



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño Mecánico de un Prototipo de Vehículo
Eléctrico de Péndulo Invertido**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA:

HUGO CÉSAR VARGAS OSORIO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. VICENTE BORJA RAMÍREZ



MÉXICO D.F. 2013

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma De México

A mi director de tesis: Dr. Vicente Borja Ramírez

A mis sinodales:

Dr. Adrián Espinosa Bautista

Dr. Marcelo López Parra

Dr. Alejandro Ramírez Reivich

Arq. Arturo Treviño Arizmendi

A mis compañeros de proyecto, gracias por su apoyo y amistad.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica de la UNAM

(DGAPA PAPIIT IN118810), por el patrocinio de este proyecto.

Dedicatorias

A mi madre,

Por su apoyo incondicional, su amor y paciencia;

Por estar conmigo en cada etapa de mi vida;

Por darme la libertad y confianza, para que yo construyera mi propio destino.

A ti te dedico todos mis logros y espero recompensar tus esfuerzos para convertirme en un hombre de bien;

Estoy orgulloso de ser tu hijo.

A mis tres hermanas,

Las que siempre están para mí cuando las necesito;

Las que me alientan y me hacen sentir que no existen imposibles;

Para ustedes mi cariño y el deseo de que sus hijos tengan una vida plena y feliz.

RESUMEN

Este trabajo describe el proceso de desarrollo de un prototipo de Vehículo Eléctrico De Péndulo Invertido, el cual se plantea como una solución al transporte o movilidad personal. El funcionamiento del vehículo se basa en la tecnología de los sistemas de control de auto-balanceo, de la cual se han desarrollado diversos prototipos en universidades y empresas automotrices. El problema planteado fue desarrollar y construir un prototipo funcional con la colaboración de alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, así como de alumnos del Centro De Investigaciones De Diseño Industrial de la UNAM.

El desarrollo del proyecto se basó en la metodología de diseño aplicada al desarrollo de productos, por lo que fue necesario realizar diversas actividades de investigación, recolección de datos, creativas, análisis y evaluación de datos, así como del trabajo de campo y taller. Se partió de la identificación de las necesidades de los usuarios mediante la recolección de datos por medio de encuestas y entrevistas. Fue realizada una investigación acerca del estado del arte de los vehículos basados en la tecnología del auto-balanceo; de la que se obtuvieron datos acerca de las características de los sistemas de control que emplean, las soluciones que plantean y las aplicaciones para las que fueron desarrollados. Por otra parte se encontraron algunas normas y restricciones en cuanto al uso y seguridad de este tipo de vehículos.

Toda esta información fue la base para generar alternativas de solución las cuales al combinarse formaron varias opciones de conceptos de diseño. Para elegir al concepto definitivo, se elaboró un simulador con el que se pudieran probar todos los conceptos propuestos, mediante la realización de pruebas en parques y espacios públicos. A partir de la información obtenida se logró elegir el concepto de diseño con el que se continuaría el desarrollo del prototipo.

Con base en los requerimientos y características del concepto de diseño se estableció la arquitectura y configuración del prototipo, se elaboraron los modelos en CAD de las partes y componentes diseñados. Así mismo realizó la selección preliminar de materiales y procesos de fabricación.

Posteriormente 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.

Finalmente se realizaron pruebas de comportamiento del prototipo a nivel sistema, en base a un protocolo de pruebas establecido. Los resultados de estas pruebas mostraron un buen funcionamiento del prototipo del vehículo sin cargas añadidas y arrojaron datos que serán muy útiles en las mejoras que serán necesarias para que finalmente el prototipo pueda ser utilizado por un usuario real.

ÍNDICE

	pág.
INTRODUCCIÓN	4
CAPITULADO	
CAPÍTULO 1	
MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES	6
1.1 EL PROCESO DE DESARROLLO DE PRODUCTOS	6
1.2 ANTECEDENTES DEL PROYECTO	8
1.3 SEGUNDA ETAPA DEL PROYECTO	13
CAPÍTULO 2	
DISEÑO CONCEPTUAL	16
2.1 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA	16
2.2 DESARROLLO DEL CONCEPTO	19
2.3 PROTOTIPO DE PRUEBA DE CONCEPTOS	24
2.4 SELECCIÓN DEL CONCEPTO	27
CAPÍTULO 3	
DETERMINACIÓN DEL DISEÑO	28
3.1 ARQUITECTURA DEL VEHÍCULO	28
3.2 DISEÑO DE PARTES Y COMPONENTES	32
3.3 FACTORES HUMANOS Y ESTÉTICOS DEL VEHÍCULO	37
CAPÍTULO 4	
ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL DISEÑO	38
4.1 ANÁLISIS ESTRUCTURAL POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS	38
4.2 ANÁLISIS DEL MODELO CON CARGAS ESTÁTICAS	43
4.3 ANÁLISIS CON CARGAS DINÁMICAS	46
4.4 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR	49
CAPÍTULO 5	

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL VEHÍCULO	52
5.1 ESTIMACIÓN ESPACIAL DEL CENTRO DE GRAVEDAD	52
5.2 ESTABILIDAD LATERAL	55
5.3 DESEMPEÑO MECÁNICO DEL TREN MOTRIZ	57
CAPÍTULO 6	
DISEÑO DE DETALLE	68
6.1 REVISIÓN DE ESPECIFICACIONES	68
6.2 DOCUMENTACIÓN	68
6.3 CONSIDERACIONES PREVIAS A LA MANUFACTURA	70
6.4 MANUFACTURA Y ENSAMBLE DEL PROTOTIPO	72
CAPÍTULO 7	
PRUEBAS Y RESULTADOS	75
7.1 IMPLEMENTACIÓN DE PRUEBAS	75
7.2 RESULTADOS Y COMENTARIOS	76
CONCLUSIONES	78
TRABAJOS FUTUROS	79
REFERENCIAS	80
ANEXOS	82
ANEXO A. LISTA DE PARTES	83
ANEXO B. TABLA DE PROCESOS	84
ANEXO C. PLANOS	85
ANEXO D. PRUEBAS CON EL PROTOTIPO DE PRUEBA DE CONCEPTO	97

INTRODUCCIÓN

El vehículo eléctrico de péndulo invertido, es un proyecto multidisciplinario, cuya finalidad es desarrollar una alternativa de transporte personal, basado en la tecnología de los sistemas de control de auto-balanceo.

Esta tecnología ha desatado una nueva generación de vehículos eléctricos para el transporte personal en distancias cortas y con acceso a espacios reducidos. Esta nueva categoría del transporte, aún está en la infancia, se encuentra en un punto en donde todo se explora, prueba y experimenta; incluso los vehículos más desarrollados y difundidos como el Segway, buscan la forma de consolidarse como una opción de transporte seria y aceptable para el público.

Empresas y universidades en el mundo han visto con interés estos vehículos y han desarrollado sus propias versiones y conceptos. Bajo este contexto, surgió la iniciativa por parte de alumnos del Posgrado en Ingeniería Mecatrónica de la UNAM, de desarrollar e implementar un sistema de control de péndulo invertido, así como desarrollar un concepto de vehículo eléctrico; integrándose ambos en la construcción de un prototipo experimental.

Fue así que al autor de esta tesis se le invitó a colaborar en el proyecto, para diseñar y construir los componentes y partes mecánicas del prototipo experimental. Por lo tanto el objetivo de este trabajo tesis es:

Diseñar y manufacturar un prototipo experimental de un vehículo eléctrico de péndulo invertido para realización de pruebas de comportamiento y evaluación a nivel sistema.

Los alcances de la tesis son:

- *Desarrollo y selección del concepto de diseño*
- *Diseño de arquitectura de un Prototipo para el VEPI*
- *Evaluar por medio del Análisis por Elementos Finitos (AEF), el chasis y estructura del vehículo*
- *Realizar una caracterización dinámica del vehículo*
- *Evaluar analíticamente el desempeño del tren motriz*
- *Diseño de detalle del prototipo, incluyendo lista de partes y planos de fabricación*
- *Manufactura de componentes y ensamble del prototipo*
- *Probar el funcionamiento del prototipo*

Adquirir un título profesional fue la principal motivación para realizar esta tesis; participar en un proyecto para desarrollar un vehículo con estas características, fue lo que lo hizo interesante; ya que permitía acercarse y conocer sobre el funcionamiento de vehículos eléctricos de un eje auto-balanceables; además de entender como la ingeniería mecánica se podía aplicar en el diseño y fabricación del prototipo.

El desarrollo del vehículo involucró la participación de Ingenieros e Ingenieras Mecatrónicos, Mecánicos y Diseñadores Industriales, ya que el vehículo lo conforman diversos sistemas (eléctricos, electrónicos, mecánicos, software, etc.); sin dejar de lado los factores estéticos y humanos para su diseño. En cuanto a la metodología empleada; se tomó como base el proceso de diseño de productos, apoyándose también en las herramientas auxiliares del diseño mecánico como lo son el CAD, CAM y CAE; el uso de prototipos, bocetos y herramientas para recabar y analizar información.

En el Capítulo 1 se hace una pequeña descripción del proceso de desarrollo de productos a manera de marco teórico de la tesis, si el lector está familiarizado con el tema puede omitir esta parte; después se presentan los antecedentes del proyecto describiendo la forma en que fue organizado e integrado por un equipo multidisciplinario.

A partir del Capítulo 2 se describen y reportan las actividades realizadas durante el proyecto por parte del autor; se hace mención acerca del desarrollo del concepto de diseño, destacándose las pruebas realizadas con un simulador a fin de obtener la información suficiente para elegir un concepto de vehículo.

En el Capítulo 3 se habla sobre cómo se estableció la arquitectura del prototipo, se detallan las características de las partes y componentes que fueron diseñados o adquiridos para conformar al prototipo. Los Capítulos 4 y 5 hablan sobre los análisis y evaluación de los elementos estructurales del vehículo, el desempeño mecánico del tren motriz y de las características dinámicas del prototipo.

El diseño de detalle y aspectos relacionados con la manufactura y ensamble se presentan en el Capítulo 6. Por último las pruebas de funcionamiento realizadas y los resultados obtenidos son descritos en el Capítulo 7.

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO Y ANTECEDENTES

1.1 EL PROCESO DE DESARROLLO DE PRODUCTOS

El proceso de desarrollo de productos se basa en una metodología de diseño, la cual permite desarrollar un producto mediante una serie de pasos bien estructurados. Cada uno de estos pasos o fases se enfoca a resolver una parte del problema hasta alcanzar una solución. En la primera sección de este capítulo se describen los pasos seguidos en un proceso genérico de desarrollo de productos y las tareas involucradas en él. Para poder desarrollar el prototipo del vehículo eléctrico de péndulo invertido, se siguieron los pasos de esta metodología de diseño a fin de tener un orden y estructura en las actividades realizadas durante el proyecto. En la segunda sección del capítulo se detallan los antecedentes del proyecto, su planeación y organización.

1.1.1 IMPORTANCIA DEL DISEÑO EN EL DESARROLLO DE PRODUCTOS

Existen diversos factores que pueden determinar el éxito o fracaso de un nuevo producto, estos factores han sido identificados por la industria a largo de su historia, así por ejemplo se dieron cuenta de que el mercado reclamaba, exigía o demandaba productos de altísima calidad. Para afrontarlo, en principio se volaron costos de manufactura por medio de la automatización y la mano de obra barata, sin embargo con el tiempo y la publicación de estudios al respecto, las industrias cayeron en cuenta que la calidad no sólo debía ser algo que se inspeccionaba en las líneas de producción sino que debía ser incorporado desde la concepción del producto, es decir el éxito dependía de un alto nivel de calidad en el diseño del producto por lo que se buscaron nuevas y mejores formas de diseñar un producto.

Para entender la importancia del diseño en el desarrollo de nuevos productos, consideremos que de los costos que tienen que ver con la producción de un producto; sólo alrededor del 5% forma parte del diseño, en contraste la influencia que puede tener el diseño en el costo final del producto es del 70%, como se puede apreciar en la Figura 1.1.



FIGURA 1.1. La sombra del diseño del producto sobre el costo final del producto; tomado de Munro and Associates, Inc. (2009); [38].

1.1.2 PROCESO DE DISEÑO GENÉRICO.

El proceso de diseño es de naturaleza iterativo y basado en la resolución de problemas mediante una serie de pasos bien definidos llamados método de diseño. La Figura 1.2 muestra un diagrama del algoritmo básico de cualquier proceso de diseño.

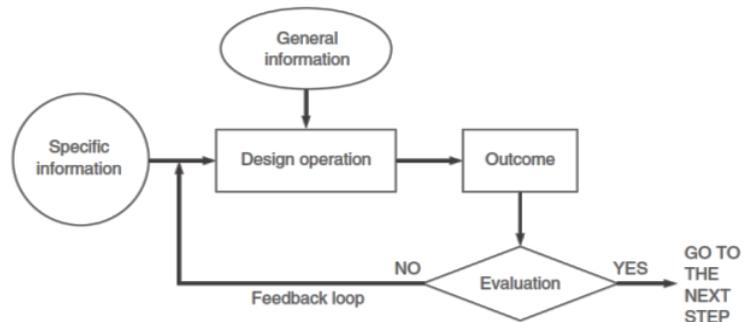


FIGURA 1.2. El algoritmo básico del proceso de diseño; tomado de George E. Dieter [2]

De acuerdo con *Morris Asimow* [1]; el proceso de diseño se puede dividir en 8 fases, las 3 primeras son las fases primarias que corresponderían a la parte de identificación de la necesidad y desarrollo en ciclo de vida del producto; las restantes son las fases del ciclo producción-consumo, A continuación se describen las fases primarias del proceso de diseño.

➤ **FASE 0 PLANEACIÓN.**

Es la etapa que antecede a la aprobación del proyecto. Plantea la misión del proyecto: mercado objetivo, objetivos comerciales, suposiciones básicas y limitaciones.

➤ **FASE I DISEÑO CONCEPTUAL**

El diseño conceptual es la parte inicial del diseño, partiendo de la identificación de la necesidad y llevándolo hasta un punto en donde se tendrán una serie de posibles soluciones, que serán reducidas a un único concepto de diseño. Esta es la fase que mayor creatividad requiere; dentro de las actividades que esta fase implica, se encuentran la identificación de las necesidades del consumidor, búsqueda de información, generación de alternativas de solución y la evaluación y selección del concepto final.

➤ **FASE II DETERMINACIÓN DEL DISEÑO**

También conocida como diseño preliminar o diseño a nivel sistema, es la fase más estructurada del proceso de diseño. Es aquí donde se deben tomar las decisiones sobre la resistencia, la selección de materiales, tamaño, forma y compatibilidad de espacio entre componentes. Tres grandes tareas tienen que ver con esta fase: la arquitectura del producto, configuración del diseño y el diseño paramétrico.

➤ **FASE III DISEÑO DE DETALLE**

En esta fase el diseño es llevado a una descripción completa para que el producto pueda ser fabricado. La información faltante es agregada, tolerancias, ajustes, acabado superficial, materiales y procesos de manufactura para cada parte. Esto da como resultado la especificación de cada parte a fabricar y de las que deberán ser adquiridas con proveedores. Las tareas involucradas con esta fase tienen que ver con la elaboración de toda la documentación necesaria para la manufactura y ensamble del producto.

En la Figura 1.3 se puede apreciar la secuencia entre cada fase, además se muestran las tareas involucradas en estas tres primeras fases del proceso de diseño.

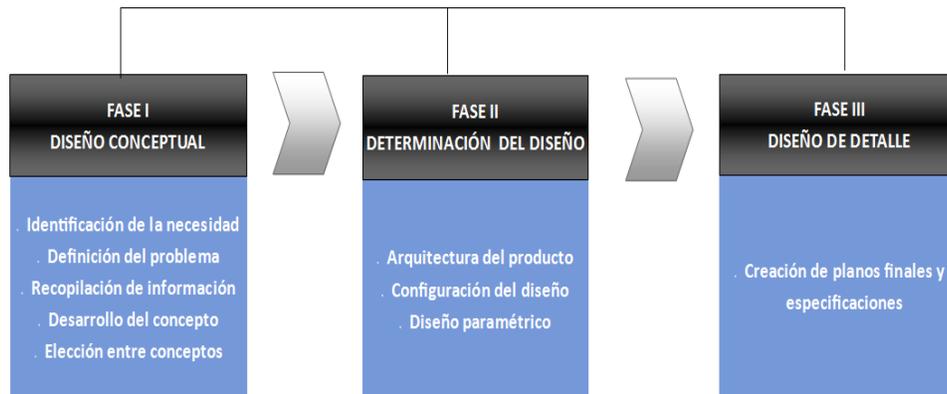


FIGURA 1.3. El proceso de diseño en sus 3 fases primarias.

1.2 ANTECEDENTES

A continuación se presentan los antecedentes del proyecto, desde su nacimiento, su planeación; pasando por las bases teóricas en que basa su funcionamiento el vehículo desarrollado. Además se resumen las actividades que precedieron a las realizadas para este trabajo y de las cuales el autor de la tesis no formó parte.

1.2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

Este proyecto tiene por esencia el desarrollo de un vehículo para transporte personal alternativo para su uso en distancias cortas. El constante crecimiento de la población y de las áreas urbanas ha incrementado la necesidad de transporte, el problema ya no implica solamente a quedar relegado en medio del tránsito, también la falta de aparcamiento cercano al destino final (casa, trabajo, escuela).

Se ha tratado de dar solución al problema a partir de modificaciones en las vías de comunicación, sin embargo, se ha perdido de vista otra posible solución que es la de optimizar los vehículos de transporte particulares, a partir del diseño de un sistema sustentable, ecológico, seguro y que ocupe mucho menor espacio.

Existen diversos tipos de transporte que actualmente se utilizan para recorrer distancias menores a 20 km, entre los cuales encontramos desde vehículos de tracción mecánica, vehículos con motor de combustión interna, eléctricos, etc. En las décadas recientes se ha buscado generar alternativas de vehículos eléctricos para el transporte personal, estas incluyen conceptos basados en motocicletas, triciclos y bicicletas que pueden ser impulsados por sistemas híbridos (motor de combustión-motor eléctrico, impulso humano-motor eléctrico) o bien ser totalmente eléctricos, por otra parte en años recientes, concretamente en la última década una nueva generación de concepto de vehículo eléctrico ha tomado una creciente relevancia.

Estos vehículos denominados algunas veces como *“self balancing vehicles”*, son completamente eléctricos y basan su funcionamiento en el principio de control del péndulo invertido, estos vehículos resultan ser bastante compactos, algunos no más grandes que una silla y pudiendo ser utilizados dentro de edificios y oficinas. El caso de mayor éxito es el *“Segway Personal Transporter”*, lo que ha impulsado que compañías automotrices y universidades de todo el mundo desarrollen sus propios conceptos de vehículos basados en esta tecnología.

Considerando las necesidades ambientales y sociales que afectan a todas las áreas urbanas en crecimiento, y a partir de la convicción de trabajar en el diseño de un producto, que además proporcione un servicio aportando alternativas que permitan solucionar necesidades reales, se dio inicio al proyecto llamado:

“Vehículo Eléctrico de Péndulo Invertido (VEPI)”.

Este proyecto nació a partir de la iniciativa de los estudiantes de Maestría en Ingeniería Mecatrónica, Ricardo Vázquez Leyva y Alfredo Mariscal Castillo; cuyo interés por desarrollar un sistema de control de péndulo invertido los llevo a considerar la aplicación de este sistema a un sistema de transporte alternativo para Ciudad Universitaria y tomar el proyecto como tema de titulación, el proyecto tiene grandes posibilidades de éxito considerando que no se ha desarrollado un vehículo de estas características en la UNAM y que además esta plataforma tecnológica ofrece la posibilidad de desarrollar productos con un buen número de mejoras e incremento de funciones.

Tomando en cuenta la dimensión que un proyecto como este implica, fue necesario dividir en dos etapas el desarrollo del vehículo, las cuales se describen enseguida:

- La *Primera Etapa* del proyecto se basó en el desarrollo y prueba del sistema de control ya que este es la parte medular del proyecto. En esta etapa se trabajó con prototipos a escala, la experiencia adquirida en ellos permitió el avance hacia la segunda etapa de desarrollo.
- La *Segunda Etapa* del proyecto a la cual se integró el autor de esta tesis, se concentró en el diseño de un prototipo a escala natural y totalmente funcional, desde el diseño de concepto hasta su manufactura y pruebas de funcionamiento.

1.2.2 PRINCIPIO BÁSICO DEL PÉNDULO INVERTIDO

Para la mayoría nos es fácil reconocer la forma básica de un péndulo común, como el de un reloj antiguo, una masa que pende de una delgada barra y describe un movimiento curvo oscilatorio. Ahora consideremos que la masa se encuentra en la parte más alta y conectada a una base por medio de la barra, tenemos un péndulo invertido, ver Figura 1.4; un sistema inestable por naturaleza ya que la masa superior siempre tendera a moverse hacia delante o hacia atrás por efecto de la gravedad.

El péndulo invertido es un problema de control clásico, es muy conocido por su excelente analogía para el diseño de controladores, por ejemplo: de vibraciones en las plataformas para el lanzamiento de un cohete, estabilización de grúas, edificaciones, robótica y sobre todo para aplicaciones didácticas, por ser un excelente medio de comprobación y evaluación de las diferentes metodologías de control, tanto en simulación como en la planta real.

Un problema clásico del control automático es el mantener en posición vertical la masa superior (m), controlando el movimiento de la masa inferior (M), desplazándola en la misma dirección en que m se desplaza, de esta forma se logra recuperar la vertical y el sistema se estabiliza. Es el mismo principio que usamos al tratar de balancear una varilla sobre nuestra mano.

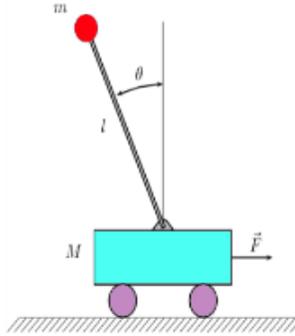


FIGURA 1.4. Representación de un sistema de control de péndulo invertido.

El Péndulo Invertido es un sistema mecánico inestable en lazo abierto. El más común es el que está conformado por un péndulo montado sobre un carro impulsado por un actuador que se mueve libremente a lo largo de un eje y una barra que pende de él, pero también los hay del tipo rotacional, de doble articulación en un plano inclinado y otros. El objetivo a alcanzar es mantener el péndulo en posición vertical tanto como sea posible y tener control sobre la posición del carro. El sistema puede ser modelado como un sistema lineal considerando que las desviaciones angulares ($\Delta\theta$) del péndulo son muy pequeñas.

1.2.3 ACTIVIDADES DE LA PRIMERA ETAPA DEL PROYECTO

Las actividades realizadas durante la primera etapa del proyecto estuvieron enfocadas principalmente en el desarrollo del sistema de un controlador de péndulo invertido; adicionalmente se realizaron actividades relacionadas con la primera fase del proceso de diseño (ver Figura 1.3). Dentro de estas actividades quedó definido el problema y se lograron identificar las necesidades o requerimientos de los posibles usuarios; se realizó una búsqueda de información relacionada con el funcionamiento de algunos vehículos eléctricos que basan su funcionamiento en el principio del péndulo invertido. Finalmente se realizaron algunas propuestas de conceptos de diseño para el VEPI.

1.2.3.1 SISTEMA DE CONTROL DESARROLLADO

A continuación se presenta un resumen con las principales características del sistema de control desarrollado, para mayor información el lector puede consultar la referencia [6].

Existen dos estados en los que el vehículo de péndulo invertido puede operar: en reposo y movimiento. Para lograr una posición en reposo, el vehículo tiene que moverse en la misma dirección y sentido con una velocidad controlada tal que compense el desplazamiento angular generado por el péndulo con respecto a un valor de referencia de cero. Si no existiera este movimiento compensatorio, el péndulo rompería su posición vertical y su estabilidad hasta caer.

El control electrónico identifica el ángulo que tiene el vehículo haciendo muestras cada intervalo diferencial de tiempo con la ayuda de un acelerómetro. Dicho elemento (acelerómetro) es un sensor inercial que entrega una señal analógica proporcional al ángulo en que se encuentra estando en reposo o en movimiento rectilíneo uniforme, es decir: al no experimentar aceleraciones.

Cuando la lógica de control detecta ángulos mayores a su tolerancia, activa señales de control que se reflejan en la actuación de motores que corrigen el error de la señal de control con respecto a su referencia para lograr estabilizar al sistema. Para generar un estado de movimiento sólo se cambia el valor de referencia haciéndolo diferente a cero.

Los primeros prototipos experimentales de un tamaño no mayor que un pequeño vehículo a control remoto; fueron construidos con la finalidad de probar el funcionamiento del sistema de control. En la Figura 1.5 se pueden observar

fotografías de los primeros prototipos experimentales. Las pruebas de funcionamiento del sistema de control fueron exitosas, logrando estabilizar a uno de los prototipos. Las experiencias adquiridas determinaron la decisión de aplicar el controlador a un prototipo de mayor tamaño.



FIGURA 1.5. Primeros prototipos de prueba.

1.2.3.2 IDENTIFICACIÓN DE NECESIDADES Y PRIMEROS CONCEPTOS DE DISEÑO

Parte de la Primera Etapa del proyecto, fue identificar los gustos y necesidades de los usuarios. Para ello se realizó un estudio para recabar información directamente de personas mediante encuestas y entrevistas.; los resultados completos y la forma en que fueron obtenidos se pueden consultar en la referencia [7]. La información relacionada con el uso del Segway proporcionada por las personas encuestadas, se dividió en tres categorías como se aprecia en la Figura 1.6; dentro de cada categoría se muestran algunos de los aspectos señalados por los encuestados.



FIGURA 1.6. Aspectos relacionados con el diseño del producto señalados por los usuarios encuestados.

A partir de la información recabada de los usuarios, se definieron las necesidades que se esperaba cubriera un sistema de transporte similar al Segway. Estas se redactaron en forma de enunciados y se jerarquizaron de acuerdo con su importancia (Tabla 1.1). La escala de jerarquía se define del 1 al 5 siendo 1 poco relevante y 5 muy relevante.

Con base en las necesidades identificadas se generaron las primeras propuestas de concepto. En la Figura 1.7a se muestra una propuesta que contemplaba un diseño similar a una silla de ruedas; las ideas que se integraron en este concepto fueron la de un manejo vía dos joysticks que controlarían tanto giros como el avance, un asiento abatible que permitiera al usuario operar de pie el vehículo, así como la asignación de un espacio publicitario en la parte posterior del respaldo.

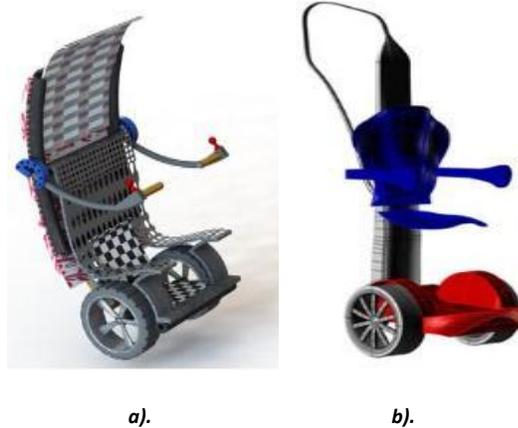


FIGURA 1.7. Primeras propuestas de concepto.

La segunda propuesta de concepto, ver Figura 1.7b; las ideas aportadas al concepto integraban un diseño de una plataforma y columna en la cual se montaban el asiento y respaldo, la característica del asiento además de ser ergonómico es que permitiría al usuario elegir entre tres posiciones, sentado, parado o semi-sentado; al abatir el asiento. El tipo de operación era idéntico al de la primera propuesta y también se destinaba un pequeño espacio publicitario en la parte trasera.

Núm.	ENUNCIADO	Imp.
1	El vehículo debe ser ecológico.	5
2	Su uso no demandará un gran esfuerzo.	4
3	El vehículo será económico.	3
4	Ofrecerá comodidad.	4
5	Acceso a espacios reducidos.	5
6	El vehículo es novedoso.	3
7	Será fácil de manejar.	4
8	Debe ser seguro.	5
9	Podrá ser operado sentado o de pie.	2
10	El vehículo es incluyente.	2
11	Podría protegerte del clima.	2
12	Permitirá un manejo suave.	3
13	Debe tener una velocidad adecuada.	3

TABLA 1.1. Resumen de las necesidades identificadas en la primera etapa del proyecto.

1.3 SEGUNDA ETAPA DEL PROYECTO

Concluida la primera etapa del proyecto, con el desarrollo e implementación del control de estabilidad satisfactoriamente y con la idea de que este se podía aplicar a un prototipo de mayor tamaño el proyecto avanzó a la Segunda Etapa.

La meta para la segunda etapa fue crear y desarrollar un concepto de vehículo que pudiera ser probado mediante un prototipo construido a escala natural y probar su funcionamiento.

Esto involucró una mayor carga de trabajo y una diversificación en las tareas de diseño (mecánica, eléctrica, electrónica, control, industrial), por lo que para conseguir llegar a la meta con resultados de calidad, fue primordial una buena planificación y organización. En los siguientes apartados se expone como fueron divididas las actividades de trabajo, así como el proceso de desarrollo seguido.

1.3.1 DIVISIÓN DEL VEPI EN MÓDULOS

Debido a que el prototipo a desarrollar lo conformarían diferentes sistemas (mecánicos, eléctricos, electrónicos), se tomó la decisión de dividir al VEPI en diferentes módulos. Esto con la finalidad de poder trabajar en forma más eficiente, al desarrollar cada módulo en forma paralela. Se definieron 4 módulos véase la Figura 1.8, con base en los sub-sistemas que le permiten al vehículo funcionar adecuadamente. Las tareas a desarrollar por cada uno de estos módulos fueron:

- *Módulo mecánico.* Diseñar y manufacturar las estructuras y elementos mecánicos que integran al prototipo. Seleccionar y evaluar los medios de transmisión de potencia y tracción adecuados.
- *Módulo electrónica y control.* Elaboración y adaptación del circuito de control, diseño de los circuitos de potencia, ajustes al sistema de control.
- *Módulo eléctrico.* Selección de motores y baterías.
- *Módulo de operación.* Diseñar el sistema que le permita al usuario controlar el movimiento del vehículo, selección de componentes e implementación.

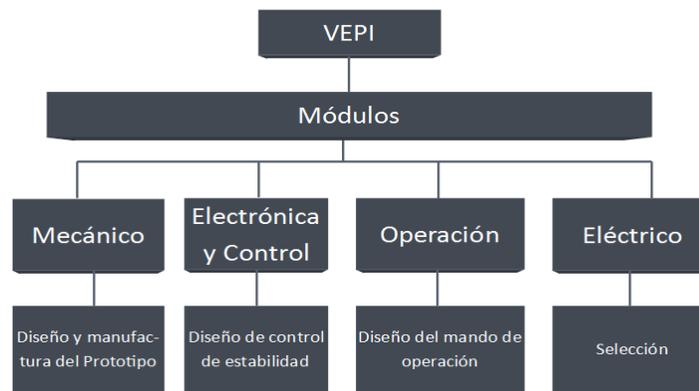


FIGURA 1.8 Módulos de diseño del vehículo.

1.3.2 EQUIPO DE TRABAJO

Para el desarrollo de cada módulo se formaron equipos de trabajo multidisciplinarios integrados por estudiantes de nivel licenciatura y maestría, todos ellos bajo la dirección del Dr. Vicente Borja Ramírez. A continuación se hace mención de las personas involucradas en el desarrollo de cada módulo:

Módulo mecánico

- Alfredo Mariscal Castillo (Estudiante de maestría en Ingeniería Mecatrónica, UNAM).
- Hugo César Vargas Osorio (Estudiante de Ingeniería Mecánica, UNAM).
- Alfonso Gonzales Figueroa (Estudiante de Diseño Industrial, UNAM).

Módulos de electrónica, control y operación

- Ricardo Vázquez Leyva (Estudiante de maestría en Ingeniería Mecatrónica, UNAM).
- Ingrid Iraní Ibarra Romero (Estudiante de Ingeniería Mecatrónica, UNAM).

1.3.3 FORMA DE TRABAJO

Con las tareas particulares de trabajo ya asignadas a cada equipo, se planeó el desarrollo de cada módulo en forma paralela, Figura 1.9; de esta forma se acortaría el tiempo necesario para desarrollar al prototipo y se además el trabajo en forma paralela permite que un módulo pueda ser probado en forma independiente y no esperar hasta que se tenga completo el prototipo.

Se establecieron reuniones periódicas con todos los integrantes del proyecto con la finalidad de revisar avances, compartir experiencias e información que pudiera ser de utilidad para el desarrollo del proyecto.

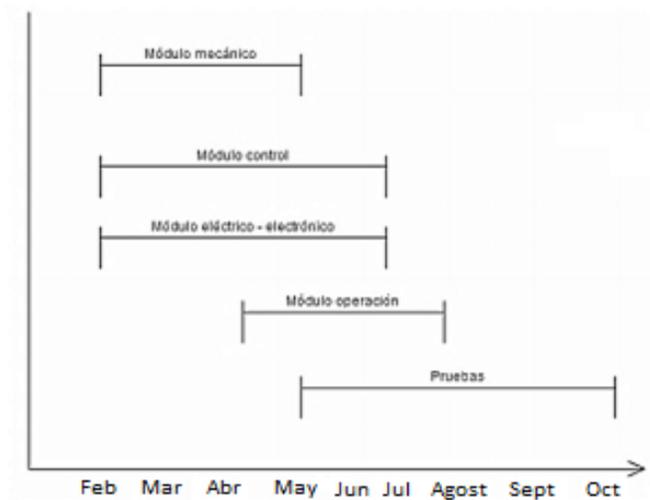


FIGURA 1.9. Plan de trabajo en forma simultanea o paralela.

1.3.4 ESTRUCTURA DE TRABAJO

El desarrollo de cada uno de los módulos que integran al VEPI, consistió en una serie de actividades con una cierta metodología. En particular en este documento se reportan las actividades involucradas con el desarrollo del módulo mecánico, para lo cual se tomó como base la metodología de diseño descrita en la sección 1.1.2 de este capítulo.

Las actividades, en las que intervino directamente el autor de esta tesis fueron:

- *Búsqueda de información complementaria*
- *Desarrollo y selección del concepto de diseño*
- *Definición de la arquitectura*
- *Diseño y selección de partes y componentes*

- *Evaluación de elementos estructurales del vehículo por medio del AEF*
- *Análisis teórico de la dinámica del vehículo*
- *Generación de planos y documentación para manufactura*
- *Manufactura de las partes y componentes*
- *Pruebas de funcionamiento con el prototipo*

En los capítulos subsecuentes de este documento se irán detallando cada una de estas actividades, en cuanto orden en que estas actividades fueron realizadas, se siguieron los pasos del método de diseño descrito en la Figura 1.3. La correlación entre las actividades realizadas y las fases del proceso de diseño se muestran en la Figura 1.10.

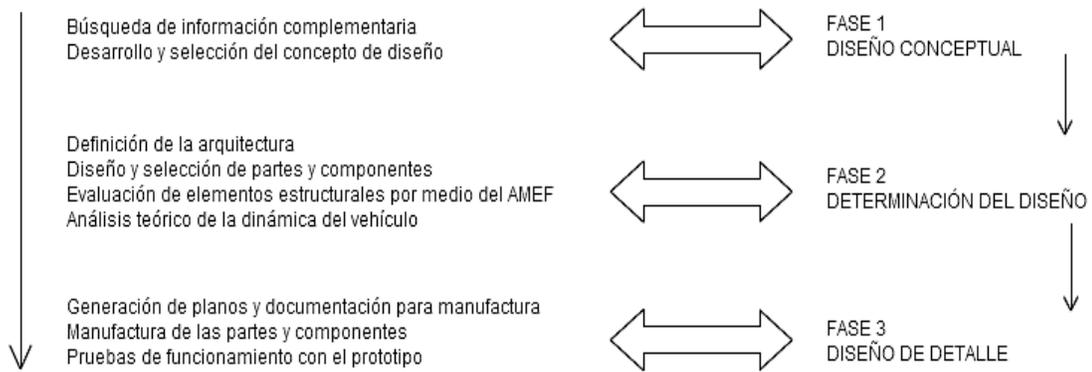


FIGURA 1.10. Estructura de las actividades realizadas para el desarrollo del módulo mecánico.

CAPÍTULO 2

DISEÑO CONCEPTUAL

En la primera etapa del proyecto se lograron avances en el diseño conceptual del VEPI, como ya se mencionó en el capítulo anterior quedaron definidos los requerimientos y necesidades, además de que se obtuvo información acerca del funcionamiento de otros prototipos similares. Asimismo se obtuvieron dos propuestas de concepto, sin embargo se consideró que se debía completar la información recabada; para entonces realizar un nuevo desarrollo del concepto, tomando en cuenta también las ideas aportadas por los primeros conceptos generados (Cap. 1.2.3.2). En este capítulo se relata cómo se generaron nuevas opciones de concepto, su evaluación y selección del concepto final.

2.1 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA

La búsqueda de información debe ser una actividad constante durante el proceso de desarrollo de cualquier producto. Se buscó información acerca de otros medios de transporte que se basaran en la misma tecnología de auto-balanceo, además de información que se enfocara en aspectos legales en cuanto al uso en vías públicas de estos vehículos. Asimismo se buscaron normas que regularan el uso adecuado y seguro por parte de los usuarios.

