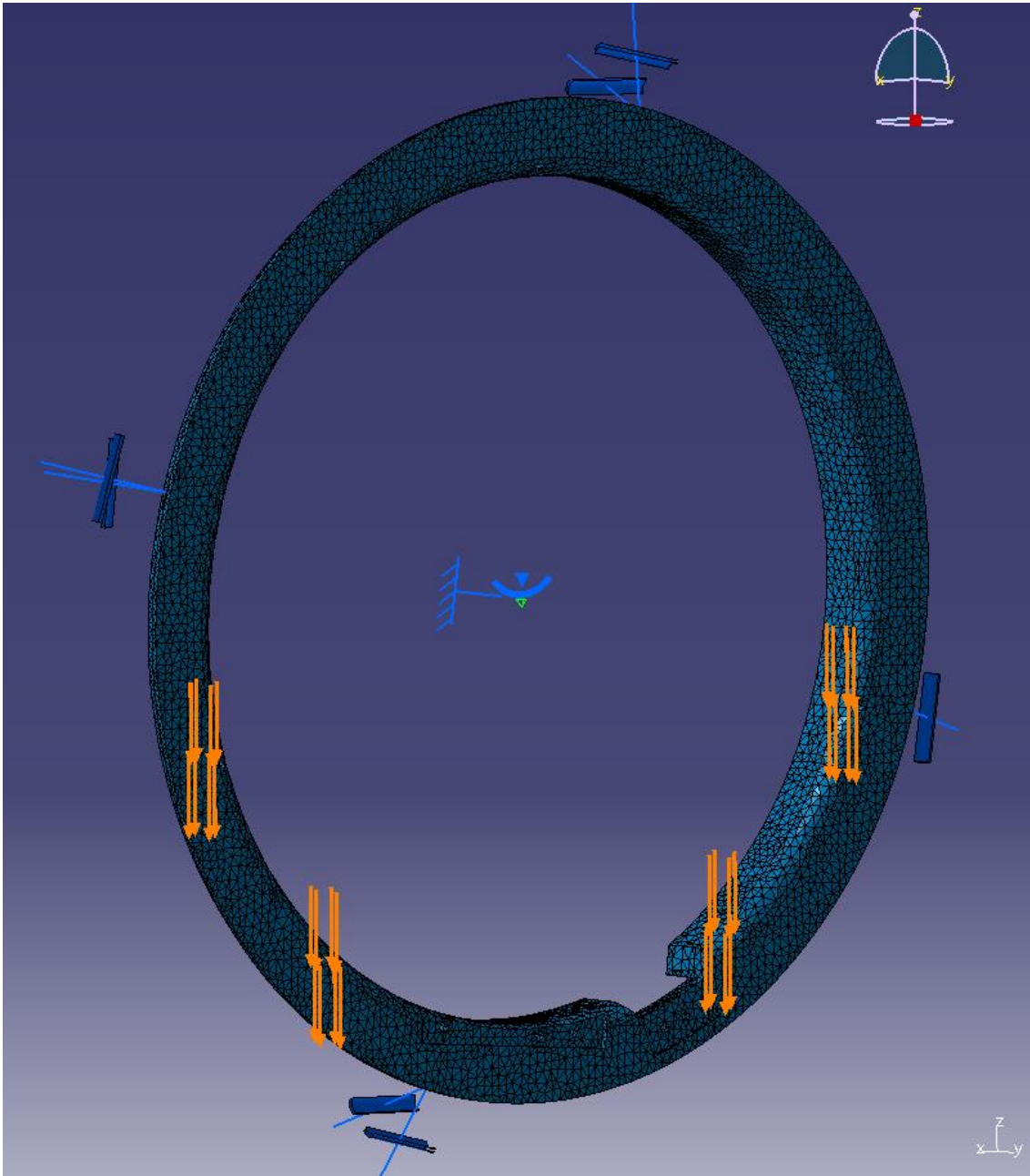


Figura 5.34 Base del monociclo mallado, con cargas y restricciones.

Las flechas naranjas representan las cargas mientras que los elementos azules representan las restricciones. Ya teniendo todo definido, se corre el análisis por elementos finitos y el programa entrega los siguientes resultados mostrados en la imagen a continuación (Figura 5.35), en la que se muestra los valores máximos de la tensión de Von Mises la cual se usa como indicador de un buen diseño para materiales dúctiles.

