

**INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS TOLUCA**



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
VEHÍCULO ELÉCTRICO DE BAJO COSTO CON SERVO
DIRECCIÓN STEER BY WIRE**

TESIS QUE PRESENTA

DANIEL CAMILO PRADA VILLAMIZAR

**MAESTRÍA EN INGENIERIA AUTOMOTIRZ
MIR**

MAYO, 2021

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE MONTERREY
CAMPUS TOLUCA



**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE
VEHÍCULO ELÉCTRICO DE BAJO COSTO CON SERVO
DIRECCIÓN STEER BY WIRE**

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERIA AUTOMOTRIZ
PRESENTA

DANIEL CAMILO PRADA VILLAMIZAR

ASESOR: Dr. David Hernández Castillo

CO ASESOR: Dr. Efraín Lopez Damian

COMITE DE TESIS: Dr. Alfredo Santana Diaz

Toluca De Lerdo, Estado de México, Mayo 2021

RECONOCIMIENTOS

A Conacyt, por apoyarme con los recursos para el desarrollo de esta investigación y posterior trabajo de grado.

Al Tecnológico de Monterrey: Campus Toluca y al Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz por la oportunidad de formar parte de sus programas y aportar a mi formación académica, personal y profesional.

A mi comité de tesis integrado por los doctores Alfredo Santana Díaz, Efraín López Damian y David Hernández Castillo por su guía, dirección, apoyo y comprensión durante todo este proceso.

Al Ingeniero en Jefe del laboratorio de Mecatrónica Eduardo Vazquez por su guía, apoyo, ayuda y consejos durante el desarrollo de este proyecto, Su contribución para el desarrollo de este proyecto fue crucial.

Al equipo técnico de especialistas conformado por Angel Vallejo, Lucas Morales y Ricardo Santillan por sus aportes y contribuciones al desarrollo de este proyecto.

Al doctor Javier Quezada, a Aurora Soto Bucio y a Martha González Niembro por su todo su apoyo en los momentos difíciles.

RESUMEN

Los temas de vehículos eléctricos y navegación autónoma son tecnologías con un alto potencial de desarrollo para las que se espera, sean los futuros estandartes de la industria automotriz. Para lograr una completa transición hacia estas tendencias, es necesario continuar con los esfuerzos de investigación y desarrollo de manera que se sigan logrando avances en componentes y sistemas integrados. La tarea de desarrollar vehículos comerciales nuevos es un proceso largo y complejo, que involucra una gran cantidad de recursos y de personas, trabajando para llevar la idea inicial del vehículo a la realidad. Es por esto, que surge la necesidad para instituciones e investigadores de explorar otras formas para disponer de prototipos de vehículos eléctricos funcionales que puedan ser usados por plataformas de pruebas.

Este proyecto de tesis muestra paso por paso los procesos de diseño y construcción de un prototipo de vehículo eléctrico de bajo costo, orientado a cumplir las necesidades básicas de un vehículo industrial para transporte de carga y también, para ser una plataforma de pruebas en futuras investigaciones relacionadas a la navegación autónoma o temas subyacentes. Para esto, se propone un método de carácter exploratorio que, basado en la experiencia y el conocimiento del personal más capacitado, respecto a este tema, del Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz (CIMA), muestre los lineamientos y los puntos más importantes en el desarrollo de los sistemas principales del prototipo cuando se parte de condiciones preestablecidas y componentes de vehículos donantes para su desarrollo.

El prototipo fue desarrollado como un vehículo de carga eléctrico, compacto, funcional y con alta maniobrabilidad, equipado con una servodirección *Steer by wire*¹ y una arquitectura de control eléctrica y electrónica que permite el control remoto adicional de los sistemas de tracción y frenos.

¹ Término en inglés para referirse a un sistema de dirección actuado de forma electrónica o “Dirección por cable”

ABSTRACT

Electric vehicles and autonomous navigation are highly potential technologies to work with, as they represent the future in automotive industry. To accomplish a whole transition to this trend, more research and development is needed to keep improving components and systems (especially those involved with the security and integrity of the vehicle and its surroundings) and find its best industrial applications. The task of developing new commercial vehicles, is a long and complex process which involves a vast amount of resources and a lot of people, working on to manifest the initial idea in reality. Hence, the need for some institutions involved in this research area to explore other ways to get functional prototypes of electric vehicles to be used as test and study platforms.

This Master thesis project, shows the step by step process on the design and construction of a low-cost electric vehicle prototype, aimed to meet basic requirements for moving material in industry facilities and serve as a study platform for further research in autonomous navigation and related subjects. For this is proposed an exploratory method that gathers the knowledge and experience of most skilled members on this subject from the research center on automotive mechatronics (CIMA), that shows the guidelines and emphasize on key points for the development of all core systems of the prototype when working with predefined and given components.

The functional prototype was built as a compact sized, highly maneuverable, electric vehicle cargo equipped with an electric powered steer by wire system and the whole electric and electronic architecture needed to allow power train and brakes systems to be remotely controlled.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	5
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUCCIÓN	16
1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	18
1.2 OBJETIVOS.....	21
1.2.1 OBJETIVO GENERAL	21
1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	21
2. AGVS (MARCO TEORICO)	22
3. DESARROLLO DE LA PLATAFORMA AGV.....	27
4. DISEÑO	37
4.1 PRELIMINARES: REQUERIMIENTOS Y PROPUESTAS DE DISEÑO.	37
4.1.1 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS, NECESIDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO.....	37
4.1.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES PARA EL VEHÍCULO Y SUS SISTEMAS.....	39
4.1.3 DISEÑO DEL CHASÍS: ETAPA INICIAL	44
4.2 PRIMERA FASE: TREN DELANTERO DEL VEHÍCULO	46
4.2.1 PRELIMINARES: COMPONENTES DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN.....	46
4.2.2 TREN DELANTERO: SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y LLANTAS.....	47
4.2.3 SISTEMA DE DIRECCIÓN DEL VEHÍCULO	50
4.3 SEGUNDA FASE: TREN TRASERO DEL VEHÍCULO	55

4.3.1	PRELIMINARES: TREN DE POTENCIA DEL VEHÍCULO.....	55
4.3.2	TREN TRASERO DEL VEHÍCULO: SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y LLANTAS	58
4.3.3	TREN DE POTENCIA DEL VEHÍCULO	60
4.4	TERCERA FASE: COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN Y SEGURIDAD	62
4.4.1	SELECCIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS DEL VEHÍCULO	62
4.4.2	SELECCIÓN DEL COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN.....	63
4.4.3	CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL TREN DE POTENCIA.....	64
4.5	CUARTA FASE: COMPONENTE DE CONTROL DEL VEHÍCULO.....	65
4.5.1	SELECCIÓN DEL CONTROLADOR.....	66
4.5.2	DISEÑO DE CIRCUITOS DE CONTROL Y DE POTENCIA.....	66
4.5.3	DISEÑO DE TARJETAS INTEGRADAS PCB	67
5.	CONSTRUCCION.....	70
5.1	FASE PRELIMINAR: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PRIMERA ETAPA DEL CHASÍS.....	70
5.2	FASE 1: TREN DELANTERO DEL VEHÍCULO	71
5.2.1	SUSPENSIÓN DELANTERA E INSTALACIÓN DE RUEDAS	71
5.2.2	SISTEMA DE DIRECCIÓN DEL VEHÍCULO	74
5.3	FASE 2: TREN TRASERO DEL VEHÍCULO	77
5.3.1	SUSPENSIÓN TRASERA E INSTALACIÓN DE RUEDAS.....	78
5.3.2	TREN DE POTENCIA DEL VEHÍCULO	80
5.4	FASE 3: COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN Y SEGURIDAD.....	83
5.4.1	INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS DEL VEHÍCULO	83
5.4.2	INSTALACIÓN DEL COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN DEL VEHÍCULO.....	85