2.1.1 VEHÍCULOS AFÍNES

Considerando que Segway es quien lidera el mercado de este sector del transporte personal, es natural que se realice un comparativo con estos vehículos, esto permite adoptar las mejores características y convertir las deficiencias en oportunidades de éxito para nuestro producto.

Durante la búsqueda de información principalmente a través de la red se encontraron vehículos que además del Segway, basan su funcionamiento y operación en sistemas de péndulo invertido. La mayoría son modelos conceptuales nada a nivel de producción; los vehículos más desarrollados son prototipos beta o pre-series de compañías automotrices como *GM*, *Honda* y *Toyota*, así como algunas compañías creadas a partir del desarrollo de estos vehículos; tal es el caso de *Ryno Motors* [8,9,10,11,12,13].

Indagando acerca del funcionamiento y desempeño de éstos, se realizó un comparativo entre los vehículos de péndulo invertido existentes en el mercado o con miras a su próxima incorporación al mercado. La información fue obtenida de los sitios web de cada empresa y sólo se puede considerar como una referencia ya que no existe certeza alguna de que realmente cumplan al 100% con lo que se dice en estos sitios.

En la Tabla 2.1; se muestra resumida la información recabada por vehículo, las primeras columnas muestran el nombre del vehículo y la empresa que lo desarrolla, las siguientes 4 columnas resumen el desempeño y versatilidad en el manejo de cada uno. Enseguida se tiene la velocidad máxima de operación y su autonomía. Después se tiene una medición cualitativa del nivel de confort que podría ofrecer cada uno; con base en la percepción personal, que se tiene al observar la postura adoptada por las personas al conducir estos vehículos. Por último en qué nivel del ciclo de vida se encuentra cada uno.

Como se aprecia, cada uno ofrece ventajas y desventajas, que pueden ser oportunidades en el desarrollo de un producto competitivo; pero se debe tener en claro que las características de cada uno están enfocadas de acuerdo al servicio que pueden ofrecer. Los vehículos 1, 2, 3 y 6 están diseñados para recorridos largos en vías públicas, con uno o dos pasajeros máximo; los vehículos 4 y 5 se diseñaron para ofrecer movilidad dentro de lugares de trabajo como oficinas; el vehículo 7 es el único que ofrece movilidad para discapacitados o personas de la tercera edad.

Se pueden establecer 3 categorías, de acuerdo al servicio que brindan:

- La primera son los vehículos para transporte y/o recreación.
- La segunda vehículos de movilidad laboral.
- Tercera vehículos para personas con limitaciones físicas de movilidad.

	NOMBRE	EMPRESA	Movimiento de avance	Giros y vueltas	Medio de control	Postura de operación	Velocidad [Km/h]	Autonomía [Km]	Confort	Nivel
	1. SEGWAY PT	SEGWAY INC.	Adelante-atrás	Giro sobre su eje y vueltas	Cuerpo y manubrio	Pie	20	10	Medio	Ventas
	2. PUMA	GM-SEGWAY	Adelante-atrás	Giro sobre su eje y vueltas	Timón-masa desplazable	Sentado	50	20	Alto	Desarrollo
	3. RYNO	RYNO MOTORS	Adelante	Zigzag	Manubrio	Sentado	32	32	Medio	Lanzamiento
	4. U-3X	HONDA	Adelante-atrás y lateralmente	Giro sobre su eje y vueltas	Cuerpo	Sentado	5	-	Medio	Desarrollo
	5. WINGLET	TOYOTA	Adelante-atrás	Giro sobre su eje y vueltas	Cuerpo	Sentado-Pie	6	10	Bajo	Lanzamiento
	6. Self Balancing Unicycle (SBU)	FOCUS DESIGN SIGNS	Adelante	Zigzag	Cuerpo	Sentado-Pie	16	20	Bajo	Ventas
	7. I-BOT	INDEPENDENCE TECHNOLOGY	Adelante-atrás	Giro sobre su eje y vueltas	Joysticks y control remoto	Sentado	-	-	Alto	Ventas limitadas

TABLA 2.1. Comparativo de vehículos afines.

2.1.2 NORMAS DE TRÁNSITO APLICABLES

No existe en México ninguna regulación que impida o limite el uso o circulación de este tipo de vehículos en espacios públicos. Esta aseveración se refuerza en la página de internet de “Amemoving México”, empresa dedicada a la renta y venta de soluciones alternativas de transporte [14].

Los únicos artículos del reglamento de tránsito referentes a vehículos de transporte personal son el 11, 29 y 30; los cuales hablan sobre todo de las preferencias sobre el tránsito de ciclistas y motociclistas, las señales y normas de seguridad que deben seguir así como de los espacios donde se prohíbe su circulación.

2.1.3 USO Y SEGURIDAD

Con la salida al mercado de los primeros Segway, el modelo de negocios se basó en el uso de estos vehículos dentro de sitios cerrados como aeropuertos, museos, universidades, centros comerciales así como en sitios de trabajo como grandes almacenes e industria, el uso por parte de propietarios particulares supone poder viajar por cualquier vía secundaria de tránsito incluso sobre aceras, pero el alto costo que implica adquirir un Segway (alrededor de 6,750 U.S.D) ha limitado la proliferación de estos vehículos en las calles.

Por otra parte estos vehículos han encontrado un nicho en el sector servicios, donde empresas turísticas adquieren éstos para ofrecer servicios de renta y recorridos turísticos o empresariales, otro de sus principales clientes son las empresas de seguridad pública o privada y oficinas de correo y mensajería.

Otro aspecto importante que va de la mano con el uso de estos vehículos son las cuestiones de seguridad, como en cualquier otro medio de transporte los accidentes son inevitables, en el caso del Segway la mayoría de los accidentes son causados por un uso inadecuado y falta de entrenamiento en su operación, los accidentes se tratan por lo regular de colisiones con otros peatones, autos, arboles etc.; pudiendo ocasionar serias lesiones a los usuarios. En algunas ciudades estadounidenses y europeas se ha prohibido explícitamente el uso de estos vehículos en vías públicas por motivos de seguridad a pesar de no estar restringido su uso por reglamentos de tránsito.

Se buscó una reglamentación que estableciera algún tipo de norma para el uso adecuado y seguro de estos vehículos, lo único que se encontró fue un estudio realizado por la “Asociación General De Aseguradoras Alemanas” a través de la *Unfallforschung der Versicherer* (centro de investigación de accidentes viales); para evaluar los riesgos a la seguridad y salud de los usuarios del Segway. El estudio analiza las consecuencias de colisión en dos eventos; el primero es la colisión contra un peatón y el segundo un impacto contra un automóvil compacto. Asimismo analiza el desempeño durante la conducción del Segway; véase la Figura 2.1. El estudio es parte de una revisión a los nuevos sistemas de transporte y puede ser consultado en la página web de la asociación [15,16].

En cuanto a las pruebas de conducción, el estudio destaca que [15]:

- El manejo en pendientes de hasta 20% en el asfalto, así como en grava; sin problemas.
- El paso por bordillos (altura de 110mm) no maniobrable.
- La conducción con pérdida de presión de neumáticos sin problema.
- La evasión de obstáculos repentinos no es satisfactoria.
- El frenado y manejo en superficies con bajos coeficientes de fricción ($\mu = 0,4$, $\mu = 0,12$) sin problemas.
- Las distancias de parada en el frenado de emergencia a 20 [km/h] fueron entre 4.7-5.7 [m] considerablemente más prolongadas que en una bicicleta.



FIGURA 2.1. Fotografías de las pruebas realizadas para determinar la seguridad del Segway, tomadas de [15].

De las pruebas de impacto, el estudio proporciona los siguientes datos:

Colisión Segway-Peatón

1. Serias lesiones de cráneo por choque de cabezas.
2. Serias lesiones en piernas y tobillos al peatón por el impacto con la parte inferior del Segway.
3. Serias lesiones en cabeza, cuello y tórax en ambos individuos por impacto con el suelo.

Las recomendaciones realizadas a partir del estudio son las siguientes:

- Sólo debe ser utilizado en el tráfico después de entrenamiento especial.
- Debe ser utilizado en primer lugar sobre carriles para bicicleta. El uso en carreteras no se recomienda.
- Se permite conducir a una velocidad máxima de 6 km/h en zonas peatonales y por senderos. Una velocidad de 9 Km/h fuera de estas zonas y mayores a 15 Km/h bajo la responsabilidad del usuario.
- Técnicamente los Segways han de ser tratados como bicicletas (deben contar con luz, campanilla, direccionales)
- Cada Segway-Rider, debe llevar un casco de protección.

2.2 DESARROLLO DEL CONCEPTO

En la generación de nuevos conceptos se siguieron una serie de pasos y técnicas que ayudasen a obtener buenos resultados. Se comenzó por dividir el problema en entidades más pequeñas y manejables. Esta división confirió una visión más clara de todos los problemas que envuelven al vehículo. Para generar alternativas de solución, técnicas de pensamiento creativo fueron de gran ayuda. Tras seleccionar a las alternativas de solución, fueron evaluadas mediante la construcción de un prototipo de prueba de conceptos.

2.2.1 DIVISIÓN DEL PROBLEMA

Un producto viéndolo como un sistema técnico puede ser dividido en varias formas dependiendo el criterio con que se realice. La forma más inmediata de hacerlo es de acuerdo con su constitución física, ensambles, sub-ensambles, partes, componentes. Otra forma de hacerlo es atendiendo a las funciones que realizara el producto o también de acuerdo a las acciones que el usuario tenga que realizar para operar o controlar al sistema.

En este caso, se comenzó por dividir al vehículo en forma física, de acuerdo a la noción general que se tenía entonces de su configuración física y de lo que podría llegar a ser. La Figura 2.2; muestra un diagrama con la descomposición física del producto, sólo se integran las partes y componentes elementales del vehículo.



FIGURA 2.2. Diagrama de bloques de la descomposición física del vehículo.

Para dividir al producto de acuerdo con las *funciones o tareas que realiza*, se consideró que la mayoría de las funciones que realiza un vehículo están relacionadas con el movimiento, de esta forma se pueden dividir en *avanzar, retroceder, dar vuelta y frenar*. La forma en que sean realizadas, depende directamente del sistema de control que se ha diseñado.

De acuerdo con las *acciones que el usuario realizara* para poder utilizar el producto, se pueden dividir en acciones de *ascenso, manejo y descenso* del vehículo. A partir de la división es fácil reconocer los principales problemas a los que hay que dar solución. Éstos se pueden puntualizar por medio de enunciados interrogativos que les den un carácter más directo. Algunas de las cuestiones se enlistan a continuación:

- ¿Cómo se producirá el movimiento de avance y retroceso?
- ¿Cómo se lograra dar vueltas y giros?
- ¿Cuál será la acción de frenado?
- ¿Qué deberá hacer el usuario para subir al vehículo?
- ¿Qué movimientos se tendrá que realizar para operar los controles?
- ¿Sobre qué superficies tendrá apoyo el usuario?
- ¿Cómo se descenderá del vehículo?
- ¿Qué postura adoptara el usuario para conducir?

Número	Especificación	Unidad	Rango
1	Masa total	Kg	30<m<40
2	Velocidad Máxima	km/h	15<v<20
3	Capacidad total de carga	Kg	50<m<100
4	Altura máxima de asiento	cm	60<h<80
5	Distancia de separación al suelo	cm	10<h<30
6	Largo de la base de plataforma	cm	30< l <45
7	Ancho de la base de plataforma	cm	30< a <40
8	Distancia máxima entre llantas	cm	<70
9	Radio mínimo de viraje	cm	r >= 50
10	Temperatura de operación	°C	0<T<40
11	Autonomía de baterías	Km	10<A<50
12	Medida de rines	in	10<r<20
13	Ancho de llantas	cm	5<a<10
14	Tiempo máximo en ciclo de carga	hr	2<t<8
15	Máxima Pendiente a subir	%	10<p<20
16	Potencia de motores	W	400<P<800
17	Par de motores	Nm	T>=2.5
18	Voltaje de operación de motores	V	24
19	Costo unitario	\$	15,000<C<25,000

TABLA 2.2. Especificaciones generales.

Tras recolectar y analizar la información; se realizó una lista de las primeras especificaciones (véase la Tabla 2.2). Los valores que se asignaron a cada especificación de acuerdo a la información que se tenía entonces. Conforme avanzó el proyecto la lista de especificaciones se fue ampliando y detallando como se verá en los Capítulos siguientes.

2.2.2 GENERACIÓN DE ALTERNATIVAS

Tras evaluar los problemas que involucra el diseño, tocó el turno de la generación de soluciones concretas. Para ello se echó mano de herramientas auxiliares en el proceso creativo como la realización de propuestas en bocetos a mano alzada o en CAD. También se llevaron a cabo dos sesiones de *Brainstorming* o lluvia de ideas, la primera con todos los miembros del equipo y después una segunda con otros compañeros. Durante cada sesión se pidió a los integrantes exponer sus ideas con respecto a cada uno de los problemas que involucra el diseño del vehículo. Cada participante aportó sus ideas libremente ya fuera en forma verbal o escrita en un papel.

Terminada cada sesión, se organizó toda la información en grupos. Estos grupos de ideas fueron reducidos mediante mecanismos de evaluación como las matrices de selección; donde se evaluaron las soluciones contra los objetivos y requerimientos del vehículo (Tabla 1.1). En la Tabla 2.3 se muestra la evaluación de las soluciones propuestas para los medios de control del vehículo. La evaluación se realizó para cada uno de los sub-problemas; descartando todas las ideas que no se ajustaran a los objetivos perseguidos.

SOLUCIONES	Practicidad	Seguridad	Respuesta óptima	Manejabilidad	Control adecuado de velocidad	Totales
Joysticks	1	3	1	3	3	27
Botones	1	3	1	1	3	9
Panel touch	3	3	1	3	3	81
Controles de puño	3	3	1	1	3	27
Smart-phone	3	1	1	3	3	27

TABLA 2.3. Evaluación para las soluciones al sub-problema de los medios para controlar el vehículo. Si la solución cumple el criterio se le asignó un 3, de lo contrario un 1; el total es el múltiplo de las puntuaciones.

2.2.3 SELECCIÓN DE ALTERNATIVAS

Con un conjunto de soluciones más reducido, se pudo realizar una segunda evaluación de las ideas aportadas, en la lluvia de ideas. Por medio de un cuadro de soluciones donde los sub-problemas se colocaron en los renglones y en las columnas las alternativas de solución correspondientes (ver la Tabla 2.4). No necesariamente se tiene que discriminar todas las alternativas, se puede seleccionar una alternativa y ser combinada con alguna de las soluciones de otro sub-problema. Esto permite generar varias opciones de solución al problema principal [3].

	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Postura de manejo	Parado	Sentado	Semi sentado	Parado/sentado
Tipo de mando	Manubrio lateral	Manubrio al frente desplegable	Manubrio al frente a la altura del pecho	Sin manubrio
Forma de ascenso-descenso	Frontal	Trasera	Lateral	Libre
Superficies de apoyo	Plataforma	Estribos	-	-
Tipo de estructura	Plegable	Desmontable	Fija	-
Medio de manejo	Joysticks	Panel touch	Smart-phone/bluetooth	Mecánico
Acción de avance-retroceso	Inclinación del peso del usuario	Masa móvil	Variar ángulo de equilibrio vía sistema de control	-

TABLA 2.4. Soluciones propuestas.

Con las soluciones propuestas, se formaron combinaciones; que resultaron en las posibles configuraciones que podría adoptar el vehículo. Obviamente no todas las combinaciones eran viables, sólo se seleccionaron 8 configuraciones que, el equipo considero factibles de una evaluación posterior. La descripción de cada una de las configuraciones se da en el Tabla 2.5 y en la Figura 2.3 se muestran algunos bocetos que representan algunas de las configuraciones propuestas.

<i>Configuración 1.</i> Postura semi-sentado, manubrio al frente desplegable, forma de ascenso frontal, estribos, estructura fija, panel touch y acción de avance vía sistema de control.	<i>Configuración 2.</i> Postura semi-sentado, manubrio lateral, forma de ascenso frontal, estribos, estructura fija, panel touch y acción de avance vía sistema de control.
<i>Configuración 3.</i> Postura semi-sentado, manubrio al frente fijo, forma de ascenso trasera, estribos, estructura fija, panel touch y acción de avance vía sistema de control.	<i>Configuración 4.</i> Postura semi-sentado, sin manubrio, forma de ascenso libre, estribos, estructura fija, panel touch y acción de avance vía sistema de control.
<i>Configuración 5.</i> Postura parado/sentado, manubrio lateral, forma de ascenso frontal, plataforma, estructura plegable, joysticks y acción de avance vía sistema de control.	<i>Configuración 6.</i> Postura parado/sentado, manubrio frontal, forma de ascenso lateral, plataforma, estructura plegable, panel touch y acción de avance vía sistema de control.
<i>Configuración 7.</i> Postura parado/sentado, manubrio lateral, forma de ascenso frontal, plataforma, estructura desmontable, manejo mecánico acción de avance por inclinación del peso del usuario.	<i>Configuración 8.</i> Postura parado/sentado, manubrio frontal, forma de ascenso lateral, plataforma, estructura plegable, manejo mecánico acción de avance por masa móvil.

TABLA 2.5. Descripción de las configuraciones propuestas.

Las configuraciones fueron después evaluadas, antes de elegir alguna como la definitiva. La forma en que se discriminó entre ellas, fue confrontando cada una con aquellos factores que podrían poner en riesgo el desarrollo del proyecto; como lo es la falta de recursos o acceso limitado a ellos; el tiempo que se disponía para terminar el proyecto; la complejidad de los procesos de manufactura que requieran el diseño; el número de componentes y partes a fabricar o adquirir. Esto redujo el conjunto a aquellas opciones que realmente podrían ser concretadas con los recursos (tiempo, dinero, personal) disponibles del proyecto.

Cada configuración se evaluó asignando un valor de 1, si cumplía las consideraciones hechas; y cero si no era así. Las consideraciones más importantes fueron; que la configuración elegida fuera fácil de construir; que el diseño de sus

componentes fuera simple; que se ajustara con el tiempo límite para concluir el proyecto y con los recursos económicos disponibles. De acuerdo a la Tabla 2.6; las configuraciones que cumplen con todas las consideraciones fueron la 1, 2, 3 y 4.

Configuración	Manufactura sencilla	Simplicidad de los componentes	Tiempo de desarrollo	Costo moderado	Totales
1	1	1	1	1	4
2	1	1	1	1	4
3	1	1	1	1	4
4	1	1	1	1	4
5	1	0	0	1	2
6	1	0	0	1	2
7	1	1	0	0	2
8	1	1	0	0	2

TABLA 2.6. Matriz de exclusión de configuraciones. Se asignó un 1 si era factible y 0 si no lo era; el total es la suma de los puntajes.

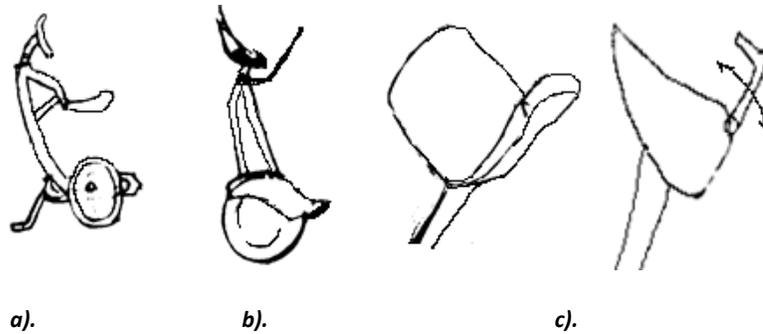


FIGURA 2.3. Bocetos de algunas configuraciones propuestas. a) boceto correspondiente a la configuración 3; b) configuración 2; c) mando frontal desplegable para las configuración 1.

2.3 PROTOTIPO DE PRUEBA DE CONCEPTOS

En la fase de diseño conceptual se puede hacer uso de prototipos como una herramienta de apoyo en la evaluación y prueba del diseño. En este contexto el prototipo de prueba de concepto es un modelo físico que permite demostrar que el concepto cumple con las necesidades del cliente y con las especificaciones correspondientes [17].

2.3.1 PLANEACIÓN

Tras evaluar y seleccionar las configuraciones de concepto de diseño; aún no se podía tomar una decisión para elegir el concepto final; debido a que no se contaba con la información suficiente. Fue entonces que se tomó la decisión de construir un prototipo de prueba de conceptos que, para fines más prácticos se le nombró como “*Simulador*”. El simulador se planeó para poder representar funciones y sensaciones que el usuario pudiera experimentar al manejar el vehículo. Un punto importante era que se realizaran pruebas con personas, por lo que se construyó a escala natural. Otro beneficio de construir el simulador, es que se pudieron tomar distancias y mediciones antropométricas que ayudaron en la definición de las dimensiones finales.

Los puntos críticos probados con el Simulador fueron:

- Forma de ascenso y descenso (practicidad)
- Tipo de mando de operación (sensación de seguridad y practicidad)
- Forma del asiento y respaldo (confort)
- Altura y posición del asiento, estribos y mando (ergonomía)
- Sensación de seguridad con cada configuración

2.3.2 CONSTRUCCIÓN

Para la construcción del simulador se tomó como base, un banco de madera; sobre el cual se realizaron modificaciones que le permitieran tener un movimiento de balanceo hacia el frente y atrás. El movimiento simulaba la sensación que una persona experimenta en un vehículo de auto-balanceo. Además se trató de proporcionarle al prototipo un movimiento de avance y retroceso.

Para simular el movimiento de balanceo se construyó una base compuesta por un marco de madera cuyos laterales son atravesados por un tubo de acero ver Figura 2.4. Ambos extremos del tubo son fijados a dos soportes y de esta manera el marco de madera puede girar alrededor del tubo. En las esquinas del marco se colocaron resortes con el objeto de suavizar y restringir el movimiento de cabeceo. Al marco se fijó el banco de madera por lo que ahora todo el conjunto tenía movimiento (Figura 2.5). Por debajo del marco se tiene otra base con 4 ruedas y ambas bases están conectadas por medio de los soportes donde se fijan los extremos del tubo.



FIGURA 2.4. Base del simulador.



FIGURA 2.5. Unión entre el banco de madera y la base.

Por otra parte se elaboró un asiento tallado en espuma de Poliuretano. El asiento tiene la geometría y dimensiones para probar en él, la postura de semi-sentado. Además se le agregó un pequeño respaldo como se ve en la Figura 2.6.



FIGURA 2.6. Asiento y respaldo.

Se agregaron un par de ruedas de bicicleta en los costados del simulador; esto con la finalidad de tener una representación más completa del producto y restringir la forma en que las personas abordarían el simulador. Se añadió un estribo en la parte inferior frontal como soporte de los pies y apoyo en el ascenso y descenso del simulador, ver Figura 2.7. Con estos elementos quedó conformada la configuración base del simulador. Para probar las propuestas de diseño del mando de operación se fabricaron dos manubrios con tubo doblado. Dependiendo el concepto que se quisiera probar se montaba o desmontaba el tipo de manubrio.



FIGURA 2.7. Estribos y uno de los mandos hechos de tubo doblado.

2.3.3 PRUEBAS Y RESULTADOS

Los detalles de cómo fueron realizadas las pruebas así como la encuesta realizada se pueden consultar en el Anexo D. La mayor parte de la información recabada, se documentó por medio de videos; esto con la intención de analizar con mayor detalle la forma en que las personas interactuaban con el simulador. Las pruebas no se realizaron con la finalidad de obtener datos puramente cuantitativos; nos interesaba más, conocer las opiniones y sugerencias que las personas nos hicieran ver. Por lo tanto se decidió aplicar una encuesta con preguntas abiertas para que cada persona se expresara libremente acerca de su experiencia con el simulador.

Tras las pruebas, la información obtenida se agrupó en tres categorías para evaluar cada configuración de concepto Figura 2.8. Estas tres categorías (seguridad, confort y practicidad), engloban en cada una la sensación que cada configuración les brindó a las personas encuestadas. En cuanto a la seguridad el 38% indicó sentirse seguros con la configuración 2 y el 29% de las personas con la configuración 1. Entre los comentarios más recurrentes en cuanto al por que se sentían seguras con estas configuraciones; decían que necesitaban que el manubrio o mando fuera una estructura fija a la que se pudieran sujetar a la vez que se maneje el vehículo; pero por otra parte, en caso de un accidente necesitaban poder librarse del vehículo, por lo que cualquier objeto que se interpusiera los limitaría. De acuerdo con esto la mayoría optó por la configuración 2 en donde se tiene el manubrio a los costados y el frente totalmente descubierto para poder colocar un pie al frente o levantarse.

En cuanto al confort las opiniones se repartieron casi por igual en todas las configuraciones, la mayoría de las personas no tuvo problemas con el asiento propuesto y la postura de semi-sentado; salvo algunas, que dijeron sentirse inseguras al estar un poco inclinadas hacia el frente; por otra parte la mayoría no consideraron la necesidad de un respaldo para viajar distancias cortas.

La practicidad se debe entender, como la facilidad con la que podían subir y bajar del simulador y la utilidad de tener el mando al frente, lateral o sin él. De acuerdo con los resultados, la configuración 2 resultó ser la más práctica; según los comentarios hechos por las personas el tener el mando en los costados y poderlo mover como un volante, les resultaba muy intuitivo hablando de la conducción; además el poder sentarse en el simulador como si fuera en una silla o un banco les resulto de lo más sencillo.

En cuanto a las distancias y alturas del asiento, manubrios y apoya pies, se fueron ajustando durante la construcción del simulador; probando la posición de cada elemento con personas sobre todo de baja estatura (hombres y mujeres de entre 1.45 y 1.55 m). Fue así que se lograron aproximar las medidas generales que el prototipo experimental debería tener una vez seleccionado el concepto de diseño.

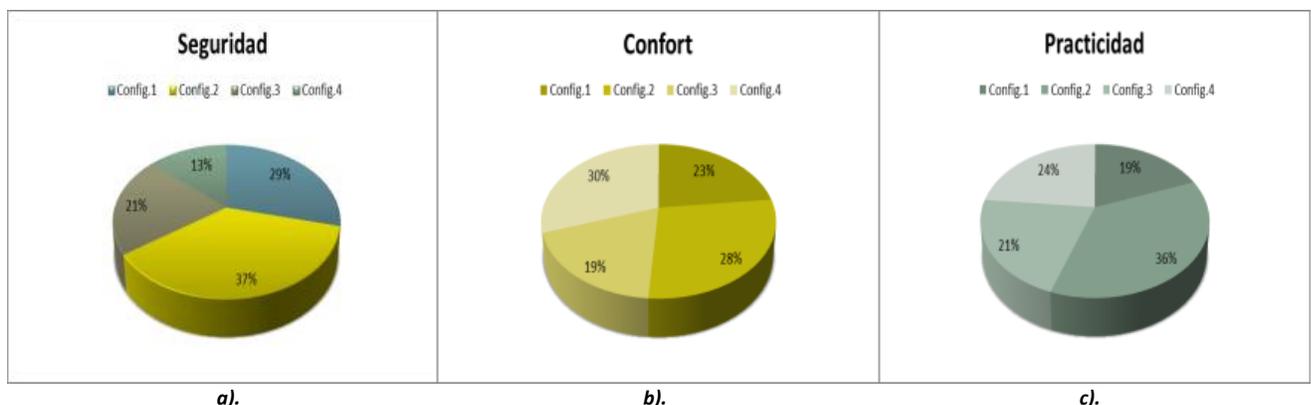


FIGURA 2.8. Gráficas de pastel con los resultados obtenidos por configuración para: a). seguridad; b). confort; c). practicidad.

2.4 SELECCIÓN DEL CONCEPTO

Para seleccionar la configuración que será la base para continuar con el diseño del vehículo; se empleó una sencilla matriz de selección donde cada configuración se compara contra los criterios de selección elegidos (Tabla 2.7).

El hecho de que alguna de las configuraciones cumpla con algunos de los criterios se basó en la información generada a partir de las pruebas con el simulador. La decisión final se tomó en base a la matriz de selección y al juicio de todos los miembros del equipo. De acuerdo con la matriz de selección de la Tabla 2.7; la configuración elegida fue la número 2; que recordando es aquella en la que se opta por una postura de semi-sentado, manubrio lateral, forma de ascenso frontal, estribos, estructura fija, panel *touch* y acción de avance vía sistema de control.

Aunque esta configuración se tomó como base para continuar con el diseño, algunas de las características como el uso de controles tipo *touch* en la operación del vehículo o la acción de avance y retroceso vía sistema de control son aun susceptibles de modificaciones o de ser remplazados por alguna otra solución, siempre y cuando sea la que mejor se adapte a los requerimientos del usuario y sea fácil de implementar.

	Confort	Seguridad	Ergonomía	Ascenso/ descenso	Control / manejo	Total
Config. 1	1	3	1	3	1	9
Config. 2	3	3	1	3	3	81
Config. 3	1	1	1	3	1	3
Config. 4	3	1	1	3	1	9

TABLA 2.7. Matriz de selección del concepto. Se asignó un 3, si cumplía con el objetivo y un 1 si no; el total es el múltiplo de los puntajes.

CAPÍTULO 3

DETERMINACIÓN DEL DISEÑO

3.1 ARQUITECTURA DEL VEHÍCULO

Para dar comienzo a esta etapa de diseño es necesario establecer la arquitectura del producto. Esta tarea implicó reconocer aquellas partes o elementos que trabajan juntos para realizar una función en particular y agruparlos dentro de sub-ensambles. De manera que el producto se dividió en varios sub-ensambles, que de alguna forma tienen que interactuar entre sí para que el producto sea funcional. Esta interacción se da a través de interfaces, las cuales son elementos críticos ya que un mal diseño o implementación las convierte en fuente de fallas y problemas en el desempeño del producto.

En cuanto al tipo de arquitectura seleccionada para el diseño, ésta quedó establecida como modular, dado que el prototipo es para la realización de pruebas el utilizar una arquitectura modular tiene como beneficios el que cada módulo pueda ser probado en forma independiente sin tener que esperar a tener completamente integrado el producto. Fue así que efectivamente cada módulo se probó por separado y al final se realizaron las pruebas con el vehículo terminado para verificar la correcta integración de todos los módulos como se verá en el Capítulo 6.

Desde el trabajo realizado en la fase conceptual se pudieron identificar algunos de los sub-ensambles que conforman los bloques básicos que constituyen al vehículo. En aquella fase fueron aproximados mediante la identificación de los sub-problemas que ayudaron en la generación del concepto (Capítulo 2.2.1). Para establecer la arquitectura de nuestro producto se siguieron los siguientes pasos [18].

- Se creó un diagrama esquemático del producto.
- Se agruparon los elementos comunes de acuerdo a su función.
- Se creó una disposición geométrica aproximada de cada elemento dentro del vehículo.
- Por último se identificaron las interacciones entre los sub-ensambles.

3.1.1 DEFINICIÓN DE SUB-ENSAMBLES

Con el conocimiento que se tenía sobre como el vehículo funcionara y de los componentes necesarios para llevar a cabo dichas funciones se elaboró un diagrama esquemático del producto. El diagrama se puede ver en la Figura 3.1; en él son representados todos los componentes por medio de bloques los cuales están interconectados por medio de líneas. Cada una representa el intercambio de información, fuerza o energía entre componentes. De acuerdo con la función que deben realizar estos componentes son agrupados dentro de sub-ensambles a los cuales se les ha dado un nombre en específico de acuerdo con la función o propósito de cada uno.

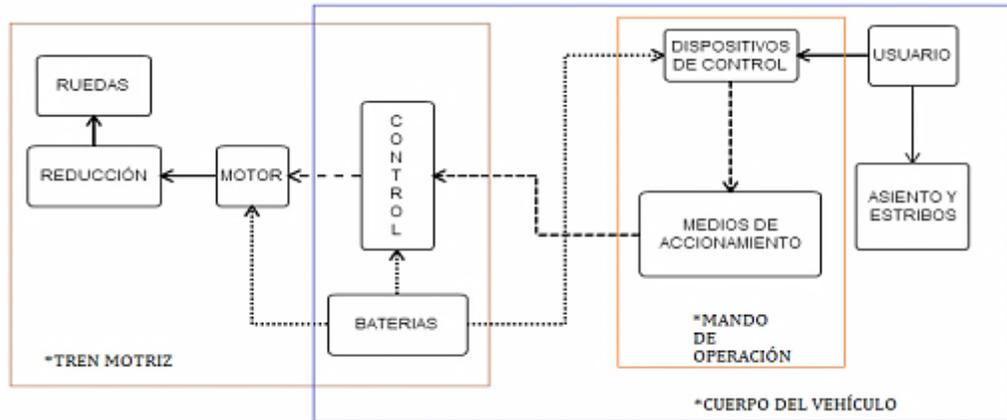


FIGURA 3.1. Diagrama esquemático del prototipo, las líneas que conectan a los elementos representan el flujo de fuerza (línea gruesa), señales (línea discontinua), energía (línea punteada).

Los sub-ensambles que componen al VEPI son:

1. *Tren Motriz.* Su función básica es proporcionar movimiento al vehículo sobre alguna superficie rígida. Sus componentes primarios son: motores, reductor de velocidad y ruedas.
2. *Cuerpo del Vehículo.* Su propósito es dar alojamiento y soporte al usuario así como al mando de operación. Su componentes base son: una estructura, asiento, estribos o apoya pies.
3. *Mando de Operación.* Su propósito es el brindarle al usuario los medios para controlar el avance y dirección del vehículo. Sus componentes primarios son: dispositivos de control (puede ser una palanca, joystick, botón) y de los medios de accionamiento (electrónicos o electromecánicos).

El siguiente paso consistió en acomodar geoméricamente a cada sub-ensamble; es decir colocarlos en un sitio de acuerdo con las restricciones físicas impuestas al producto. El tren motriz al ser el módulo encargado proporcionar movimiento sobre alguna superficie rígida tiene que estar necesariamente en la parte inferior. Encima de éste se tendrá el cuerpo del vehículo y en la parte superior al mando de operación a la altura justa para que todo usuario pueda alcanzar los controles.

La ubicación en particular, de las baterías y los circuitos podía estar dentro del Tren Motriz o bien en el cuerpo del vehículo. En cuanto a las baterías se optó por colocarlas dentro de la estructura del Tren Motriz; la decisión se tomó en base a que la ubicación del centro de gravedad del vehículo es un factor imprescindible debido a que antes de intentar estabilizar el vehículo aplicando un controlador, éste debe estar en equilibrio estático. Los motores y baterías al ser los componentes de mayor peso en el vehículo, su posición es determinante para lograr que el vehículo se pueda mantener en equilibrio sobre sus dos ruedas.

En el diagrama de la Figura 3.2 se observa el arreglo geométrico entre los motores y baterías, el eje de equilibrio pasa por el centro de los ejes en donde se montan la ruedas, si se quiere equilibrar al conjunto la suma de momentos alrededor de este eje debe ser cero; al tener una masa similar los motores y baterías deben colocarse aproximadamente a la misma distancia respecto del eje de equilibrio. La ubicación exacta de estos elementos así como la ubicación del centro de gravedad del vehículo se describen más adelante en el Capítulo 5.

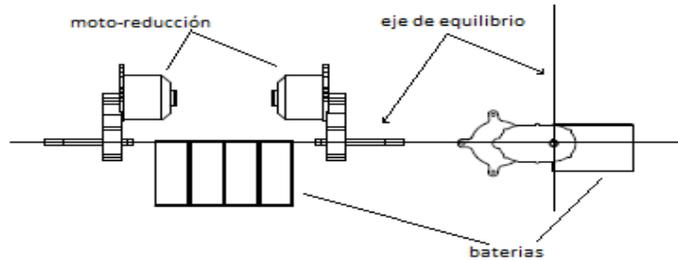


FIGURA 3.2 Diagrama que muestra la ubicación de las baterías y motores respecto de un eje de equilibrio estático. A la izquierda se muestra la vista superior del arreglo y a la derecha la vista lateral.

La ubicación de los circuitos de control y potencia también fueron ubicados dentro del tren motriz, de esta forma se facilitan las conexiones eléctricas entre los circuitos y los motores así como entre baterías, motores y circuitos.

3.1.2 INTERACCIÓN ENTRE SUB-ENSAMBLES

El último paso en el establecimiento de la arquitectura del producto es el modelar las interacciones entre sub-ensambles y describir las características de desempeño de cada sub-ensamble. Se pueden identificar cuatro tipos de interacciones [19]: espacial, energética, informática y material. En particular sólo se atendieron las interacciones del tipo espacial y energética; ya que las interacciones del tipo información serán definidas por los miembros del equipo encargados del módulo de control, electrónico, eléctrico y software.

La principal interacción entre el tren motriz y el cuerpo del vehículo se ubica en las uniones de las estructuras de ambos sub-ensambles. Estas uniones son del tipo desmontable por lo que se emplearon medios de sujeción roscados (tornillos, tuercas). Ahora bien por medio de las uniones se transmitirán cargas y esfuerzos además de vibraciones provocadas por los motores e irregularidades en la superficie de rodamiento. Las uniones tienen que ser capaces de mantener su rigidez ante las cargas y la fuerza de apriete aún bajo vibraciones por lo que se utilizaron elementos auto-blocantes o de seguridad como tuercas con insertos de Nylon.