## Resultados del Análisis de la Base

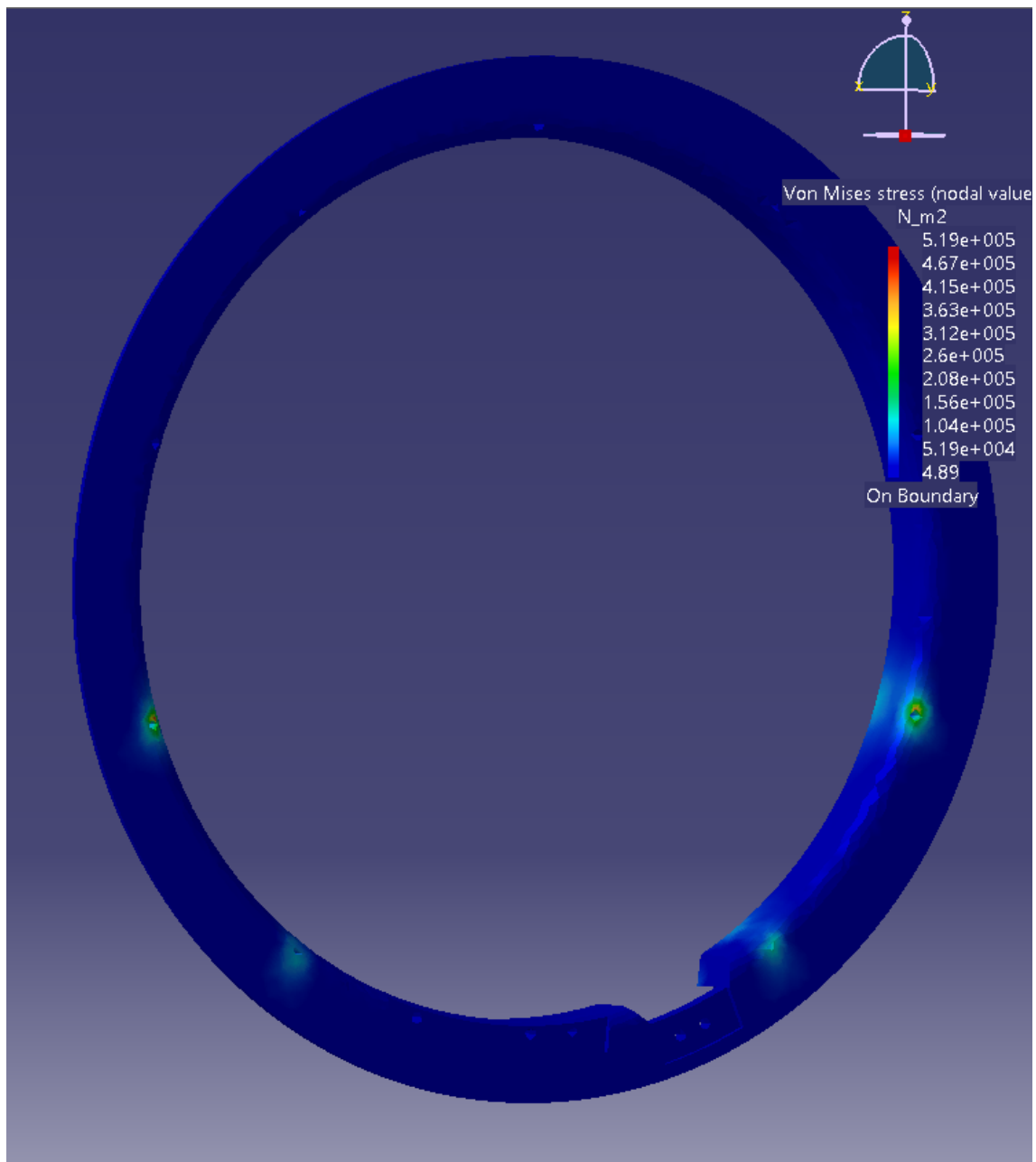


Figura 5.35 Resultados del análisis por elementos finitos de la base.

Observando la imagen, se puede ver que las zonas críticas en donde se concentran principalmente los esfuerzos es en los barrenos donde se aplicaron las cargas, sin embargo no es algo preocupante ya que las únicas zonas que muestran color rojo son muy pequeñas y se encuentran en la periferia de los dos barrenos más altos como se ve en la Figura 5.35. Haciendo la comparación, se calcula el esfuerzo máximo de diseño

$\sigma_{Max\ Diseño} = \frac{2.76 \times 10^8}{2} = 1380 \times 10^5 [Pa]$ , mientras que el máximo valor de esfuerzo en

el análisis es de  $\sigma_{Max} = 5.19 \times 10^5 [Pa]$ , por lo tanto se puede asumir que la pieza se va a comportar bien una vez en funcionamiento, ya que estos análisis se hacen llevando las piezas a condiciones de uso críticas. Verificando los desplazamientos máximos se encuentra que no habrá problema alguno, pues el máximo desplazamiento que arrojó el análisis fue de  $5.25 \times 10^{-5} mm$  que es despreciable.

### 5.7.3 Análisis del soporte del motor

Como se dijo en la sección del diseño de soportes, el análisis del soporte del motor es obligatorio ya que por la forma en que está dispuesto el motor, el diseño del soporte es un poco complicado pues está sujeto al par que genere el motor el cual, para poder mover a una persona de 100 Kg más el peso del motor debe ser considerable.

Para hacer este análisis, fue necesario calcular las fuerzas en los 4 barrenos donde va soportado el motor que sienten como respuesta al par que genera el motor, por lo que se hizo el siguiente análisis bastante sencillo:

El par que genera el motor es de 110.21 lb-in o 12.45 Nm, mientras que el diámetro de la circunferencia donde van los barrenos es de 113.137 mm o, lo que es lo mismo, un radio de 56.56 mm o 0.0565 m, por lo que la fuerza tangencial sería de:

$$F = \tau r = 12.45(0.0565) = 0.704 N$$

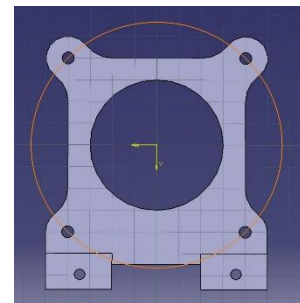


Figura 5.36 Circunferencia donde van los barrenos.

La cual distribuida entre los 4 barrenos, estando los 4 en la misma circunferencia como se muestra en la Figura 5.36 por lo cual se calcula como una distribución equitativa:

$$\frac{0.704}{4} = 0.176 N$$

Por lo que en cada barreno habría una fuerza resultante tangencial de 0.176 N y para conocer los componentes de cada fuerza, se considera que los barrenos están a 45°, 135°, 225° y 315°, por lo que se hace el siguiente cálculo de trigonometría:

Componente Vertical:  $co = hip(\text{sen}\theta) = 0.176(\text{sen}(45^\circ)) = 0.1143 N$



Componente Horizontal:  $ca = hip(\cos\theta) = 0.176(\cos(45^\circ)) = 0.1338N$

Y así para las demás posiciones de los ángulos. Una vez que se asigna cada fuerza de reacción en los barrenos del soporte se le pone la restricción, haciendo fija la superficie que va atornillada al monociclo, una vez mallado se ve como lo muestra la imagen a continuación:

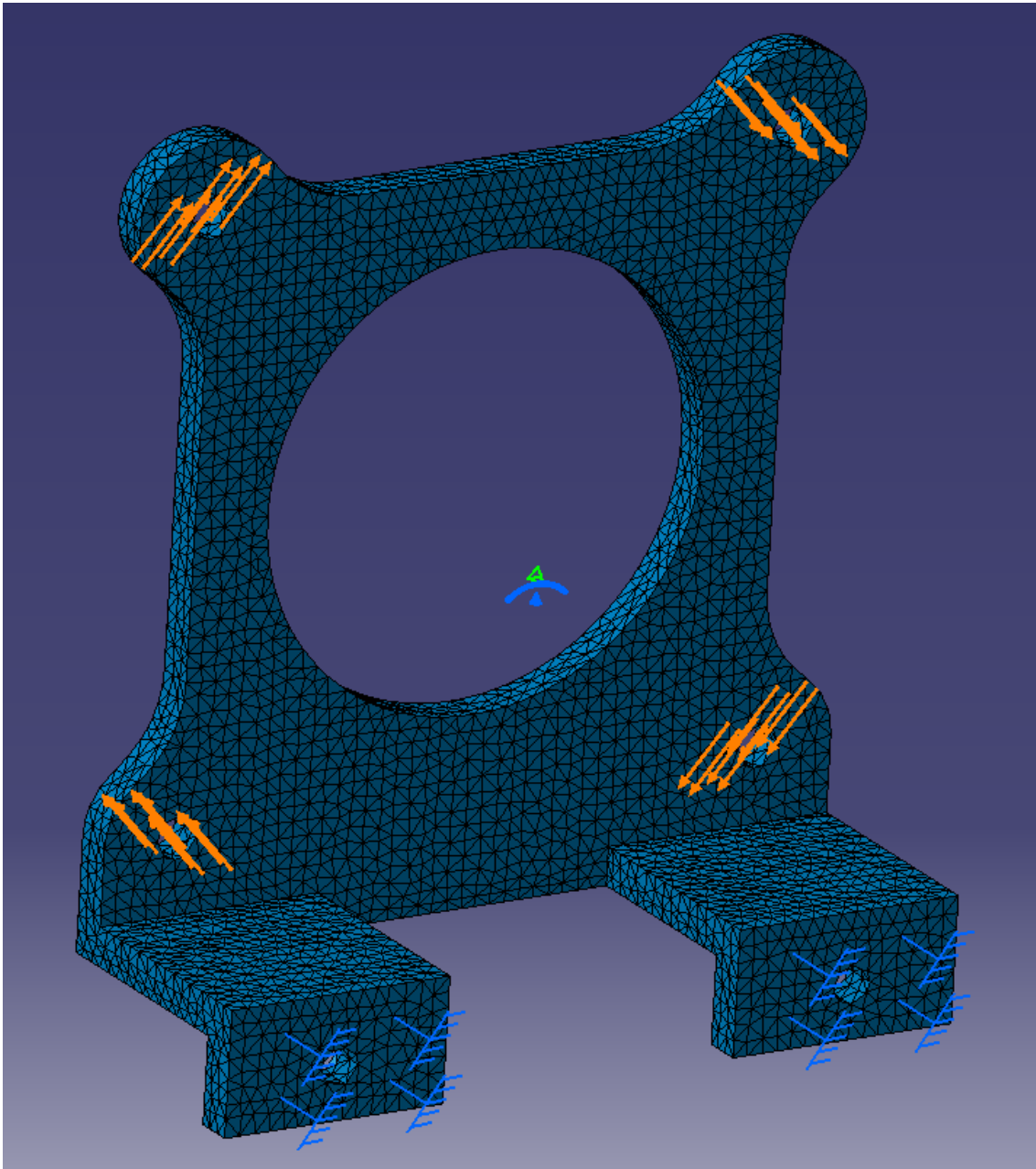


Figura 5.37 Soporte del motor mallado, con cargas y restricciones.

En donde las cargas están representadas con su vector en color naranja y la restricción en color azul.

### Resultados del Análisis de la base del motor

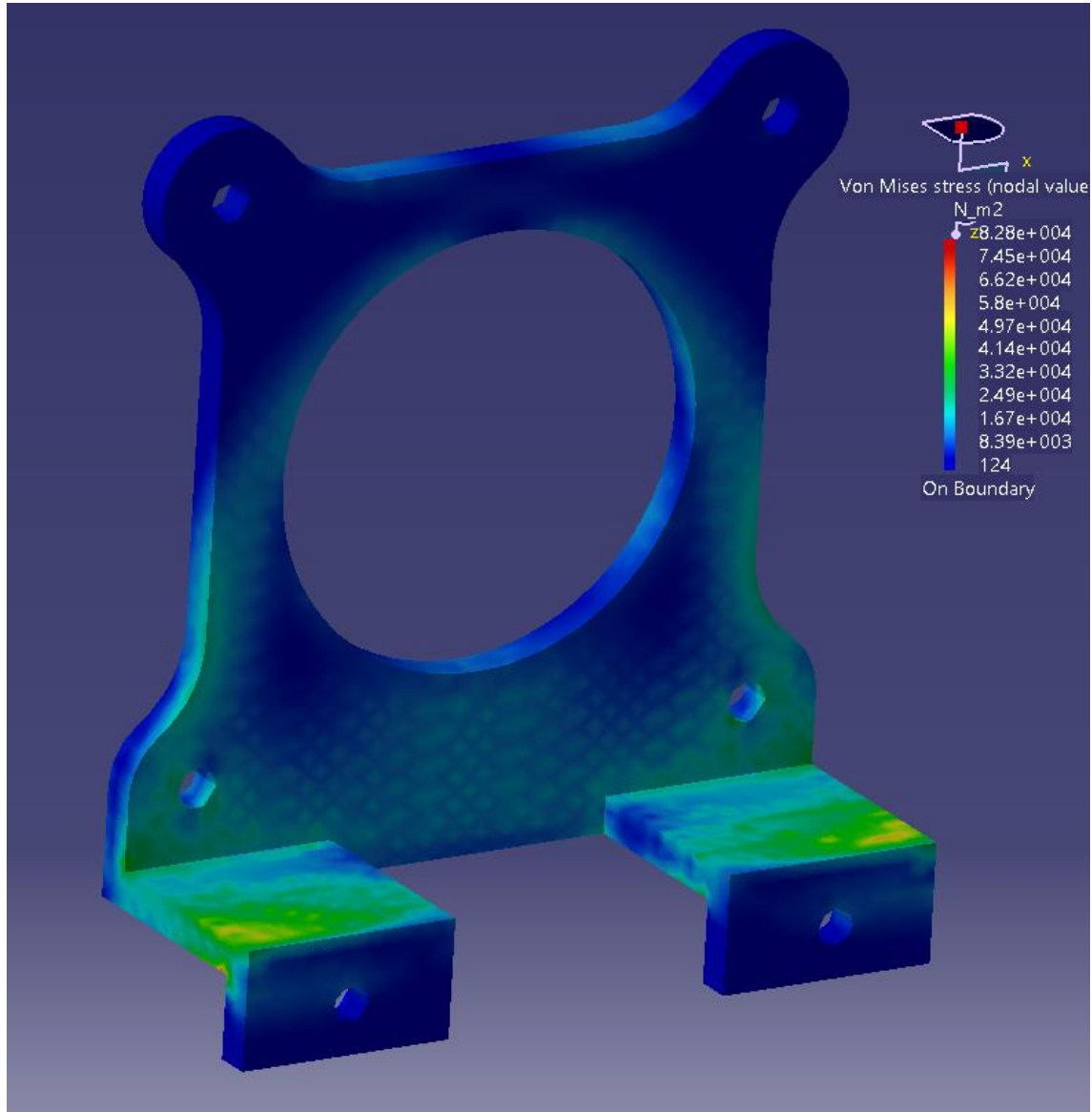


Figura 5.38 Resultado del análisis FEM del soporte del motor.

Como era de esperarse, la zona de mayor esfuerzo son las extensiones para centrar el motor, pues son las que tienen que soportar el par motor, hay que comparar los valores máximos de esfuerzo que dieron como resultado con el esfuerzo de fluencia, siendo  $\sigma_{Max\ Diseño} = \frac{2.76 \times 10^8}{2} = 1380 \times 10^5 [Pa]$  para el aluminio 6061 T6 con un factor de seguridad de 2 como ya se mencionó, mientras que el esfuerzo de Von Mises máximo en el análisis es de  $\sigma_{Max} = 8.28 \times 10^4 [Pa]$  que es menor a  $\sigma_{Max\ Diseño}$  además

de que el máximo desplazamiento resultado del análisis fue de 0.00331mm lo cual no es suficiente para que exista algún problema como que la banda pierda tensión o que los centros pierdan concentricidad , por lo que no hay problema alguno con el soporte.