5.4.3	CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL TREN DE POTENCIA.....	86
5.5	FASE 4: COMPONENTE DE CONTROL Y COMUNICACIÓN DEL VEHÍCULO.....	87
5.5.1	ELABORACIÓN DE TARJETAS INTEGRADAS PCB.....	87
6.	PRUEBAS.....	89
6.1	SISTEMA DE SUSPENSIÓN DELANTERO.....	90
6.1.1	CAPACIDAD DE RESTITUCIÓN Y RESPUESTA.....	90
6.1.2	VALIDACIÓN DEL SISTEMA INSTALADO.....	91
6.2	SISTEMA DE DIRECCIÓN.....	93
6.2.1	CAPACIDAD DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN Y RADIO DE GIRO.....	93
6.2.2	FENOMENO DE BUMP STEER.....	94
6.2.3	VALIDACIÓN DE ESQUEMA STEER BY WIRE.....	94
6.3	SISTEMA DE SUSPENSIÓN TRASERO.....	95
6.3.1	VALIDACIÓN DEL SISTEMA INSTALADO.....	95
6.4	TREN DE POTENCIA.....	97
6.4.1	DESEMPEÑO DEL SISTEMA.....	97
6.4.2	ANÁLISIS A COMPONENTES CRÍTICOS.....	97
6.4.3	AUTONOMÍA Y VELOCIDAD MÁXIMA DEL VEHÍCULO.....	98
6.5	SISTEMA DE FRENOS.....	99
6.5.1	PRUEBAS ESTÁTICAS.....	99
6.5.2	PRUEBAS DINÁMICAS EN AMBIENTE CONTROLADO.....	99
6.6	SISTEMA DE CONTROL.....	100
6.6.1	CAPACIDAD DE LA ARQUITECTURA INSTALADA.....	100
	CONCLUSIONES.....	101

TRABAJO A FUTURO.....	103
REFERENCIAS.....	104
APÉNDICES.....	106
APÉNDICE A: NORMA NTP 343.....	106
APÉNDICE B: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHÍCULO DONANTE – RENAULT 5.....	107
APÉNDICE C: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHÍCULO DONANTE – ITALIKA DS150.....	108
APÉNDICE D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHÍCULO DONANTE – ITALIKA ATV180.....	110
APÉNDICE E: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, BATERÍAS DE DESCARGA PROFUNDA LTH 27MDC.....	110
APÉNDICE F: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHÍCULO DONANTE - ATV YAMAHA WOLVERINE 350.....	111

LISTA DE TABLAS

TABLA 3.1 LISTADO DE REQUERIMIENTOS DE LA PLATAFORMA AGV	30
TABLA 4.1 MATRIZ DE DECISIÓN PARA LA ELECCIÓN DE HACER O COMPRAR LAS HORQUILLAS DE LA SUSPENSIÓN.	40
TABLA 4.2 MATRIZ DE DECISIÓN PARA LA ELECCIÓN DE UN PROVEEDOR DE AUTOPARTES ÓPTIMO.....	41
TABLA 4.3 MATRIZ DE DECISIÓN: ESQUEMA DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA PARA EL TREN TRASERO DEL AGV.....	57
TABLA 6.1 CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPO DESARROLLADO.	89

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL MÉTODO PROPUESTO PARA EL DESARROLLO DE LA PLATAFORMA AGV. (ORIGINAL EN COLORES).	20
FIGURA 2.1: PROTOTIPO DE VEHÍCULO ELÉCTRICO CON DIRECCIÓN STEER BY WIRE EN LAS 4 RUEDAS. NOTA: TOMADO DE ZHANG ET AL. (2017) [13]. (ORIGINAL EN COLORES).....	25
FIGURA 3.1: VEHÍCULOS DESARROLLADOS EN EL CIMA, VEHÍCULO RECREATIVO 1 (VR1) Y SUSTAINABLE TEC BIKE (STB). (ORIGINAL EN COLORES).....	28
FIGURA 3.2: DEFINICIÓN DEL CONCEPTO BASE DE LA PLATAFORMA AGV. (ORIGINALES EN COLORES).....	29
FIGURA 3.3: ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL PUNTO DE PARTIDA PARA EL DISEÑO Y LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO. (ORIGINALES EN COLORES).....	32
FIGURA 3.4: ESQUEMA DEL FLUJO DE TRABAJO SEGUIDO EN EL PROCESO DE DESARROLLO PARA LA PLATAFORMA AGV. (ORIGINALES EN COLORES)	36
FIGURA 4.1: ANÁLISIS PARA EL CÁLCULO APROXIMADO DE LA CARGA POR EJE EN LA ATV180 (CON LA CARGA MÁXIMA DE OPERACIÓN INDICADA POR EL FABRICANTE). (ORIGINAL EN COLORES).....	43
FIGURA 4.2: ANÁLISIS PARA EL CÁLCULO APROXIMADO DE LA CARGA POR LLANTA EN LA MOTO DS 125 (CON LA CARGA MÁXIMA DE OPERACIÓN INDICADA POR EL FABRICANTE). (ORIGINAL EN COLORES).....	43
FIGURA 4.3: DISEÑO INICIAL DEL CHASÍS CON SUS RESPECTIVAS RECOMENDACIONES. (ORIGINAL EN COLORES).....	46
FIGURA 4.4: SIMULACIÓN CINEMÁTICA DE LA SUSPENSIÓN DELANTERA EN VSUSP. (ORIGINA EN COLORES).	50

FIGURA 4.5: DIMENSIONES DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN DEL RENAULT 5. (ORIGINAL EN COLORES)	51
FIGURA 4.6: CONFIGURACIONES MÁS COMUNES PARA EL SISTEMA DE SUSPENSIÓN. TOMADO DE JAZAR (2017) [20].	53
FIGURA 4.7: DIRECCIÓN ACKERMAN EN DETALLE. TOMADO DE JAZAR (2017) [20].	53
FIGURA 4.8: CONCEPTO DE LOS ESQUEMAS PROPUESTOS PARA EL TREN DE POTENCIA DEL VEHÍCULO. (ORIGINAL EN COLORES).	56
FIGURA 4.9: SUSPENSIÓN PUSH ROD: ESQUEMA BÁSICO. (NOTA: LA IMAGEN DE LA DERECHA FUE TOMADA DE DIVISIONE LA REPUBBLICA (2012)) [22]. (ORIGINAL EN COLORES).	59
FIGURA 4.10: DISEÑO BALANCINES PARA EL MECANISMO DE SUSPENSIÓN PUSH ROD DE TREN TRASERO. (ORIGINAL EN COLORES).	60
FIGURA 4.11: ARREGLO DE CARDAN PROPUESTO PARA LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA ENTRE EL DIFERENCIAL Y LAS LLANTAS. TOMADO DE JAZAR (2017) [20].	62
FIGURA 4.12: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA BATERÍA DE DESCARGA PROFUNDA LTH 27MDC (VER APÉNDICE E). (ORIGINAL EN COLORES).	64
FIGURA 4.13: CIRCUITO DE CONEXIÓN PARA EL SUMINISTRO DE POTENCIA AL MOTOR POR MEDIO DEL CONTROLADOR ALTRAX.	65
FIGURA 4.14 – CIRCUITO DE CONTROL PARA EL SISTEMA DE DIRECCIÓN DEL AGV. (ORIGINAL EN COLORES).	67
FIGURA 4.15: CIRCUITO DE CONTROL PARA LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN Y FRENOS DEL AGV. (ORIGINAL EN COLORES).	67
FIGURA 4.16: TARJETA INTEGRADA PCB PARA EL SISTEMA DE DIRECCIÓN Y FRENOS DEL AGV. (ORIGINAL EN COLORES).	68