Las interacciones del tipo energética se presentan entre el mando y tren motriz, es necesario suministrar corriente eléctrica a motores, circuitos y componentes en el mando de operación. El medio de transmisión son cables eléctricos, los cuales necesitan una ruta por donde se puedan conectar desde las baterías hasta donde se encuentre el componente que requiera corriente. Por lo tanto se consideraron en el diseño de las estructuras, los espacios necesarios para que los cables eléctricos puedan pasar y ser fijados. En cuanto a los circuitos se tomó en cuenta que el calor que se desprende de ellos puede llegar a afectar su correcto funcionamiento. Para asegurar que los circuitos se mantengan a una temperatura adecuada se procuró montarlos en un sitio donde parte de ese calor sea disipado hacia el ambiente por medio del uso de disipadores de calor.

Para establecer adecuadamente las características de desempeño de cada sub-ensamble se elaboró un conjunto de requerimientos y especificaciones para cada uno. Estos requerimientos están relacionados con los que ya se definieron en función de las necesidades del usuario (Tabla 1.1); sólo que ahora se definieron acorde con la función específica de cada sub-ensamble.

Los requerimientos del Tren Motriz fueron definidos como:

- Dar soporte y alojamiento a todos los componentes del tren motriz
- Cuenta con tracción independiente en ambas ruedas

- Mantiene alineados los ejes de ambos motores aún bajo estado de cargas
- Tiene un reducido número de partes y será fácil de ensamblar
- Se acopla fácilmente con el cuerpo del vehículo
- Es ligero y resistente
- Es fácil de manufacturar evitando cualquier tipo de unión que provoque deformaciones térmicas en su estructura.
- Los motores proporcionan la potencia y par necesarios

Las Especificaciones del tren motriz se muestran en la Tabla 3.1

No.	ESPECIFICACIÓN	VALOR NOMINAL	TOLERANCIA	UNIDAD
A1	Dimensiones	400 X 400 X 200	+/- 50	mm
A2	Masa total	25	+ 5	Kg
A3	Carga máx. soportada	1300	+ 5	N
A4	Potencia	450	+/- 50	W
A5	Par	Por definir	*	Nm
A6	Velocidad	15	+/- 5	Km/h
A7	Altura del piso a base	100	+100	mm
A8	Diámetro de ruedas	20	+/- 5	in
A9	Distancia entre ruedas	650	+/- 50	mm

TABLA 3.1. Especificaciones del tren motriz

Los Requerimientos del Cuerpo del Vehículo se definieron como:

- Da soporte al usuario
- Cuenta con un par de estribos o apoya-pies
- Cuenta con un asiento ergonómico
- Aloja el mando de operación, asiento y estribos
- Proporciona comodidad y ergonomía
- Es ligero
- Permite un fácil ascenso y descenso del vehículo
- Mantiene alineado el centro de gravedad del usuario sobre una posición de equilibrio estático
- Proporciona seguridad al usuario
- Los estribos son ajustables a la altura del usuario

Las Especificaciones correspondientes se muestran en la Tabla 3.2.

No.	ESPECIFICACIÓN	VALOR NOMINAL	TOLERANCIA	UNIDAD
B1	Altura del asiento	650	+/- 50	mm
B2	Masa	5	+ 4	Kg
B3	Peso máx. soportable	1100	+/- 5	N
B4	Carga máx. en los estribos	750	+/- 50	N
B5	Ajuste de los estribos	2	*	Posición
B6	Distancia del asiento a los estribos	Por definir	*	mm
B7	Altura del mando	Por definir	*	mm

TABLA 3.2. Especificaciones del cuerpo del vehículo

En lo que se refiere al mando de operación no se establecieron un grupo de especificaciones concretas ya que hasta el momento de la redacción de este trabajo no se tiene totalmente definido como funcionara, por lo pronto sólo se tienen algunas propuestas y algunos componentes ya probados, para mayor información se puede consultar el Artículo de la referencia [20].

3.2 DISEÑO DE PARTES Y COMPONENTES

El diseño de configuración se relaciona con el establecimiento de la forma general y dimensiones de partes y componentes. Se pueden distinguir aquellas partes cuya función y manufactura son comunes y rutinarias por lo regular se les llama *partes estándar o comerciales* y las que debe ser totalmente diseñada y manufacturada para cumplir un propósito en particular llamadas *parte de propósito especial*. Un componente o ensamble es un conjunto de partes capaces de realizar una tarea específica, los *componentes estándar* o comerciales son por ejemplo motores eléctricos, cajas de transmisión, válvulas, bombas, compresores etc.

En esta sección se describen las partes y componentes estándar que fueron adquiridas y el diseño de las partes y componentes especiales que fueron necesarios para poder integrar al vehículo. El diseño y selección de partes y componentes estuvo restringido por aspectos como los materiales y procesos de manufactura disponibles y de los recursos con que cuenta el proyecto. Cabe mencionar que a este nivel las dimensiones y forma de las partes no se tomaron como las definitivas; sus dimensiones y tolerancias finales se definieron más adelante por medio de una evaluación y análisis del diseño. En este apartado sólo se mencionan los componentes mecánicos y electromecánicos del vehículo, los componentes eléctricos y electrónicos utilizados pueden consultarse en la referencia [6].

3.2.1 COMPONENTES ESTÁNDAR

Al inicio de la Segunda Etapa Del Proyecto fueron adquiridos un par de motores con caja de reducción incluida; 4 baterías recargables con un cargador de batería así como un par de llantas con rines de aluminio, Figura 3.3a. Estos artículos son vendidos como refacciones para scooter eléctricos y motocicletas eléctricas en la web; los motores incluían un soporte listo para ser montado en el chasis de un scooter. Para nuestro propósito estos soportes no eran los adecuados por lo que se tuvo que diseñar y manufacturar nuevos soportes.

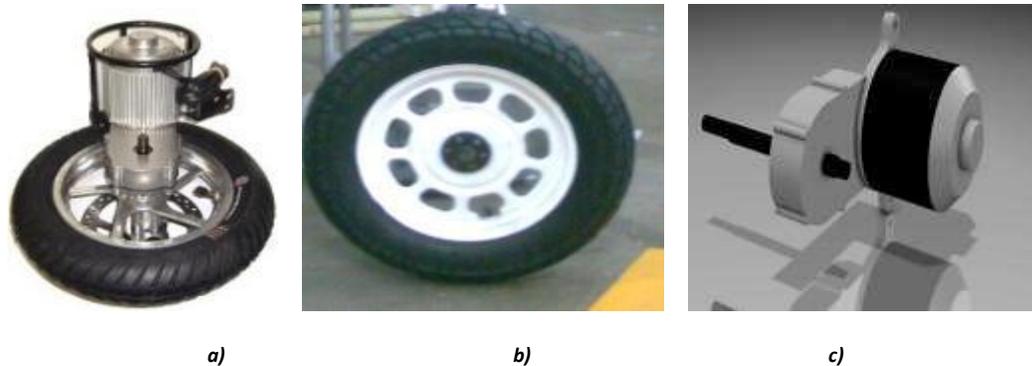


FIGURA 3.3. a) imagen del paquete adquirido de motor-reducción y ruedas. b) fotografía de los rines y llantas utilizadas en el prototipo final. c) modelo en CAD de un motor con reducción.

Para tener una referencia geométrica de los motores, reducciones y baterías se tomaron mediciones completas (dimensiones y peso) de cada componente y con ellas se elaboraron modelos 3D con el software CATIA V5; con el fin de tener una base de las partes y componentes en CAD del proyecto, en la Figura 3.3c se puede observar un modelo 3D de los motores adquiridos.

Debido a las pequeñas dimensiones en las llantas adquiridas con el paquete de los motores y reducciones y a que los rines presentaban fracturas en sitios de montaje, se optó por buscar nuevos neumáticos y rines. Se buscó en establecimientos dedicados al servicio de mantenimiento de motocicletas y *Scooters* eléctricos. Se encontraron un par de llantas con rines de segunda mano las cuales aunque contaban con las dimensiones idóneas, como se muestran en la Figura 3.3b; solamente los rines tuvieron que ser modificados y adaptados para poder ser montados en los ejes de los motores.

3.2.2 DISEÑO DE COMPONENTES Y PARTES ESPECÍFICOS

En el diseño de una parte o componente debe tenerse primero en cuenta la función que realizara o su propósito dentro del sub-ensamble. En segundo lugar deben revisarse las especificaciones del producto y en especial aquellas que estén relacionadas con el sub-ensamble al que pertenezca la pieza.

De acuerdo con el plan de trabajo mostrado en la Figura 1.9; los módulos mecánico y de control fueron los que arrancaron primero; entre el equipo se acordó que, el sub-ensamble en ser diseñado y fabricado primero del módulo mecánico; debía ser el tren motriz para poder realizar las primeras pruebas de potencia y control necesarias para el desarrollo del módulo de control y electrónica. Ya en la sección referente a la arquitectura del producto se mencionaron los principales componentes que integran al Tren Motriz, los componentes restantes tienen que ver con elementos estructurales y de montaje.

Como primer componente a diseñar se consideró a la estructura que da soporte y alojamiento a motores, reducciones, baterías, etc. De acuerdo con los requerimientos y especificaciones del Tren Motriz los motores deben quedar fijos en una posición tal que los ejes de ambos queden colineales. Con base en ello, se propuso el diseño de una estructura; compuesta de dos soportes laterales donde se monten los motores y conectadas por medio de tres barras en un arreglo triangular; con la finalidad de restringir cualquier movimiento relativo entre los dos soportes laterales.

Las restricciones espaciales y la configuración de los soportes laterales, están relacionadas con la interacción con los motores. Los motores tienen integrada una brida de montaje con tres barrenos, separados a 80 grados uno de otro como se observa en la Figura 3.4; por lo que los soportes laterales se diseñaron para tuvieran los mismos 3 barrenos en la posición correcta; además se dejó el espacio necesario para que el conjunto motor-reducción pueda ser montado sin obstrucciones.



FIGURA 3.4. Fotografía de la brida de montaje de los motores, donde se aprecia la ubicación de cada barreno.

Acordado diseñar esta estructura para el Tren Motriz, se realizaron modelos 3D de los soportes laterales, para establecer sus dimensiones y geometría, el modelo se construyó alrededor del modelo virtual que se tenía del motor-reducción. En la Figura 3.5, se observa el modelo con sus principales características geométricas (aberturas, barrenos y perfiles).

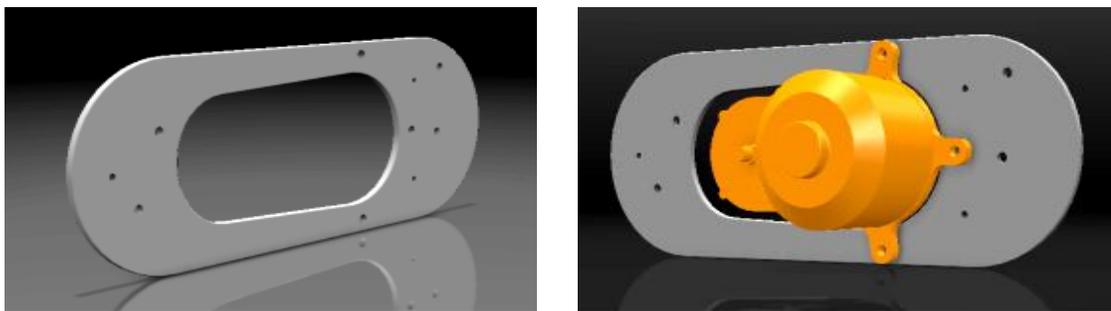


FIGURA 3.5. A la izquierda, modelo CAD del soporte lateral. A la derecha se muestra la ubicación del motor

Cada soporte cuenta con otros 3 barrenos en donde se fijan las tres barras diseñadas para que unan a ambos soportes con la alineación adecuada e impidiendo cualquier movimiento relativo entre un soporte y el otro. La longitud de cada barra depende del espacio que requieren las baterías y del ancho necesario para que el vehículo pase por cualquier puerta. La forma en que cada barra se fije a los soportes se determinó que debería ser por medio de uniones atornilladas; ya que el empleo de uniones soldadas puede provocar deformaciones térmicas y no podría garantizarse una buena alineación.

Para asegurar que cada barreno sea hecho en la posición exacta que le corresponde, la manufactura de cada soporte se planeó para que fuera hecha por algún proceso de Control Numérico (fresado, taladrado). El utilizar alguna máquina-herramienta de Control Numérico asegura que cada barreno sea hecho en las coordenadas correctas y al momento de ensamblar no existan problemas con la alineación de componentes. Los detalles de la manufactura de los soportes laterales se describen en el Capítulo 6.

Cuando fue definida la arquitectura del Tren Motriz las baterías fueron ubicadas en un sitio donde se guardara el equilibrio. Para montar físicamente las baterías y las tarjetas de circuitos impresos se necesita una plataforma. Ésta se diseñó para sujetarse a la estructura del tren motriz por la parte inferior. El diseño propuesto y el conjunto ensamblado en CAD se muestran en la Figura 3.6.

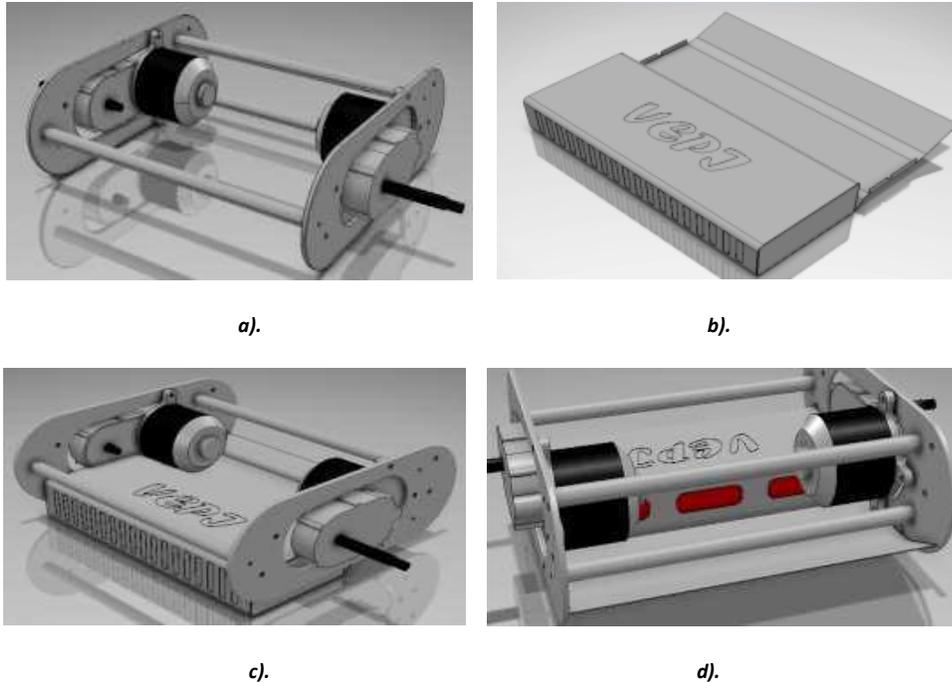


FIGURA 3.6. a). estructura del tren motriz; b). Plataforma para montar baterías y circuitos; c). d). Vistas del ensamble del tren motriz.

Para proporcionar movimiento al vehículo se necesita una adecuada transmisión de par, desde el motor hasta las ruedas. Los ejes a la salida de la reducción cuentan con una chaveta para el montaje de las ruedas; los rines que se adquirieron no contaban con el acoplamiento adecuado para montarse en la chaveta del eje. Para el correcto ensamble de las ruedas; se diseñó un buje con chavetero el cual se fijó en el hueco cilíndrico al centro de los rines. Su diseño implicó el cálculo de las dimensiones del diámetro externo para tener un ajuste de apriete con el agujero en los rines y el tamaño del diámetro interno para tener un ligero juego con el eje de los motores.

Otro componente que debe estar sujeto a los ejes son los *encoders*; estos componentes electromecánicos se encargan de registrar la posición y velocidad angular a la que gira cada eje. El encoder debe estar fijo a la estructura y dejar que gire su eje de salida. Se diseñó un acoplamiento rígido de manguito para acoplar el eje del encoder y el eje de los motores.

El siguiente componente a diseñar fue la estructura superior que da forma y soporte al sub-ensamble del cuerpo del vehículo. La estructura debe tener la forma adecuada para por un lado soportar las cargas a las que sea sometida, el peso del usuario por ejemplo, y por el otro para que se tenga lugar donde montar el asiento, estribos y el mando de operación.

Como la estructura del tren motriz se diseñó para ser lo suficientemente rígida y así mantener la alineación de los ejes. La estructura superior no requiere estar perfectamente alineada por lo que el uso de uniones soldadas en su construcción se pensó como una alternativa viable. Sus dimensiones básicas se restringieron para que su ancho máximo fuera menor o igual al ancho de la estructura del tren motriz; su altura máxima la necesaria para que una persona de baja estatura pueda alcanzar sin problema el asiento. La estructura superior se sujeta de los soportes laterales del tren motriz con uniones atornilladas.

Las propuestas hechas para determinar la forma y configuración de la estructura superior se muestran en la Figura 3.7a, 3.7b y 3.7c. Para su construcción se pensó desde el inicio en una estructura tubular unida por soldadura y fue así que se realizó el modelo final en CAD Figura 3.7d.

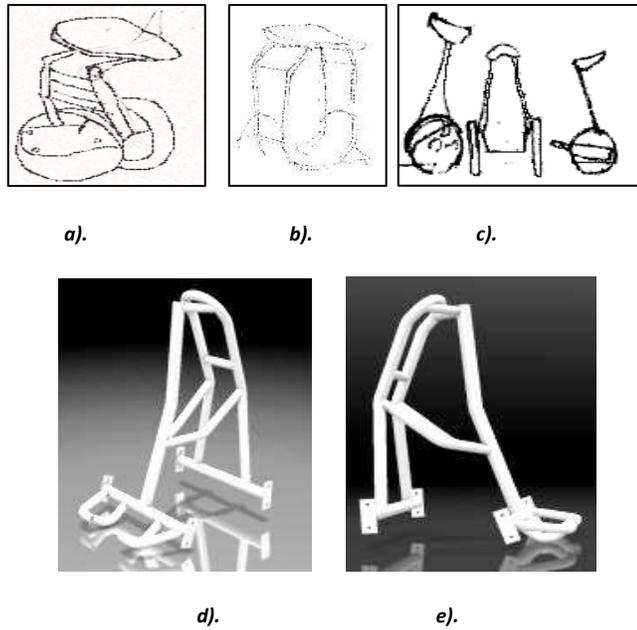


FIGURA 3.7. a), b), c); *propuestas en bocetos de la estructura; d) vista en isométrico del diseño final hecho en CAD; e) vista lateral del modelo.*

El diseño del asiento se mantuvo prácticamente igual al que se fabricó para el simulador en la etapa de prueba de conceptos. El asiento sólo requirió de una base para ser montado en la estructura superior.

El sub-ensamble del mando de operación al no estar totalmente definido sólo se diseñó un soporte tubular con la forma del manubrio lateral que se quiere implementar, ver la Figura 3.8; éste quedó por lo pronto fijo a la estructura superior y se le incorporaran unas empuñaduras con los paneles *touch* que se propone controlen el avance y retroceso del vehículo. En la Figura 3.9 se puede ver el modelo del prototipo ensamblado con todos sus componentes.



FIGURA 3.8. *Izquierda modelo del soporte tubular del mando de operación. Derecha imagen donde se muestran las empuñaduras con los paneles táctiles que se desean implementar.*



FIGURA 3.9. Modelo en CAD del prototipo completo.

3.2.3 SELECCIÓN PRELIMINAR DE MATERIALES

La selección de materiales tiene una estrecha relación con el proceso de diseño ya que finalmente para pasar de la idea, el boceto y los planos se necesita de un material que sea transformado mediante un proceso de manufactura para obtener la forma deseada. La selección de materiales involucra encontrar la mejor combinación entre los requerimientos del diseño y las propiedades de los materiales que pueden ser empleados [21].

Cada una de las piezas diseñadas, se pensaron para ajustarse a las dimensiones de materiales comerciales como barra, solera, placa o lámina. Por lo tanto la elección de los materiales no fue tan rigurosa; simplemente se consideró que el material elegido tuviera las propiedades físicas generales (densidad) y mecánicas, de acuerdo con el tipo de servicio y solicitaciones al que se someta a cada pieza.

En todo caso para definir por completo al material definitivo es necesario un paso adicional en el cual se evaluó si la parte construida con el material propuesto cumple con los requerimientos de diseño. En particular las partes y componentes estructurales fueron sometidas a un análisis de resistencia de materiales mediante el *Análisis Por Elementos Finitos*, como se describe en el Capítulo 4.

Los materiales definitivos empleados por pieza, pueden ser consultados en el Anexo B.

3.3 FACTORES HUMANOS Y ESTÉTICOS DEL VEHÍCULO

En la mayor parte de los productos no es suficiente el contar con un buen desempeño para atraer la atención del consumidor. La estética del producto así como la ergonomía le otorgan un valor agregado al producto al ser aspectos muy apreciados por los consumidores. El diseño industrial es la disciplina que se encarga de estos aspectos, éste se enfoca en la apariencia visual del producto así como la manera en que el consumidor interactúa con el producto. La aplicación de estos conceptos al diseño del vehículo se puede consultar en la referencia [22].

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS ESTRUCTURAL DEL DISEÑO

4.1 ANALISIS ESTRUCTURAL POR EL METODO DE ELEMENTOS FINITOS

El chasis del vehículo consta de dos estructuras principales, el tren motriz y una estructura superior. La estructura del tren motriz alberga a las baterías, circuitos, motores y reducciones así como a las ruedas que se montan sobre los ejes a la salida de la reducción de los motores. También sobre éste se monta la estructura superior; dadas estas circunstancias el tren motriz tiene que soportar importantes cargas tanto estáticas como dinámicas.

La rigidez de esta estructura es crucial para un óptimo desempeño del vehículo; ya que al no tener un sólo eje común a ambas ruedas, la estructura deberá mantener siempre alineados ambos ejes de los motores. Por otra parte la estructura superior tiene como principal objetivo el soportar sin problemas el peso de cualquier usuario dentro del rango de peso de diseño, aunque también estará sujeto a varias cargas estáticas y dinámicas, la rigidez en este elemento no es tan importante por lo que si se presentan pequeñas deformaciones elásticas no afectara en mayor grado el desempeño del vehículo.

Dadas estas condiciones se propuso analizar ambas estructuras por separado, como inicio se realizó un análisis completo al tren motriz considerando cargas estáticas en primer lugar y posteriormente cargas dinámicas. Para conocer el comportamiento del chasis ante diferentes estados de cargas, se creó un modelo de elementos finitos con ayuda del Software *ABAQUS 6.10* a partir de los modelos tridimensionales hechos anteriormente con *CATIA V5*.

En el caso de del tren motriz cualquier deformación plástica se considerara como una falla de la estructura, por lo tanto sólo se permitirán deformaciones dentro del rango elástico, el criterio de fluencia utilizado fue el de Von Mises, el cual afirma que la deformación plástica ocurre cuando la energía de deformación volumétrica supere al esfuerzo de cedencia del material [27]. Este criterio es aplicable a materiales dúctiles, homogéneos e isótropos, así como a cualquier estado de esfuerzos.

4.1.1 CONSIDERACIONES INICIALES DEL ANÁLISIS

La geometría del tren motriz fue importada al programa *ABAQUS 6.10* directamente de un archivo *CAT.produt*; realizado previamente con un factor de escalamiento de 0.001 a fin de tener todas las dimensiones en milímetros. Este archivo, ver Figura 4.1; incluye a la geometría base del tren motriz ensamblada con los 2 conjuntos motor-reducción. El programa emplea una nomenclatura específica para cada eje del sistema coordinado como u_1 u_2 y u_3 correspondientes a x,y, z.

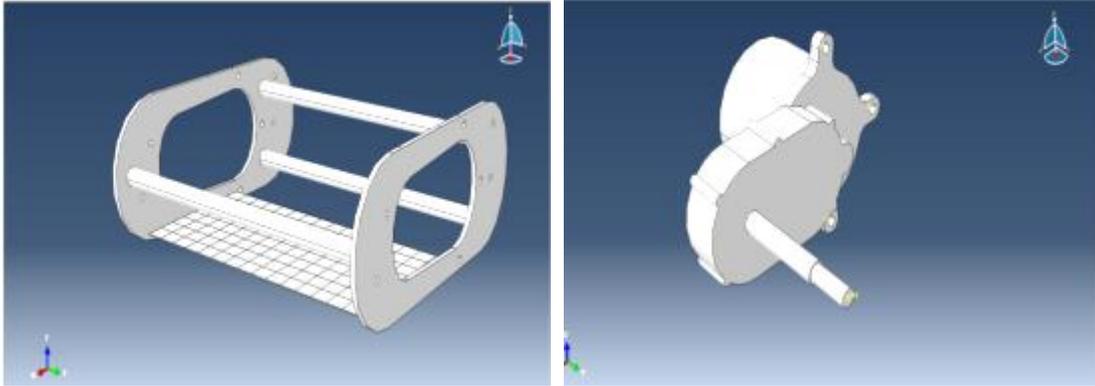


FIGURA 4.1. Modelos tridimensionales importados, de la estructura (izquierda) y motor-reducción (derecha).

En total se tienen 3 elementos tridimensionales, la estructura del tren motriz es el elemento a analizar por lo que se define dentro del programa como un elemento sólido tridimensional deformable. Por otro lado los dos conjuntos de motor reducción sólo se emplearán para simular las condiciones de frontera ya que las cargas y fuerzas de reacción se transmiten de los ejes hacia la estructura. Estos elementos se definieron como sólidos rígidos.

El ensamble de los elementos se muestra en la Figura 4.2, se aprecian la ubicación de los puntos de referencia asignados en cada eje y que servirán de referencia espacial una vez comenzado el análisis.

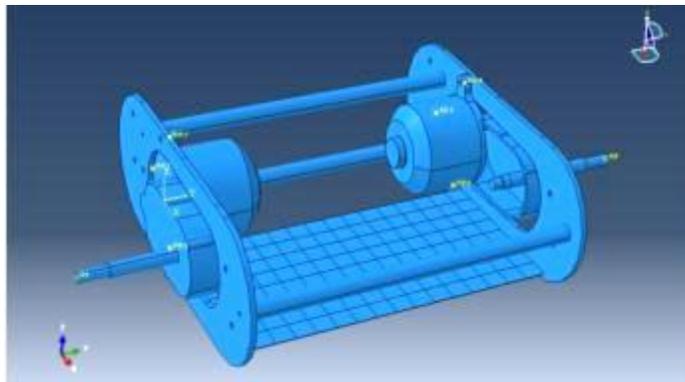


FIGURA 4.2. Ensamble del modelo.

El material seleccionado para la estructura del tren motriz es una *aleación de aluminio de la serie 6061 T6*, cuyas propiedades se muestran en la Tabla 4.1, estos valores corresponden a los datos encontrados en la literatura y hojas técnicas [28,29]; por lo que no se puede asegurar que correspondan con las propiedades reales del material adquirido, la única forma de estar seguro es realizar ensayos (tracción y compresión) con probetas hechas del mismo material, estas pruebas no se realizaron para este proyecto; así que se tomaron los valores mínimos de entre todos los datos encontrados referentes a esta aleación.

<i>Propiedad</i>	<i>Valor</i>
Densidad	2700 [Kg/m3]
Módulo de Young	68.9 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0.33
Esfuerzo de cedencia	276 [MPa] máx. 241 [MPa] min.

Tabla 4.1. Propiedades mecánicas del Aluminio-6061 T6.

Posteriormente fueron mallados todos los elementos, como se ve en la Figura 4.3.

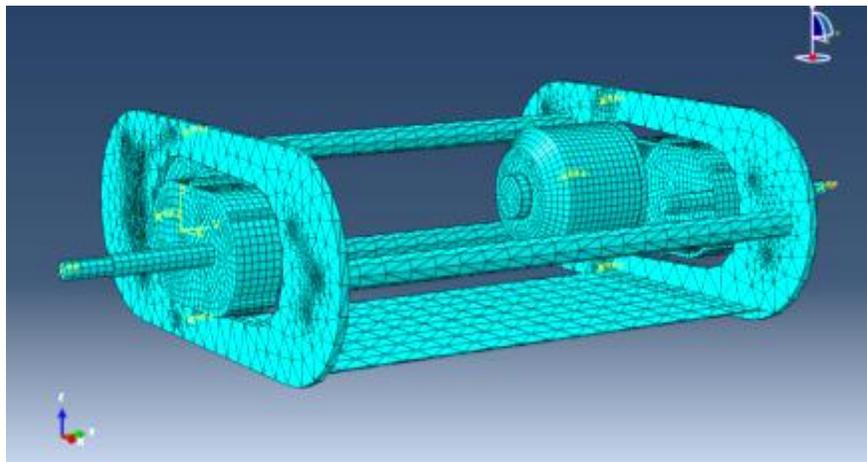


FIGURA 4.3. Modelo completamente mallado.

Por último se definieron las interacciones de la estructura con los motores, físicamente estos están fijados mediante tres pernos con la estructura, esta fijación se puede simular en el programa creando una interacción del tipo *Tie*; en la cual podemos seleccionar una región maestra en el sólido rígido y otra región esclava en el sólido deformable; las regiones

seleccionadas deberán estar directamente en contacto para este caso las regiones seleccionadas son los bordes de los barrenos en las caras de las placas que se encuentran en contacto como se ilustra en la Figura 4.4.

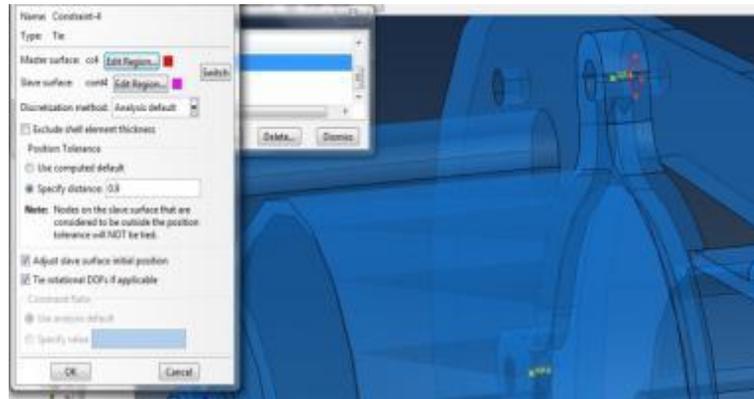


FIGURA 4.4. Definición de las regiones esclava-maestra en cada unión.

Propiamente las barras transversales que unen a las dos placas laterales están unidas por medio de tornillos, sin embargo en el modelo, estas uniones se consideraron como rígidas aunque un comportamiento más aproximado sería el de una unión semirrígida Figura 4.5.

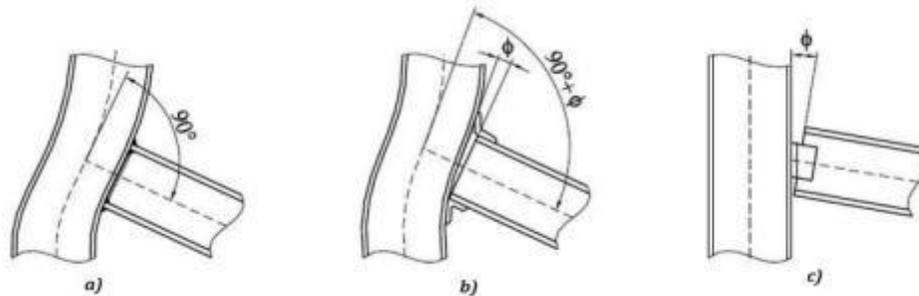


FIGURA 4.5. Tipos de unión: a) Unión rígida, b) unión semirrígida, c) unión flexible

4.1.2 APLICACIÓN DE CARGAS

A este modelo se le aplicaron todas las cargas; las cuales se deben al peso de las pilas, el peso de la estructura superior, el peso del usuario, los motores y el propio peso del tren motriz. La masa de las 4 pilas es de aproximadamente de 13 Kg la cual se distribuyó sobre los nodos resaltados como se aprecia en la Figura 4.6; sobre la lámina inferior del tren motriz.

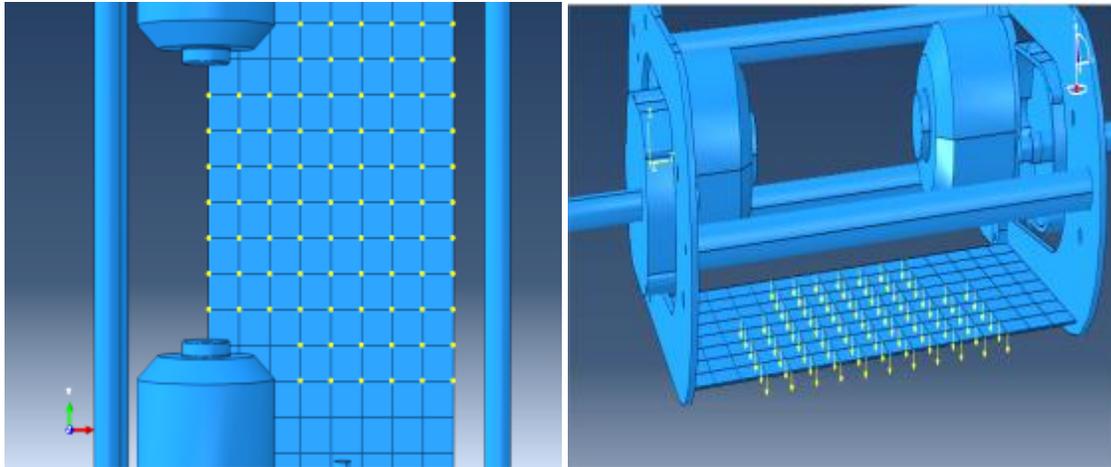


FIGURA 4.6. Distribucion del peso de las baterias en la base.

La masa de la estructura superior es de aproximadamente de 5 Kg que sumado a una masa del usuario de 100 Kg, se reparten sobre 8 pernos en los soportes laterales del tren motriz que es en donde se unen ambas estructuras, ver Figura 4.7; la presión que ejerce este peso sobre la cara inferior de cada barreno es de unos 1.8 [MPa].

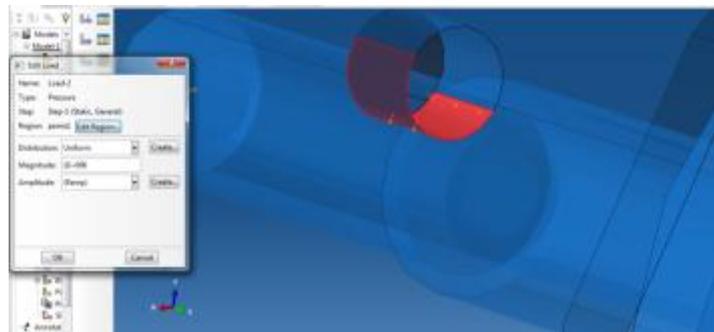


FIGURA 4.7. Region sobre la que se apoya cada perno.

Por último el peso de la propia estructura del tren motriz es determinado por la densidad del aluminio introducida en las propiedades del material y automáticamente se asignó como una fuerza de gravedad. Para ambos motores se asignó previamente una masa de unos 6.5 Kg por cada uno.

En este punto se tenían suficientes elementos para correr la simulación, pero antes era necesario establecer un coeficiente de seguridad que diera 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 esta estructura sea ligera y que funcione adecuadamente bajo condiciones normales de carga y de impacto. Por lo tanto el coeficiente de seguridad se estableció como:

$$C_s = \frac{241MPa}{\sigma_{max\ diseño}} = 2$$

Por lo tanto el esfuerzo máximo permisible será $\sigma_{max\ diseño} \leq 120.5 MPa$.

4.2 ANÁLISIS DEL MODELO CON CARGAS ESTÁTICAS

Los casos a analizados fueron:

1. Carga axial
2. Cargas combinadas

El primer caso de análisis corresponde a determinar el estado de esfuerzos en la estructura bajo todas las cargas estáticas (peso de todos los componentes y del usuario). Las condiciones de frontera se definieron como un encastramiento (restricción de todos los grados de libertad) en ambos ejes considerando una posición de reposo en la que ambas ruedas se apoyan sobre una superficie horizontal, Figura 4.8.

Los resultados obtenidos muestran (Figura 4.9); que el esfuerzo maximo presente en la estructura no rebasa los 18 MPa presentando deformaciones o desplazamientos por debajo de 1 mm. La magnitud de la carga total aplicada es de unos 1325 N, según los resultados en cada eje se tiene una fuerza de reacción de 663 N las cuales concuerdan con la carga aplicada.