#### 5.7.4 Análisis del eje

Se espera que el eje soporte fácilmente ya que este fue diseñado totalmente para esta aplicación, sin embargo se hace su análisis para corroborar, ya que es aquí donde van montados la polea y el piñón, de tal forma que es éste es el que transmite el movimiento de rotación que da el motor al rin, por lo que está sujeto a una gran cantidad de esfuerzos mientras está trabajando.

Para hacer el análisis, se consideró como trabajo crítico aquella situación donde el monociclo esté detenido contra una pared o algo que detenga su movimiento, mientras que el motor estaría funcionando a mayor potencia, entregando el mayor par a la llanta para intentar moverlo. Es así como se le asignaron las cargas de la siguiente manera: como la llanta no se mueve pues está atorada con algo, en la zona donde va montado el piñón se le puso una restricción de *clamp*, es decir, rígido, de esta forma se simula que esa zona del eje no se puede mover. En la zona donde van los rodamientos, se les asigna un slider, permitiendo rotación sobre un eje, pero no desplazamientos y, para terminar, se asigna el par máximo que pueda dar el motor a la sección donde va montada la polea, siendo un par de 11Nm donde va montada la polea la cual recibe el movimiento del motor y lo transporta al eje. Al mallar el eje y con todas las cargas en color amarillo y restricciones en color azul definidas queda de la siguiente forma (Figura 5.39):

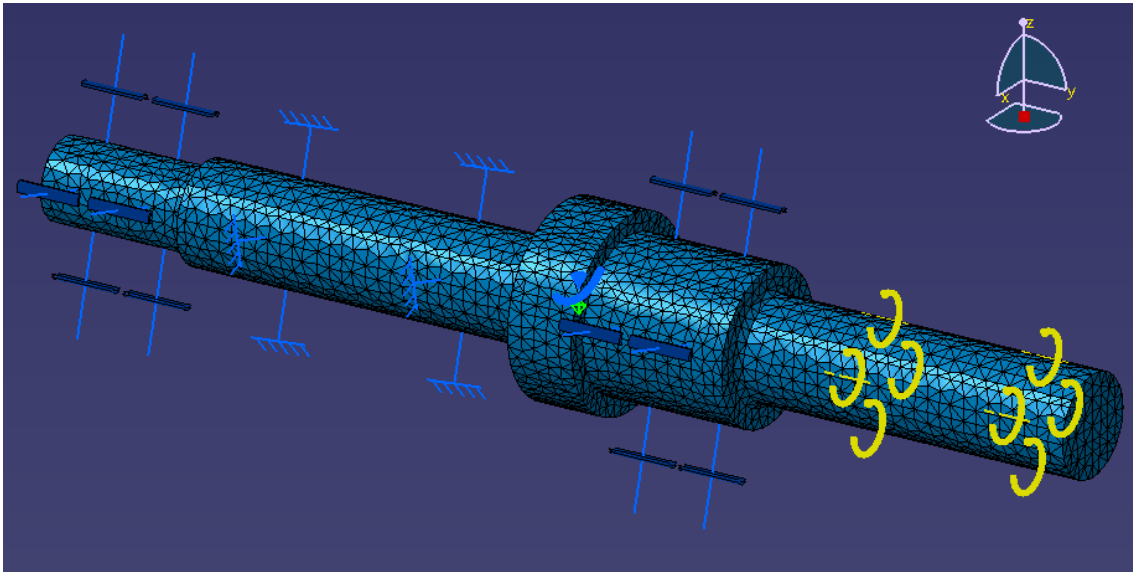


Figura 5.39 Mallado del eje con cargas y restricciones.

El eje está listo para ser analizado, por lo que se prosigue con el análisis, el cual muestra los resultados a continuación:

### Resultados del Análisis del Eje

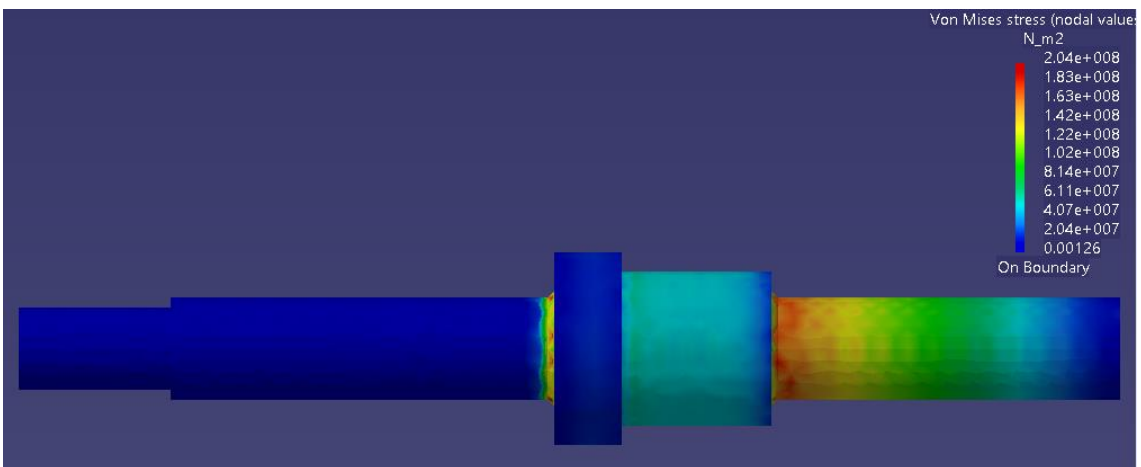


Figura 5.40 Vista frontal del eje con los resultados del FEM.