FIGURA 4.17: TARJETA INTEGRADA PCB PARA LOS SISTEMAS DE TRACCIÓN Y FRENOS DEL AGV. (ORIGINAL EN COLORES).....	69
FIGURA 5.1: EXTERIOR DEL CHASÍS DEL AGV (PRIMERA FASE DE LA MANUFACTURA). (ORIGINAL EN COLORES).	71
FIGURA 5.2: PRIMERA FASE DE LA MANUFACTURA DE LAS MANGUETAS DE DIRECCIÓN. (ORIGINAL EN COLORES).....	72
FIGURA 5.3: MANGUETAS DE DIRECCIÓN MANUFACTURADAS (CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES). (ORIGINAL EN COLORES).....	73
FIGURA 5.4: SUSPENSIÓN DELANTERA DE LA PLATAFORMA AGV. (ORIGINAL EN COLORES)	74
FIGURA 5.5: MECANISMO DE DIRECCIÓN MODIFICADO (NOTA: LAS DIMENSIONES Y EL POSICIONAMIENTO CORRESPONDEN A UN ÁNGULO DE DIRECCIÓN CERO O NEUTRO PARA EL VEHÍCULO). (ORIGINAL EN COLORES).....	75
FIGURA 5.6: COMPONENTE MECÁNICO DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN DE LA PLATAFORMA AGV. (ORIGINAL EN COLORES).....	76
FIGURA 5.7: ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN STEER BY WIRE. (ORIGINAL EN COLORES).	77
FIGURA 5.8: BALANCINES DE LA SUSPENSIÓN PUSH ROD (SUSPENSIÓN DEL TREN TRASERO DE LA PLATAFORMA AGV). (ORIGINAL EN COLORES)	78
FIGURA 5.9: SUSPENSIÓN TRASERA DEL PROTOTIPO – CONFIGURACIÓN: “ <i>PUSH-ROD</i> ”. (ORIGINAL EN COLORES).....	80
FIGURA 5.10: DIFERENCIAL RECONSTRUIDO E INSTALADO. (ORIGINAL EN COLORES).	81
FIGURA 5.11: INSTALACIÓN DEL MOTOR Y ACOPLE CON EL DIFERENCIAL. (ORIGINAL EN COLORES).	82
FIGURA 5.12: PROCESO DE MANUFACTURA PARA LAS MAZAS DE LAS LLANTAS	

TRASERAS Y MONTAJE EN PROTOTIPO. (ORIGINAL EN COLORES).....	83
FIGURA 5.13: PROCESO DE MANUFACTURA PARA LAS MAZAS DE LAS LLANTAS TRASERAS Y MONTAJE EN PROTOTIPO. (ORIGINAL EN COLORES).....	84
FIGURA 5.14: COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN INSTALADO EN LA PLATAFORMA.	86
FIGURA 5.15: CIRCUITO ELÉCTRICO DEL TREN DE POTENCIA INSTALADO. (ORIGINAL EN COLORES).	87
FIGURA 6.1: GRAFICA DE DESPLAZAMIENTO VS TIEMPO PARA UNA PERTURBACIÓN DE CARGA. TOMADO DE CERÓN (2014) [17]. (ORIGINAL EN COLORES).	91
FIGURA A1: APARTADOS B Y C DE LA NORMA NTP 434.....	107
FIGURA B1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS RENAULT 5.	108
FIGURA C1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ITALIKA DS150, PARTE 1.....	109
FIGURA C2: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ITALIKA DS150, PARTE 2.....	109
FIGURA D1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ITALIKA ATV180.	110
FIGURA E1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BATERÍAS DEL AGV.....	111
FIGURA F1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL ATV YAMAHA WOLVERINE 350.	112

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, dada la tendencia hacia vehículos e industrias libres de emisiones y la constante necesidad de las organizaciones por hacer sus procesos cada vez más eficientes, se ha desarrollado un gran interés por los temas de vehículos eléctricos y navegación autónoma. Interés que está sustentado en las mejoras y los avances que ha traído la incorporación de los Automatic Guided Vehicle ² (a partir de ahora AGV) con los avances realizados hasta ahora.

Desde sus primeras incursiones en el ámbito industrial, como alternativa a los elementos de transporte de carga usados convencionalmente en centros de manufactura, grandes avances se han realizado en todas las tecnologías que hoy día forman parte de lo que se concibe como un AGV. Sin embargo, se percibe que para el campo de investigación relacionado a estos sistemas, el interés se ha centrado principalmente en temas de navegación y autonomía, situación que tiene mucho sentido cuando se parte del precedente de tener un vehículo comercial modificado como eléctrico y perfectamente adaptado para la aplicación de toda la tecnología que está detrás de la navegación autónoma, pero que de cierta forma limita la posibilidad de estudios y posteriores avances por parte de terceros.

Aunque en la teoría se puedan realizar grandes avances en términos de algoritmos de control y componentes electrónicos (como sensores y elementos relacionados con el control, la ubicación y la navegación) de forma aislada, en la práctica se requiere de una serie de evaluaciones en uno o varios prototipos funcionales, antes de que su desempeño pueda ser analizado bajo la realización de una o más pruebas en un ambiente real. Situación que, de nuevo, limita la realización de posibles avances significativos en esta área por parte de personas o instituciones pequeñas o medianas interesadas en el tema.

En esencia, un AGV se compone de 3 sistemas principales: un sistema mecánico, un sistema eléctrico/electrónico y un sistema de control (que incluye los componentes de navegación y

² Término en inglés para referirse a los vehículos de guiado automático.

comunicación). Con base en todo lo expuesto anteriormente, se delimita una necesidad para realizar investigaciones y/o estudios en el campo de la generación de prototipos de vehículos eléctricos funcionales que, una vez construidos y probados, sirvan como objetos de estudio para futuras investigaciones en el tema de los AGV.

Este documento, propone un método para el desarrollo de un prototipo de vehículo eléctrico funcional, que pueda ser aprovechado por el centro de investigación en mecatrónica automotriz para futuras investigaciones en el tema de los vehículos autónomos o AGV. Para esto, la propuesta consiste en aprovechar el conocimiento y la experiencia, desarrollados por varios miembros del centro de investigación a lo largo de la ejecución de diferentes proyectos relacionados con la construcción y puesta a punto de vehículos eléctricos y que ha sentado unas bases y un nivel de experticia que se desea mejorar con la ejecución de un nuevo proyecto, al mismo tiempo que se documenta de modo que pueda ser reproducible en el futuro para nuevos proyectos relacionados a estos temas de gran interés como lo son los vehículos eléctricos y la navegación autónoma.

Según la forma en que se organizó este escrito, en el capítulo 2 se presenta el marco teórico que contiene los antecedentes sobre el desarrollo de lo que hoy en día se concibe como el concepto de AGV, según sus aplicaciones industriales, y plantea la importancia de mantener relevantes los temas ligados a la construcción de prototipos funcionales y plataformas de estudio, según la experiencia y el ejemplo de algunos autores.

En el capítulo 3, se presenta un resumen del proceso que se siguió en el desarrollo de la plataforma, en donde se muestra el proceso de manera secuencial, haciendo énfasis en las características más importantes de cada etapa y las generalidades a tener en cuenta en cada punto del método propuesto para el desarrollo de la plataforma AGV.

Los capítulos 4 y 5 presentan el desarrollo en detalle de los elementos más relevantes de cada etapa, desde la perspectiva del diseño y la construcción, respectivamente. Se sigue el orden secuencial propuesto en el capítulo 3 y se aprovecha para cubrir de forma específica los detalles más importantes y las consideraciones más relevantes para el diseño y la manufactura de cada componente de cada sistema.

Siguiendo con el capítulo 6, se presentan propuestas de pruebas con el objetivo de validar la funcionalidad y la confiabilidad del vehículo a partir de cada uno de sus sistemas. Para esto se

propone el análisis y la validación de los componentes considerados críticos en cada sistema, junto con unas recomendaciones para su análisis y las características de diseño y manufactura más relevantes a tener en cuenta.

Por último, se presentan las observaciones y conclusiones respecto al trabajo realizado y los resultados obtenidos, tratando de mantener un enfoque objetivo respecto a estos últimos y buscando proponer puntos de mejor para el método que se usó en la construcción del prototipo, así como para otros elementos que se consideren importantes o relevantes para mejorar el desempeño del método, así como los resultados que, con su aplicación, se pueden llegar a tener.

Para terminar, se realiza una aclaración importante respecto a las limitaciones que se tuvieron durante el desarrollo del proyecto y como estas afectaron de diferentes maneras el resultado obtenido. En este caso, la parte de la propuesta para el alcance del proyecto relacionada a las pruebas y la validación de los sistemas del vehículo se vio afectada por las restricciones que fueron implementadas para la entrada al campus y el uso de los laboratorios, producto de las acciones de contingencia generadas por la pandemia global del virus Covid-19. Por esta razón, y aprovechando el espacio para agradecer al comité de graduación integrado por los doctores Alfredo Santana, Efraín López y David Castillo por su comprensión y la consideración de las condiciones generadas de acuerdo con la situación, se decidió cambiar el enfoque hacía una propuesta de varias pruebas que podrían ser realizadas para la validación del sistema, en lugar de la presentación de los resultados obtenidos con su respectivo análisis.