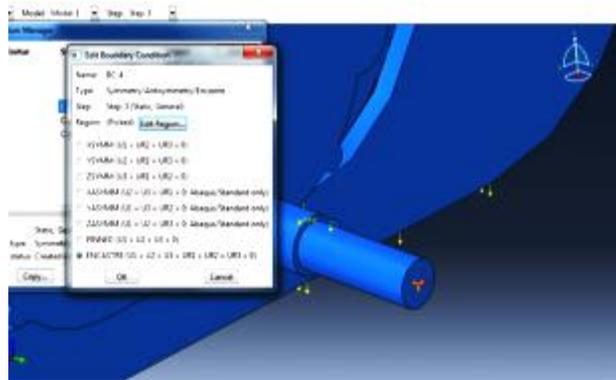


FIGURA 4.8. Definición de las condiciones de frontera en el programa

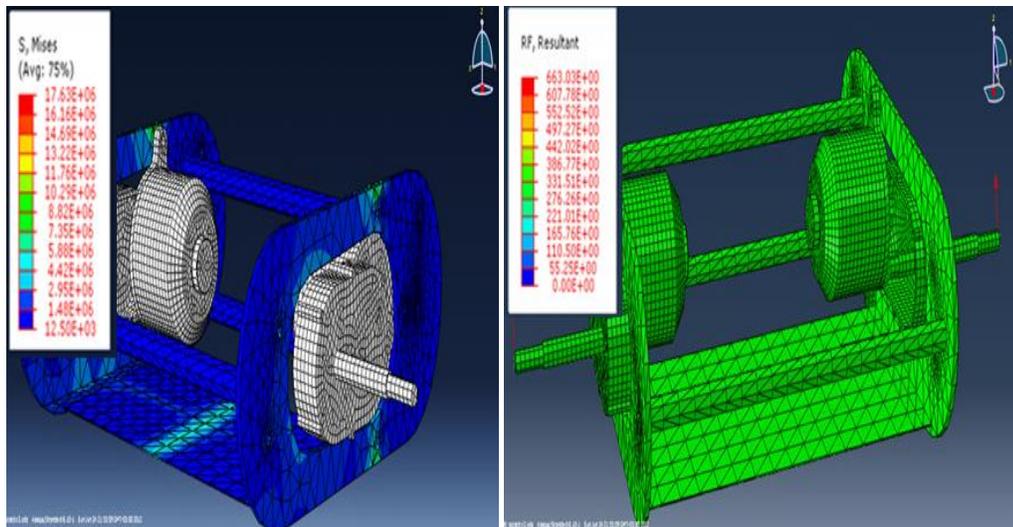


FIGURA 4.9. Esfuerzos (derecha) y fuerzas de reacción (izquierda); bajo carga axial.

4.2.1 ANÁLISIS BAJO CARGAS COMBINADAS

Los pesos de los componentes y usuario no serán las únicas cargas a la que estará sometida la estructura, durante su operación tendrán lugar fuerzas y momentos fuera del equilibrio estático. La idea es observar el comportamiento de la estructura ante las fuerzas producidas durante la conducción. Estas fuerzas son provocadas por la interacción entre las ruedas y las irregularidades que se pudieran presentar en la superficie de rodamiento (baches, bordos, desniveles depresiones). Debido a que las fuerzas eran desconocidas, la rigidez de la estructura fue examinada con la aplicación de pequeños desplazamientos y rotaciones en alguno de los ejes para determinar las fuerzas de reacción y esfuerzos asociados con estos desplazamientos.

Las nuevas condiciones de frontera constaron de un empotramiento y un desplazamiento en alguna de las tres direcciones según sea el caso a analizar. Todos los pesos que soporta la estructura se mantuvieron y a estas se les sumaron las fuerzas asociadas a los desplazamientos por lo que se tenía un estado de esfuerzos combinados.

Las fuerzas aplicadas en los ejes en dirección u_3 , véase la Figura 4.11; se transmiten hacia la estructura en forma de un momento debido a la distancia (d) existente entre el punto de aplicación de la carga (2) y el punto donde se apoyan los motores a la estructura (1); el movimiento generado es el de una rotación alrededor de u_2 . Esta rotación y el momento asociado provocan esfuerzos de torsión en la estructura. Para analizar estos efectos se consideró el escenario en donde al avanzar el vehículo, una de las ruedas se mantenga apoyada sobre la superficie horizontal; mientras que la otra pasa sobre una superficie irregular.

Para simular este escenario se planteó darle una rotación a la flecha izquierda alrededor u_2 y un empotramiento en la flecha derecha (visto el modelo de frente). No se trata de una rotación alrededor de la flecha sobre si, el eje u_2 es paralelo al eje de la flecha y están separados una distancia d ; por lo que la flecha junto con todo lo que esté unido a ella girara alrededor de u_2 con un radio de giro igual a d .

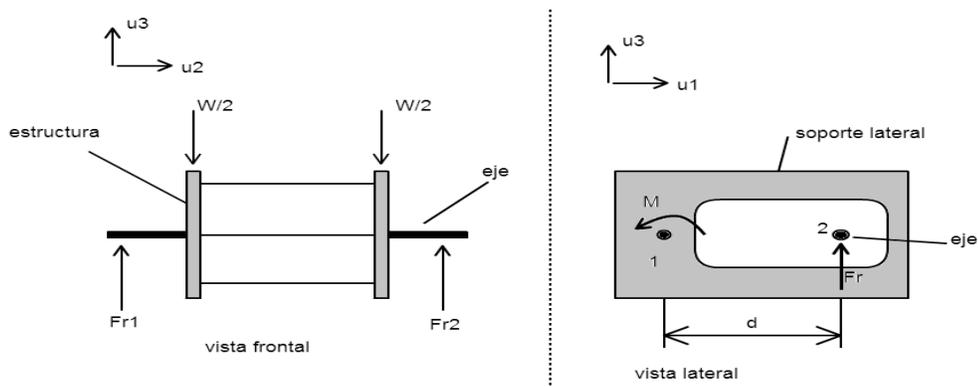


FIGURA 4.11. Diagrama de cuerpo libre con las cargas y reacciones aplicadas a la estructura del tren motriz

El primer análisis se realizó para una rotación de 1 grado la Figura 4.12 muestra los resultados. Los puntos críticos en la estructura son las uniones entre los soportes laterales y las barras así como los barrenos en donde se sujetan los motores. En las uniones los esfuerzos no rebasaron los 60 MPa mientras que en los barrenos se presentan esfuerzos de hasta 119.5 MPa muy cercano al esfuerzo máximo permitido. La máxima desviación entre los ejes es de 1.7 mm y la fuerza de reacción asociada es de 855 N en el eje derecho.

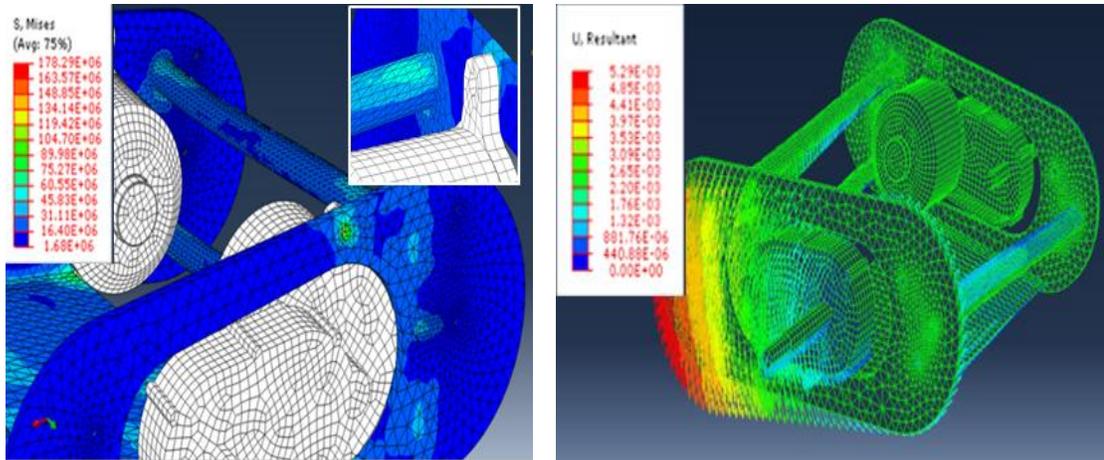


FIGURA 4.12. En la parte derecha se muestran los esfuerzos generados en la estructura y en la parte izquierda los desplazamientos y fuerzas de reacción.

Después se probó para una rotación de 3 grados, los resultados muestran esfuerzos de 180 MPa en las uniones y de hasta 240 MPa en los barrenos por lo que la estructura fallara por la presencia de deformaciones plásticas. La fuerza de reacción asociada está por encima de los 900 N apenas mayor que en el caso anterior.

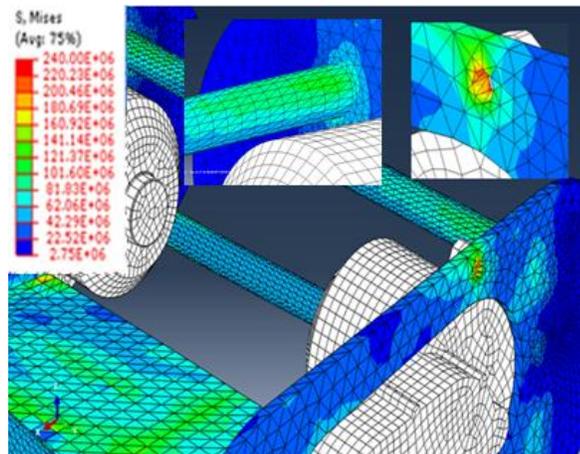


FIGURA 4.13. Estado de esfuerzos asociado con la rotación de 3 grados; en la parte superior de la imagen se muestra una ampliación de las zonas de uno de los barrenos y de una de las barras que es donde se ubican los esfuerzos de mayor magnitud.

Por último se consideró la situación en que una de las ruedas quedara apoyada sobre una superficie inclinada y la otra rueda sobre el suelo plano. Esto generaría una pequeña rotación alrededor del eje u_1 para provocar este movimiento es necesaria una fuerza cuyas componentes se encuentren en u_2 y u_3 ambas en sentido positivo. Bajo estas condiciones la estructura quedaría bajo un estado de esfuerzos de flexión y compresión. El análisis se realizó con una rotación de medio grado en $-UR1$, de acuerdo con los resultados los esfuerzos en la estructura no sobrepasan los 90MPa, sin embargo en las uniones de los motores los esfuerzos están en un rango que va de los 108 hasta 214 MPa en algunas zonas, bajo las condiciones de diseño se corre el riesgo de que fallen afectando la estabilidad del vehículo. La fuerza de reacción encontrada fue de 890 N y un desplazamiento máximo en uno de los ejes de 3 mm con respecto al otro.

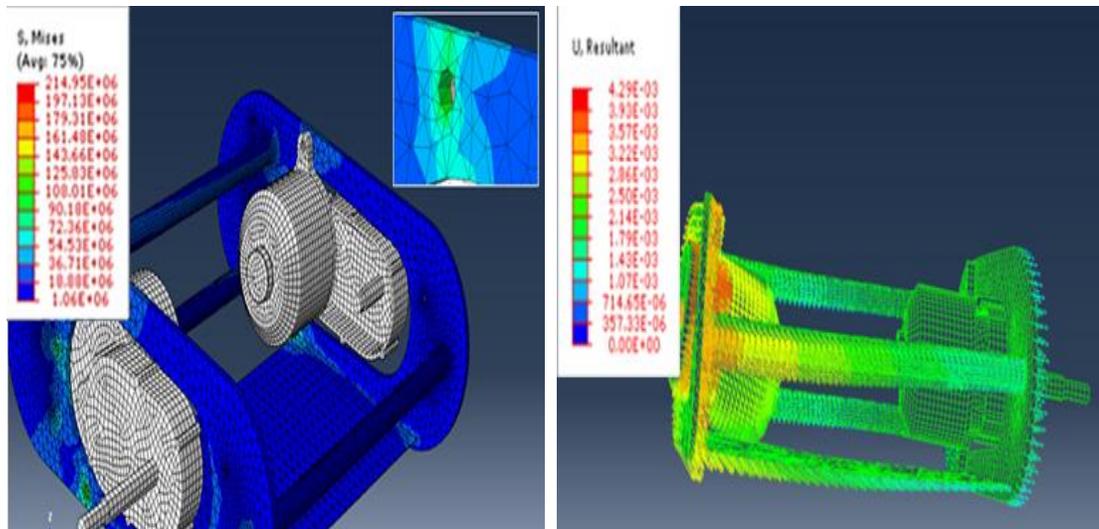


FIGURA 4.14. Esfuerzos (parte superior) y deformaciones (parte inferior); en flexión y compresión.

4.3 ANÁLISIS CON CARGAS DINÁMICAS

Después de analizar el comportamiento de la estructura con cargas estáticas es tiempo de conocer el comportamiento de ésta, con cargas dinámicas es decir cargas aplicadas durante un corto intervalo de tiempo, en el vehículo este tipo de cargas serán muy comunes al avanzar en superficies irregulares como en el caso de caer en un bache o hueco en el camino o pasar por un borde a gran velocidad. A diferencia del análisis estático, los efectos de las fuerzas de inercia así como de las fuerzas internas de la estructura son factores muy relevantes en un análisis dinámico. El modelo dinámico más simple que representa a este fenómeno es el de una masa sujeta a un resorte, si se desplaza la masa y el resorte en la misma dirección para después soltarlos súbitamente el sistema comenzara a oscilar con una cierta frecuencia hasta llegar al equilibrio de nuevo [31].

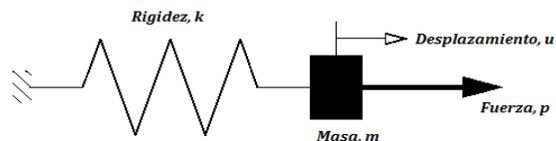


FIGURA 4.15. Modelo simplificado de un sistema masa-resorte.

El software *ABAQUS 6.10* proporciona las herramientas necesarias para realizar el análisis dinámico del tren motriz. Para realizarlo se utilizó el mismo modelo para el análisis estático realizando sólo algunas modificaciones. El análisis constara de dos partes, la primera es necesaria para determinar los datos de las frecuencias naturales de la estructura y los grados de libertad para cada forma de vibración. La segunda parte muestra los efectos de las cargas de impacto sobre la estructura (esfuerzos, deformaciones) con base en los datos obtenidos en la primera parte del análisis.

Para iniciar se crearon dos *steps*, el primero extrae los modos de vibración con sus respectivas frecuencias naturales, se calcularon los 30 primeros modos para tener una buena representación de la respuesta dinámica de la estructura; en este paso no es necesario definir un tiempo de duración así como ningún tipo de carga. Para el segundo *step* se fijó un tiempo de duración de 0.3 segundos y se definió un factor de amortiguamiento entre el 1% y el 10.

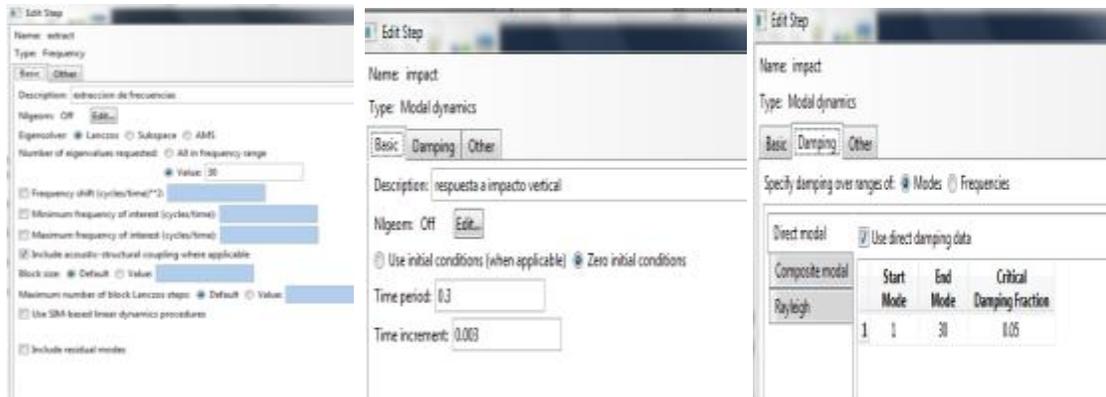


FIGURA 4.16. Definición de las características de los steps creados para extraer las frecuencias naturales y para asignar cargas dinámicas al modelo.

La amplitud en que se aplicaron las cargas se definió como se muestra en la Figura 4.17, la duración de estas cargas es de 0.2 segundos.

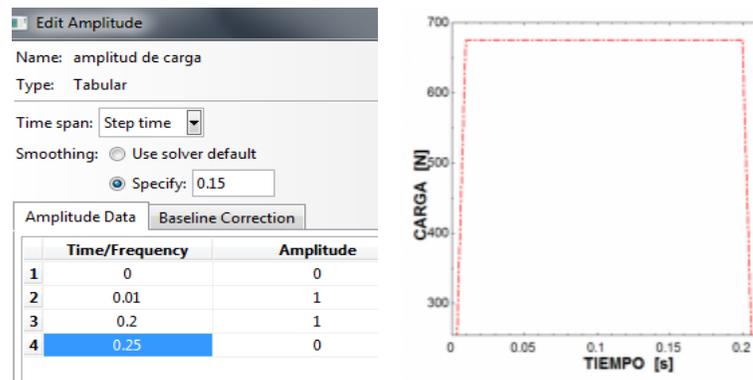


FIGURA 4.17. Definición de la amplitud a la que se aplicaron las cargas de prueba.

Para el análisis se aplicó por 0.2 segundos la mitad del peso total sobre uno de los ejes (675 N en dirección $+u_3$) y restringiendo todos los grados de libertad a excepción de los desplazamientos en u_3 y las rotaciones alrededor de u_1 y u_2 . Para el otro eje fueron restringidos todos los grados de libertad. Con estas condiciones se pretende simular el caso en que una de las ruedas pase repentinamente por algún bache en el suelo mientras la otra rueda continua apoyada sobre el suelo plano.

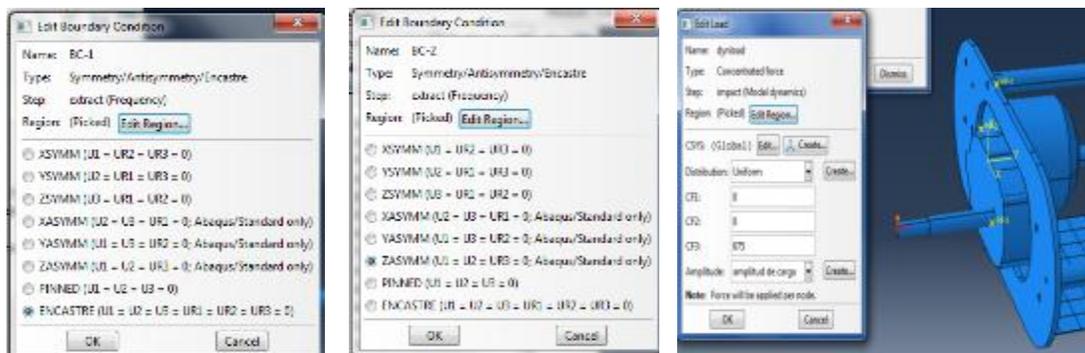


FIGURA 4.18. Asignación de las condiciones de frontera y cargas.

Los resultados de la extracción de frecuencias se muestran concentrados en las siguientes tablas, Figura 4.19. La primera muestra las frecuencias para cada uno de los 30 modos. Siendo la más alta de 3494 Hz y la menor frecuencia de 482 Hz con un tiempo asociado de 0.002 segundos. Después de muestran las direcciones predominantes de los grados de libertad en los que actúa cada modo. Por ejemplo para el modo 1 los desplazamientos serán predominantemente en la dirección u_3 .

MODE NO	EIGENVALUE	FREQUENCY		PARTICIPATION FACTORS			
		(RAD/TIME)	(CYCLES/TIME)	MODE NO	X-COMPONENT	Y-COMPONENT	Z-COMPONENT
1	9.18634E+06	3030.9	482.38	1	-0.15253	-4.20328E-03	1.8119
2	9.38811E+06	3064.0	487.65	2	3.84799E-02	1.4661	1.28608E-03
3	1.39653E+07	3737.0	594.76	3	1.1817	-9.08004E-02	0.36408
4	1.50996E+07	3885.8	618.45	4	1.1322	-3.08697E-02	-1.24674E-02
5	1.64693E+07	4058.2	645.89	5	7.57199E-02	-9.87212E-03	0.69740
6	1.87427E+07	4329.3	689.03	6	0.43472	1.86510E-02	0.46547
7	1.95991E+07	4427.1	704.59	7	-0.22249	1.01806E-02	1.0016
8	2.48266E+07	4982.6	793.01	8	-5.42655E-02	-9.11807E-03	1.0722
9	3.19068E+07	5648.6	899.00	9	-3.38172E-02	2.47277E-02	0.34763
10	4.73606E+07	6881.9	1095.3	10	8.67654E-02	-4.97408E-02	-0.15530
11	5.20183E+07	7212.4	1147.9	11	-2.76826E-02	2.0616	-1.25939E-02
12	6.62674E+07	8140.5	1295.6	12	-1.21199E-02	-0.25333	-6.14989E-02
13	6.98015E+07	8354.7	1329.7	13	0.11256	-7.17129E-02	7.25211E-02
14	8.27013E+07	9094.0	1447.4	14	-7.79853E-03	-6.41421E-03	2.51428E-03
15	1.00117E+08	10006.	1592.5	15	-0.38095	-2.81706E-02	-5.54232E-03
16	1.06055E+08	10298.	1639.0	16	-2.30864E-03	-0.63089	-4.86228E-03
17	1.40082E+08	11836.	1883.7	17	5.98464E-03	7.16266E-02	1.32852E-02
18	1.47140E+08	12130.	1930.6	18	1.74913E-02	9.76142E-02	-8.14445E-03
19	1.53524E+08	12390.	1972.0	19	-2.41463E-02	0.20798	4.81678E-03
20	1.69561E+08	13022.	2072.4	20	2.17863E-02	0.60391	3.27128E-02
21	1.78409E+08	13357.	2125.8	21	-1.41509E-02	-6.94992E-02	4.11037E-03
22	2.11765E+08	14552.	2316.0	22	-6.68853E-02	0.46153	1.09562E-02
23	2.70817E+08	16457.	2619.1	23	0.65058	4.44521E-02	-6.48909E-02
24	3.01429E+08	17362.	2763.2	24	-1.1241	0.58679	2.11926E-02
25	3.06506E+08	17507.	2786.4	25	-0.57754	-1.4141	2.15509E-02
26	3.60924E+08	18998.	3023.6	26	0.52520	-5.46569E-02	-0.15628
27	3.76936E+08	19415.	3090.0	27	-0.57141	8.78607E-05	-3.67172E-02
28	4.18278E+08	20452.	3255.0	28	-1.88272E-02	-0.31712	-4.94664E-02
29	4.66363E+08	21595.	3437.0	29	-8.84262E-02	1.32337E-02	-0.21327
30	4.81967E+08	21954.	3494.0	30	5.47050E-04	-2.96113E-02	4.06345E-02

FIGURA 4.19. Frecuencias naturales y grados de libertad para cada modo de vibración en la estructura.

Los resultados de la prueba de impacto se muestra en la Figura 4.20, el máximo esfuerzo en la estructura se registró en los barrenos con un valor de 166 MPa, en la zona de unión entre las barras y soportes los esfuerzos alcanzaron hasta 111 MPa, tras el impacto se registraron oscilaciones entre los +/-3 mm con dirección u_3 , en el eje sobre el que se aplicó la carga. En estas circunstancias el esfuerzo máximo de diseño se ha sobrepasado aplicando una carga pequeña, por lo que el diseño de la estructura no está listo para soportar cargas dinámicas.

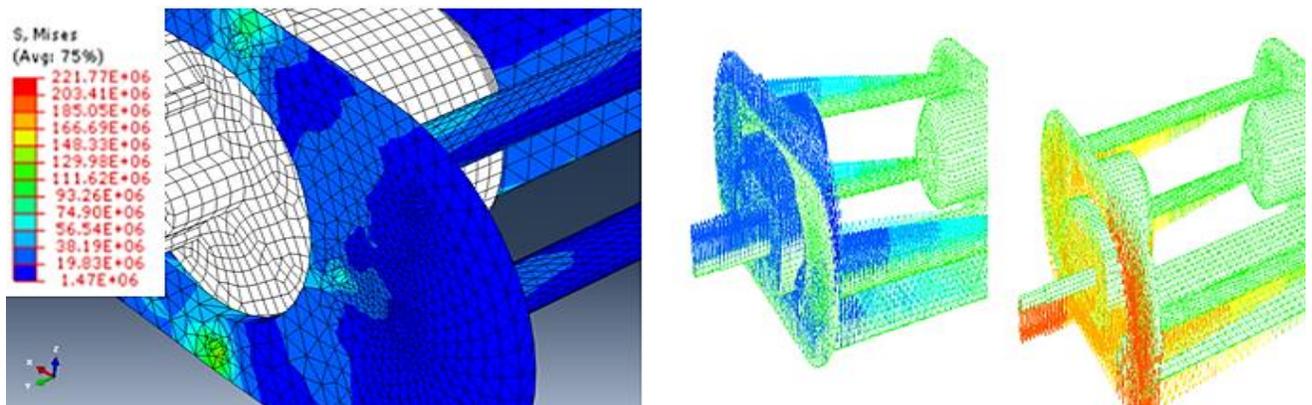


FIGURA 4.20. En la imagen derecha, se observa la concentración de esfuerzos en los barrenos; en la imagen izquierda se pueden apreciar los desplazamientos aumentados por un factor de escalamiento provocados por la vibración tras el impacto.

4.4 ANÁLISIS DE LA ESTRUCTURA SUPERIOR

El análisis de esfuerzos de la estructura superior fue realizado con el módulo *Analysis & Simulation de CATIA V5* ya que se presentaron problemas de compatibilidad entre archivos durante la importación del modelo tridimensional de la estructura en *ABAQUS*.

El análisis de esta estructura se planteó para 3 casos posibles:

1. Carga Axial.
2. Carga combinada (Axial y Lateral) distribuida uniformemente.
3. Carga combinada no distribuida uniformemente.

El material seleccionado para la estructura fue tubo de acero *SAE1018* con las siguientes propiedades mecánicas [28]:

Propiedad	Valor
Densidad	7680 [Kg/m3]
Módulo de Young	200 [GPa]
Coefficiente de Poisson	0.27
Esfuerzo de cedencia	240 [MPa]

TABLA 4.2. Propiedades mecánicas del acero SAE-1018

El factor de seguridad se estableció en este caso como:

$$C_s = \frac{240MPa}{\sigma_{max}} = 2$$

Y el esfuerzo máximo permisible será $\sigma_{max} \leq 120 MPa$

El primer análisis corresponde a la aplicación de una carga axial a compresión sobre la estructura. Dicha carga corresponde al peso máximo del usuario para el que se está diseñando (1000 N aprox.). Las condiciones de frontera se establecieron como un empotramiento en los 4 apoyos que se tienen en la base y la aplicación de una carga distribuida sobre los elementos en que se apoya el asiento. Los resultados obtenidos por el análisis muestran un esfuerzo máximo en los soportes traseros de unos 35 MPa y un desplazamiento máximo de 0.14 mm en la parte superior. Por lo tanto la estructura soporta perfectamente el peso de un usuario de hasta 100 Kg bajo condiciones estáticas.

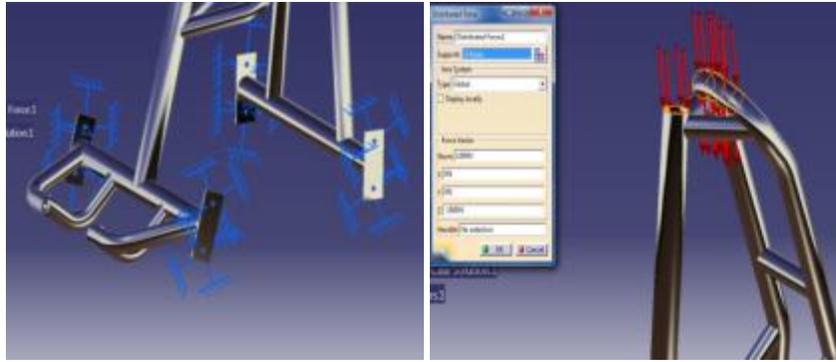


FIGURA 4.21. Asignación de cargas y restricciones en la estructura.

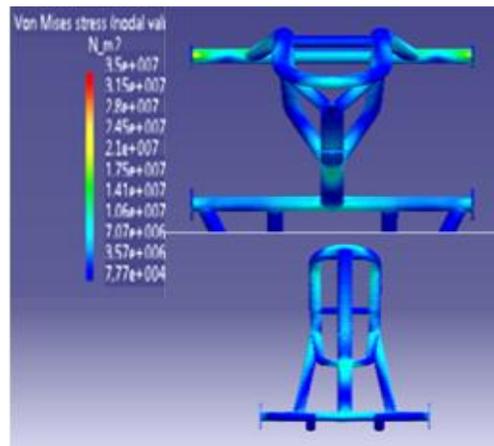


FIGURA 4.22. Estado de esfuerzos resultante en la estructura.

Para el siguiente análisis se consideró el efecto que provocan las fuerzas generadas cuando el vehículo avanza sobre una curva. Durante el movimiento curvilíneo la estructura se verá afectada por una fuerza lateral originada por el efecto de la componente normal de la aceleración sobre la masa del vehículo y pasajero. Las condiciones de frontera se mantuvieron igual que en el caso anterior y se añadió un tipo nuevo de carga. Este tipo de carga se define en el programa como una aceleración, para introducirla al programa es necesario definir un vector aceleración (magnitud y dirección de dicha aceleración). La magnitud de esta aceleración se tomó considerando una curva con un radio de 3 m a una velocidad de 15 Km/h, por lo que $a = 5.8 \text{ m/s}^2$.

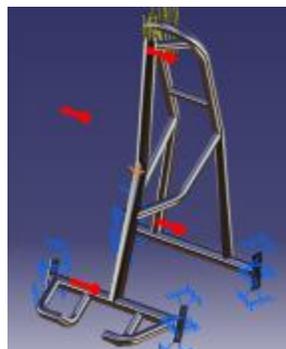


FIGURA 4.23. Definición del vector aceleración.

Los resultados obtenidos muestran una gran concentración de esfuerzos en los soportes traseros, en esta región los esfuerzos se encuentra entre los 56 y 80 MPa que siguen sin representar un riesgo de falla. El desplazamiento máximo es de 0.6 mm en la parte superior de la estructura con dirección u_1 .

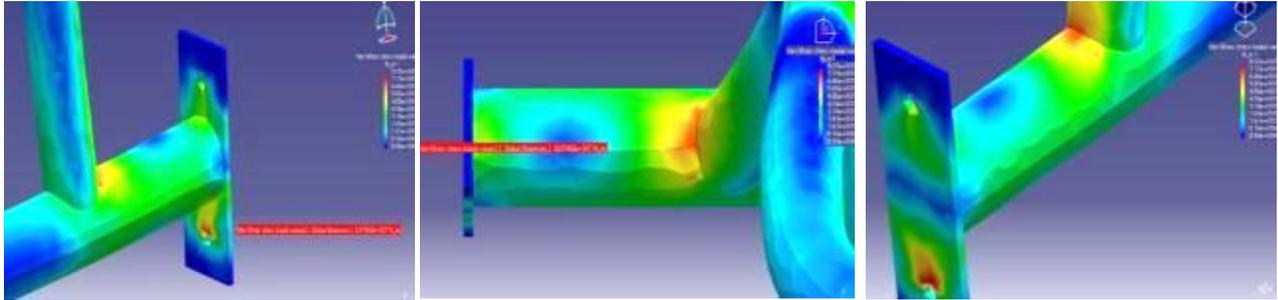


FIGURA 4.24. Esfuerzos en los soportes traseros de la estructura.

Después se propuso realizar el mismo tipo de análisis pero con la diferencia de que las condiciones de frontera simulen una situación en la que al tomar la curva una de las ruedas pierda contacto con el suelo y toda la carga se transfiera a los dos soportes del lado contrario. Esto se logró dejando libres los grados de movimiento en dos de los soportes y empotrando los otros dos. Las cargas se mantuvieron iguales y se corrió el análisis. En esta situación se tiene una concentración de esfuerzos significativa en el soporte trasero sobre todo en las regiones que corresponden a las uniones. Los esfuerzos en esta zona van de los 160 MPa hasta 204 MPa en los barrenos por lo que el riesgo de falla por deformación plástica es muy elevado.

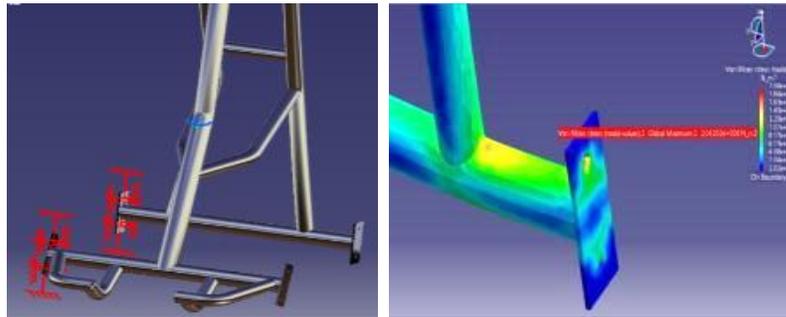


FIGURA 4.25. Condiciones de frontera seleccionadas y esfuerzos en el soporte trasero.

Una solución a este problema es colocar un par de refuerzos en los apoyos traseros con el fin de transmitir la mayor parte de la fuerza hacia los laterales del tren motriz y reducir el efecto palanca generado. Corriendo de nuevo la simulación se observó que ahora los esfuerzos en esta zona van de los 100 a 114 MPa lo cual se encuentra dentro del rango admisible.

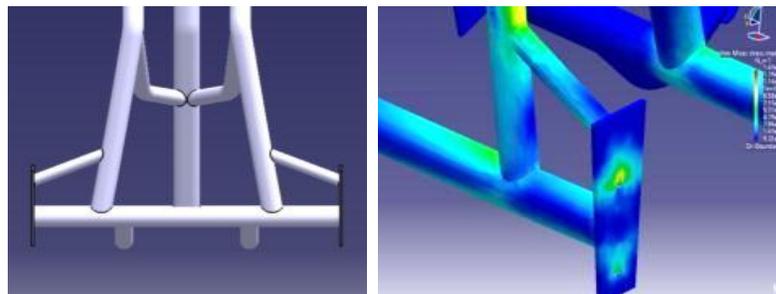


FIGURA 4.26. En la izquierda se muestran los refuerzos agregados y en la parte derecha los resultados del análisis.

CAPÍTULO 5

CARACTERIZACIÓN DINÁMICA DEL VEHÍCULO

Una vez que se han definido la configuración del VEPI y las dimensiones de éste con base en los requerimientos y especificaciones, es momento de realizar con estos datos un análisis de la dinámica del vehículo que permita estimar el comportamiento durante su uso y operación. Dicho comportamiento es resultado de la interacción entre el vehículo, usuario y el medio de operación principalmente.

El comportamiento dinámico global puede ser descrito por medio de aspectos relacionados con:

- *El desempeño mecánico* del vehículo que depende de la fuente de energía y de la forma en que se transmite para generar tracción en las ruedas y de los medios para acelerar o desacelerar su movimiento (frenado).
- *El confort*, que en este caso será relacionado con la comodidad que se experimenta durante el trayecto y que estará en función de la forma en que las vibraciones se transmiten desde la fuente de excitación hacia el pasajero.
- *La manejabilidad* que tiene que ver con la capacidad de seguir una trayectoria ante perturbaciones externas. Aquí se consideran dos aspectos básicos, el control de la dirección y la capacidad de estabilización. Las medidas de desempeño que se refieren a la manejabilidad están asociadas con grandes desviaciones respecto de una posición de equilibrio es decir la inestabilidad.

Para este trabajo se han considerado los aspectos relacionados con la manejabilidad (estabilidad) y el desempeño mecánico del tren motriz. Los resultados del análisis podrán determinar si es necesario la modificación o la corrección de alguna de las dimensiones o geometría del diseño, o bien el remplazo o adaptación de algún componente que ayude a mejorar el desempeño del vehículo.

5.1 ESTIMACIÓN ESPACIAL DEL CENTRO DE GRAVEDAD

La ubicación del centro de gravedad es un parámetro que resulta importante debido a dos motivos, primero su altura será determinante en la tendencia de la volcadura y en segundo afectara la estabilidad a partir de una posición de equilibrio determinada por el sistema de control.

Para localizarlo se debe tomar en cuenta que existe un centro de gravedad sin carga y otro centro de gravedad con carga. El usuario representa la carga principal y es debido a las diferencias físicas entre una persona y otra, que el centro de gravedad en conjunto con el usuario sea variable. Será necesario entonces encontrar el centro de gravedad del vehículo (cg_V) y el centro de gravedad del usuario sentado en la posición de manejo para diferentes datos antropométricos, con la ubicación de ambos se determinara el centro de gravedad total (cg_T).

Para encontrar el centro de gravedad del vehículo se hizo uso del modelo de ensamble 3D generado en CATIA, asignando a cada uno de los componentes que integran al VEPI las propiedades físicas del material del que estarán construidas, el software puede realizar un cálculo aproximado de las coordenadas del cg de cada parte con base en la expresión (1) y después mediante el teorema de ejes paralelos (2) determina las coordenadas del centro de gravedad global del ensamble.

$$\bar{X} = \frac{\bar{x}V}{V} \quad \bar{Y} = \frac{\bar{y}V}{V} \quad \bar{Z} = \frac{\bar{z}V}{V} \dots \dots \dots (1)$$

$$I = I_G + md^2 \dots \dots \dots (2)$$

Para encontrar el centro de gravedad de una persona sentada sobre el VEPI con la postura que le impone el diseño del asiento y la ubicación de los controles de operación, se empleó un método analítico denominado método segmental, el cual divide al cuerpo humano en 14 segmentos y con base en datos estadísticos le asigna a cada segmento un cierto porcentaje de la masa total del cuerpo, el porcentaje se multiplica por el vector de posición de cada segmento y la suma algebraica de todos los productos dan como resultado las coordenadas del centro de gravedad.