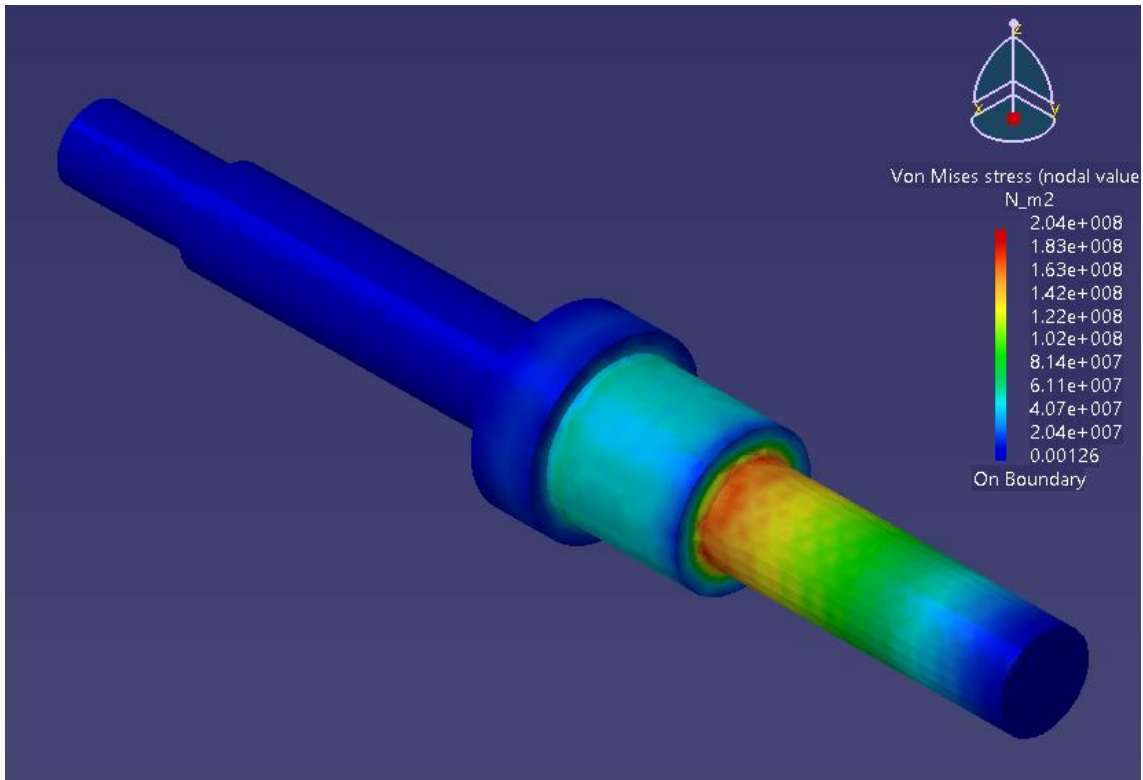


Figura 5.41 Resultados del FEM del eje.

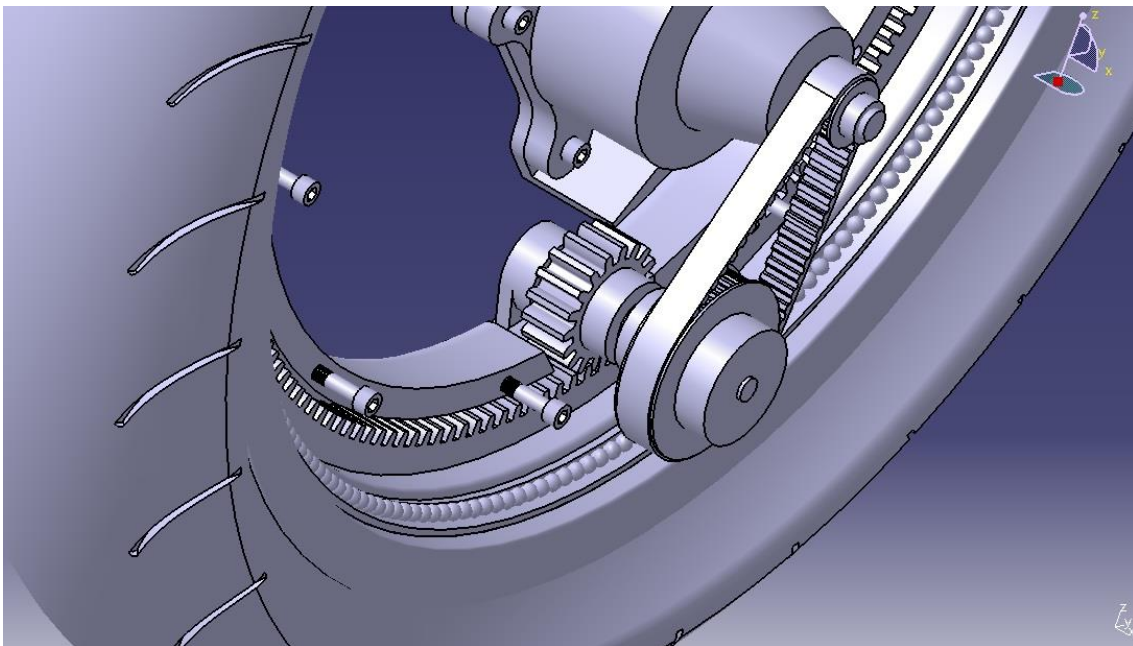
Como se puede ver, hay una gran sección roja entre la zona de montura de la polea y la del rodamiento, por lo que se tiene que comparar el máximo esfuerzo que da como resultado el análisis contra las propiedades del acero AISI 1144, siendo su esfuerzo máximo de diseño de  $\sigma_{Max\ Diseño} = \frac{5 \times 10^8}{2} = 2.5 \times 10^8 [Pa]$  mientras que el valor máximo del análisis es de  $\sigma_{Max} = 2.04 \times 10^8 [Pa]$ , como  $\sigma_{Max\ Diseño} > \sigma_{Max}$  no habrá problema alguno ya que, como se mencionó al inicio, se está evaluando una condición de funcionamiento crítica, la cual será muy difícil alcanzar en la vida real, y si aun así lo soporta entonces no habrá ningún problema en un funcionamiento promedio.