1.1 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El estudio y la investigación en el desarrollo de los vehículos eléctricos representa una contribución con un impacto significativo para la industria automotriz, dando un gran campo de oportunidad para la generación de nuevas y mejores tecnologías. Sin embargo, el desarrollo de estas tecnologías requiere del desarrollo de nuevos métodos que, basados en el conocimiento y la experiencia, permitan establecer una serie de pasos e instrucciones que faciliten el desarrollo de

las plataformas sobre las cuales se desean realizar estudios, o dicho de otra forma, la construcción de vehículos eléctricos tipo prototipo que sean completamente funcionales y sirvan para el desarrollo estudios e investigaciones posteriores en campos más avanzados como lo son los bancos de baterías y sus propiedades, los ciclos de potencia del vehículo, el desarrollo de sistemas de navegación autónoma, entre otros. Con el desarrollo de este proyecto, se busca entregar un objeto de estudio funcional al Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz para su uso en futuras investigaciones relacionadas con el tema de vehículos eléctricos y navegación autónoma. Para esto, se va a producir un vehículo de carga compacto, eléctrico, que tenga la capacidad para desplazarse por terrenos irregulares y que tenga una alta maniobrabilidad, de modo que pueda moverse por espacios cerrados como pasillos, bodegas o laboratorios de pruebas sin mayor problema, se propone la implementación de un modelo de chasis tipo skateboard ³ y un enfoque de desarrollo de bajo costo que plantea el uso de componentes provenientes de vehículos donantes.

³ Término en inglés para referirse a un chasis con diseño tipo “patineta” o plataforma.

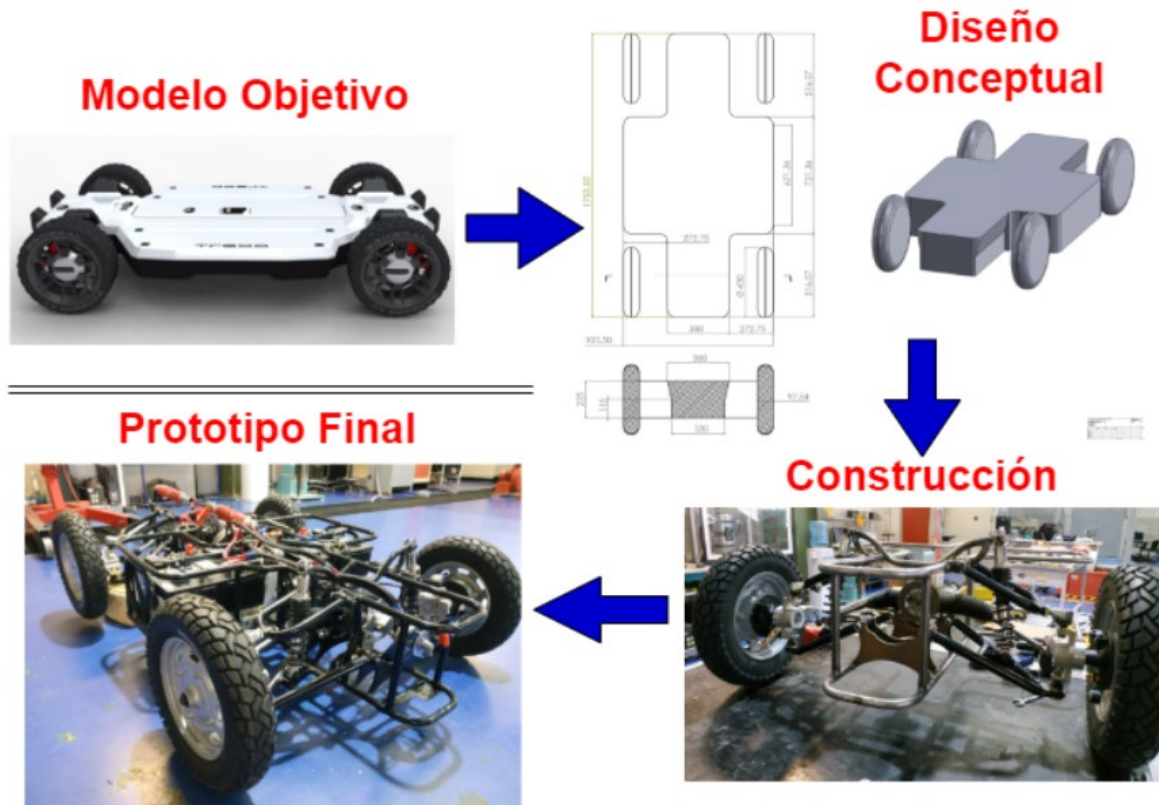


Figura 1.1 – Esquema representativo del método propuesto para el desarrollo de la plataforma AGV. (Original en colores).

Adicional a todas las características mencionadas, relacionadas directamente al componente mecánico del vehículo, se sentarán las bases electromecánicas correspondientes (es decir, se implementarán los sistemas electromecánicos necesarios, incluido una arquitectura para el sistema de dirección tipo: *steer by wire*) de modo que se logre el objetivo de que la plataforma construida sirva como objeto de estudio para investigaciones en el campo de la navegación autónoma.

Finalmente, además de construir la plataforma de vehículo eléctrico, se documentará y dejará un registro del método seguido en la generación del prototipo, el cual surge de una recopilación de la experiencia adquirida por parte de algunos miembros del CIMA durante su participación en el desarrollo de varios otros proyectos como el desarrollo del Vehículo Recreativo 1[1] y de una motocicleta de 3 ruedas [2], relacionados con el diseño y la manufactura de vehículos eléctricos. Con esto, se refuerza la intención de transmitir tanto el conocimiento como la experticia

desarrollados, de manera que en un futuro se logre el desarrollo de nuevos vehículos eléctricos, productos de la reproducción del método que se plantea en este documento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un prototipo de vehículo eléctrico de bajo costo orientado al desplazamiento de carga en ambientes estructurados, bajo la implementación de un método experimental, que permita dotar al Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz con un prototipo equipado con una servodirección steer by wire y sistemas teleoperables, que cumpla con los requerimientos mínimos para ser un objeto estudio funcional en futuras investigaciones sobre vehículos eléctricos y navegación autónoma.

1.2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

1. Construir un vehículo compacto de carga, eléctrico, tipo plataforma, diseñado para su desplazamiento en espacios cerrados.
2. Incursionar en el tema de direcciones asistidas eléctricamente, mediante el diseño y la construcción de una dirección servo-asistida del tipo steer by wire.
3. Analizar el estado bibliográfico actual respecto al desarrollo de prototipos funcionales en el campo de los sistemas AGV.
4. Proponer un método de carácter exploratorio para la construcción de prototipos de vehículos eléctricos.

2. AGVS (MARCO TEORICO)

En la actualidad, cuando se habla de un AGV, es bastante común relacionar su concepto con el de un vehículo autónomo hecho para aplicaciones industriales. Sin embargo, aunque los sistemas AGV se perciban como un concepto moderno o cuyo desarrollo corresponde a la época actual (valga la redundancia), este surgió algunas décadas atrás y estaba fuertemente ligado al transporte de bienes para rutas y/o trayectos repetitivos y, sus componentes de navegación y automatización no se percibían muy relevantes en ese entonces.

Desde sus primeras apariciones, el concepto de AGV se muestra en la literatura como un sistema de transporte autónomo (sin conductor) usado para el movimiento de carga en propiedad horizontal, introducido en 1955 (Müller, 1983) [3]. Por su parte, Götting (2000) [4] complementó la definición de los sistemas de AGV diciendo que “...su uso y/o aplicación, darán mejores resultados para sistemas que requieran el transporte de bienes bajo un esquema de rutas repetitivas” (p.2).

Acercamientos más recientes en el campo de los AGV, han delimitado y hecho más específico su concepto, mostrando la aceptación y éxito que los sistemas AGV han tenido en diversas aplicaciones como la manufactura, el transporte y la distribución de bienes, en donde a su vez, destacan que el uso de los sistemas de AGV, no se limita a interiores, tal como recoge en su trabajo Vis (2006) [5].