Para la aplicación del método fue necesario primero construir modelos virtuales de personas o *maniqués* con el módulo *Ergonomics Design & Analysis* de *CATIA V5*, se generaron tres modelos para cada género (masculino y femenino) con base en datos antropométricos de hombres y mujeres mexicanos para los percentiles 5, 45 y 95 de la población. Estos maniqués fueron puestos en posición de manejo sobre un modelo virtual del VEPI, ver Figura 5.1; con un análisis de postura el software generó un reporte que incluía las coordenadas de posición de cada segmento corporal. Con el conocimiento de estos datos se aplicó el método ya mencionado para encontrar el *cg* en los 6 casos.

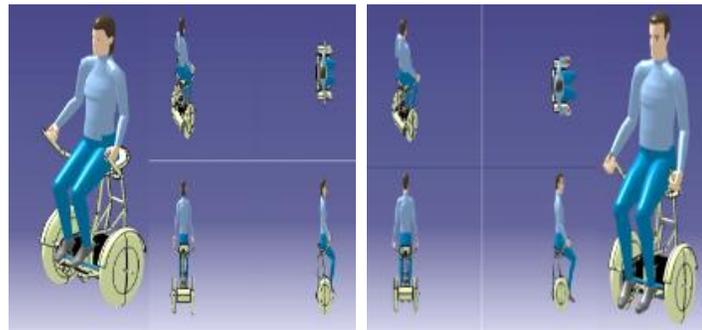


FIGURA 5.1. Modelos virtuales de los maniqués generados para analizar la ubicación del centro de gravedad del vehículo.

Los resultados de los centros de gravedad obtenidos se muestran en la Tabla 5.1, las variaciones de posición se presentan en el plano xz esencialmente, esta variación responde al cambio en la altura de cada individuo y de cómo se distribuye su masa con la postura que adopta en el vehículo. Al ser el usuario quien aporte la mayor parte del peso al conjunto, será quien determine la posición del centro de gravedad total por lo que no se encontrara en una posición fija.

Ubicación del Centro de Gravedad de los Usuarios (x, y, z) [mm]			
Percentil	5%	45%	95%
Hombres	(119.92, 69.06, 710.76)	(123.77, 69.16, 720.85)	(129.42, 69.16, 738.22)
Mujeres	(108.07, 69.17, 707.27)	(112.09, 69.17, 729.36)	(115.98, 69.39, 722.65)

TABLA 5.1. Coordenadas del centro de gravedad para diferentes percentiles.

Tomando los valores extremos del rango de ubicaciones del centro de gravedad de los usuarios, fueron determinadas las dos posiciones más extremas del centro de gravedad total que se pudieran presentar, éstas se muestran en forma aproximada en la figura inferior y además la ubicación del *cg* del vehículo sin carga. Éstos representan el *cg_T* más alto y bajo posibles así como las posiciones más distales con respecto al eje vertical del sistema de referencia mostrado en la Figura 5.2. Este eje sirve como referencia para determinar la posición de equilibrio en el plano medio formado por los ejes vertical y longitudinal.

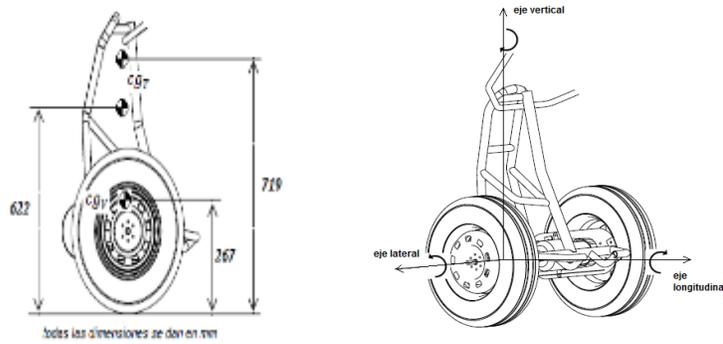


FIGURA 5.2. Izquierda, altura máxima y mínima del centro de gravedad total del vehículo; derecha, sistema de referencia del vehículo.

El vehículo tiene 6 grados de libertad, traslación en las 3 direcciones (longitudinal, lateral y vertical) y movimientos de rotación alrededor de los tres ejes. En particular la rotación de la estructura alrededor del eje lateral es el movimiento gobernado por el sistema de control, el movimiento es provocado por los momentos que se generan al moverse el centro de gravedad de su posición de equilibrio.

La estabilidad del vehículo es lograda por las acciones de control del sistema que involucran principalmente el movimiento del tren motriz para lograr alcanzar la posición de equilibrio, la velocidad y desplazamiento necesarios para alcanzar el equilibrio dependerán de cuán grande sea la desviación del centro de gravedad con respecto a la vertical Figura 5.3; si lo que se desea es mantener al vehículo en una posición cuasi estática se puede permitir una desviación digamos entre los 1 y 5 grados por ejemplo; en este rango los motores estarán apagados y una vez que se rebase el valor límite se activarán para mover las ruedas y equilibrar a todo el conjunto.

Con los datos del cg_T se calcularon las máximas desviaciones respecto a la vertical si consideramos que el usuario sentado mantiene su postura es decir no se inclina hacia adelante o atrás, la máxima desviación es de 3.3 grados hacia el frente aunque se encuentra dentro del rango establecido se debe considerar que el método para determinar la ubicación del cg_T es aproximado y que los datos son sólo una referencia para determinar si la ubicación de la estructura con respecto al tren motriz es la adecuada; la comprobación de estos hechos requerirá de las pruebas experimentales con el prototipo funcional.

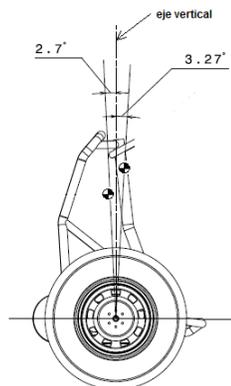


FIGURA 5.3. Rango de desviación del centro de gravedad con respecto a la vertical.

5.2 ESTABILIDAD LATERAL

La volcadura de un vehículo es producida a partir de la acción de una fuerza lateral sobre el centro de gravedad que sea lo suficientemente grande para romper el equilibrio debido a las fuerzas de reacción en las llantas y provocar el giro alrededor de su eje longitudinal. Las fuerzas laterales son especialmente grandes cuando se siguen trayectorias curvas o se realizan cambios súbitos en la dirección (Figura 5.4). Ante esto las llantas reaccionan en forma diferente, la llanta en el lado externo reacciona con mayor magnitud que la llanta en lado interno pudiendo llegar al punto en que la fuerza de reacción sea nula debido a la pérdida del contacto entre llanta y el suelo, esto es el inicio de la volcadura.

En la dinámica vehicular uno de los parámetros fundamentales es la estabilidad lateral. Particularmente en un vehículo de péndulo invertido con dos ruedas paralelas, si las fuerzas laterales son suficientes para que se pierda contacto con el suelo en una de las ruedas, el sistema de control perderá toda facultad para estabilizar al vehículo y los riesgos en la seguridad del usuario podrían ser graves.

La tendencia a la volcadura puede ser estimada por medio del valor máximo en la aceleración lateral a que se está sujeto justo antes de la pérdida de contacto con el piso de una de las llantas. La aceleración lateral está relacionada directamente con el par necesario para producir un giro con respecto a la superficie de contacto que se considera plana y horizontal.

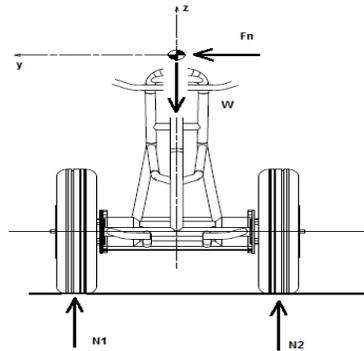


FIGURA 5.4. Diagrama de cuerpo libre donde se muestran las principales fuerzas que actúan sobre el vehículo durante una trayectoria curva.

El umbral de volcadura puede ser determinado en forma experimental mediante maniobras direccionales tipo rampa [33]; otra forma de hacerlo es de forma teórica haciendo uso de una expresión matemática sencilla que relaciona un factor geométrico denominado entevía (Figura 5.5) y la altura del centro de gravedad. Este parámetro adimensional se expresa con frecuencia en términos de la aceleración de la gravedad [34].

$$a_y = \frac{e}{2h} g \quad (3)$$

Dónde:

- h , es la altura del centro de gravedad desde el suelo.
- e , es la entevía del vehículo
- g , es la aceleración de la gravedad

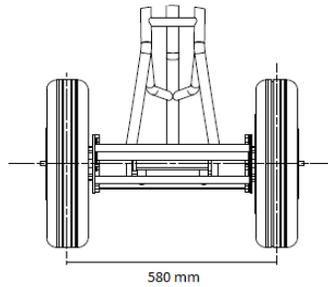


FIGURA 5.5. La entrevía definida como distancia entre ambas llantas del vehículo

Otros factores pueden afectar el valor del umbral, como la rigidez radial de las llantas y la transferencia lateral de cargas, pero se ha demostrado que la altura del centro de gravedad es el que mayor efecto tiene sobre él; la Figura 5.6 muestra una gráfica de la aceleración requerida para una volcadura en tres diferentes configuraciones de entrevía que se consideraron en el VEPI, para diferentes alturas del centro de gravedad. Es evidente como la aceleración lateral requerida para producir la volcadura es mayor al bajar el centro de gravedad y aumentar el tamaño de entrevía. Altos valores de umbral (por encima de 0.8g's) confieren mayor estabilidad y la posibilidad del deslizamiento antes de que se presente una volcadura [34]; con base en ello la configuración que mejor estabilidad le brinda al vehículo es aquella con una entrevía entre los 0.5m y 0.7m y una altura del menor a los 0.5m.

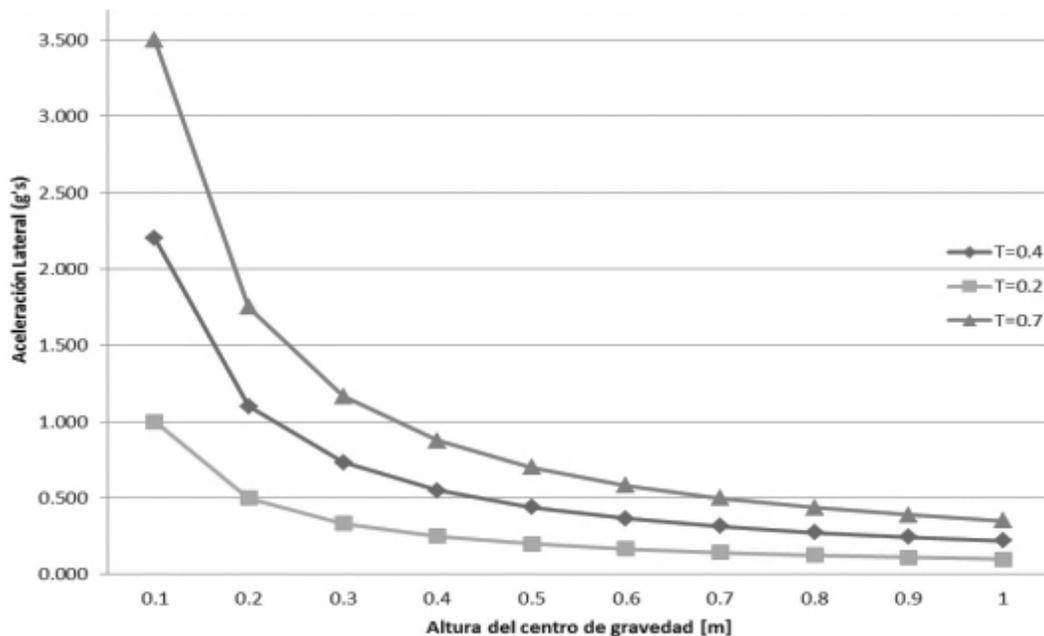


FIGURA 5.6. Umbrales de volcadura en función de la altura del centro de gravedad y entrevía.

El umbral de volcadura también puede ser útil en la determinación de algunos límites de operación como son la velocidad máxima a la que se puede tomar una curva o realizar maniobras de cambio repentino de dirección. La estimación de la velocidad máxima, involucra una expresión que relacione la velocidad de avance, el radio de curvatura del camino, el umbral de volcadura y la aceleración de la gravedad; esta expresión sólo toma en cuenta los efectos de la fuerza centrífuga generada por la componente normal de la aceleración con un avance a velocidad constante, en una situación más realista estas velocidades pudieran ser menores.

$$v = \sqrt{R a_y g} \quad m_s \quad (4)$$

Donde R es el radio de curvatura de la trayectoria.

Tomando el caso extremo en que se tenga una entrevía de 0.580 m con un usuario de 1.85 m y 90-100 Kg, que le confiere al vehículo una altura del c_{gT} de 0.720 m, el umbral de volcadura es de 0.4g's. La velocidad recomendada en zonas peatonales según se vio en el *Capítulo 2.3.4*; es no mayor a los 6 Km/h, a esta velocidad el riesgo de una volcadura según la Tabla 5.2, es nulo, la maniobrabilidad del vehículo debería ser bastante buena; a una velocidad de hasta 9 Km/h se mantiene la estabilidad a excepción de pequeños giros que tendrán que realizarse a menos de 5 Km/h (1.4m/s).

En maniobras de conducción por encima de los 15 Km/h, como la evasión de obstáculos o cualquiera que implique seguir trayectorias curvas, el vehículo será más sensible a la pérdida de contacto con el suelo de alguna de sus ruedas y en el peor de los casos la volcadura. Es importante mencionar que dichas velocidades pudieran ser aun menores en la práctica, es indispensable entonces que los datos se contrasten con pruebas realizadas con el prototipo experimental.

Radio de curvatura[m]	Velocidad de volcadura [Km/h]	Velocidad de volcadura [m/s]
0.5	5.1	1.4
1	7.2	2.0
3	12.4	3.4
5	16.0	4.4
7	18.9	5.3
9	21.5	6.0
11	23.7	6.6
15	27.7	7.7
25	35.8	9.9
35	42.3	11.8
50	50.6	14.1
100	71.6	19.9

TABLA 5.2. Velocidades de volcadura

5.3 DESEMPEÑO MECÁNICO DEL TREN MOTRIZ

El propósito básico de todo vehículo es el trasladar ya sea un objeto o persona de un lugar a otro por medio de un sistema de locomoción. En este caso el tren motriz es el responsable de generar el movimiento que necesita el vehículo para desplazarse. Como ya se ha mencionado los componentes principales que lo conforman son baterías, motores, caja de reducción y ruedas. Las baterías son la fuente que suministra energía al tren motriz; el conocer si la transformación de la energía a través de los motores y reducción es la adecuada o suficiente para generar la tracción necesaria en las ruedas se analizara a continuación.

Existía cierta incertidumbre sobre si los motores y reducciones que fueron adquiridos tenían la suficiente capacidad para mover al vehículo. Esto se debe a que su compra, no fue realizada después de realizar un análisis y selección de las características que estos componentes deberían tener, acorde con las especificaciones de diseño. Se consideró en principio, suficiente, el hecho de que los motores son empleados en *Scooters* eléctricos con características de desempeño

similares a las que tendrá el vehículo. Para eliminar dudas, se realizó un análisis dinámico que señalara las fuerzas que los motores deben vencer para generar un movimiento acelerado bajo distintas circunstancias de operación.

Antes que nada la operación del vehículo se puede dividir en dos regímenes:

Régimen de arranque y paro: cuando el sistema pierde su condición de equilibrio estático el control envía una señal para que los motores se activen y muevan las ruedas a la velocidad necesaria para recobrar la posición de equilibrio, una vez que se alcanzó los motores se apagan. Esta situación se puede repetir varias veces cuando el vehículo se encuentre en una posición cuasi estática.

Régimen de operación nominal: éste se presenta cuando una vez que los motores han arrancado se continúa acelerando por un periodo de tiempo más amplio por lo que existe un movimiento constante del vehículo durante cierta distancia.

Cada régimen le demandara una potencia y par a los motores. Para encontrar estos valores los pasos seguidos fueron los siguientes:

1. Realizar un análisis dinámico para encontrar las fuerzas que se oponen al movimiento.
2. Modelar el sistema en función de las variables de interés.
3. Encontrar la potencia y el par requeridos y compararlos con los propios en los motores.
4. Establecer límites de operación del tren motriz para realizar pruebas experimentales.

Según datos de placa las especificaciones técnicas de cada motor se muestran en la Tabla 5.3.

Potencia	450[W]
Par nominal	1.5 [Nm]
Voltaje	24[V]
Velocidad angular	2900 rpm
Eficiencia	>80%

TABLA 5.3. Especificaciones técnicas de cada motor.

5.3.1 MODELADO DINÁMICO

Las fuerzas que afectan la dinámica del vehículo se pueden determinar a partir del diagrama de cuerpo libre de la Figura 5.7. En él se considera el caso genérico de operación del vehículo en el cual se avanza sobre una superficie con algún grado de inclinación.

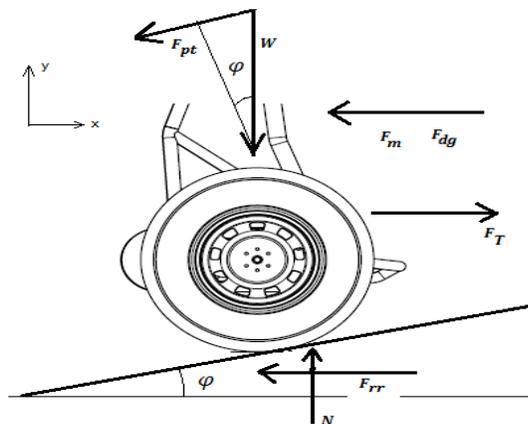


FIGURA 5.7. Diagrama de cuerpo libre donde se muestran las principales fuerzas que se oponen a la fuerza de tracción del vehículo.

La suma de fuerzas es:

$$\rightarrow + \quad F_x = F_T - F_{rr} - F_{pt,x} - F_m - F_{dg} = 0 \quad (5)$$

$$\downarrow + \quad F_y = W + F_{pt,y} - N = 0 \quad (6)$$

Donde.

- $F_T \equiv$ fuerza de tracción
- $F_{rr} \equiv$ fuerza por resistencia a la rodadura
- $F_{pt} \equiv$ fuerza por pendiente
- $F_m \equiv$ fuerza de inercia
- $F_{dg} \equiv$ fuerza de arrastre
- $W = mg \equiv$ peso
- $N \equiv$ reacción normal
- $\varphi \equiv$ ángulo de inclinación del camino

Cada una de las fuerzas que provocan una resistencia al movimiento se describe a continuación.

La fuerza originada por la resistencia a la rodadura se presenta cuando existe deformación en cuerpo que rueda sobre una superficie que se puede considerar rígida o deformable también. Este efecto se puede comparar con el de la fricción entre cuerpos que deslizan. Esta fuerza se puede definir a partir de la siguiente ecuación.

$$F_{rr} = \mu_{rr}W \quad (7)$$

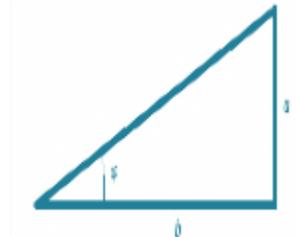
Donde μ_{rr} es el coeficiente de rodadura que depende de las propiedades físicas del material de la llanta, el radio de la rueda, velocidad a la que gira entre otras. En el caso de neumáticos los fabricantes proporcionan valores típicos de este coeficiente que están entre 0.010 y 0.015.

La fuerza que se presenta al subir por una pendiente se establece de acuerdo con el diagrama de cuerpo libre como.

$$F_{pt,x} = W \text{sen } \varphi$$

Cuando se trata de ángulos pequeños $\text{sen } \varphi \approx \tan \varphi$, por lo tanto.

$$F_{pt} = W \tan \varphi = W \cdot \frac{a}{b} = W f_{pt} \quad (8)$$



Donde f_{pt} se define como un factor que depende de la geometría de la pendiente. La pendiente mas pronunciada que se considerara para los cálculos será una de 20% ($f_{pt} = 0.2$).

La fuerza por arrastre aerodinámico, depende de la velocidad relativa entre un objeto y el fluido en el que está inmerso, el área frontal normal a la dirección de la velocidad y de un coeficiente de arrastre.

$$F_{dg} = 1/2 \rho A C_d v^2$$

Considerando la densidad del aire como 1.25 Kg/m³, un área frontal de 0.4 m² (para un ciclista promedio en posición de pedaleo) y un coeficiente de arrastre igual a 2 [35]. Esta fuerza se puede reducir a la siguiente expresión.

$$F_{dg} = 0.5v^2 \quad (9)$$

Las fuerzas debidas a la inercia se pueden considerar como aquellas originadas por un cambio en la aceleración lineal (inercia traslacional) y las que se originan por un cambio en la aceleración angular (inercia rotacional), en el caso de los elementos que giran.

$$F_m = ma \quad \text{inercia traslacional}$$

$$T_I = I\alpha \quad \text{inercia rotacional}$$

$$I \equiv \text{momento de inercia}$$

$$\alpha \equiv \text{aceleración angular}$$

Para encontrar la fuerza asociada al par de inercia rotacional, consideremos la representación del tren motriz en la Figura 5.8.

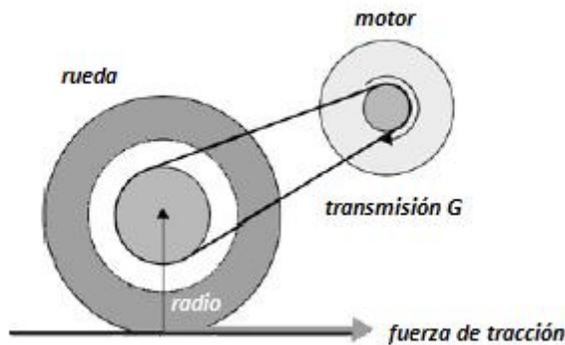


FIGURA 5.8. Representación gráfica del tren motriz.

El par en las ruedas es igual a

$$T_{sal} = I_{carga} \alpha_{sal} = F_T r_{rueda} \quad (10)$$

Tomando en cuenta la relación de transmisión G como

$$G = \frac{\omega_{mot}}{\omega_{sal}} = \frac{\alpha_{mot}}{\alpha_{sal}} \quad (11)$$

donde ω_{mot} , ω_{sal} son la velocidad angular del motor y velocidad angular a la salida

de la reducción respectivamente; así mismo α_{mot} y α_{sal} son las aceleraciones angulares.

$$T_{mot} = I_{carga} \frac{\alpha_{mot}}{G} = \frac{T_{sal}}{G}$$

$$T_{mot} = \frac{F_T r_{rueda}}{G} \quad (12)$$

Por otro lado el par del motor se puede determinar como

$$T_{mot} = I_{rotor} \alpha_{mot} = I_{rotor} G \alpha_{sal}$$

Pero $\alpha_{sal} = a/r_{rueda}$

$$T_{mot} = I_{rotor} G \frac{a}{r_{rueda}} \quad (13)$$

Igualando 12 y 13 se puede encontrar la fuerza necesaria en las ruedas para suministrar la aceleración angular al sistema.

$$F_{\omega} = I_{rotor} \frac{G^2}{r_{rueda}^2} a \quad (14)$$

Cuando no se tienen datos acerca del momento de inercia del rotor del motor se puede tomar en cuenta el hecho de que la fuerza de aceleración angular es mucho menor que la fuerza por aceleración lineal, por lo que una simplificación aceptable [36] es incrementar la masa en la ecuación para la inercia traslacional en un 5%.

$$F_m = 1.05ma \quad (15)$$

La reducción que viene integrada con nuestros motores consta de un tren de engranes helicoidales simple véase Figura 5.9; en el que el engrane impulsor cuenta con 10 dientes, el engrane libre tiene 58 dientes y el engrane conducido consta de 68 dientes por lo que la relación de transmisión es de 6.8:1. La eficiencia de transmisión se consideró del 95%.

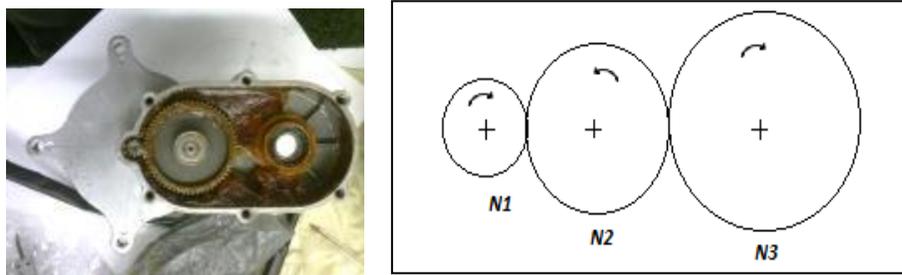


FIGURA 5.9. Izquierda, fotografía de la caja de reducción destapada; derecha esquema del tren de engranes de la caja de transmisión.

$$G = \frac{N_3}{N_1} = \frac{68}{10} = 6.8 \quad ; \quad \eta_g = 95\%$$

La fuerza de tracción total es la suma de todas las fuerzas que se oponen al movimiento.

$$F_T \geq \mu_{rr}W + Wf_{pt} + 0.5v^2 + 1.05ma \quad (16)$$

La potencia de tracción en función de la fuerza de tracción y la velocidad es.

$$P_T = T_{sal} v = F_T r_{rueda} v \quad (17)$$

Para determinar la potencia que debe tener el tren motriz se debe considerar la eficiencia de la transmisión y la eficiencia de los motores.

$$P_{mot} = \frac{P_T}{\eta_m \eta_g} \quad (18)$$

Ahora el par necesario en los motores es.

$$T_{mot} = \frac{F_r r_{rueda} \eta_g}{G} \quad (19)$$

Ahora es momento de encontrar una expresión matemática que determine la potencia y el par requeridos en el tren motriz. Cada régimen de operación está sujeto a ciertas condiciones físicas que le exigirán un desempeño específico al tren motriz. Para cada caso se deberá encontrar el desempeño necesario aún bajo las condiciones extremas de operación y determinar los límites físicos del propio tren motriz.

En el régimen de arranque y paro, se debe considerar que al estar el vehículo prácticamente en reposo moviéndose únicamente para estabilizarse, la velocidad de operación es muy baja por lo que la resistencia por arrastre aerodinámico se tomara como nula. Se considera también que se estará moviendo sobre una superficie horizontal por lo que la fuerza generada en una pendiente será cero en este caso. Por lo tanto el modelo matemático se establece de acuerdo con la ecuación 20. Para evaluar esta ecuación es necesario encontrar la velocidad y aceleración máxima a la que se moverán las ruedas para estabilizar el vehículo.

$$F_T = \mu_{rr} W + 1.05ma \quad (20)$$

Supongamos que se tiene a una persona sentada en el vehículo en reposo, la resultante de fuerzas y momentos alrededor del centro de gravedad total es cero por lo que está en equilibrio estático. En un instante determinado la persona se inclina hacia el frente rompiendo el equilibrio y comenzando a caer describiendo un movimiento circular alrededor del eje de la rueda. La Figura 5.10 es una representación gráfica de la situación descrita; tomando como referencia al punto cg y el punto p en el centro de la rueda para describir el movimiento del usuario y de la rueda respectivamente. El punto cg comienza a moverse a partir de la posición A hasta B con una aceleración tangencial. Cuando cg llega a la posición B el control dará la señal para que los motores se activen y muevan las ruedas a cierta velocidad, para alcanzar nuevamente la posición de equilibrio el punto p deberá recorrer una distancia d igual al arco recorrido por cg a una velocidad y aceleración mayores que las del punto cg .

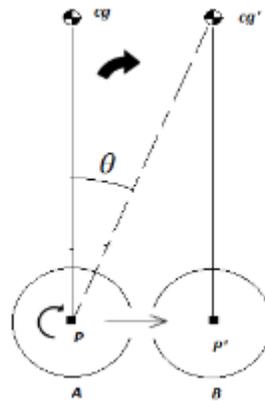


FIGURA 5.10. Esquema que representa el movimiento relativo entre el tren motriz y el centro de gravedad durante la estabilización del vehículo.

Para encontrar la velocidad y aceleración tangencial se deberá encontrar la ecuación de movimiento del conjunto usuario-vehículo cuando se mueven alrededor del eje de las ruedas. A partir del diagrama de cuerpo libre de la Figura 5.11 se planteó el siguiente desarrollo.

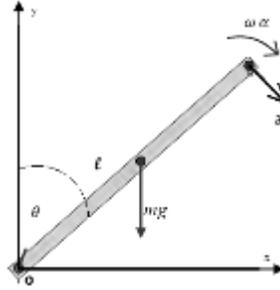


FIGURA 5.11. Diagrama de cuerpo libre para una barra con un pasador su extremo inferior, en caída libre.

Considerando al peso como la única fuerza que actúa sobre el cuerpo, la suma de momentos alrededor del punto fijo O:

$$\sum (+) M_o = mgsen\theta l - I_o\alpha = 0$$

De donde

$$\alpha = \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{mgsen\theta l}{I_o}, \text{ de donde se puede apreciar que la aceleración angular no es cte.}$$

Tomando $\lambda = mgl/I_o$, como un factor que depende de el peso, la distancia entre el centro de gravedad y el eje de giro (l) y el momento de inercia del conjunto alrededor del punto O.

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \lambda sen\theta$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d\omega}{d\theta} \omega = \lambda sen\theta$$

separando variables $\omega d\omega = \lambda sen\theta d\theta$

e integrando esta expresión, con $\theta_0 = \omega_0 = 0$

$$\omega_f^2 = 2\lambda[1 - sen(2\pi - \theta)] \quad (21)$$

es la ecuación de movimiento buscada

el factor λ para el caso particular de una masa de 135 Kg y una altura del centro de

gravedad l de 0,465 m se estimo en $14.7 \frac{1}{s^2}$, entonces:

$$\omega_f^2 = 29.4[1 - sen(2\pi - \theta)] \quad (22)$$

Ahora la velocidad y aceleración tangente del punto cg se pueden estimar a partir de.

$$\omega = \frac{v}{l} \rightarrow v_{cg} = \omega_f l \quad (23)$$

$$\alpha = \frac{a_{cg}}{l} \rightarrow a_{cg} = \lambda sen\theta l \quad (24)$$

Evaluando para un ángulo θ de 10 grados como la máxima desviación a partir de la posición de equilibrio ($\theta = 0$).

$$v_{cg} = 0.3 \frac{m}{s} \quad y \quad a_{cg} = 1.2 \frac{m}{s^2}$$

Esta velocidad y aceleración, deberán ser mayores en las ruedas, de lo contrario nunca alcanzarán la posición de equilibrio de nueva cuenta.

En el régimen de operación nominal, el vehículo se desplazará por superficies horizontales o con una pendiente a velocidad ya sea constante o variable. La forma generalizada para hallar la fuerza de tracción es la ecuación (25), a partir de ésta se puede encontrar la potencia y par necesarios para la tracción.

$$F_T = 9.81m\mu_{rr} + 9.81mf_{pt} + 0.5v^2 + 1.05ma$$

$$\text{con } \mu_{rr} = 0.010$$

$$F_T = m \cdot 9.81 \cdot 0.01 + f_{pt} + 1.05a + 0.5v^2 \quad (25)$$

En este régimen de operación otra medida de desempeño que puede ser útil es la aceleración que puede alcanzar un vehículo, esta medida de desempeño es comúnmente medida en el tiempo en que se alcanza una cierta velocidad a partir del reposo (por ejemplo de 0 a 100 Km/h en 4.5 segundos).

Estas mediciones son realizadas en motores de combustión interna a máximo par y también en el caso de vehículos eléctricos. Sin embargo en los motores eléctricos el par está en función de la velocidad angular del motor, el par máximo se mantiene constante hasta alcanzar una velocidad angular crítica para después caer conforme se aumenta la velocidad hasta alcanzar el par nominal y mantenerse constante.

Comúnmente la velocidad angular crítica es el 30% de la velocidad angular máxima, véase la gráfica de la Figura 5.12. La velocidad angular del motor depende de la relación de transmisión y del radio de la rueda, por lo tanto el par del motor se puede modelar en función de estos parámetros. Los motores que emplea el tren motriz tendrán una velocidad angular crítica de 91 [rad/s], aproximadamente con un par máximo de 7.8 [Nm] y 900 [W] de potencia por ambos motores.

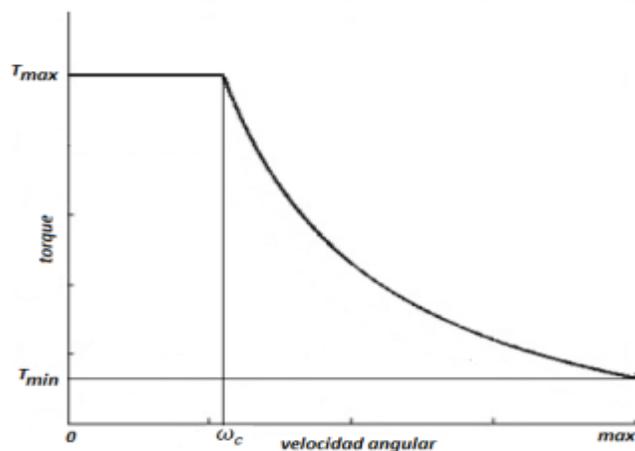


FIGURA 5.12. Comportamiento del par en un motor con respecto a la velocidad angular.

De acuerdo a la gráfica de la Figura 5.11.

$$\text{para } \omega < \omega_c \text{ ó } v < \frac{r_{rueda}}{G} \omega_c \text{ entonces } T = T_{max} ;$$

$$\text{cuando } \omega \geq \omega_c \text{ entonces } T = \frac{r_{rueda} \omega_c T_{max}}{vG}$$

Ahora para encontrar un modelo matemático en función de la aceleración, de la ecuación para el par del motor.

$$F_T = \frac{G}{r_{rueda} \eta_g} T = \frac{6.8}{0.254 \cdot 0.95} T = 28.2 T \quad (26);$$

igualando 25 con 26:

$$28.2T = m \cdot 9.81 + 0.01 + f_{pt} + 1.05a + 0.5v^2 \quad \text{pero } a = \frac{dv}{dt} ;$$

$$28.2T = m \cdot 9.81 + 0.01 + f_{pt} + 1.05 \frac{dv}{dt} + 0.5v^2 ;$$

$$\text{para cuando } \omega < \omega_c \quad v = \frac{0.254}{6.8} \cdot 91.1 = 3.4 \frac{m}{s} \quad \text{y} \quad T = T_{max} = 7.8 Nm ;$$

sustituyendo y despejando la derivada de mayor orden;

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} (A - 0.47v^2 - 9.34f_{pt} - 0.0934) \quad (27)$$

$$\text{donde } A = \frac{28.2T_{max}}{1.05} = 26.9T_{max}$$

$$\text{cuando } v \geq 3.4 \frac{m}{s} \quad T = \frac{3.4T_{max}}{v} ;$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} \left(\frac{B}{v} - 0.47v^2 - 9.34f_{pt} - 0.0934 \right) \quad (28)$$

$$\text{donde } B = \frac{3.4T_{max} \cdot 28.2}{1.05} = 91T_{max}$$

Las ecuaciones diferenciales (27 y 28), tendrán como condiciones iniciales $v=0$ en $t=0$, para su solución numérica mediante un software matemático (MATLAB 7). Con los modelos desarrollados se simuló diferentes situaciones para determinar los límites de operación del tren motriz.

5.3.2 RESULTADOS

Se encontró con que el tren motriz tiene la capacidad suficiente para lograr estabilizar el sistema aún bajo carga máxima, en la Figura 5.13 se puede apreciar una gráfica de la potencia y par requeridos (línea sólida) para diferentes cargas, las líneas horizontales punteadas son la potencia y par máximos del tren motriz, las cuales nunca son intersectadas por la

línea sólida. En la misma gráfica se muestran los valores correspondientes a un ascenso por una pendiente de 20% con velocidad constante de 5Km/h (cuadros), 10Km/h (círculos) y 15Km/h (rombos). En este caso el límite de operación lo determina el par máximo que sólo tendrá capacidad para subir la pendiente con un máximo de 110 Kg a velocidad constante.

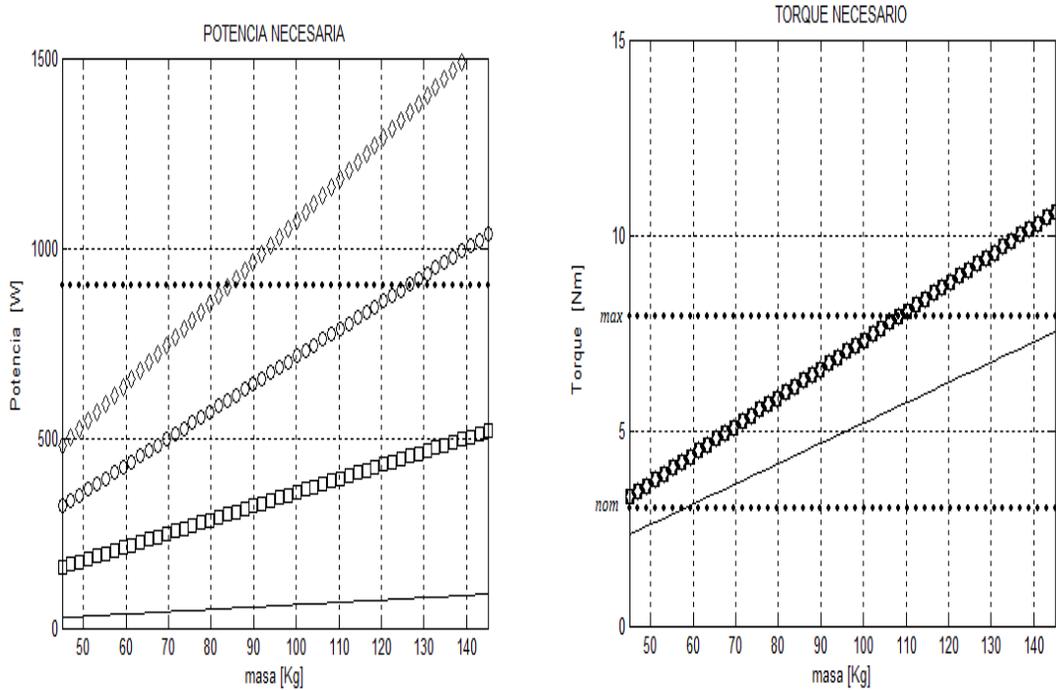


FIGURA 5.13. Potencia y par requeridos con una pendiente del 20% considerando velocidad constante y los requeridos para la estabilización a partir de una desviación del cg de 10 grados (línea sólida).