## **Capítulo 6**

### **Resultados**

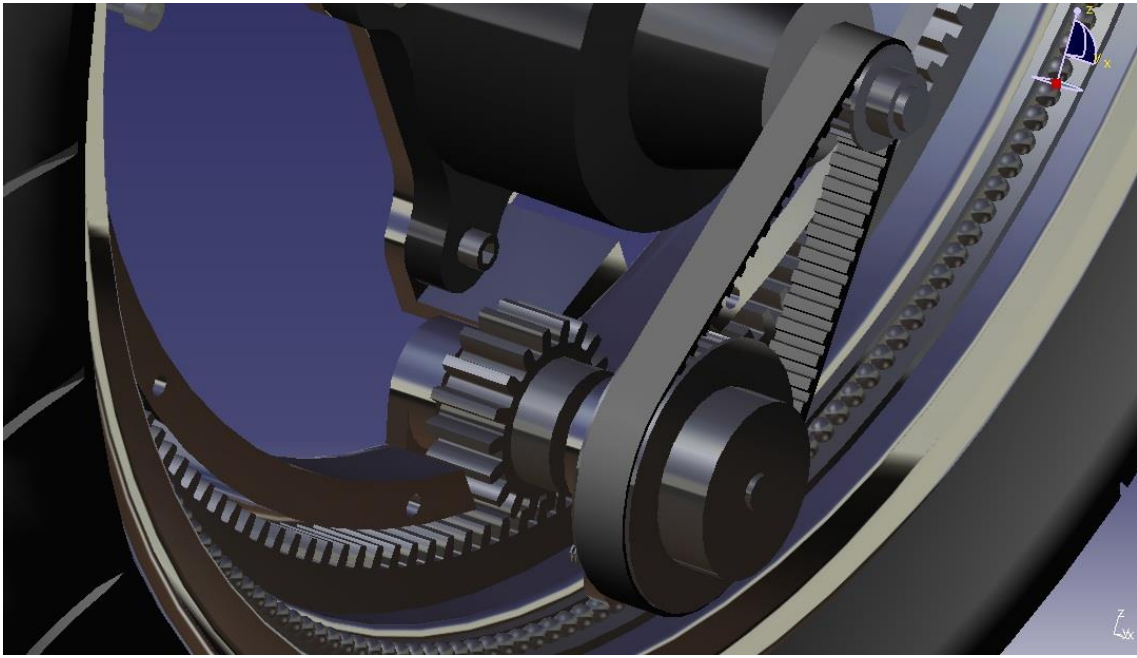
Una vez que todas las piezas están diseñadas y analizadas para asegurarse que su funcionamiento sea óptimo, se puede ensamblar el modelo de tal forma que el equipo pueda ver un acercamiento a cómo se vería ya armado en la realidad, para esto, todos los elementos deben ser juntados en un archivo *.CATproduct*, usando el software *Catia v5*. Una vez que todos los elementos están juntos, se les asignan restricciones a cada uno para que queden bien ensamblados y en posición con todo el sistema.

En las siguientes imágenes se muestra el prototipo virtual final del monociclo eléctrico que se ha desarrollado a lo largo de este trabajo de tesis. Se muestran los elementos mecánicos de transmisión de potencia y soportes diseñados ya ensamblados con el rin y la llanta, listos para que los elementos eléctricos y los mecanismos de asiento y manubrio sean montados, así como cualquier cosa necesaria para hacer pruebas con este prototipo. En la siguiente imagen, se muestra el monociclo sin una de sus bases con el objetivo de que sus elementos internos puedan ser vistos:



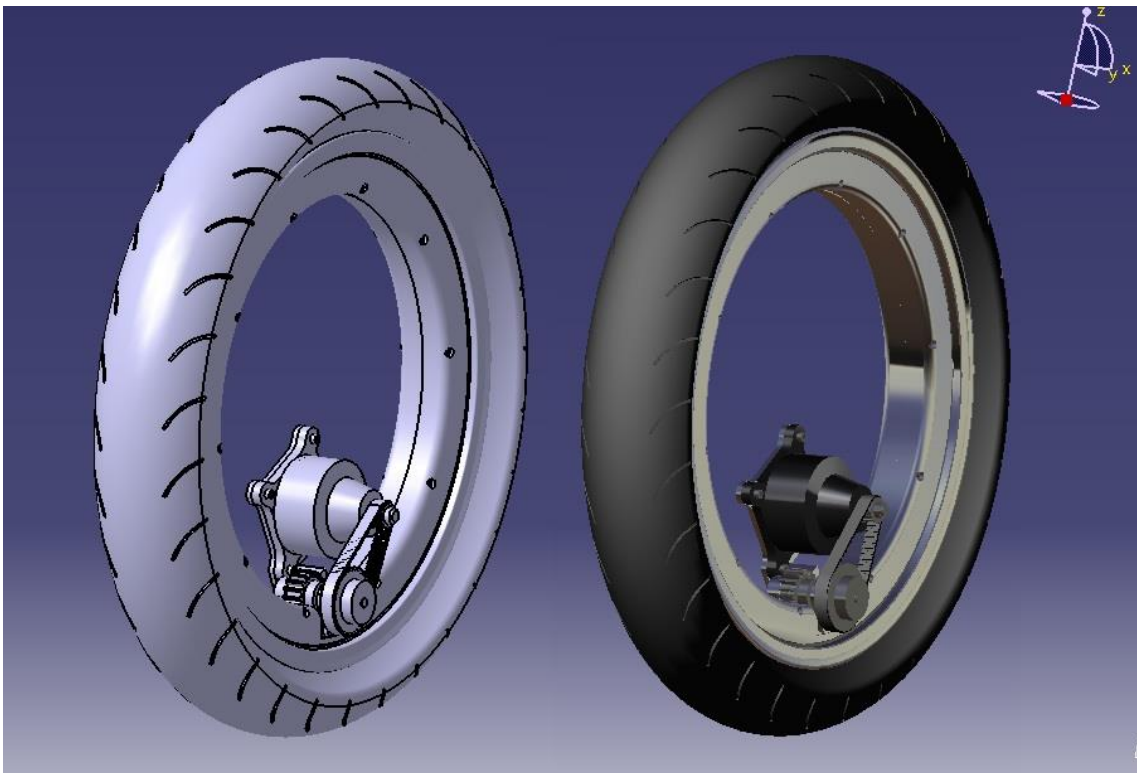
*Figura 6.1 Sistema de transmisión en el ensamble del monociclo.*





*Figura 6.2 Sistema de transmisión con vista de materiales.*

El prototipo final con todas sus piezas ensambladas se muestra en las siguientes imágenes:



*Figura 6.3 Ensamble del monociclo.*





*Figura 6.4 Ensamble final de la parte mecánica del monociclo eléctrico.*

Las siguientes imágenes se muestran con una propuesta de diseño estético con carenados y soportes de asiento y manubrio, acercándose al diseño conceptual que se había propuesto inicialmente, con manubrio y asiento abatibles de forma que al cerrar los mecanismos queda ocupando un espacio muy reducido y de puede guardar en la cajuela del auto o algún otro lugar más fácilmente, además de que se abre la opción de conducir en posición erguida el monociclo.