Es este punto, es evidente como un concepto tradicional de los AGV, se enfoca en su uso como sistema de transporte para aplicaciones industriales. Autores como Haefner & Bieschke (1998) [6] plantean el uso de sistemas AGV como posible solución para abordar el problema de la baja eficiencia en el proceso de transporte en puertos de embarque, cuando se usan terminales no automatizadas. Otro caso se evidencia en estudios como el realizado por Van der Heijden, Van Harten, Ebben, Saanen, Valentin & Verbraeck (2002) [7], en donde se propone una aplicación para exteriores, con el diseño de un sistema de transporte subterráneo tubular, que comunique a una compañía con un aeropuerto, usando AGVs. Ahora, fuera de los casos de éxito presentados sobre

el uso de sistemas AGV en aplicaciones industriales; estudios más enfocados en la teoría de los AGV como sistema de distribución y transporte de bienes, muestran que para antes de los 2000, un AGV era un sistema algo robusto compuesto por un listado de componentes que incluye: vehículos, red de transporte, un enlace físico entre las zonas de carga/descarga y un sistema de control. Los anteriores componentes se presentan después de analizar el documento de Lim, Siong y Ho (1989) [8].

No fue hasta el comienzo del nuevo siglo en que de la mano de autores como Gotting (2000) [4], se propuso abordar, con un poco más de énfasis, el componente de navegación y guía de los vehículos usados en estos sistemas de AGV.

En la literatura más reciente, se aborda un concepto más actualizado de lo que es un sistema de AGV. En este, la característica de **“vehículo para transporte de carga”**, sigue fuertemente arraigada, sin embargo, aspectos como la navegación y el componente de automatización dejan de estar en un segundo plano y adquieren mayor relevancia. Un ejemplo de esto se puede ver en Turreson (2016) [9], donde la autora, expone los AGV como vehículos que se benefician significativamente del componente de automatización y cuyo uso, como elemento de transporte y distribución de bienes, se recomienda para entornos como centros de producción, almacenes y hospitales. Lo anterior, tomando como base la experiencia compartida por compañías dedicadas a esta área, quienes aseguran que la implementación de herramientas como los AGV en la ejecución de los procesos, puede mejorar de forma significativa la eficiencia de estos, reducir los costos de operación, minimizar los riesgos de accidentes y daño al personal o a la propiedad, entre otros, presentados en Kollmorgen Automation (2016) [10].

Afirmaciones de otros autores apoyan lo expuesto por Turreson, como en un estudio realizado en 2015 por la *National Tsing Hua University*, en donde afirmaron que, debido a las ventajas que ofrecen en términos de flexibilidad y utilización de espacio, los AGV serían la opción viable más viable para optimizar un *“layout”* de transporte de bienes para empresas pequeñas y medianas, cuando se aplica en conjunto con un esquema tipo **“bahía”** (esto teniendo en cuenta la tendencia mundial hacia las tecnologías de la automatización y la estabilidad y seguridad que aseguran los AGV en el desplazamiento de cargas). Adicionalmente, los sistemas AGV superan a los sistemas de carga convencional en términos de eficiencia y costo de operación, Wang y Chang (2015) [11].

Es claro, como la consideración de las tecnologías modernas y su aplicación a los sistemas AGV, han contribuido con la evolución de este concepto, incorporando nuevos componentes dentro de su arquitectura, además de la característica de sistema o elemento de transporte; que, aunque sigue siendo su fin principal, ha dejado de ser el único o más relevante para estos sistemas en campos de estudio e investigación.

En apoyo a la afirmación anterior, se puede ver cómo algunos autores expresan la importancia que tienen ahora otros componentes relacionados a los avances y objetivos de la tecnología actual. Turreson (2016) [9], en su trabajo para el desarrollo de interfaces de comunicación más accesibles para un tipo de AGVs específicos, habla de los elementos que componen un AGV y expone que "... visto como un sistema, un AGV se compone de 3 elementos principales: navegación, hardware y software, y que en general, cualquier vehículo industrial que permita ser completamente automatizado en pro de los componentes de software, automatización y navegación, puede ser considerado como AGV." (p.22) y, desempeñarse en entornos y tareas industriales como las que se han mencionado anteriormente. Por su parte, otros autores como Zhang & Yu (2018) [12], en sus trabajos enfocados a la optimización de las redes de internet para la comunicación y el manejo de grupos de AGVs, reafirman la percepción expuesta por Turreson sobre los elementos que componen un sistema de AGV, proponiendo que "...un sistema de AGV, visto como un vehículo de transporte automatizado no tripulado, está integrado por cuatro componentes principales, que son: el vehículo, el sistema de guía y localización (componente de navegación), el sistema de control y el sistema de comunicación." (Zhang & Yu, 2018, p.1) [12].

Hasta el momento, es fácil identificar una tendencia e intuir hacia donde se dirigen los esfuerzos de investigación y desarrollo en el campo de los AGV. Analizando con más detalle el panorama presentado se ve que en su mayoría, los autores parten de una premisa en común: el componente mecánico ya está construido y cumple de manera satisfactoria con los requerimientos planteados para cada caso de estudio. En otras palabras, se puede decir que es muy poco el enfoque que se le ha dado al componente mecánico de estos sistemas y a sus respectivos procesos de desarrollo. Siendo este un elemento tan importante para el AGV como puede llegar a serlo el sistema de navegación.

Bajo esta nueva perspectiva, se presenta el trabajo realizado por Zhang, Zhang, Pan, Salman,

Rassim, Liu, Wang, Yang y Li (2017) [13] que plantea el desarrollo de un prototipo de vehículo eléctrico, compacto, completamente funcional y con dirección steer by wire; como una posible solución para abordar problemática común en el esquema de movilidad actual: el desplazamiento por lugares cerrados y/o estrechos. En su trabajo, los autores destacan el desarrollo del componente mecánico y como fue diseñado respecto a las necesidades y los requerimientos planteados. Del resultado (ver Figura 2.1), se observa que el prototipo fue construido bajo un diseño sencillo, pero a su vez efectivo y funcional, características que, en conjunto, presentan una relación directa con los costos de desarrollo del prototipo (y que, en este caso, permiten intuir un nivel de costos bajo o moderado).



Figura 2.1: prototipo de vehículo eléctrico con dirección Steer by wire en las 4 ruedas. Nota: tomado de Zhang et al. (2017) [13]. (Original en colores)

Con respecto a los AGV, el interés en su uso comercial y en aplicaciones industriales, depende en gran medida del factor económico, según lo comentan Chengalva, Bletsis & Moss (2009) [14], en su justificación para el desarrollo de un prototipo de vehículo de competencia autónomo de bajo costo: “El costo de desarrollo de los vehículos autónomos es uno de los principales factores a tener en cuenta para su comercialización y a su vez, es de los factores que menos se tienen en cuenta”. (p.1). Como criterio de desarrollo, los costos, adquieren especial importancia cuando las

instituciones disponen de recursos limitados para el desarrollo de proyecto relacionados con este campo de investigación, y se cuentan con pocos o ningún patrocinio o ayuda externa.

Con el desarrollo de este trabajo, se desea abordar el tema de los AGV desde la perspectiva de la construcción del prototipo basado en las necesidades y los requerimientos planteados para el mismo (entre ellos, el factor económico), detallando de manera adecuada los componentes mecánico, eléctrico y electrónico del vehículo. Se aclara que para efectos del documento que se va a presentar, el alcance será limitado al desarrollo de una “**plataforma AGV**” de bajo costo; es decir, un prototipo de vehículo eléctrico diseñado y construido para ser una plataforma de estudio funcional, para el campo de los vehículos autónomos.

El desarrollo de este tipo de plataformas ya se ha hecho antes con casos de éxito en uso como el que se aprecia en la investigación realizada por José Julio Rodríguez, en la que el autor, usa un prototipo completamente funcional como plataforma de estudio, en el desarrollo de un diferencial electrónico para un vehículo eléctrico impulsado por motores in-wheel ⁴.

⁴ Termino en inglés que hace referencia a la tecnología de motor dentro de la llanta.