Después se consideró un ascenso con la misma pendiente pero con aceleración constante partiendo de una velocidad cero hasta los 5, 10 y 15 Km/h según el caso (Figura 5.14). En esta situación se tendría potencia y par suficientes para ascender a 5Km/h con una carga por debajo de los 100 Kg.

Por último se determinó si el tren motriz tiene la capacidad para que el vehículo alcance una velocidad de al menos 15 Km/h, tanto en una superficie horizontal como con una pendiente del 10%. De acuerdo con las gráficas de la Figura 5.15; es posible alcanzar cuando menos los 20 Km/h (sin pendiente), inclusive con carga máxima. Con una pendiente del 10% la velocidad máxima para un usuario promedio de 75 Kg es de 18 Km/h y de 16 Km/h con carga máxima.

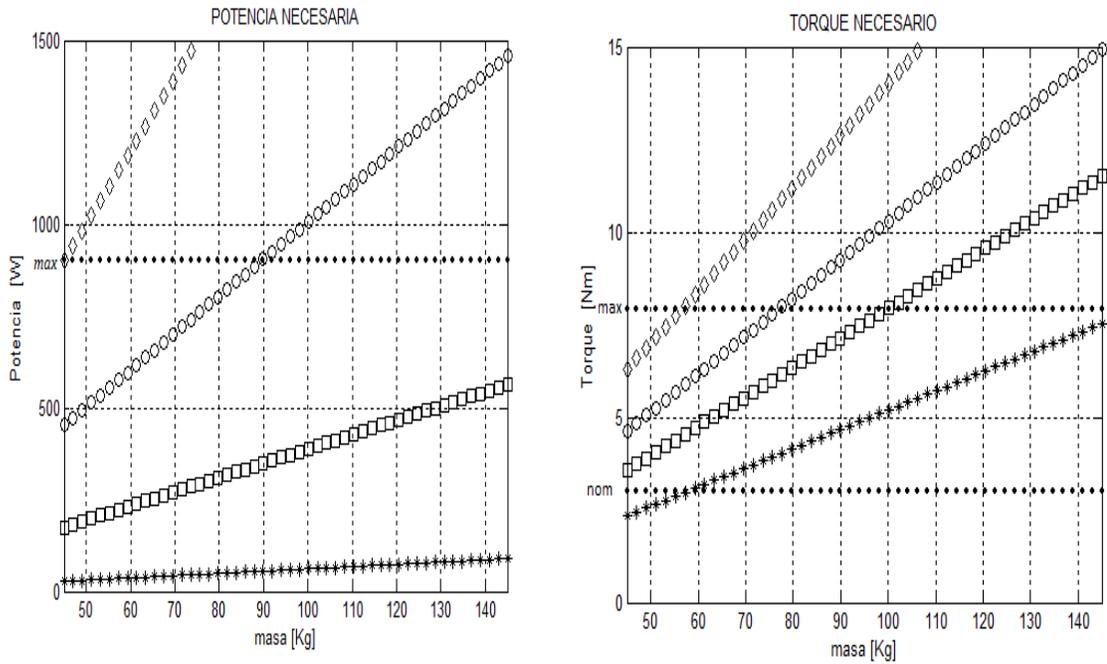


FIGURA 5.14. Potencia y par requeridos con una pendiente del 20% considerando aceleración constante.

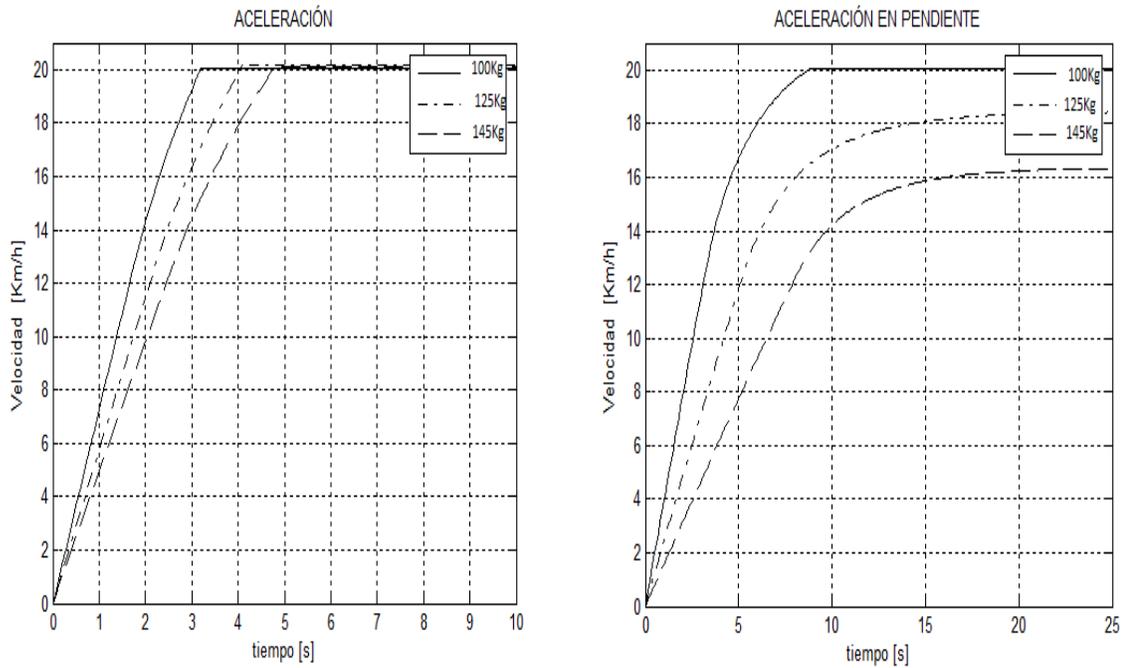


FIGURA 5.15. Curvas de desempeño bajo aceleración, sin pendiente (izquierda) y con pendiente (10%); para diferentes cargas.

Estos resultados se deben tomar sólo como una referencia ya que su veracidad únicamente se podrá comprobar realizando pruebas experimentales.

CAPÍTULO 6

DISEÑO DE DETALLE

6.1 REVISIÓN DE ESPECIFICACIONES

Las especificaciones finales del producto se muestran en la Tabla 6.1. En esta tabla las especificaciones se han agrupado según su tipo y ensamble al que pertenecen. Las dimensiones y valores registrados en cada especificación son el resultado de la información obtenida de los análisis hechos y de la información obtenida por medio del simulador.

No.	ESPECIFICACIÓN	VALOR NOMINAL	TOLERANCIA	UNIDAD
A1	Masa total del prototipo	40	+/-5	Kg
A2	Masa máxima del usuario	95	+5	Kg
A3	Autonomía de baterías	15	+/- 0.5	Km
A4	Tiempo máximo en ciclo de carga	3	+ 0.5	hr
	Tren Motriz			
B1	Dimensiones	400 X 400 X 200	+/- 50	mm
B2	Masa total	25	+5	Kg
B3	Carga máx. soportada	1300	+25	N
B4	Potencia motor	900		W
B5	Par motor	3		Nm
B6	Velocidad máxima	15	+5	Km/h
B7	Altura del piso a base	100	+50	mm
B8	Diámetro de ruedas	10	+/- 2	in
B9	Distancia entre ruedas	650	+/- 50	mm
B10	Máxima Pendiente a subir	10	+5	%
	Cuerpo del vehículo			
C1	Altura del asiento	650	+/- 50	mm
C2	Masa	5	+/- 0.5	Kg
C3	Peso máx. soportable	1100	+/- 5	N
C4	Carga máx. en los estribos	750	+/- 50	N
C5	Ajuste de los estribos	1		Posición
C6	Distancia del asiento a los estribos	450	+/- 100	mm
C7	Altura del mando	600	+/- 100	mm

TABLA 6.1 ESPECIFICACIONES FINALES.

6.2 DOCUMENTACIÓN

A partir de las especificaciones finales se definieron las tolerancias geométricas y dimensionales así como de los ajustes. Con estos datos se elaboró la documentación necesaria para la manufactura del prototipo la cual incluye los planos, códigos de control numérico y una lista de partes y materiales.

6.2.1 PLANOS Y CÓDIGOS DE CONTROL NUMÉRICO

Los planos de cada parte fueron generados a partir de sus modelos CAD por medio de la aplicación *Drafting* del módulo *Mechanical Design* de CATIA V5, en cada plano de parte se procuró incluir toda la información necesaria para su fabricación, incluyendo dimensiones, tolerancias y ajustes en caso de ser necesario. También se elaboraron planos de conjunto por cada sub-ensamble donde se detalla el nombre y ubicación relativa de cada componente con respecto a los otros. Los planos completos se pueden consultar en el Anexo C.

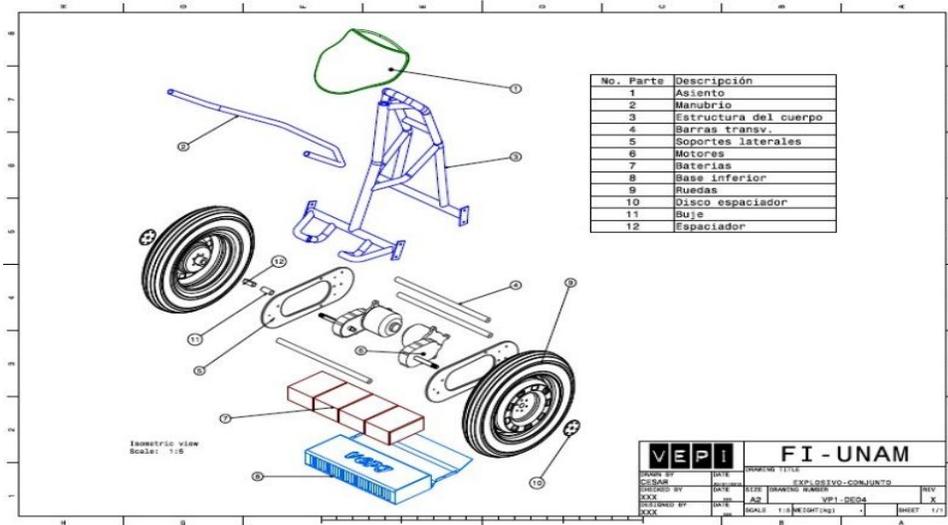


FIGURA 6.1. Explosivo del VEPI, donde se muestran sus partes y componentes principales.

Los códigos de control numérico necesarios para la manufactura de los soportes laterales en la estructura del tren motriz; se generaron por medio del módulo *Machining* de CATIA V5. A partir del modelo geométrico 3D del soporte se generó una simulación del maquinado de la pieza el cual consiste en dos operaciones de fresado; una para cortar un hueco en el centro de la pieza y otra para cortar los bordes en los extremos. Así mismo los barrenos en donde son montados los motores fueron simulados, esta simulación permite que el software calcule las trayectorias de corte a partir de un punto de referencia arbitrario elegido por el usuario; el tamaño y tipo de herramienta en cada operación es definido acorde con el tipo de operación y características geométricas de la forma a maquinarse. Para las operaciones de fresado se seleccionó un cortador recto de media pulgada y brocas de 3/16 y 5/16 para los barrenos; la velocidad de corte y avance se tomaron en base a datos usuales para el maquinado de piezas de aluminio [16] y la velocidad de giro del husillo se calculó de acuerdo con la siguiente expresión.

$$N = \frac{1000V_c}{\pi D_c}$$

Donde :

$$V_c * = \text{velocidad de corte} = 30 \text{ m/min}$$

$$D_c = \text{diametro de la herramienta} = 12.7 \text{ mm}$$

$$N = \frac{30000}{\pi 12.7} \cong 750 \text{ rpm}$$

$$y f * = \text{velocidad de avance} \cong 150 \text{ mm/min}$$

Con esta información el software puede iniciar una simulación de cómo se llevaría a cabo cada proceso, en la Figura 6.2 se observa la simulación del corte al centro de los soportes; en este punto se pueden hacer cambios y/o ajustes si es que el resultado obtenido de la simulación no es el deseado. Una vez conforme con los resultados se generaron los códigos numéricos para cada proceso por separado y almacenados como archivos de texto para poder ser utilizados llegado el momento de la manufactura.

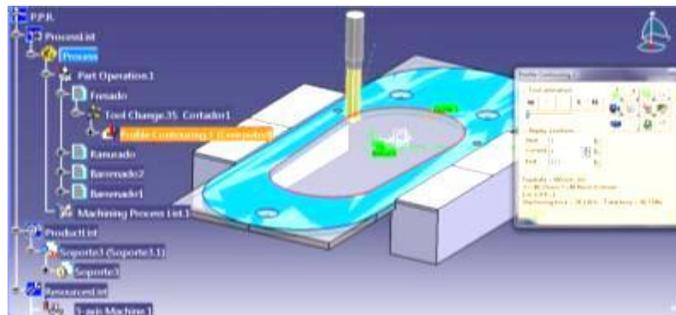


FIGURA 6.2. Simulación del fresado para realizar el corte al centro de los soportes.

6.2.2 LISTA DE PARTES Y COMPONENTES

Otro documento importante en la compilación de la información técnica de cada parte es la lista de materiales (*Bill of Materials*). Con base en el tipo de material seleccionado por cada pieza, se elaboró una lista donde se detalla el nombre y número de pieza además de indicar a que sub-ensamble pertenece; la cantidad de piezas iguales requeridas y a partir de qué tipo de materia prima será fabricada. Esta lista se puede consultar en el Anexo A.

6.3 CONSIDERACIONES PREVIAS A LA MANUFACTURA

En este punto el diseño ha alcanzado el mayor nivel de detalle, se tiene toda la documentación y las especificaciones finales por lo que el siguiente paso es la manufactura de cada una de las piezas y componentes que forman a cada sub-ensamble, para esto se requiere adquirir la materia prima necesaria para cada pieza y definir los procesos para transformarlos hasta obtener su forma final. Antes de comenzar a manufacturar fue necesario tomar algunas decisiones en cuanto a si es factible el manufacturar todas las piezas o si algunos de los componentes podrían ser manufacturados por la contratación de mano de obra especializada. Fue necesario también realizar un análisis sobre los costos derivados de la adquisición de los materiales y componentes así los costos por la contratación de mano de obra.

6.3.1 TOMA DE DECISIONES (HACER O ADQUIRIR)

Para manufacturar las piezas y componentes requeridos se tuvieron a disposición los talleres del Centro de Investigaciones de Diseño Industrial, por lo que en piezas cuya fabricación implicara procesos de corte de materiales (torno, fresa, taladro), trabajo en chapa metálica (doblado, cizallado), soldadura; su elaboración quedaría a cargo del equipo siempre y cuando el nivel de complejidad y precisión de la pieza no fuera tan elevado. Esto reduce el número de componentes sobre los que se puede tener la opción de hacer por medios propios o mandar a manufacturar por fuera.

Los soportes laterales del tren motriz son piezas que como se mencionó en el Capítulo 3; requieren un grado de precisión en su manufactura que solo puede proporcionar una máquina herramienta de control numérico. Se analizaron alternativas como el corte por chorro de agua o emplear algún centro de maquinados CNC en alguna empresa que ofreciera estos servicios, por otro lado se tenía acceso al centro de maquinado SIEMENS EMCO VMC 300 del Laboratorio de Manufactura Avanzada en el CDM. La decisión se tomó considerando que fabricarlo en el CDM no implicaría costos por

mano de obra; aunque se tenía el riesgo de fallas o inconvenientes durante la operación del centro de maquinado en el laboratorio.

La estructura superior constituida por partes de tubo doblado y unidas mediante soldadura es un componente relativamente simple en cuanto a forma y nivel de precisión por lo que el manufacturarlo por parte del equipo no representaba mayor desafío. Sin embargo el tiempo jugó un papel importante en la manufactura de este componente, las fechas de entrega estaban muy próximas y aún se debían atender otras actividades, el realizarlo por el equipo podría implicar retrasos y una baja calidad en el conjunto terminado debido a la falta de experiencia en el uso de la soldadura y doblado de tubo; considerando estos factores se determinó buscar algún taller de herrería y pailería en donde se mandara maquilar la estructura completa con un buen nivel de calidad y a precio razonable.

6.3.2 ESTIMACIÓN DEL COSTO FINAL

En la Tabla 6.2 se muestra una estimación de todos los costos realizados en la construcción del prototipo. Se han considerado los costos directos como componentes eléctricos y electrónicos, materia prima, componentes mecánicos; así como la mano de obra. Los costos indirectos como el uso de energía eléctrica, gas y otros insumos requeridos por las máquinas y herramientas utilizados, transporte de materiales, servicios de ingeniería etc.; no fueron considerados dentro del costo total.

Componentes	Unidad	Cantidad	Costo Unitario (\$)	Costo Total (\$)
Eléctricos-Electrónicos				
Moto-reductores	---	2	2,535	5,070
Baterías	---	4	283	1,132
Cargador de baterías	---	1	806	806
Giroscopio	---	1	350	350
Acelerómetro	---	1	350	350
Micro controladores	---	3	100	300
Mosfets	---	8	35	280
Drivers	---	4	40	160
Circuitos impresos	---	3	30	90
Encoders	---	2	400	800
Sensores en manubrio	---	2	15	30
Mecánicos				
Llantas con Rin	---	2	350	700
Tubo	m	4.5	45	203
Placas de Aluminio	in2	240	1.08	259
Barra de aluminio	m	1.5	93.3	140
Fundas de manubrio	---	2	30	60
Espuma de poliuretano	dm3	10	30	300
Soportes de encoders	---	2	15	30
Lamina de acero	m2	0.75	133.3	100
Tornillería	Kg	0.25	50	13
Mano de obra				
Mano de obra (Estructura)	hr	8	80	640
Mano de obra (Tren motriz)	hr	6	80	480
Mano de obra de asiento	hr	4	80	320
Ensamble	hr	1	50	50
Otros				
Cargos de importación	---	---	2,500	2,500
Total				15,162.1

TABLA 6.2. Costo total aproximado del prototipo.

6.4 MANUFACTURA Y ENSAMBLE DEL PROTOTIPO

La manufactura del prototipo se realizó en dos etapas cronológicamente hablando, en primer lugar se trabajó en todas las piezas que forman parte de la estructura del Tren Motriz. La secuencia de actividades realizadas en cada sub-ensamble se muestra en el cronograma de la Figura 6.3; entre la manufactura del tren motriz y el cuerpo del vehículo se realizaron las actividades correspondientes al simulador descritas en el Capítulo 2.4.4. Una vez concluidas las actividades relacionadas con el simulador se tuvo información suficiente para comenzar la manufactura del cuerpo del vehículo y finalmente el montaje del vehículo.

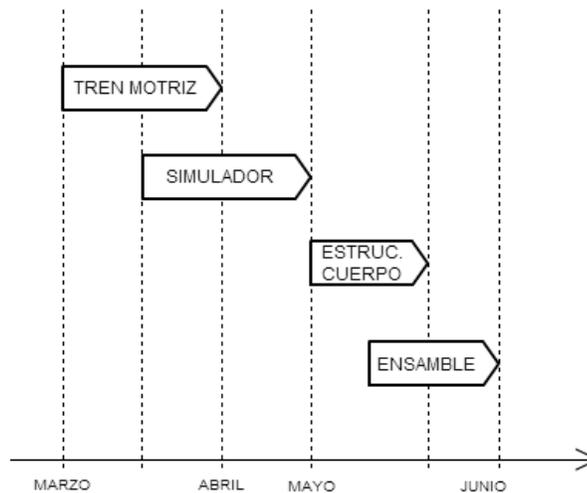


FIGURA 6.3. Cronograma de la manufactura del prototipo.

Los principales procesos de manufactura seguidos para elaborar cada una de las piezas se detallan en el Anexo B. Algunas de las actividades realizadas en la construcción del tren motriz y del cuerpo del vehículo se detallan a continuación.

Para el maquinado de cada soporte lateral se partió de operaciones preparatorias como el corte a la longitud necesaria y el refrentado de los bordes aserrados; una vez listas las placas de aluminio se montaron en el centro de maquinado por control numérico, al cual se le cargaron los programas para el barrenado y fresado de las piezas previamente creados. Todas las operaciones se realizaron sin problema a excepción de los bordes redondeados en los extremos de los soportes los cuales no se pudieron realizar debido a que no se tomó en cuenta que las dimensiones máximas de las piezas a maquinar son de 300mm en el centro de maquinado. Debido a esto el corte de estos bordes se realizó en forma manual.



FIGURA 6.4. Izquierda, fotografía del maquinado de uno de los soportes en la VMC 300; derecha, fotografía de la estructura del tren motriz ensamblada.

A parte de la fabricación de las piezas, se tuvieron que realizar unas adaptaciones en los rines; para que pudieran ser montados correctamente en los ejes de los motores. Estos rines contaban con ciertos elementos necesarios para su montaje en una motoneta pero que para nuestros fines estaban de sobra; estos elementos fueron cortados con ayuda de un torno y además fue necesario barrenar el centro de cada rin a la medida necesaria para que los bujes fabricados ajustaran a apriete dentro de ellos. Finalmente se les dio un granallado para retirar restos de pintura vieja y oxido, para después pintarlos y montar las llantas.



FIGURA 6.5. Izquierda, fotografía de la parte trasera de los rines donde se ven los elementos a retirar; derecha rines ya modificados y con los bujes insertados.

Para la elaboración del asiento se comenzó a partir de un cubo hecho en espuma de Poliuretano con las dimensiones aproximadas al asiento, el material sobrante se retiró por medio del tallado con ayuda de limatones y sierras hasta obtener la forma y dimensiones finales. A este asiento se le agregó una base en madera en la parte inferior para poder ser montado en el vehículo. Por último se mandó acolchar y tapizar.

La estructura del cuerpo del vehículo como ya se mencionó fue elaborada en un taller externo sin embargo un miembro del equipo se encargó de supervisar y verificar que la estructura se hiciera conforme a las dimensiones y forma especificadas en los planos. El resultado fue muy satisfactorio obteniéndose una estructura tubular tal y como se había modelado en CAD.

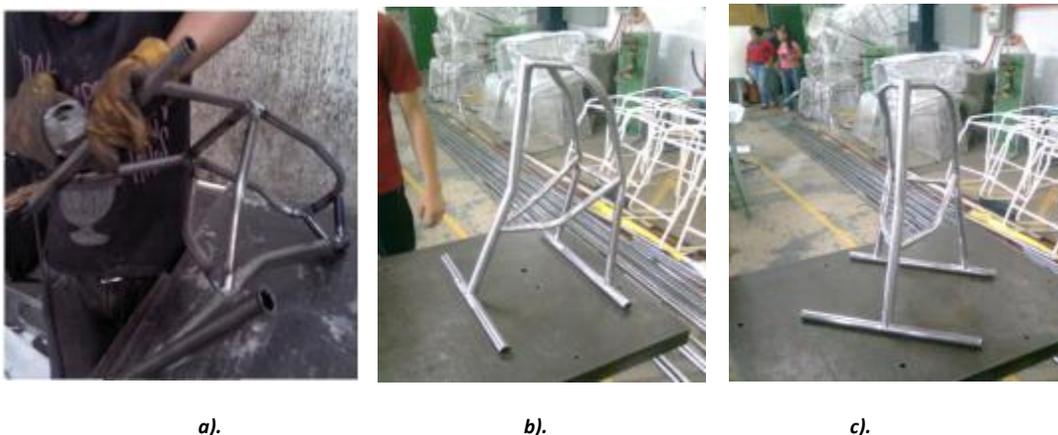


FIGURA 6.6. a) manufactura de la estructura; b) y c) fotografías de la estructura terminada.

Finalmente llegó el momento de montar todos los componentes en su sitio y unir ambos sub-ensambles para conformar al vehículo. Las operaciones de montaje realizadas incluyeron el atornillado de piezas, soldadura de algunos componentes como el manubrio a la estructura, la soldadura de cables y conectores de los motores y baterías, etc.

Con el prototipo ya ensamblado se realizaron algunas pruebas básicas para determinar si era necesario realizar algún ajuste o modificación, simplemente entre los miembros del equipo y de algún voluntario nos sentamos en el vehículo para determinar si las dimensiones eran las correctas y si no existían complicaciones al momento en que una persona ascendía y bajaba del vehículo.

Se encontró con que aún era demasiada la altura del asiento para personas de baja estatura (1.55 m cuando menos), así como la distancia y ubicación del manubrio. En consecuencia la estructura superior tuvo que ser recortada unos 10 cm y volver a soldar el manubrio en una ubicación que resultara más cómoda para las personas. Terminadas estas correcciones el prototipo pasó a manos del equipo encargado del sistema de control y electrónica, para efectuar la implementación del controlador y de los circuitos de potencia necesarios para que el prototipo pudiera funcionar y comenzar con la etapa de pruebas.



FIGURA 6.7. a) y b) prototipo ensamblado con las estructuras, motores, baterías y ruedas; c), d) y e) montaje de los circuitos de control y potencia.

CAPÍTULO 7

PRUEBAS Y RESULTADOS

7.1 IMPLEMENTACIÓN DE PRUEBAS

Las pruebas con el prototipo forman la parte final en las actividades hechas en el proyecto. Los resultados que arrojaron determinaron entre otras cosas si el desempeño de los sistemas de control, potencia y mando de operación, es suficiente para hacer funcionar al vehículo. En cuanto a la parte mecánica se evaluó si el sistema de tracción trabaja correctamente y en general el desempeño de todos los elementos mecánicos del vehículo.

Las pruebas fueron planeadas para realizarse en forma progresiva con el fin de observar el comportamiento del vehículo en cada una y realizar los ajustes y modificaciones necesarios antes de continuar con el siguiente nivel de prueba. Fue así que se definieron tres niveles de prueba tomando como base la cantidad de peso añadido al prototipo:

1. Pruebas con el vehículo sin peso añadido.
2. Pruebas con peso muerto añadido.

La secuencia seguida para cada una de las pruebas se describe en el diagrama de la Figura 7.1.

Sólo se realizaron pruebas con un movimiento rectilíneo; esto se debió a que el módulo del mando de operación no se tenía listo entonces, por lo que el realizar vueltas y giros no pudo ser posible. Los ángulos de inclinación medidos por el giroscopio y acelerómetro se monitorearon durante la duración de cada prueba mediante un módulo *Bluetooth* [6]; el cual enviaba la información en forma inalámbrica hasta una terminal donde era registrada por medio de un software. Por cada prueba se colocaba al vehículo en una posición de equilibrio y mediante el software de monitoreo se determinaba el ángulo medido respecto a la vertical por el giroscopio y acelerómetro coincidente con esta posición de equilibrio. A este ángulo se le daba una tolerancia de ± 3 grados para tener un rango en cual los motores se mantuvieran apagados y una vez rebasado el límite entrara en acción el sistema de control para estabilizar nuevamente al prototipo.

Dado que se desconocía cual sería el comportamiento del vehículo durante las pruebas; se tomaron algunas medidas de seguridad. Se instaló un interruptor de paro de emergencia.

Para las pruebas con peso muerto fueron colocadas pesas con diferentes masas en una base adaptada al prototipo en la parte superior, el máximo peso añadido fue de 40 Kgf.

7.2 RESULTADOS Y COMENTARIOS

Luego de la realización de las pruebas descritas en el apartado anterior, se obtuvieron los siguientes resultados.

a) Pruebas sin peso añadido

- El prototipo al ser liberado de su posición de reposo y aplicar una pequeña fuerza que lo sacara del equilibrio logro mantener su estabilidad sin problemas.
- Al inclinar el prototipo aplicando una mayor fuerza el sistema de control logro hacer girar los motores con la velocidad necesaria para alcanzar nuevamente la posición de equilibrio.
- Se observó que el tiempo de respuesta del sistema era mayor al inclinar hacia atrás el prototipo per en general la respuesta fue casi inmediata después de sacarlo del equilibrio.

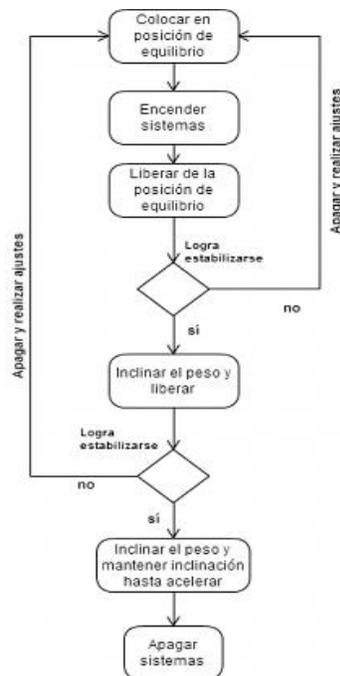


Figura 7.1. Proceso seguido durante las pruebas.

- Se observó que si el ángulo de inclinación con respecto a la posición de equilibrio era superior a los 10 grados y menor a los 15 grados el sistema de control ya no es capaz de recuperar por sí mismo la posición de equilibrio; acelerando los motores en proporción al tamaño del ángulo de inclinación.

b) Pruebas con peso muerto añadido

- Durante las pruebas de estabilización el sistema de control no fue capaz de equilibrar al vehículo sin importar si el ángulo de inclinación fuera grande o pequeño. En el mejor de los casos el sistema respondía activando los motores y proporcionándoles una velocidad que apenas era suficiente para no dejar caer al vehículo pero no la necesaria para recuperar la vertical. En el peor de los casos el sistema respondía de forma violenta activando los

motores a gran velocidad en ambos sentidos de giro provocando sacudidas y vibraciones sin lograr nunca estabilizarse en algún punto.

- En forma similar que en las pruebas sin peso, al inclinar el prototipo más de 10 grados el movimiento es constante en línea recta adquiriendo mayor velocidad si el ángulo de inclinación aumentaba.



a).

b).

c).

Figura 7.2. a) Cargando el software de monitoreo, b) prototipo con las pesas encima y ajustando el programa del controlador, c) el prototipo durante una prueba con peso muerto.

Comentarios referentes a las pruebas:

Durante las pruebas se encontraron algunos problemas que afectaban el desempeño del controlador como la presencia de vibraciones excesivas que provocan errores en las mediciones del acelerómetro y giroscopio. Las baterías al no estar adecuadamente fijadas a su base eran sacudidas al comenzar los motores a funcionar provocando mucha vibración; estos efectos adversos se corrigieron fijando correctamente las baterías y verificando que ningún otro elemento estuviera mal sujetado.

Durante las pruebas con peso muerto se encontró que, la posible causa de que no se lograra estabilizar el prototipo; se debía a que los encoders no estaban retroalimentando correctamente al sistema de control, por lo que no hacía girar a los motores con la velocidad necesaria. Se realizaron varios ajustes, pero no se logró determinar si el problema se debía a que existe deslizamiento de uno de los ejes, ya sea del motor o el encoder, dentro del cople; o si alguno de los encoders no funcionaban correctamente.

Es importante destacar que se determinó que las pruebas con usuarios no se llevarían a cabo hasta lograr que el prototipo se estabilice con peso muerto. Hasta entonces no es seguro para una persona subirse al vehículo y operarlo.

CONCLUSIONES

Al finalizar este proyecto se consiguió construir y ensamblar el prototipo experimental del VEPI con la integración de la mayoría de los módulos, así como realizar pruebas de comportamiento del vehículo a nivel sistema. Por lo tanto se puede afirmar que el objetivo de esta tesis se cumplió y los alcances propuestos fueron logrados satisfactoriamente. Esto con base en los resultados obtenidos durante las pruebas de funcionamiento, en las que se encontró que el vehículo era capaz de estabilizarse por sí mismo al menos sin cargas añadidas, y de lograr un avance en línea recta. Lo que implica que el diseño del módulo mecánico fue satisfactorio aunque no suficiente ya que aún no es posible estabilizar al vehículo con algún usuario.

En cuanto a los análisis teóricos de la resistencia de los materiales empleados y de la dinámica general del vehículo, se pudieron generar datos que por un lado justifican la utilización de los materiales propuestos en la construcción del prototipo y por otro proporcionan límites de operación y diseño del vehículo. Sin embargo no se lograron obtener datos experimentales que validaran a estos datos teóricos, pero éstos no se plantearon como parte de los alcances de este trabajo por lo que se deja para futuros trabajos.

Es importante señalar que el cumplimiento del objetivo y el logro de los alcances se debió en gran parte al seguimiento paso a paso de la metodología de diseño así como al uso de herramientas del diseño como el CAD, CAE y el CAM, pero sobre todo al trabajo interdisciplinario; ya que el punto de vista y conocimiento especializado de cada miembro del equipo, ayudo a dar solución a los problemas que se fueron presentando durante el desarrollo del proyecto.

En cuanto al desarrollo del concepto:

- Se realizó una investigación acerca de otros conceptos de vehículos de péndulo invertido y de las soluciones que éstos proponen, así como aspectos relacionados con el uso y la seguridad de estos vehículos.
- Se generaron varias opciones de concepto y se evaluaron por medio de un simulador.
- En base a la información recabada con las pruebas realizadas con el simulador se logró elegir un concepto de diseño.
- El concepto de vehículo elegido, pretende ofrecer algunas ventajas como: poder usarlo en espacios reducidos, guardarse en la cajuela de un automóvil, manejarse sin la necesidad de que las personas se inclinen al frente o atrás, proporcionar una postura de manejo que sea confortable y segura para el usuario.

En cuanto a la determinación del diseño y los análisis teóricos:

- Se logró establecer una arquitectura del prototipo que por una parte se apega a los requerimientos de los usuarios y al concepto de vehículo generado y por otra le confiere la estabilidad mecánica necesaria para que el sistema de control logre estabilizar el vehículo a partir de su posición de reposo.
- Los análisis por el método de elementos finitos de los componentes estructurales del prototipo, comprobaron que la rigidez de éstos, era la adecuada para el tipo de servicio a que serán sometidos.
- Se comprobó también por medio del AEF que las propiedades mecánicas de los materiales empleados en la construcción de las estructuras eran las adecuadas y por lo tanto se justificaba su utilización.
- Se logró realizar una caracterización dinámica del vehículo, que permitió establecer algunos límites operacionales y además encontrar la posición del centro de gravedad del vehículo y sus variaciones con respecto a las dimensiones y masa corporal de los posibles usuarios.
- De acuerdo con la caracterización dinámica del vehículo, se estableció que la velocidad máxima en zonas peatonales y ciclistas sea de 9 Km/h y de 15 Km/h en vías rectas o con radios de curvatura mayores a los 5 m.
- Se encontró que la máxima desviación del centro de gravedad con respecto a la vertical es de 3 grados, lo cual no impide equilibrar el vehículo por medio del controlador desarrollado.

- A partir del análisis matemático del desempeño del tren motriz se encontró que los motores adquiridos tienen la suficiente potencia y par para mover al vehículo hasta con una carga máxima de 100 Kg con una pendiente máxima del 20%.
- Se encontró que el tren motriz puede ser capaz de alcanzar los 20 Km/h con carga máxima en terrenos sin pendiente y 16 Km/h con carga máxima en una pendiente del 10%.

En cuanto a la manufactura del prototipo y las pruebas:

- Se logró manufacturar la mayoría de partes y componentes mecánicos, quedando pendiente la elaboración de una base más adecuada para las baterías y circuitería, así como de las cubiertas de la estructura superior y de un par de estribos ajustables.
- De las pruebas realizadas se logró estabilizar al prototipo aplicando el controlador y moverlo hacia adelante y atrás, sin añadir cargas sobre el prototipo.
- Por otro lado al añadir cargas muertas al prototipo, la respuesta del controlador no fue suficiente para estabilizar al prototipo, logrando únicamente un movimiento en línea recta por un corto periodo de tiempo antes de que el prototipo se desplomara.
- No se logró realizar ninguna prueba que determinara si el desempeño del tren motriz concuerda con la estimación teórica realizada. Tampoco se logró determinar el comportamiento del vehículo en trayectorias curvas con movimiento acelerado.

TRABAJO FUTURO

En cuanto al prototipo experimental aún es necesario lograr que el controlador funcione correctamente y revisar fallas en el módulo mecánico, para lograr la estabilización con cargas muertas; además de que es necesario que sea implementado el módulo de mando para lograr que el prototipo pueda avanzar y dar giros; una vez que se logre hacer funcionar al prototipo con cargas, se podrán realizar pruebas con usuarios, para lo que será necesario adaptar algunos dispositivos de seguridad al prototipo.

En cuanto al diseño del VEPI, aún se deben tomar en cuenta aspectos como el que se pueda almacenar en una cajuela lo cual implica seleccionar y diseñar partes y componentes más ligeros pero sin sacrificar el desempeño y capacidad de carga del vehículo, además de incluir sistemas que la permitan al vehículo desmontarse o bien plegarse. El diseño del vehículo se ha continuado refinando por medio de modelos en CAD [22], como se ve en la Figura C.1.