*Figura 6.5 Concepto visual del monociclo con mecanismos de manubrio y asiento abiertos.*

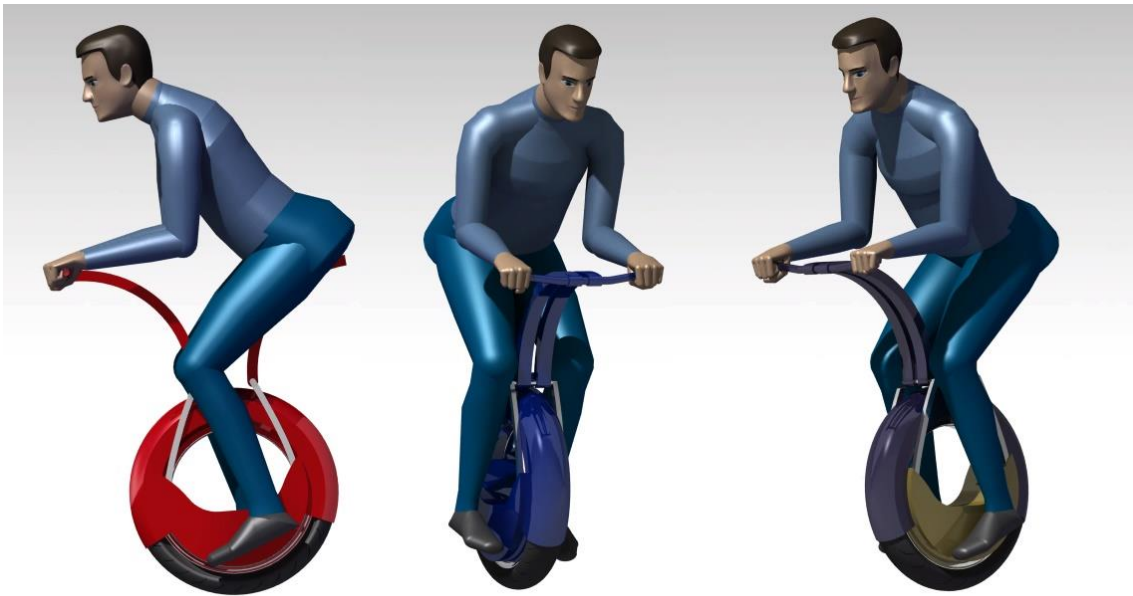


*Figura 6.6 Concepto del monociclo con mecanismos cerrados.*



*Figura 6.7 Concepto visual del monociclo en color negro.*

Para saber cómo se vería el usuario manejando este vehículo, se añadió al prototipo un *dummie virtual*, con el cual se ve la posición del cuerpo al estar montado en el monociclo, en este caso la posición del cuerpo se asemeja a la postura de una persona al montar bicicleta como se puede apreciar en las siguientes imágenes:



*Figura 6.8 Posición del usuario al montar el monociclo.*

O si se abate el manubrio y el asiento, el usuario puede manejar erguido el monociclo, como se aprecia en la figura 6.9.



*Figura 6.9 Usuario manejando el monociclo en posición erguida.*



## 6.1 Análisis y discusión de resultados

Como se puede apreciar en las imágenes que muestran el prototipo terminado, este modelo de monociclo ha logrado satisfacer la mayoría de las necesidades planteadas en capítulos anteriores, siendo un vehículo de una sola llanta mecánicamente eficiente, impulsado por un motor eléctrico, tiene la capacidad de hacerse autobalanceable con la ayuda de sistemas de control, lo cual facilita su manejo y lo hace seguro además de ser un vehículo compacto y ligero para poder ser llevado a cualquier lugar.

Este vehículo es hasta la fecha uno de los monociclos más eficientes, ágiles y potentes según la investigación realizada en este trabajo, ya que tiene un motor de 2700W permitiendo un ángulo de volcadura de aproximadamente  $18^\circ$  y una velocidad máxima de 25 km/h logrando que pueda alcanzar grandes aceleraciones, sin alcanzar una velocidad tan peligrosa.

Aunque se pensó en distintos tipos de rodamientos para darle rigidez al rin y montar la base, se optó por la forma más sencilla que es el uso de balines con sus respectivos conos, lo cual no es la forma más idónea pues existen en el mercado internacional diferentes tipos de rodamientos para esta aplicación, sin embargo, al ser solo un prototipo de pruebas, la opción por la que se optó fue por ser más fácil de adquirir y maquinar.

El diseño visual se basó principalmente en el requerimiento de que el monociclo sea compacto y respetando el diseño conceptual elegido forzando el diseño mecánico al requerimiento de que sea un *Hubless Wheel* o en español llanta sin masa teniendo que meter de esta forma un engrane interno, al mismo tiempo se optimizó espacio al integrar la transmisión en la parte interna del rin cosa que no es muy común en la actualidad. Sin embargo, el diseño exterior sigue siendo sólo una propuesta, pues no se trabajó detalladamente en el mismo, se deja abierto a futuras propuestas.



Figura 6.10 Usuario aprueba el monociclo.

Ergonómicamente la postura del usuario en este vehículo es, como se mencionó antes, muy similar a la postura que se tiene al montar una bicicleta o algunos tipos de motocicleta, la cual no fue estudiada muy a detalle sin embargo se partió del hecho que es una postura muy común para los usuarios de este tipo de vehículos por lo cual se espera una rápida adaptación a ella, aunque, al igual que el diseño visual, queda abierto a un futuro estudio en cuanto a la posición y forma del manubrio y asiento.

En cuanto a la selección de materiales, el equipo no profundizó lo suficiente como para tener los materiales más idóneos para reducir peso y espacio, sin sacrificar la resistencia, más bien se eligieron los materiales comunes para cada una de las aplicaciones haciendo esta una elección adecuada pero no idónea, sin embargo, para asegurar que puedan resistir las cargas cuando el monociclo está en uso, se hizo un análisis estructural el cual dio como resultado que las piezas que serían fabricadas con aluminio 6061 T6 quedan sobradas, por lo que se tendría que investigar algún otro material que vaya más acorde a los esfuerzos que se solicitarán en el monociclo.

## **6.2 Trabajos futuros**

- Manufacturar el prototipo final del monociclo.
- Profundizar en cuanto a las mejores posiciones y posturas del usuario al manejar el vehículo
- Hacer más ligeras las piezas hechas de AL6061 T6 con un diseño más esbelto o buscar un material que no quede tan sobrado.
- Realizar el diseño de detalle del monociclo eléctrico.
- Integrar un mecanismo de suspensión.

## Conclusiones

Se diseñó satisfactoriamente la parte mecánica del prototipo de un monociclo eléctrico de péndulo invertido, en el cual se observaron, plantearon y dieron soluciones a diversos problemas de diseño, como el listado de necesidades y requerimientos, la identificación de función crítica, la creación y selección de un diseño conceptual, la selección de materiales, la generación de prototipos rápidos y diversos análisis computacionales, que ayudaron a la evaluación a nivel sistema del Monociclo en cuestión.

En el proyecto se necesitó de diversos conocimientos en diversas disciplinas, con muchos de los cuales ya se contaba y otros más se adquirieron durante el proceso, lo que es fundamental para el completo desarrollo de un producto novedoso.

Durante este proceso de desarrollo de un nuevo producto se aprendió de la importancia que tiene cada una de las etapas de diseño, la importancia que tiene considerar el factor humano durante todas estas etapas y la gran importancia que tiene el trabajo multidisciplinario para la realización de cualquier producto.

Al ser un proyecto multidisciplinario, y al contar únicamente con integrantes de la carrera de ingeniería mecánica, no fue posible desarrollar por completo el producto, sin embargo, se tomaron consideraciones para el trabajo futuro de las diversas áreas.