3. DESARROLLO DE LA PLATAFORMA AGV

En su investigación, Vis (2006) [5] conceptualiza al AGV como un sistema de transporte no tripulado utilizado para la asistencia en el movimiento y traslado horizontal de materias. Para el desarrollo de la de plataforma AGV, se partió de los conocimientos que se han ido cimentando a través del tiempo y la experiencia, en la construcción de vehículos eléctricos funcionales, por parte del Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz del Tecnológico de Monterrey.

Como referencias que soportan dicho conocimiento, en los últimos 3 años se desarrollaron dos prototipos de vehículos eléctricos completamente funcionales, cuyos diseños corresponden cada uno a un concepto diferente (ver Figura 3.1). Iniciando con el VR1 (izquierda Figura 3.1, denotado con el número 1), vehículo usado como plataforma de estudio por José Julio Rodríguez en el desarrollo de un diferencial electrónico. En Julio (2019) [15], el concepto objetivo fue el de un vehículo de pasajeros, eléctrico, innovador y con la capacidad para desplazarse por diferentes tipos de suelo y en caminos con cambios de nivel. En este proyecto, el punto de inicio es un chasis previamente construido junto con algunos otros componentes: dos motores in-wheel para el tren de potencia, mecanismo de dirección, llantas (con sus respectivas manguetas) y sistema de frenos.

Para el segundo vehículo, la motocicleta Sustainable TEC bike o STB⁵ (derecha Figura 3.1, denotada con el número 2), se exploraron nuevas opciones en cuanto al concepto base que guio el desarrollo del vehículo, y se tuvo una mayor libertad tanto en el diseño como en los procesos de construcción usados en la manufactura de los sistemas que componen el vehículo. El concepto general fue el de un vehículo monoplaza (para un pasajero), eléctrico, de tres ruedas, de bajo costo (hecho a base de materiales convencionales y componentes comerciales) y al igual que su antecesor, con la capacidad para desplazarse por diferentes terrenos con posibles cambios de nivel; en el desarrollo de este vehículo se partió únicamente de los motores in-wheel para el tren de potencia.

⁵ Nombre de la motocicleta eléctrica desarrollada por el CIMA

Se debe resaltar que ambos vehículos comparten la misma configuración en la suspensión delantera, que corresponde a un sistema de suspensión Double Wishbone ⁶ o doble brazo u horquilla.

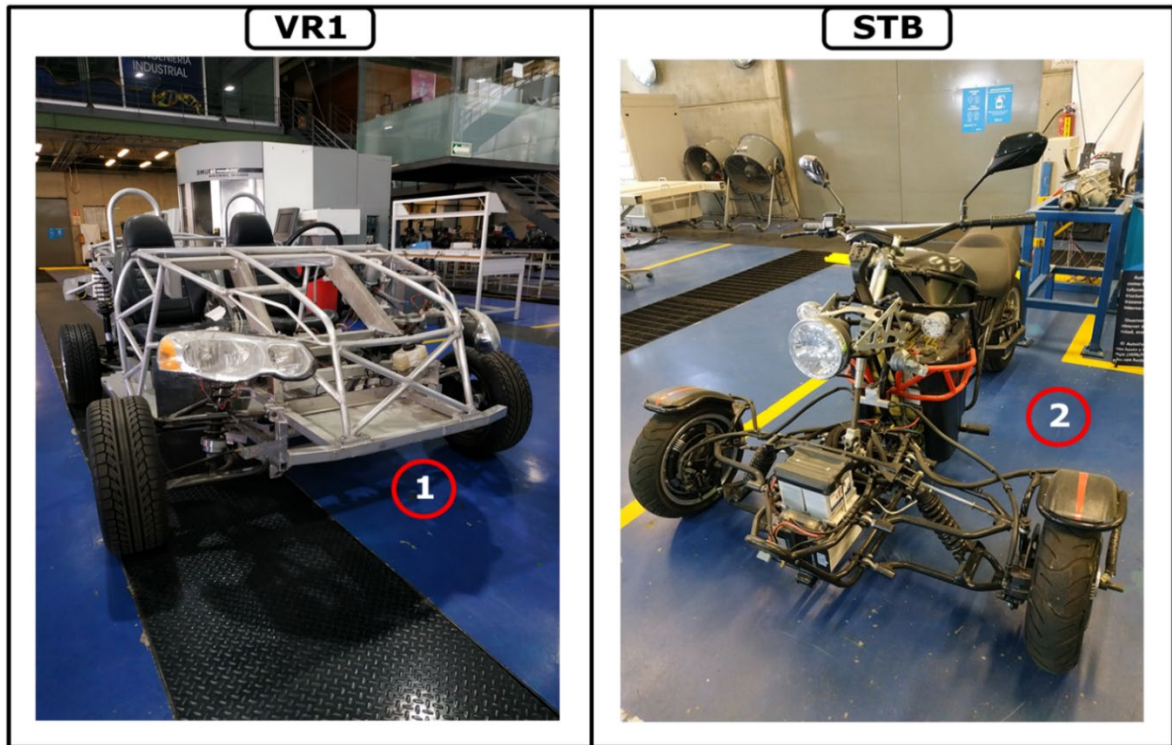


Figura 3.1: vehículos desarrollados en el CIMA, Vehículo Recreativo 1 (VR1) y Sustainable TEC bike (STB). (Original en colores).

Al igual que con sus semejantes, la plataforma AGV comienza con la definición de un concepto base que plasme de forma precisa los principales requerimientos para el vehículo y que, a su vez, sirva como guía para su desarrollo a lo largo de todas las etapas.

Presentados de forma concisa, los requerimientos con mayor relevancia para la definición del concepto del vehículo son los siguientes: vehículo de carga pequeño, tipo plataforma de 4 ruedas; eléctrico; chasis tipo skateboard; sistema de dirección steer by wire y suspensión en las 4 ruedas.

⁶ Termino en inglés para referirse al sistema de suspensión de doble horquilla.

El concepto presentado anteriormente, junto con sus características, se puede apreciar de forma más clara en la Figura 3.2.

Además de estas características que sirvieron para delimitar el concepto base del vehículo, se tienen algunos requerimientos de diseño, de construcción y de funcionamiento para el vehículo. Los requerimientos de diseño definen las condiciones de trabajo normales del vehículo, es decir, las condiciones de operación a las que estará sometido la mayor parte del tiempo. Como ejemplo de estos, se tiene la carga máxima que va a transportar el vehículo (máximo 100 kilogramos) o su velocidad límite (40 kilómetros por hora).

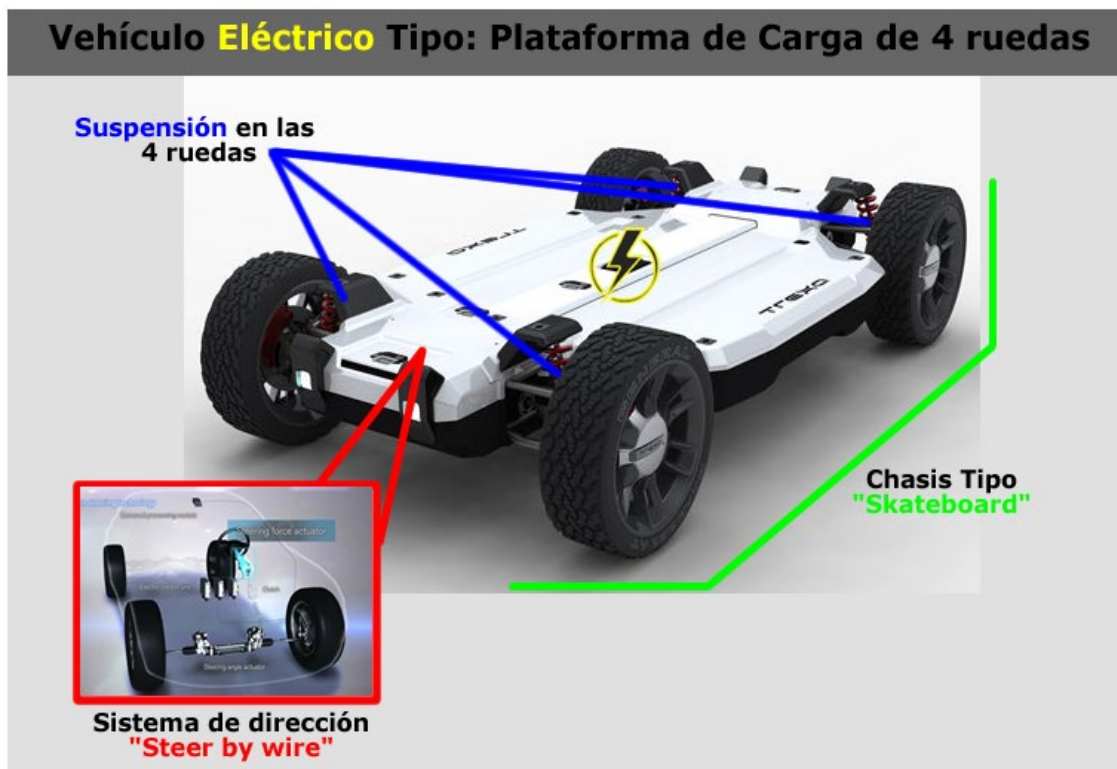


Figura 3.2: definición del concepto base de la plataforma AGV. (Originales en colores)