FIGURA C.1. Algunos renders que muestran una nueva versión para el VEPI [22].

REFERENCIAS

- [1]. *M. Asimow (1962), Introduction to Design Prentice-Hall.*
- [2]. *George E. Dieter, Linda C. Schmidt. Engineering Design — 4th ed. McGraw-Hill*
- [3]. Vicente Borja Ramírez, Alejandro C. Ramírez Reivich (2006). Cuadernos de gestión de tecnología. Innovación de producto, Premio Nacional de Tecnología.
- [4]. <http://www.segway.com/>
- [5]. <http://www.google.com/patents/US6779621>.
- [6]. Ricardo Vázquez Leyva (2012). Implementación de un controlador para un vehículo eléctrico de péndulo invertido (Tesis Maestría). Universidad Nacional Autónoma De México.
- [7]. Alfredo Mariscal Castillo (2013). Diseño de un vehículo eléctrico de péndulo invertido (Tesis Maestría). Universidad Nacional Autónoma De México.
- [8]. <http://rynomotors.com/>
- [9]. <http://www.segway.com/puma/>
- [10]. <http://www.hondanews.com/channels/149/releases/573404ed-c2ed-e058-891a-23004c34bac6>
- [11]. http://www.toyota-global.com/innovation/partner_robot/
- [12]. <http://focusdesigns.com/>
- [13]. <http://www.ibotnow.com/>
- [14]. <http://amemoving.mx/segway/faq.html>
- [15]. *Matthias Kühn, Dr. jur. Alexander Grabolle (2009). Assessing the safety characteristics of the Segway, Unfallforschung der Versicherer.*
- [16]. <http://udv.de/service/suchergebnisse/?q=segway>
- [17]. *George E. Dieter, Linda C. Schmidt. Engineering Design, Prototype and model testing throughout the design process, p. 371. McGraw-Hill.*
- [18]. *K. T. Ulrich and S. H. Eppinger, Product Design and Development, 3d ed., McGraw-Hill.*
- [19]. *George E. Dieter, Linda C. Schmidt. Engineering Design, Embodiment design, p. 308.*
- [20]. Ingrid Ibarra, Ricardo Vázquez. Control y Mando Para Un Vehículo Eléctrico De Péndulo Invertido. Artículo publicado en las memorias del XXVII Congreso de Instrumentación SOMI 2012.
- [21]. *M. F. Ashby (2009). Materials selection in mechanical design, Materials selection-the basics, p. 99. Elsevier.*
- [22]. Alfonso Gonzales Figueroa (2013). Vehículo de Transporte Personal con Tecnología de Autobalanceo (Tesis de Licenciatura), Centro de Investigaciones de Diseño Industrial. Universidad Nacional Autónoma De México.
- [23]. <http://www.semac.org.mx/index.php/ergonomia.html>

- [24]. <http://www.g-se.com/a/662/antropometria/>
- [25]. David G. Ullman (2003). *The mechanical design process. Human factors in design*, p. 415. McGraw-Hill.
- [26]. <http://ocw.mit.edu/courses/materials-science-and-engineering/3-11-mechanics-of-materials/>
- [27]. William F. Hosford (2001). *Metal forming mechanics and metallurgy, Plasticity*, p. 20. Cambridge.
- [28]. <http://www.matweb.com/>
- [29]. William F. Smith (1999). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales. Aleaciones de ingeniería*, p. 446. McGraw-Hill.
- [30]. William F. Hosford (2001). *Metal forming mechanics and metallurgy, Stress and strain*, p. 10. Cambridge.
- [31]. *Abaqus 6.10 Documentation, Getting Started with Abaqus: Interactive Edition chapter 7 Linear dynamics*.
- [32]. Fabela Gallegos, et al (2005). Aspectos Generales sobre la Caracterización Mecánica de Vehículos Terrestre. Base de una Publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte.
- [33]. Centeno F. Oscar, et al (2005). Efecto de parámetros mecánicos y geométricos sobre el comportamiento dinámico de un vehículo. Base de una Publicación Técnica del Instituto Mexicano del Transporte.
- [34]. Fabela Gallegos. Resistencia a la volcadura de vehículos. *Revista ciencia y desarrollo*, febrero 2008, vol. 34, no. 216, p. 18-23.
- [35]. Frank M. White. *Fluid Mechanics (4 ed.). Flow past immersed bodies*, p. 460. McGraw-Hill.
- [36]. James Larminie, et al. (2003). *Electric Vehicle Technology Explained. Electric vehicle modelling*, p. 187. John Wiley & Sons.
- [37]. Kerzner, Dr. H., *Project management: A Systems Approach to Planning, Scheduling, and Controlling, Third Edition*, Van Nostrand Reinhold, NY, 1989, p84.
- [38]. Munro and Associates, Inc. (2009) *The design determines the cost. [online] available from [02 September 2011]*.
- [39]. Michael C. Baeriswyl and Steven D. Eppinger (2011). *Teaching Design For Environment In Product Design Classes. International Conference On Engineering Design, ICED11*.
- [40]. John A. Schey (2002). *Procesos de Manufactura. Cap. 16, Elección de las variables del proceso* p709. McGraw-Hill.

ANEXOS

ANEXO A

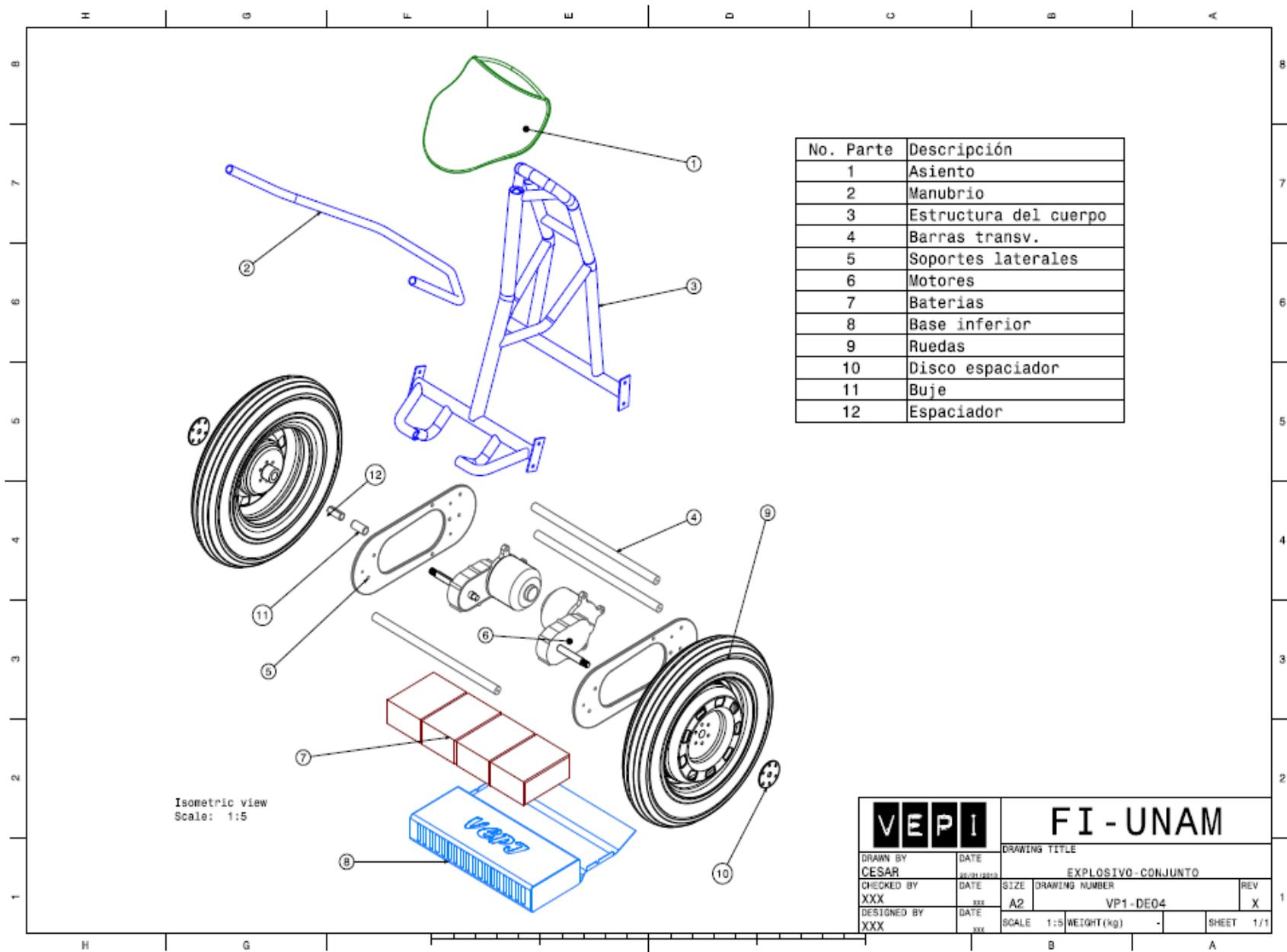
BILL OF MATERIALS					
  					
Producto :		VEPI			
Ensamble	No.	# Part.	Cantidad	Nombre	Material
TREN MOTRIZ	#1	VP1-101	2	SOPORTE LATERAL	PLACA 1/4, 6061-T6
	#2	VP1-102	3	BARRA TRANSVERSA	REDONDO 3/4, 6061-T6
	#3	VP1-103	1	BASE DE LAS BATERIAS	LAMINA ACERO
	#4	VP1-104	6	TORNILLO 5/16"	SAE 2
	#5	VP1-105	6	TUERCA DE SEGURIDAD	SAE 2
	#6	VP1-106	6	TCHC ALLEN 3/16"	CLASE 8.8
	#7	VP1-107	2	RIN 10"	ALUMINIO
	#8	VP1-108	2	LLANTA 3.5-10 51J	
	#9	VP1-109	2	ESPACIADOR	SAE1018
	#10	VP1-110	2	BUJE	SAE1020
	#11	VP1-111	2	COPLA DEL ENCODER	REDONDO 3/4, 6061-T6
	#12	VP1-112	1	DISCO ESPACIADOR	SAE1020
	#13	VP1-113	6	T. A. CAB. GOTA 1/4 X 2"	CLASE 5.8
	#14	VP1-114	2	SOPORTE DE ENCODER	LAMINA ACERO
	#15	VP1-115	4	BATERIAS 12V 10A	
	#16	VP1-116	2	MOTOR 450W	
	#17	VP1-117	2	ENCODER	
CUERPO DEL VEHÍCULO	#18	VP1-201	1	SOPORTE 1	TUBO SAE 1018
	#19	VP1-202	1	SOPORTE 2	TUBO SAE 1018
	#20	VP1-203	2	TRAVE 1	TUBO SAE 1018
	#21	VP1-204	2	TRAVE 2	TUBO SAE 1018
	#22	VP1-205	1	TRAVE 3	TUBO SAE 1018
	#23	VP1-206	1	APOYO 1	TUBO SAE 1018
	#24	VP1-207	1	APOYO 2	TUBO SAE 1018
	#25	VP1-208	2	ESTRIBO 1.1	TUBO SAE 1018
	#26	VP1-209	2	ESTRIBO 1.2	TUBO SAE 1018
	#27	VP1-210	1	MANUBRIO	TUBO SAE 1018
	#28	VP1-211	4	PLACA/SOPORTE	SOLERA 1/4, ACERO
	#29	VP1-212	1	ASIENTO	POLIURETANO
	#30	VP1-213	1	BASE ASIENTO	MADERA
	#31	VP1-214	8	TORNILLO 1/4"	SAE 2
	#32	VP1-215	8	TUERCA-RONDANA 1/4"	SAE 2

ANEXO B

TABLA DE PROCESOS					
Producto: VEPI					
ENSAMBLE	PARTE	No.	OPERACIÓN		
TREN MOTRIZ	SOPORTE LATERAL	1	ASERRADO		
		2	REFRENTADO		
		3	BARRENADO CNC		
		4	FRESADO CNC		
		5	GRANALLADO		
	BARRA TRANSVERSA	1	ASERRADO		
		2	REFRENTADO		
		3	BARRENADO		
		4	MACHUELEADO		
	BUJE	1	ASERRADO		
		2	REFRENTADO		
		3	CILINDRADO		
		4	BARRENADO		
		5	BROCHADO		
		6	CHAFLANADO		
		7	MOLETEADO		
	COPLER DEL ENCODER	1	ASERRADO		
		2	REFRENTADO		
		3	BARRENADO		
		4	MACHUELEADO		
		5	CHAFLANADO		
	ESPACIADOR	1	ASERRADO		
		2	REFRENTADO		
		3	BARRENADO		
		4	RANURADO-FRESA		
	SOPORTE DE ENCODER	1	CIZALLADO		
		2	BARRENADO		
		3	DOBLADO		
BASE DE LAS BATERIAS	1	CIZALLADO			
	2	BARRENADO			
	3	DOBLADO			
	4	PULIDO DE BORDES			
CUERPO DEL VEHÍCULO	SOPORTE 1				
	SOPORTE 2				
	TRAVE 1	1	ASERRADO		
	TRAVE 2	2	CORTE DE BORDES		
	TRAVE 3	3	CURVADO EN FRIO		
	APOYO 1	4	SOLDADURA		
	APOYO 2	5	GRANALLADO		
	ESTRIBO 1.1	6	BARRENADO		
	ESTRIBO 1.2				
	MANUBRIO				
	PLACA/SOPORTE	1	CORTE		
2		BARRENADO			
3		PULIDO			

ANEXO C

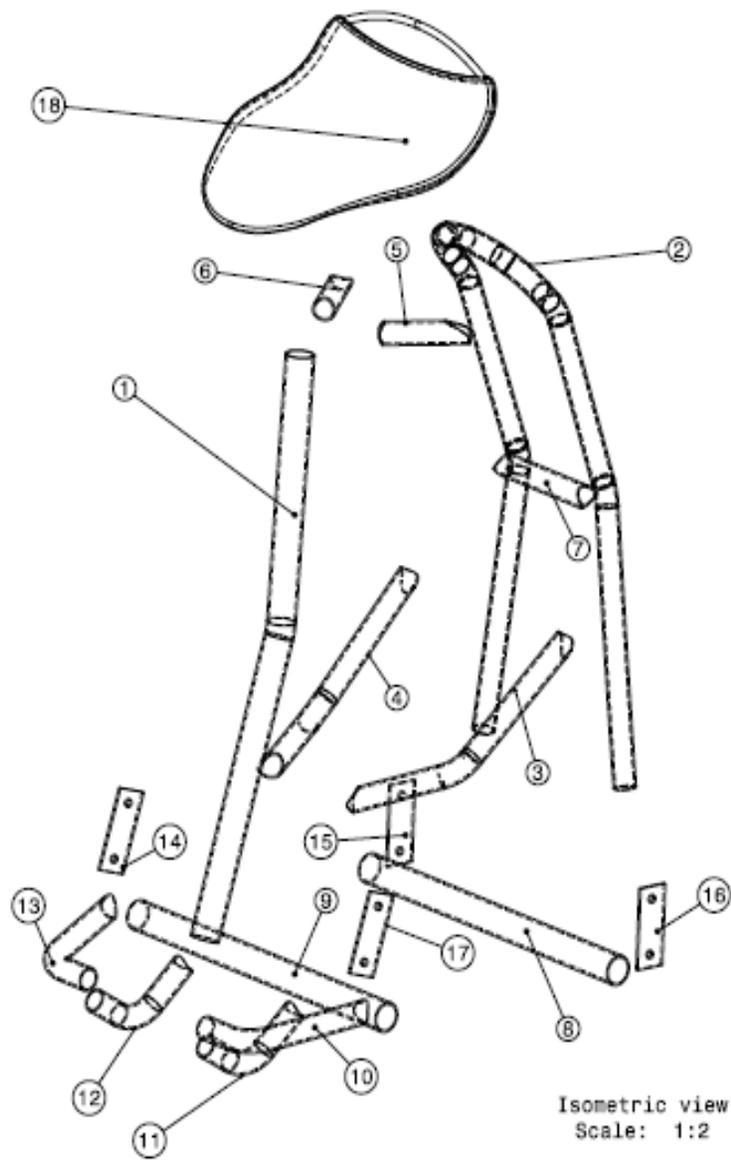
PLANOS



No. Parte	Descripción
1	Asiento
2	Manubrio
3	Estructura del cuerpo
4	Barras transv.
5	Soportes laterales
6	Motores
7	Baterías
8	Base inferior
9	Ruedas
10	Disco espaciador
11	Buje
12	Espaciador

Isometric view
Scale: 1:5

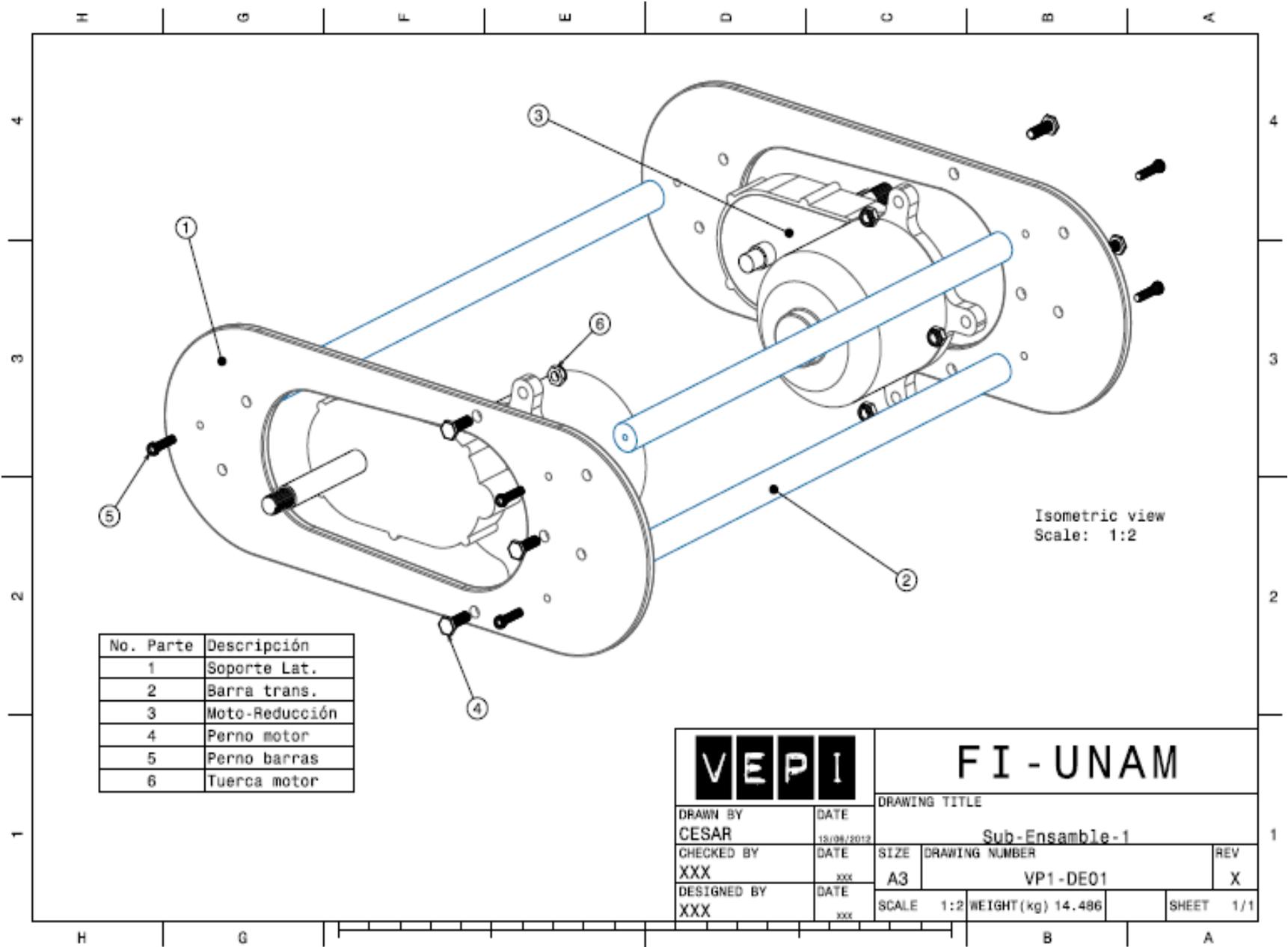
VEPI		FI - UNAM	
DRAWN BY CESAR		DRAWING TITLE EXPLOSIVO - CONJUNTO	
CHECKED BY XXX		DATE 26/01/2013	REV X
DESIGNED BY XXX		DATE XXX	SCALE 1:5 WEIGHT(kg) - SHEET 1/1
SIZE A2		DRAWING NUMBER VP1-DE04	



No. Parte	Descripcion
1	SOPORTE-1
2	SOPORTE-2
3	TRAVE-1
4	TRAVE-2
5	TRAVE-3
6	TRAVE-4
7	TRAVE-5
8	APOYO-1
9	APOYO-2
10	ESTRIBO-1.1
11	ESTRIBO-1.2
12	ESTRIBO-2.1
13	ESTRIBO-2.2
14	PLACA SOPORTE-1
15	PLACA SOPORTE-2
16	PLACA SOPORTE-3
17	PLACA SOPORTE-4
18	ASIENTO

Isometric view
Scale: 1:2

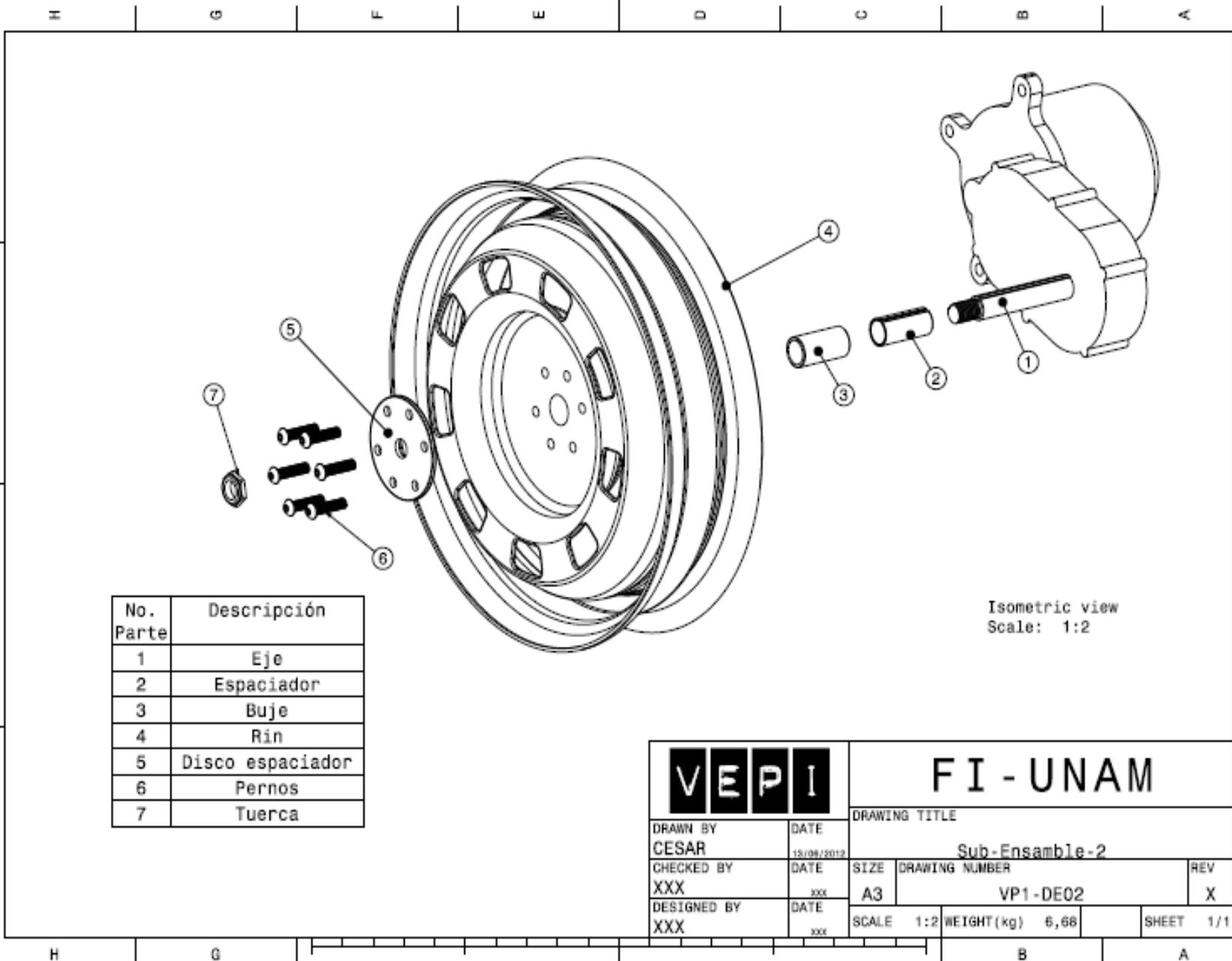
VEPI		FI - UNAM	
DRAWN BY CUCAR	DATE 	DRAWING TITLE Sub-Ensamble-3	
CHECKED BY XXX	DATE 	DESIGNED BY A1	DRAWING NUMBER VPI-0603
DISTINGUISHED BY XXX	DATE 	SCALE 1:2	SHEET 4/8



Isometric view
Scale: 1:2

No. Parte	Descripción
1	Soporte Lat.
2	Barra trans.
3	Moto-Reducción
4	Perno motor
5	Perno barras
6	Tuerca motor

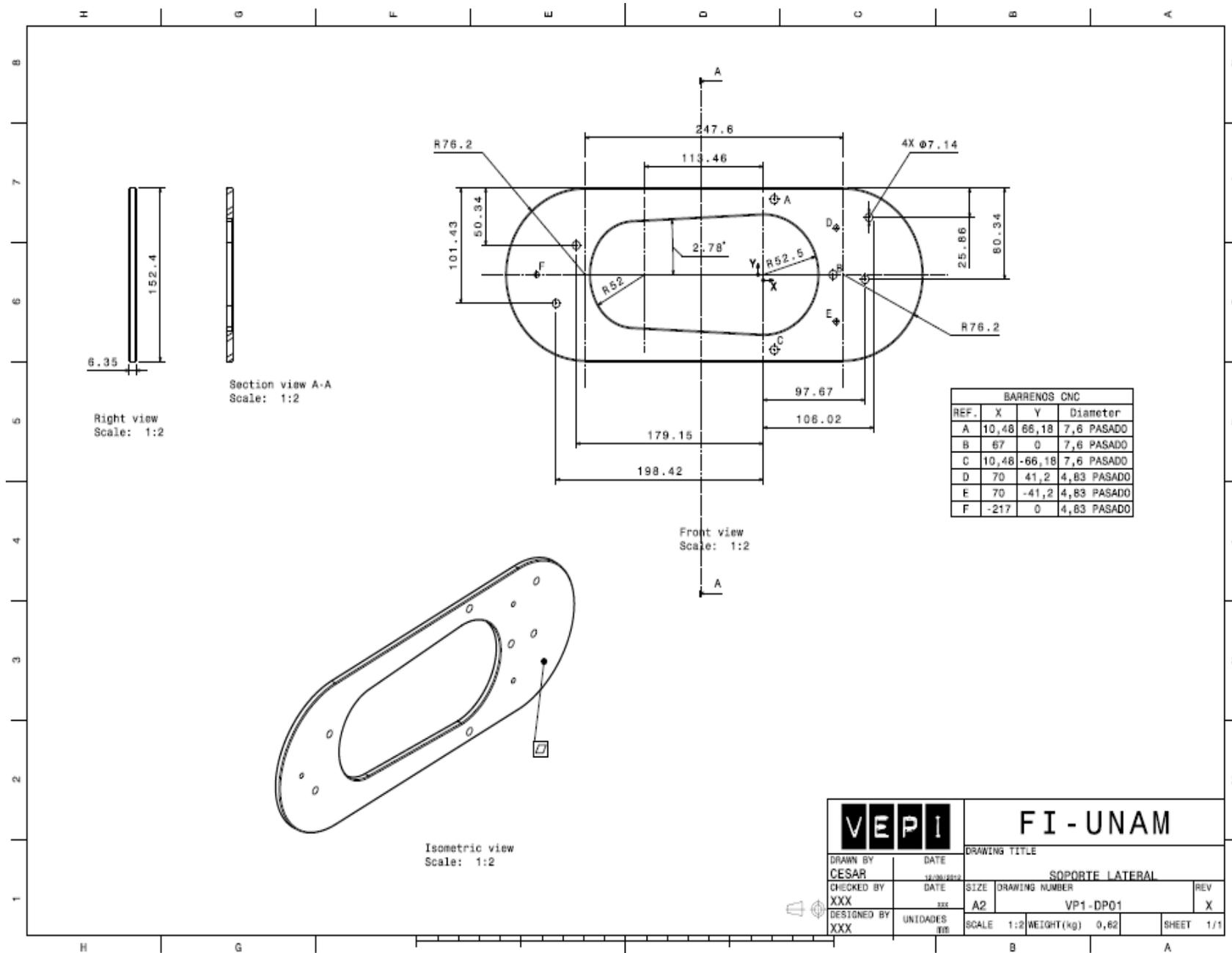
VEPI		FI - UNAM		
DRAWN BY CESAR		DRAWING TITLE Sub-Ensamble-1		
DATE 13/08/2012	CHECKED BY XXX	SIZE A3	DRAWING NUMBER VP1-DE01	REV X
DESIGNED BY XXX	DATE xxx	SCALE 1:2	WEIGHT(kg) 14.486	SHEET 1/1



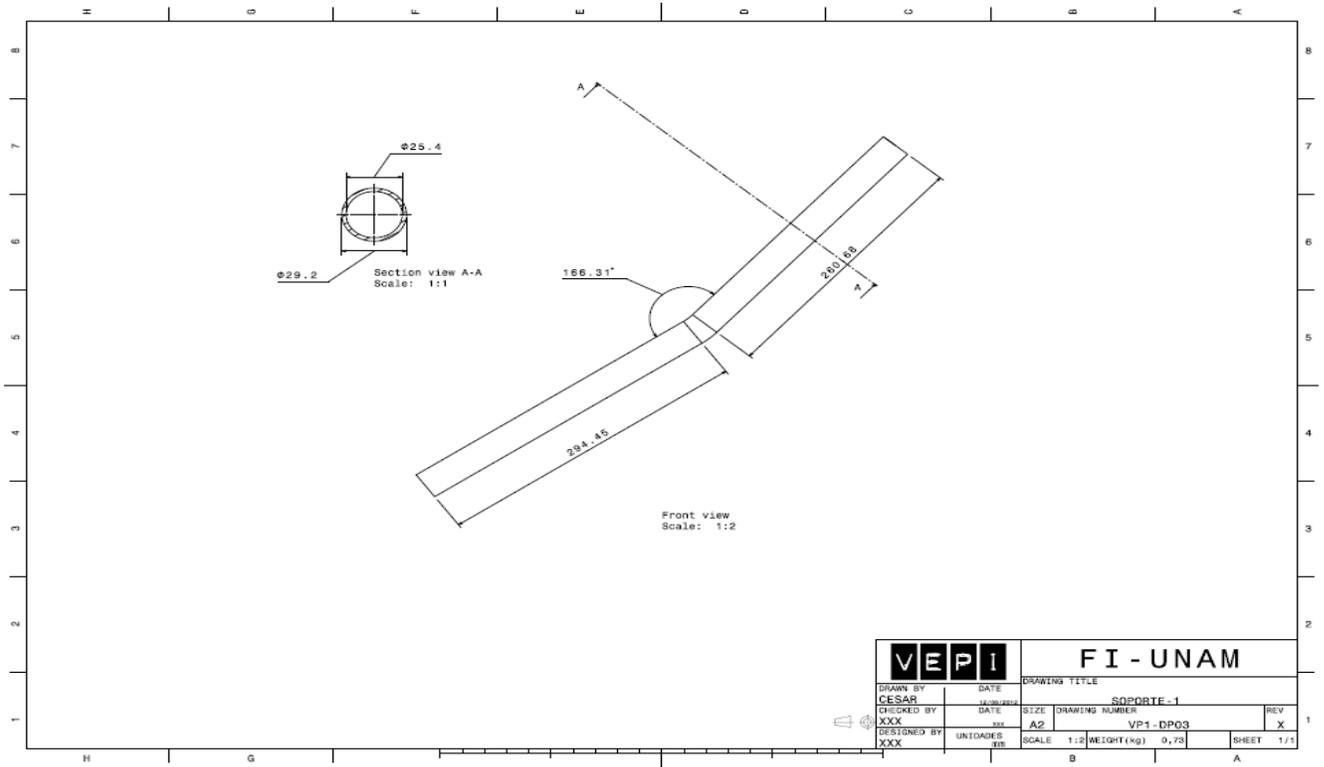
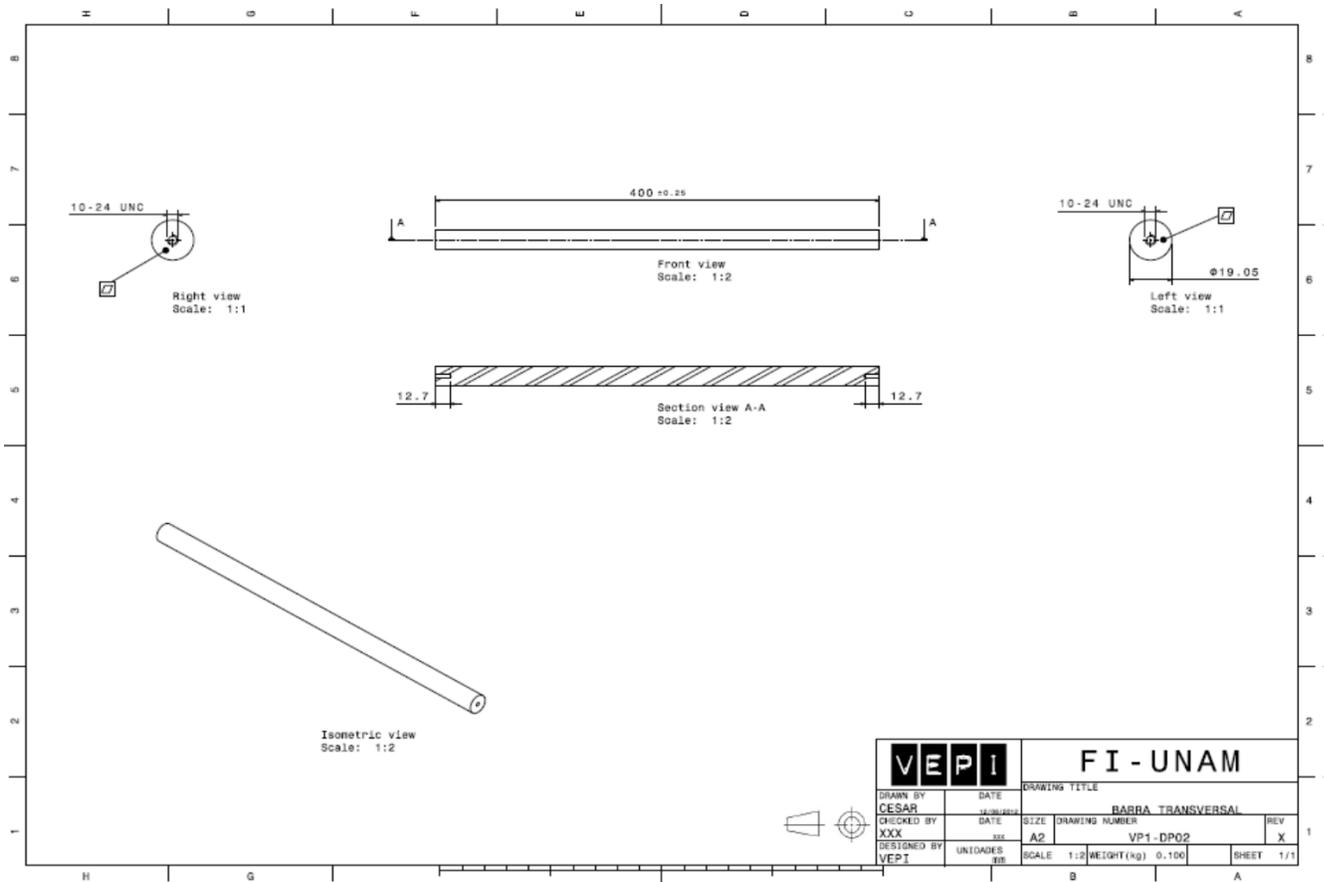
No. Parte	Descripción
1	Eje
2	Espaciador
3	Buje
4	Rin
5	Disco espaciador
6	Pernos
7	Tuerca