Se aprendió que con ayuda de todo esto se logra generar plenamente un producto que sea cómodo, eficiente, seguro, amigable con el medio ambiente, entre otras tantas virtudes, que favorece la aceptación de la sociedad hacia un nuevo producto.

Con esto se garantiza que se cumplió satisfactoriamente con el objetivo planteado inicialmente, en el que se desarrollaron cada una de las etapas planteadas.

## **Bibliografía**

Ferdinand P. Beer, E. Russell Johnston, et al

Mecánica Vectorial para Ingenieros “Dinámica”

Mc Graw Hill, 9ª Edición, 2010

Robert L. Mott

Diseño de Elementos de Máquinas

Prentice Hall, 2da Edición, 1992

Robert L. Norton

Diseño de Máquinas

Pearson Educación, Primera Edición, 1999

Martin Sproket & Gear,

Inc. Catálogo 1090

Katsuhiko Ogata

Sistemas de Control en Tiempo Discreto

Pearson Educación, 2da Edición, 1996

## Referencias

- [Ref.1] <http://dthsg.com/phases/> (última vez ingresado 20/09/2013)
- [Ref.2] [http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/\\_17985\\_turnigy\\_rotomax\\_1\\_4\\_0\\_brushless\\_outrunner\\_motor.html](http://www.hobbyking.com/hobbyking/store/_17985_turnigy_rotomax_1_4_0_brushless_outrunner_motor.html) (última vez ingresado 17/08/2013)
- [Ref.3] Martin Sproket & Gear, Inc. Catálogo 1090
- [Ref.4] Diseño de Elementos de Máquinas, Robert L. Mott
- [Ref.5] <http://www.uclm.es/profesorado/porrasysoriano/elementos/Tema10.pdf>  
(última vez ingresado 28/01/2014)
- [Ref.6] <http://www.skf.com/mx/products/bearings-units-housings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/single-row/index.html> (última vez ingresado 30/01/2014)
- [Ref.7] <http://www.matweb.com> (última vez ingresado 11/02/2014)
- [Ref.8] <http://www.ociomotor.com/2011/12/solowheel-el-monociclo-electrico-que-recuerda-los-viejos-tiempos/> (última vez ingresado 11/03/2014)
- [Ref.9] <http://ecoexpoonline.com/newsdetail.php?ID=1108> (última vez ingresado 10/04/2014)
- [Ref.10] <http://www.ecologiahoy.com/ryno-el-monociclo-electrico> (última vez ingresado 10/04/2014)
- [Ref.11] [http://www.motor.com.co/avances/honda-presenta-el-nuevo-monociclo-u3-x\\_11544804-4](http://www.motor.com.co/avances/honda-presenta-el-nuevo-monociclo-u3-x_11544804-4) (última vez ingresado 10/04/2014)
- [Ref.12] [http://ibytes.es/blog\\_breve\\_historia\\_grafica\\_de\\_los\\_monociclos\\_motorizados.html](http://ibytes.es/blog_breve_historia_grafica_de_los_monociclos_motorizados.html)
- [Ref.13] <http://dthsg.com/phases/> (última vez ingresado 22/04/2014)
- [Ref.14] [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/engranajes-internos-9195-5819039.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/engranajes-internos-9195-5819039.jpg) (última vez ingresado 22/04/2014)
- [Ref.15] [http://img.directindustry.es/images\\_di/photo-g/poleas-sincronas-32592-4451859.jpg](http://img.directindustry.es/images_di/photo-g/poleas-sincronas-32592-4451859.jpg)  
(última vez ingresado 22/04/2014)
- [Ref.16] <http://www.motor.com.co/avances> (última vez ingresado 22/04/2014)



- [Ref.17]. <http://yadbeyad.wordpress.com/2009/10/08/una-empresa-israeli-logra-generar-electricidad-gracias-al-trafico/>
- [Ref. 18] <http://www.backgroundstudio.es/servicio-diseno-grafico-laboratorio-digital.html>
- [Ref. 19] <http://www.portaldesalta.gov.ar/historia/bici1.gif>
- [Ref. 20] <http://serecurioso.files.wordpress.com/2013/08/efemc3a9rides-29-8-01.png>
- [Ref. 21] [http://img.motorpasionmoto.com/2010/03/ktm-freeride-offroad-concept-2\\_500.jpg](http://img.motorpasionmoto.com/2010/03/ktm-freeride-offroad-concept-2_500.jpg)
- [Ref. 22] [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Nissan\\_Leaf.jpg](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/37/Nissan_Leaf.jpg)
- [Ref. 23] <http://www.usawholesalescooters.com/E-cycle.jpg>
- [Ref. 24] <http://blog.xmundo.net/wp-content/uploads/2011/06/segway.jpg>
- [Ref. 25] <http://static.betazeta.com/www.fayerwayer.com/up/2009/09/yikebike2.jpg>

## Anexos

### Encuesta realizada para definir las necesidades.

¿Cuál de las siguientes características te parece más importante para un monociclo?  
(Selecciona 4)

- 1 Que sea eléctrico.
- 2 Que sea compacto.
- 3 Que sea ligero.
- 4 Que sea barato.
- 5 Que sea cómodo.
- 6 Que tenga una buena velocidad.
- 7 Que se equilibre solo.
- 8 Que tenga una buena autonomía.
- 9 Agradable a la vista.
- 10 Fácil de manejar.
- 11 Que sea innovador.
- 12 Que sea ecológico.
- 13 Que pueda transportar buen peso.
- 14 Que sea seguro.
- 15 Que sea fácil de recargar la batería.

No. DE USUARIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	Suma	Calific	
1 Que sea eléctrico	1	1				1				1		1						1	1				7	8,33
2 Que sea compacto			1			1					1			1		1		1					6	7,14
3 Que sea ligero			1					1	1		1				1	1							6	7,14
4 Que sea barato	1		1			1							1									1	5	5,95
5 Que sea cómodo	1									1			1		1						1		5	5,95
6 Que tenga una buena velocidad				1				1			1							1	1		1		6	7,14
7 Que se equilibre solo			1	1			1	1				1			1	1					1		8	9,52
8 Que tenga una buena autonomía				1				1		1							1					1	5	5,95
9 Agradable a la vista					1								1	1					1				4	4,76
10 Fácil de manejar		1			1		1				1									1	1		6	7,14
11 Que sea innovador				1				1				1						1		1	1		6	7,14
12 Que sea ecológico	1		1				1	1															4	4,76
13 Que pueda transportar buen peso							1						1							1	1	1	5	5,95
14 Que sea seguro		1			1	1				1		1		1	1								7	8,33
15 Que sea facil de recargar la batería					1			1				1						1					4	4,76