Por parte de los requerimientos de construcción, se espera que la plataforma AGV sea un prototipo de bajo costo, elaborado a base de materiales convencionales (como tubería de acero) y de componentes automotrices comerciales y/o de vehículos donantes. Por último, los

requerimientos de funcionamiento, en este caso, hacen referencia al entorno de trabajo del vehículo y al igual que con los anteriores, van a repercutir de forma directa en el diseño de este.

Se espera que la plataforma AGV sea un vehículo no tripulado, capaz de desplazarse por corredores estrechos y por espacios cerrados, por lo que sus dimensiones máximas deberán ajustarse a la norma correspondiente (ver apéndice A). Enlistando todo lo mencionado, se presenta de forma resumida los requerimientos del vehículo, prototipo de bajo costo, en función a los tres tipos de requerimientos principales mencionados previamente (requerimientos de diseño, de construcción y de funcionamiento), lo que puede verse en la Tabla 3.1.

La definición del concepto base y de sus requerimientos, da lugar para el inicio de las etapas de diseño y construcción, que para efectos del proceso que se siguió en el desarrollo de la plataforma AGV, se desarrollan de forma paralela en casi todas las etapas del vehículo.

Tabla 3.1

Listado de requerimientos de la plataforma AGV

REQUERIMIENTOS DEL VEHÍCULO	
	Vehículo eléctrico exclusivo para carga (No pasajeros).
Requerimientos de diseño	Carga de trabajo ≤ 100 [kg] (independiente del peso sostenido del vehículo). Velocidad Limite del vehículo = 40 [km/h].
Requerimientos de construcción	Prototipo de bajo costo. Construcción de prototipo y sus sistemas, basada en elementos existentes y materiales convencionales.
Requerimientos de funcionamiento	Dimensiones máximas (largo x ancho) $\leq 1.5 \times 1.5$ [m] (Norma NTP 434). Radio de giro ≤ 2.5 [m] (aproximadamente). Diseño orientado a vehículo no tripulado.

Con base en la experiencia adquirida, y siendo fiel a la forma en que se desarrolló el vehículo, el siguiente paso se enfoca, de forma más específica, en el diseño del prototipo y contempla la

primera etapa del chasis (basándose en el concepto definido previamente), junto con la selección de materiales y “componentes” que serán necesarios (tanto para el diseño como para la construcción de los diferentes subsistemas del vehículo); dentro de estos componentes, se incluyen las autopartes y refacciones seleccionadas de vehículos altamente comerciales. Algunos de los componentes y materiales de partida para el desarrollo del vehículo y sus sistemas fueron los siguientes: ruedas o llantas (de vehículo comercial); horquillas de suspensión para las 4 ruedas (de vehículo comercial); tubería de acero A36 de $\frac{3}{4}$ de pulgada de diámetro externo; solera de acero de 1 pulgada x $\frac{1}{8}$ de pulgada de espesor; amortiguadores (sistema resorte-amortiguador, de vehículo donante); mecanismo de piñón y cremallera para la dirección (de vehículo donante – Renault 5); par motor de tracción eléctrico – controlador (de vehículo donante – Electraton).

Con los elementos definidos en este punto, se tiene una base sólida para adentrarse en la primera fase de diseño y construcción del prototipo. En esta etapa, el objetivo será el chasis, sistema que, para efectos del desarrollo de la plataforma AGV, será el eje central en varias etapas del proceso y el sistema respecto al cual se diseñen y construyan los demás sistemas del vehículo. Con el tamaño de llantas y el listado de requerimientos y restricciones ya definidos, se hace un diseño esquemático del chasis, en donde se dan propuestas en el dimensionamiento del vehículo teniendo en cuenta características como: tamaño de las llantas (su efecto en el ancho total del vehículo y la posibilidad de interferencia con el chasis durante el accionamiento del sistema de dirección); largo por ancho del vehículo dentro de las dimensiones permitidas por la normativa; forma general del chasis, acorde al concepto base (chasis tipo skateboard); altura del chasis, acorde a las dimensiones de elementos ya existentes; longitudes de los brazos de suspensión (y su efecto en el ancho del vehículo), de acuerdo con la orientación dada por el diseño del sistema.

Uniando los listados de requerimientos, características y componentes descritos anteriormente, se tienen las bases necesarias para iniciar la primera fase en el diseño y la construcción. A continuación, en la Figura 3.3 se presenta un resumen de todo lo mencionado.

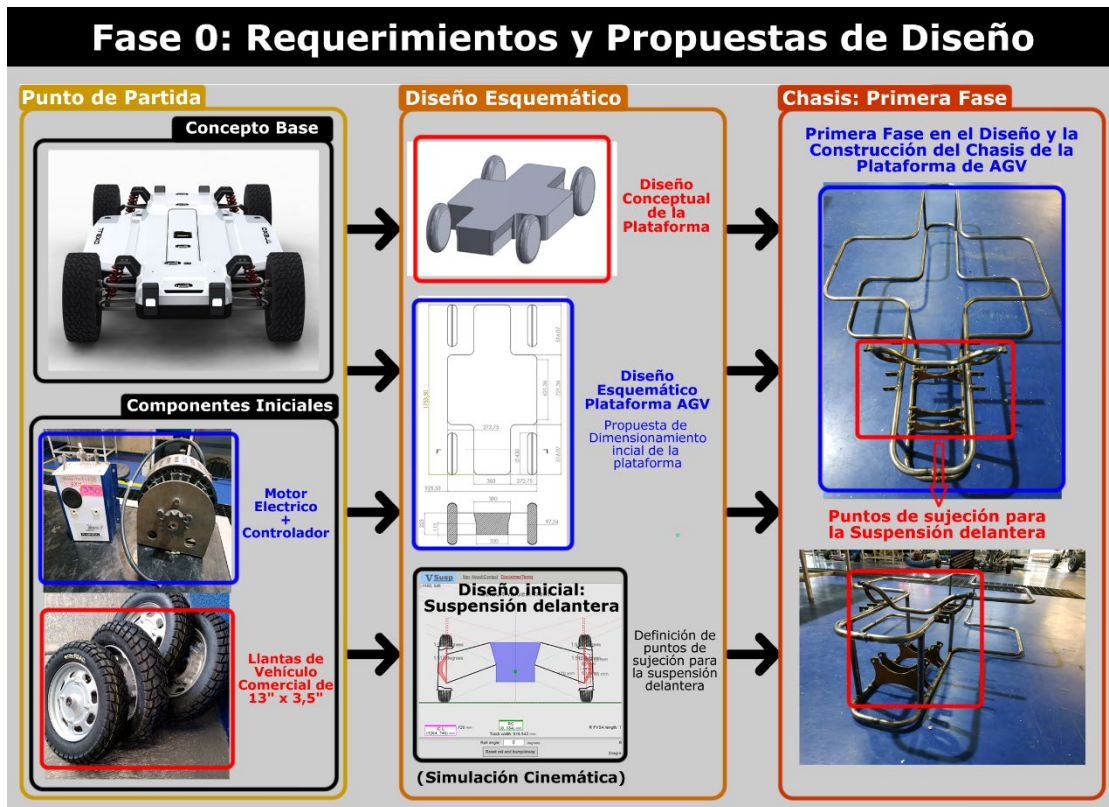


Figura 3.3: esquema representativo del punto de partida para el diseño y la construcción del prototipo. (Originales en colores)

Siguiendo con el proceso de desarrollo del AGV, se da inicio a la etapa de diseño y construcción del tren delantero, abordando de esta manera los sistemas de suspensión delantera y dirección del vehículo. Resulta de gran utilidad abordar al tren delantero como un todo, de forma que los dos sistemas propuestos se desarrollen de forma paralela y secuencial. Lo anterior implica realizar primero el diseño y la construcción del sistema de suspensión de acuerdo con los componentes iniciales, las características y requerimientos definidos, y realizar el diseño de la dirección con base en las características de funcionamiento y/o operación de la suspensión, para luego finalizar con la construcción del sistema de dirección.