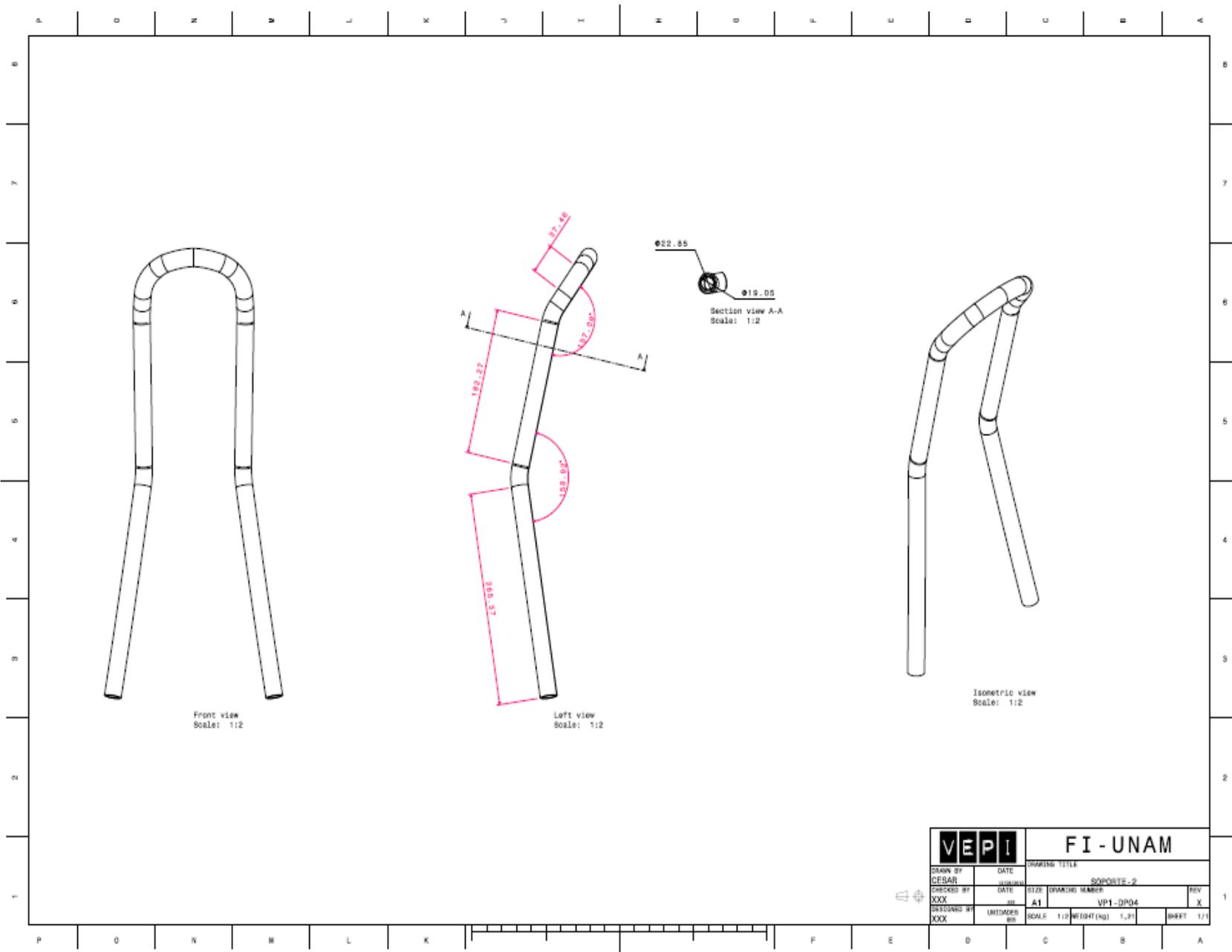
Isometric view
Scale: 1:2

VEPI		FI - UNAM	
DRAWN BY CESAR		DRAWING TITLE Sub-Ensamble-2	
CHECKED BY XXX	DATE 13/06/2013	SIZE A3	DRAWING NUMBER VP1-DE02
DESIGNED BY XXX	DATE XXX	SCALE 1:2	REV X
		WEIGHT(kg) 6,68	SHEET 1/1

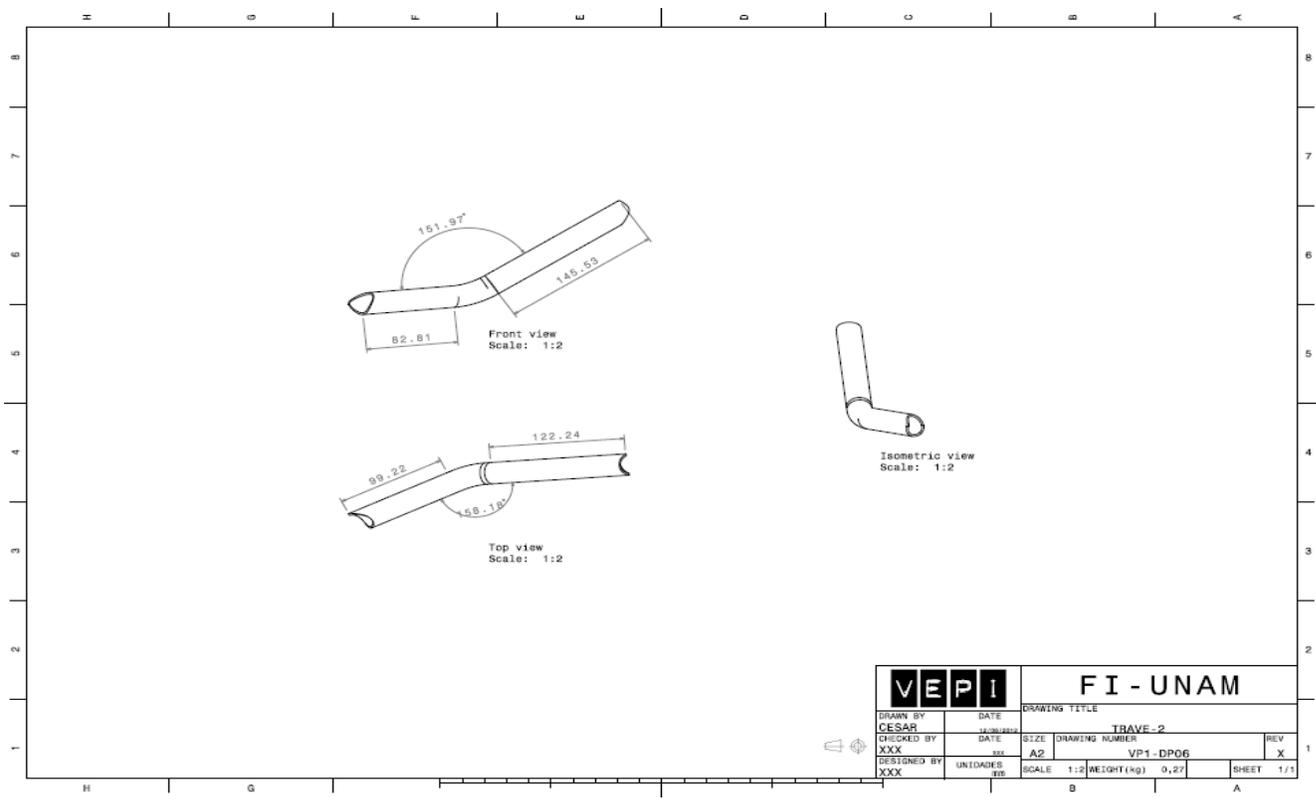
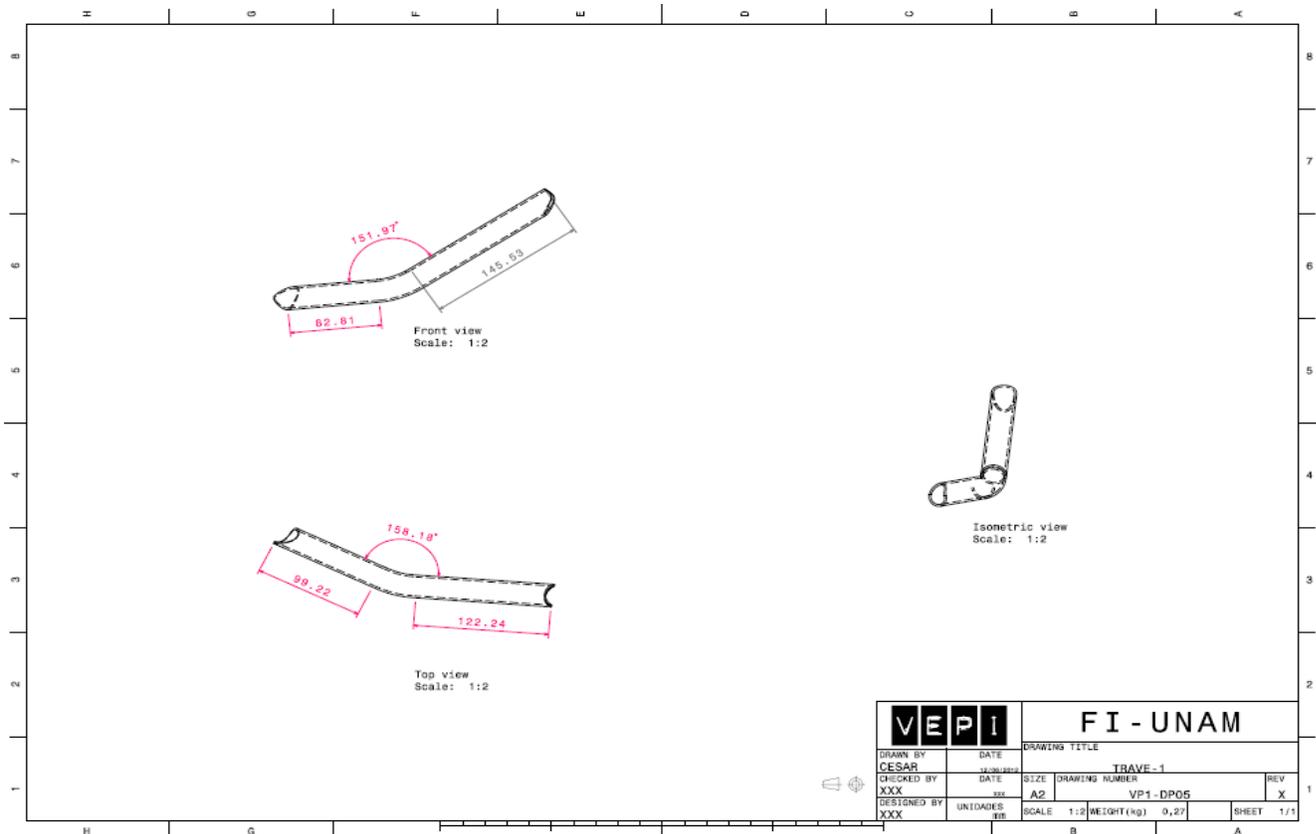


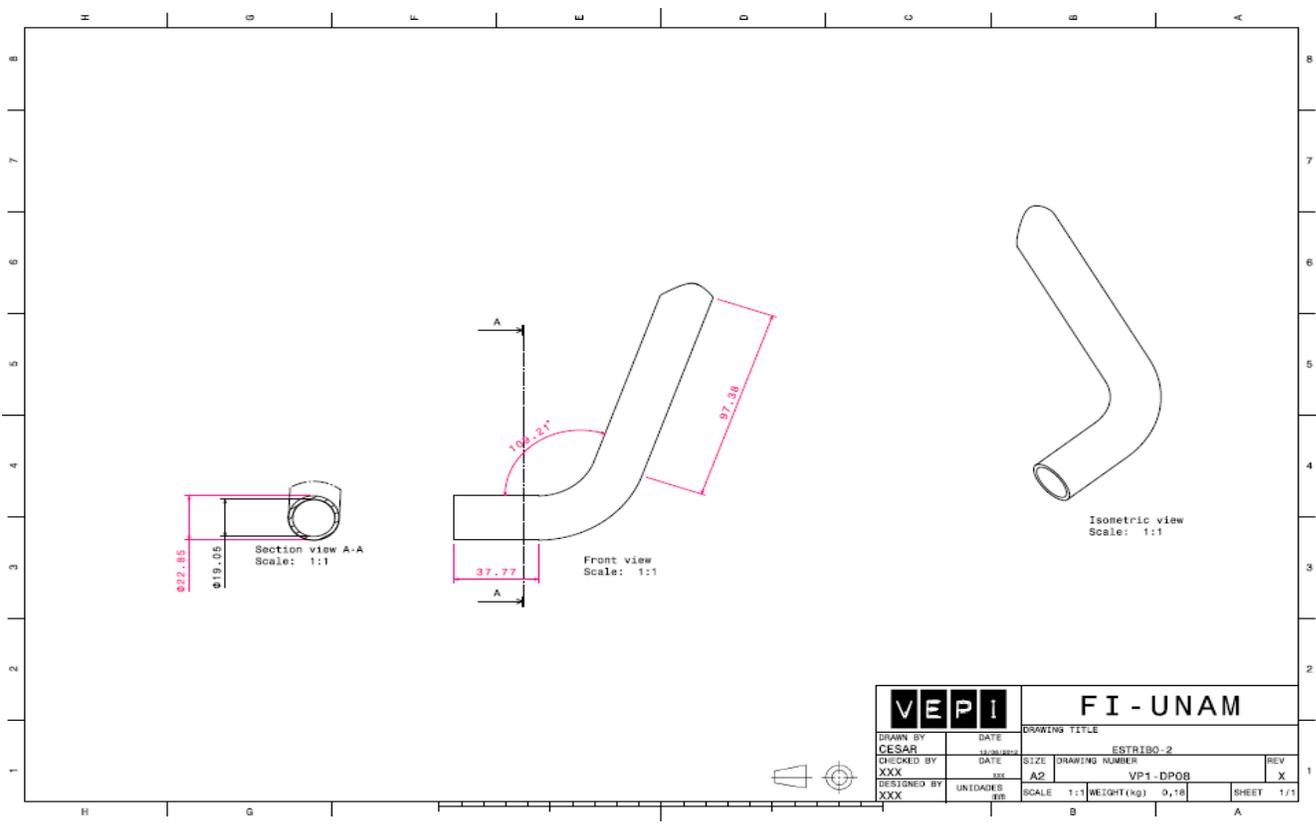
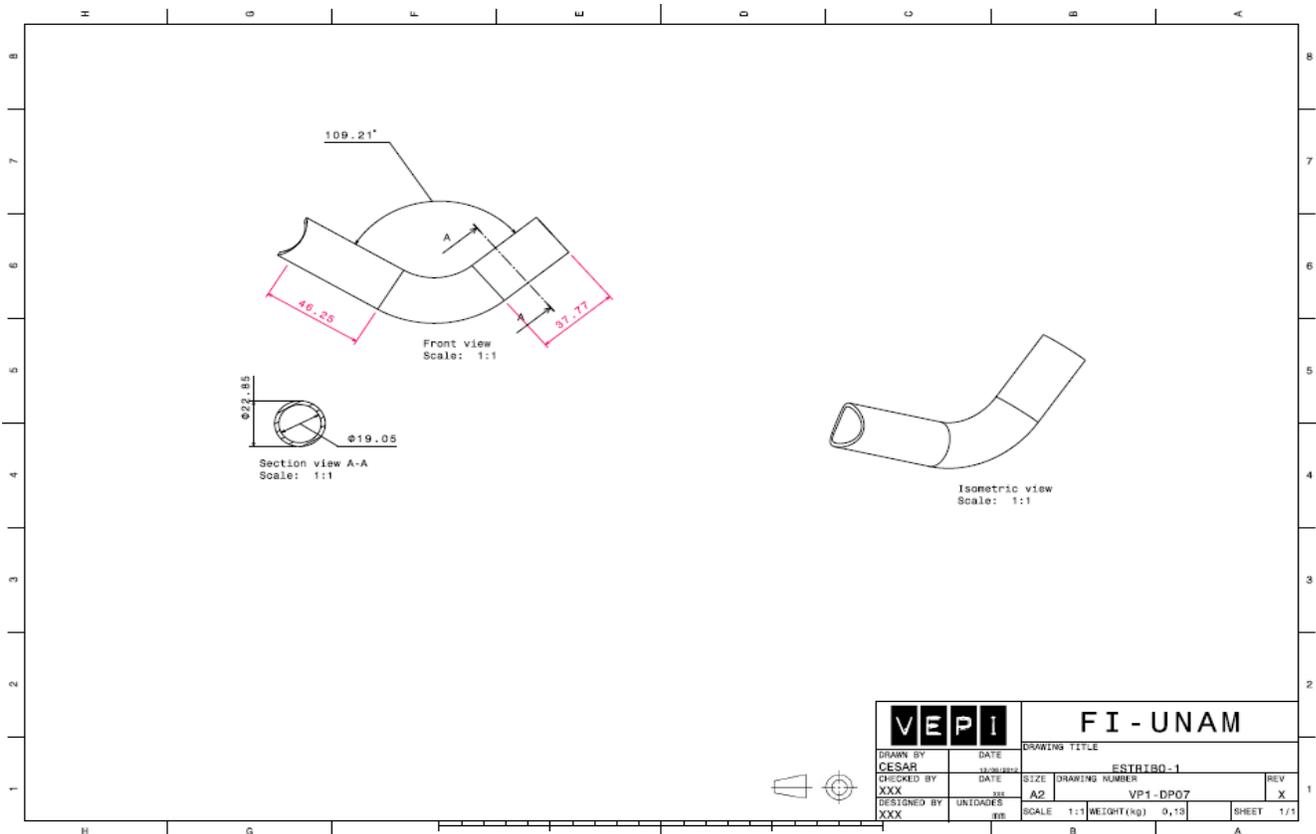
VEPI		FI - UNAM	
DRAWN BY CESAR	DATE 14/08/2022	DRAWING TITLE SOPORTE LATERAL	
CHECKED BY XXX	DATE XXX	SIZE A2	DRAWING NUMBER VP1-DP01
DESIGNED BY XXX	UNIDADES INB	SCALE 1:2	WEIGHT(kg) 0,62
		SHEET 1/1	REV X

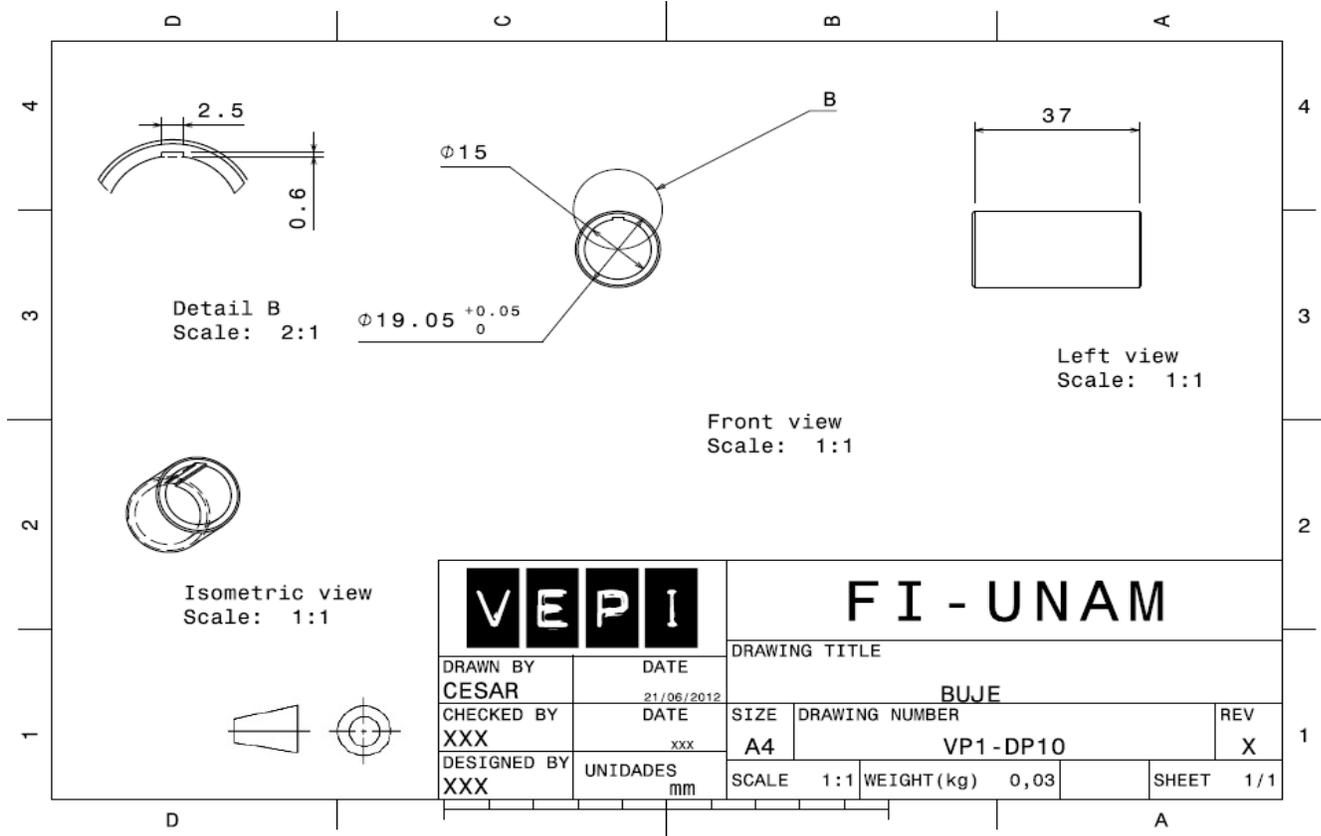
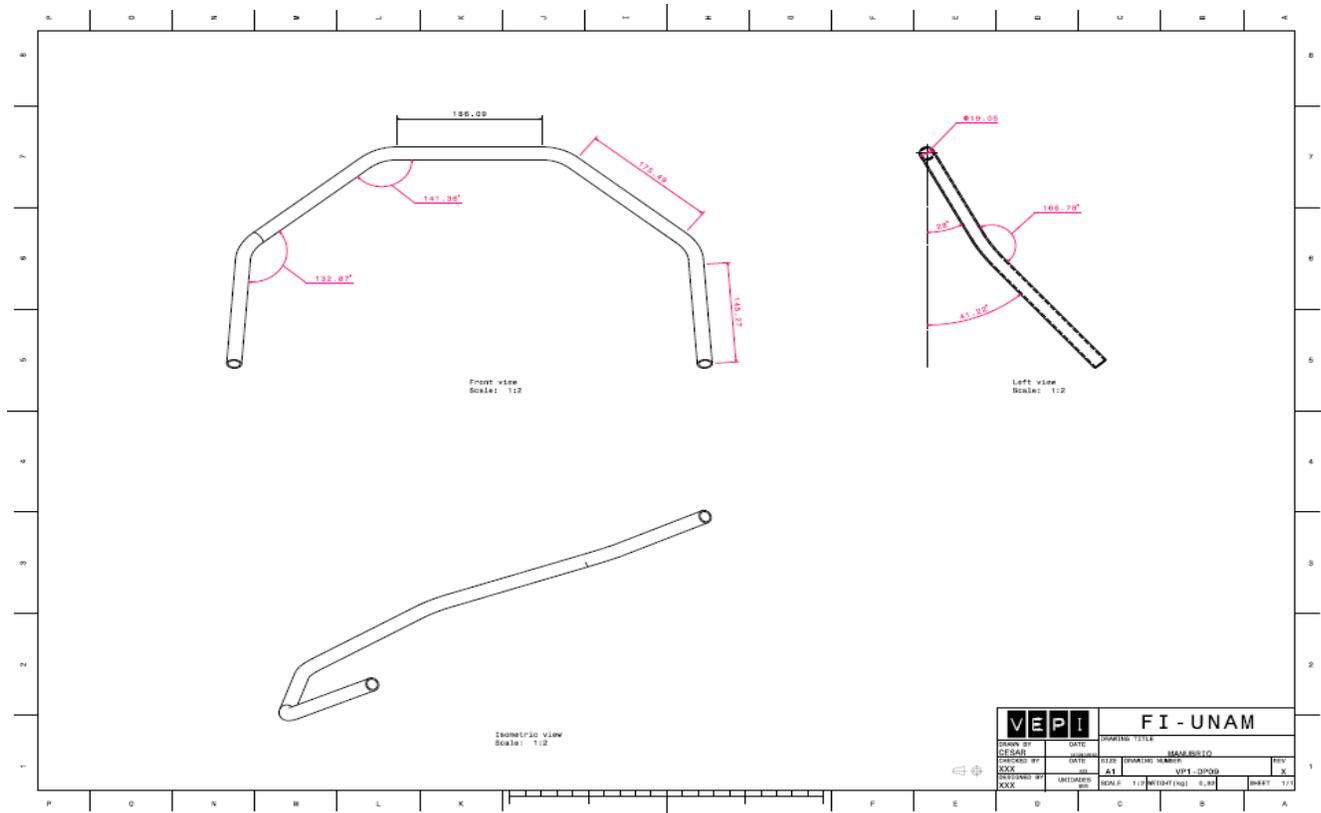


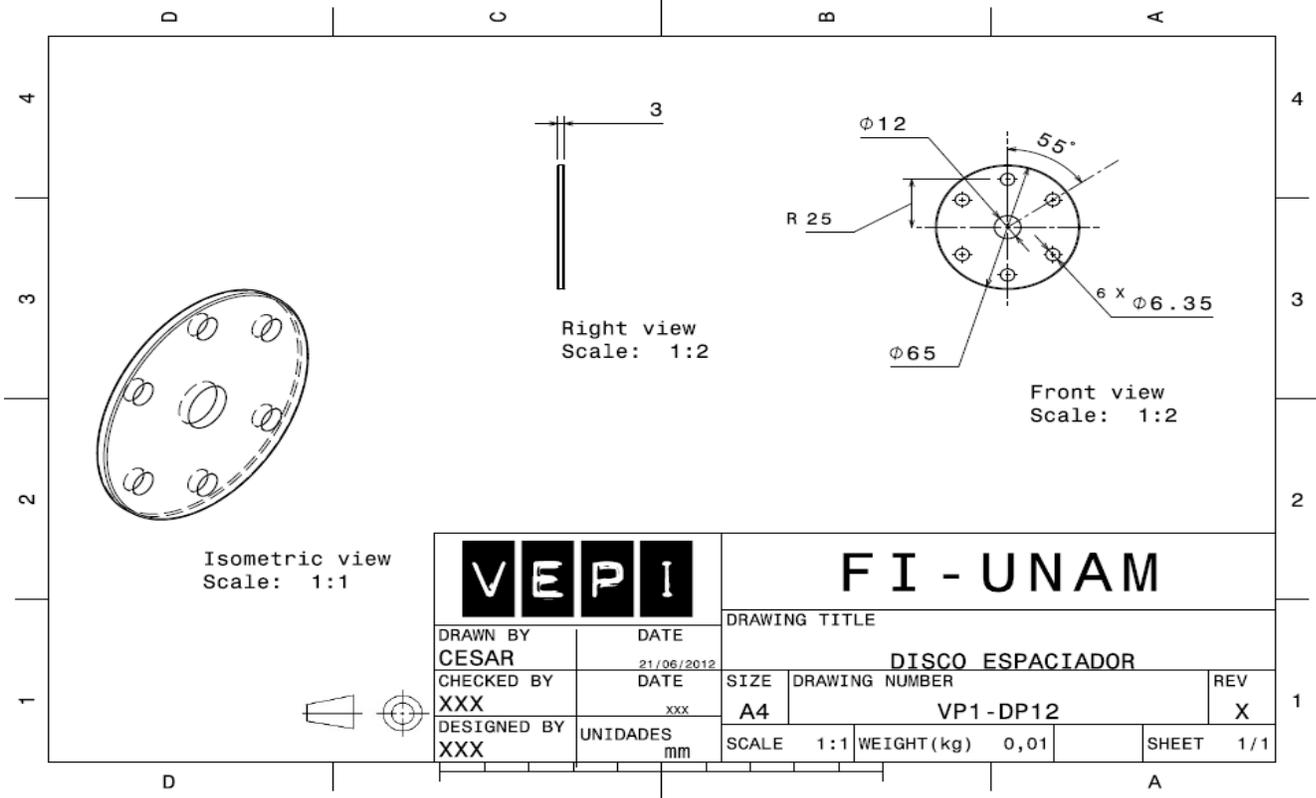
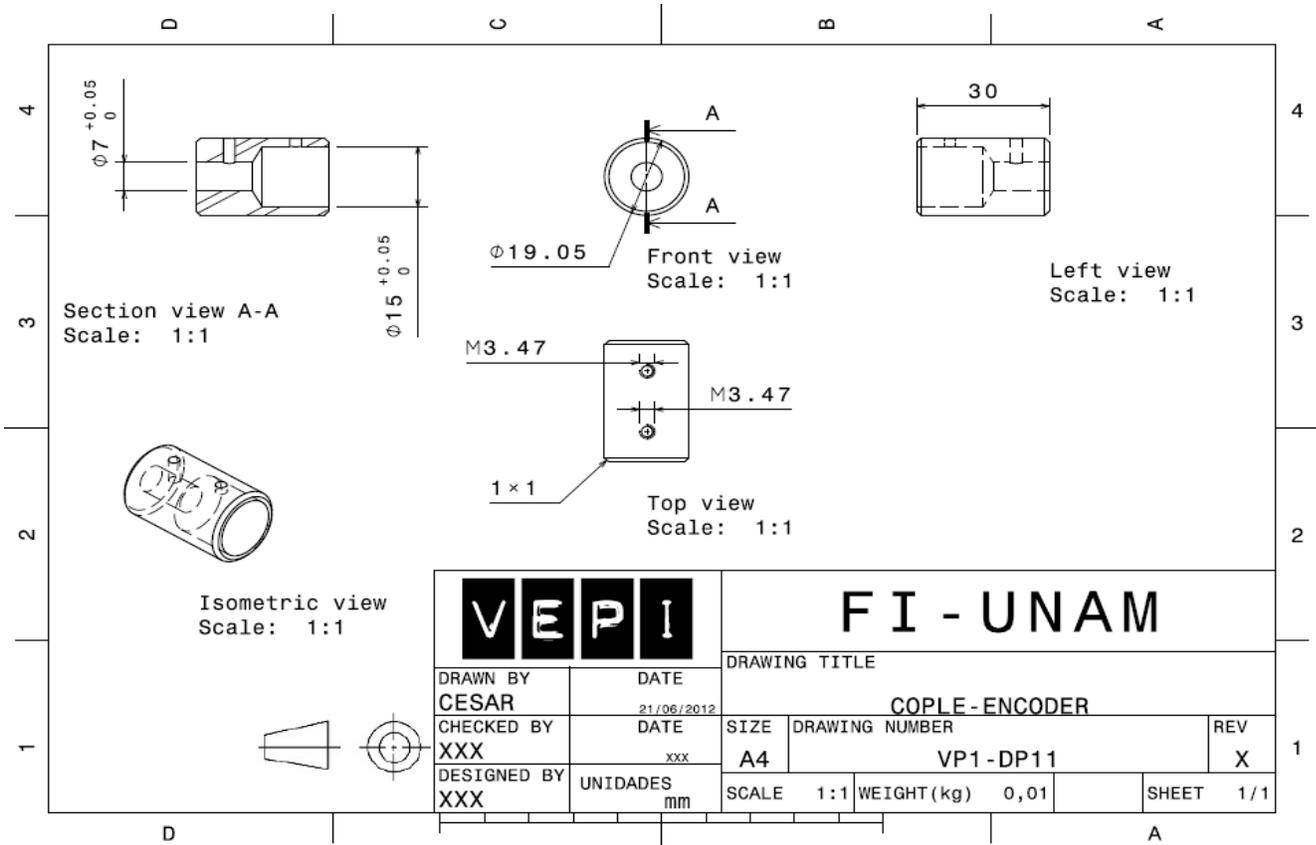


VEPI		FI - UNAM	
DRAWN BY CESAR	DATE	DRAWING TITLE SOPORTE-2	
CHECKED BY XXX	DATE	SIZE A1	DRAWING NUMBER VP1-DP04
DESIGNED BY XXX	UNIT/SCALE 1:2	WEIGHT (kg) 1.21	REV X
			HEET 1/1









ANEXO D

PRUEBAS CON EL PROTOTIPO DE PRUEBA DE CONCEPTO

Para realizar las pruebas se elaboró una pequeña encuesta con preguntas abiertas; con la finalidad de escuchar la opinión y comentarios de las personas, y no enfocarse en obtener datos puramente cuantitativos acerca del prototipo. Las preguntas básicas realizadas en cada prueba se enfocaron en obtener los siguientes datos.

✓ Datos de la configuración del vehículo:

¿Cuál fue la sensación de seguridad al subir y bajar?

¿Qué tan difícil fue subir o bajar?

¿Qué tan necesario fue el uso de un apoyo en los pies?

¿Te pareció adecuada la posición y altura de estos apoyos?

¿Cuál fue la sensación ante un frenado repentino o la posibilidad de caerte?

✓ Datos del asiento:

¿Te pareció adecuada la altura del asiento?

¿Qué tan cómodo lo sentiste?

¿Crees necesario el uso de un respaldo?

¿Es adecuada la postura que te da el asiento?

✓ Datos del mando de operación:

¿Te proporciona seguridad el manubrio?

¿Es cómoda la postura de los brazos al manejar?

¿Cuál es tu percepción de control que pudieras tener con este mando?

✓ Datos del voluntario:

¿Cuál es su edad?

¿Cuál es su estatura?

Por cada uno de los voluntarios, se probaron los conceptos correspondientes a las configuraciones seleccionadas (Capítulo 2.4.3).

1. Ascenso/ descenso por frontal y manubrio lateral.
2. Ascenso/ descenso por detrás y manubrio frontal a la altura de las piernas.
3. Ascenso/descenso por detrás y manubrio frontal a la altura del pecho.
4. Ascenso/descenso sin apoyo y manejo alternativo (Volante libre o con Smartphone).

Las pruebas fueron realizadas en diferentes sitios, se procuró obtener el punto de vista desde diferentes perspectivas: ingeniería, diseño industrial y la que ofrece el sentido común de las personas. Los lugares seleccionados para realizar las pruebas fueron:

- ✓ Facultad de ingeniería.
- ✓ Centro de Coyoacán.
- ✓ Facultad de Arquitectura.
- ✓ Diseño industrial.

Por otra parte se trató de conseguir la ayuda de personas con diferentes complejiones, edades, estaturas, genero etc.

La secuencia o protocolo para establecer las pruebas se ilustra con el siguiente esquema:

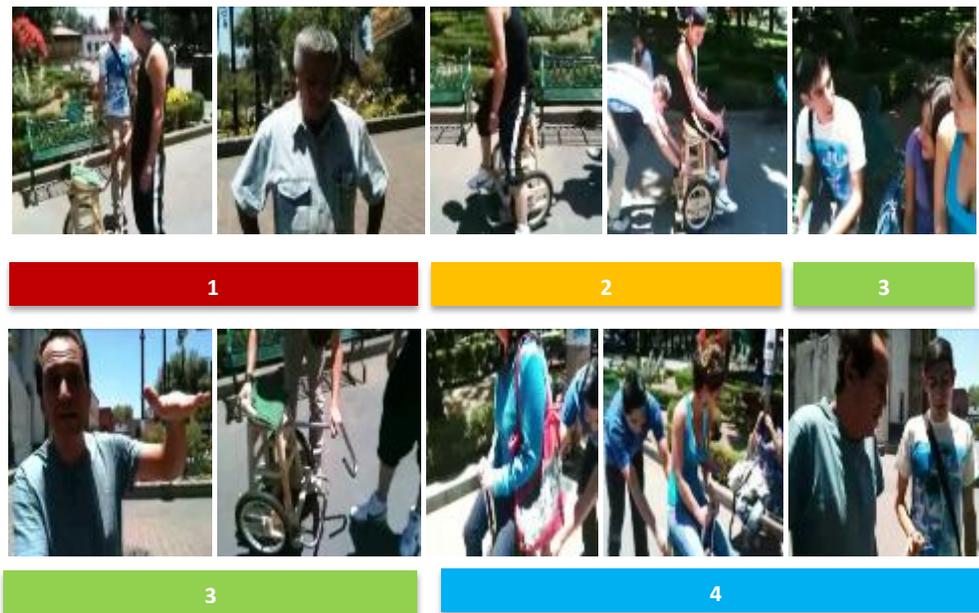


FIGURA E-1. Secuencia realizada en las pruebas.

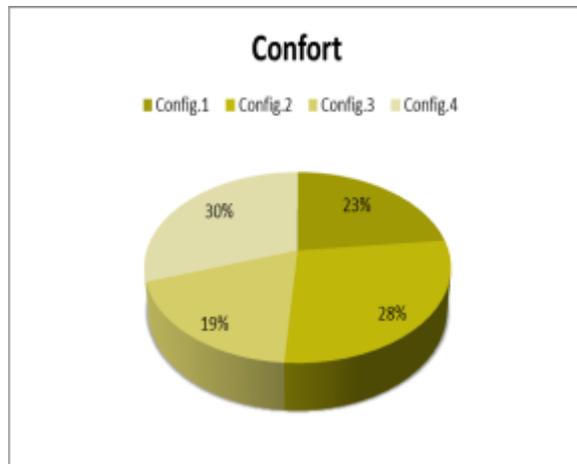
- i. Solicitar la ayuda de una persona y darle una breve explicación del proyecto y de lo que pretendemos probar con el simulador.
- ii. Pedirle a la persona suba al simulador con alguna de las configuraciones propuestas y empujarlo por una distancia corta a una velocidad moderada.
- iii. Al término del recorrido se recabaron las opiniones y comentarios del voluntario y se le pidió probar una configuración diferente.
- iv. Se le volvió a dar un pequeño recorrido y se recabaron sus opiniones sobre la configuración en turno.

Se entrevistaron a un total de 20 personas entre los 20 y los 60 años, con diversas complejiones y estaturas.

Los resultados de las encuestas se muestran en las siguientes gráficas:



a).



b).



c).

FIGURA E-2. Gráficas de pastel con los resultados obtenidos por configuración para: a). seguridad; b). confort; c). practicidad.