La suspensión delantera del vehículo, según lo definido previamente, obedece a la configuración de doble brazo u horquilla. Los brazos de suspensión (2 superiores y 2 inferiores para el tren delantero) hacen parte del listado de componentes iniciales que fueron seleccionados de un vehículo altamente comercial (ATV 150 *Italika*). En conjunto con la sección del chasis designada

para el alojamiento de este sistema, el ancho de la suspensión delantera (medido desde las caras externas de las llantas) es de 110 [cm] aproximadamente, ancho que además corresponde al ancho máximo del vehículo.

En cuanto al sistema de dirección, se desarrolló bajo el concepto propuesto de Steer by wire, y se compone de un mecanismo de piñón y cremallera modificado, junto con los elementos de transmisión de potencia y accionamiento, que para el caso corresponde a un actuador electromecánico. El mecanismo de piñón y cremallera proviene de un Renault 5, modelo 1990 (vehículo donante), por otro lado, el actuador corresponde a un motor eléctrico “*levantacristales*” de auto. Los componentes mencionados corresponden al listado inicial o de partida del proyecto.

El tren trasero del vehículo comprende los sistemas de suspensión trasera junto con el tren de potencia del vehículo. Siguiendo el orden de ideas propuesto hasta ahora, ambos sistemas se desarrollaron de forma paralela y secuencial, en donde primero se realizó un diseño de los dos sistemas evaluando la posibilidad de interferencias y choques entre los elementos de cada sistema, luego se realizó el diseño y la construcción del sistema de suspensión trasera, para terminar con el diseño (basado en los parámetros de operación de la suspensión trasera y las restricciones de espacio generadas por su desarrollo) y la construcción del tren de potencia del vehículo.

Adicionalmente, se destaca el rediseño del sistema de suspensión trasera, el cual, según lo propuesto en las primeras etapas del proyecto, tendría la configuración de doble brazo u horquilla (es decir, un espejo del sistema de suspensión delantero). Sin embargo, producto del diseño en paralelo de los sistemas mencionados, se evidenció el riesgo inminente de interferencias entre los componentes de ambos sistemas, por lo que se procedió a rediseñar la distribución de la suspensión trasera, dando como resultado la implementación del sistema de suspensión Push rod ⁷ en el tren trasero del vehículo. En cuanto al tren de potencia, se compone de un motor de tracción eléctrico con una potencia de 10 caballos a 48 [V] conectado a un diferencial con una reducción 2:1 por medio de juntas universales, y a su vez, el diferencial transmite la potencia de salida hacia las llantas traseras por medio de mecanismos compuestos, igualmente, por juntas universales.

Con el desarrollo de los trenes delantero y trasero casi a totalidad y los resultados positivos para las pruebas estáticas realizadas a los sistemas construidos, se hace necesario integrar los

⁷ Término en inglés para referirse a un sistema de suspensión basado en una barra o biela de empuje

componentes que permitirán la evaluación de la plataforma AGV como conjunto. En primer lugar, se encuentra el componente de alimentación, necesario para el funcionamiento del tren de potencia y el sistema de frenos que es un componente de seguridad básico para cualquier vehículo. Luego de una etapa de selección y a consideración de algunos criterios, se decidió que el componente de alimentación estaría compuesto por un “*pack*” de baterías de ácido plomo de descarga profunda de 12 [V] y 90 [A] por batería, en su totalidad, son 4 baterías integradas bajo una configuración tipo serie que hace que el voltaje resultante a la entrada del circuito de potencia del motor sean los 48 [V] requeridos.

Ahora, correspondiente al sistema de frenos, por cuestiones de seguridad preventiva se decidió que el vehículo tenga frenos en las cuatro llantas, donde, de acuerdo con el diseño del sistema y aprovechando las características de las llantas adquiridas, en el tren delantero cuenta con frenos de tambor y con frenos de disco en el tren trasero (esto es, el sistema más efectivo en control del tren motriz). Ambos sistemas son accionados por cable y su accionamiento está a cargo de un actuador electromecánico, con la ayuda de un mecanismo diseñado específicamente para este propósito.

En este punto se cuenta con un prototipo de plataforma AGV, completamente funcional. A pesar de esto, según el propósito del proyecto, la plataforma desde su concepto base se pensó como un vehículo no tripulado, por lo que se debe implementar un componente o herramienta que permita la manipulación y el control del vehículo desde el exterior del mismo; cumpliendo con el objetivo de hacer una plataforma tele operada. Dicha herramienta no es otra cosa que una interfaz de usuario, la cual, según los requerimientos se desarrolló como una aplicación web, accesible de manera móvil, con la capacidad de dar al usuario el control de los sistemas de tracción, dirección y frenos del vehículo; así como de una retroalimentación de variables de operación del vehículo como lo son la velocidad y el ángulo de dirección.

La implementación de este sistema requiere de la instalación de una “interfase” física en el vehículo encargada de recibir las señales y ejecutar las acciones deseadas. Esta llamada interfase física corresponde a un componente de control eléctrico-electrónico en donde un controlador seleccionado, va a manipular la función de los actuadores del vehículo de acuerdo con las señales de entrada recibidas, en donde, la integración del controlador con las fases de control y de potencia del vehículo se dará a través de circuitos impresos, diseñados específicamente para el manejo de

los niveles de voltaje y corriente que usan los sistemas del vehículo. La funcionalidad del vehículo queda a juicio de los resultados obtenidos por las pruebas realizadas a la plataforma como conjunto, para las que se espera, el vehículo pueda desempeñarse de forma adecuada bajo la carga y las condiciones de trabajo requeridas.

El desarrollo del prototipo de AGV obedece a un esquema de trabajo (ver Figura 3.4) presentado como una serie de pasos lógicos que, implementados de la forma en que se muestra en este documento, pueden llevar a la obtención de un producto de bajo costo y completamente funcional, capaz de responder a las necesidades planteadas y con potencial para ser objeto de investigación en futuros temas como lo son la conducción autónoma.

En resumen, el prototipo desarrollado tiene como medidas máximas 160x115 [cm] (largo x ancho), con un peso de aproximadamente 230 [kg] repartido en un porcentaje 80/20 entre peso suspendido y no suspendido del vehículo. Adicionalmente, cuenta con suspensión en las cuatro ruedas diseñada para soportar el conjunto de la carga propia del vehículo junto con la carga de trabajo, en condiciones normales. También se debe indicar que el sistema de dirección Steer by wire cuenta con rango de -35° a 35° , capaz de responder bajo la carga de trabajo de 100 [kg]. Por último, el tren de potencia cumple con todas las características y restricciones de diseño propuestas a la vez que aborda y da solución a las necesidades iniciales.

Para concluir, es necesario resaltar que la información presentada en este capítulo es una recopilación del proceso que se llevó a cabo con el desarrollo de la plataforma AGV. En los capítulos posteriores a este, se presenta en detalle el proceso descrito anteriormente, distribuido en tres grandes fases o etapas propuestas en un orden secuencial o lineal. Empezando con la fase de diseño del producto, donde se describe a detalle todas las consideraciones y decisiones tomadas para la generación de un diseño en detalle; continuando con la fase de construcción, donde se muestra cómo a partir de los recursos disponibles y el diseño previo, se fueron obteniendo todos los componentes necesarios para el ensamble de la plataforma; concluyendo con la fase de pruebas, donde se exponen los métodos usados en la validación de los diseños, los componentes manufacturados y los sistemas del vehículo.

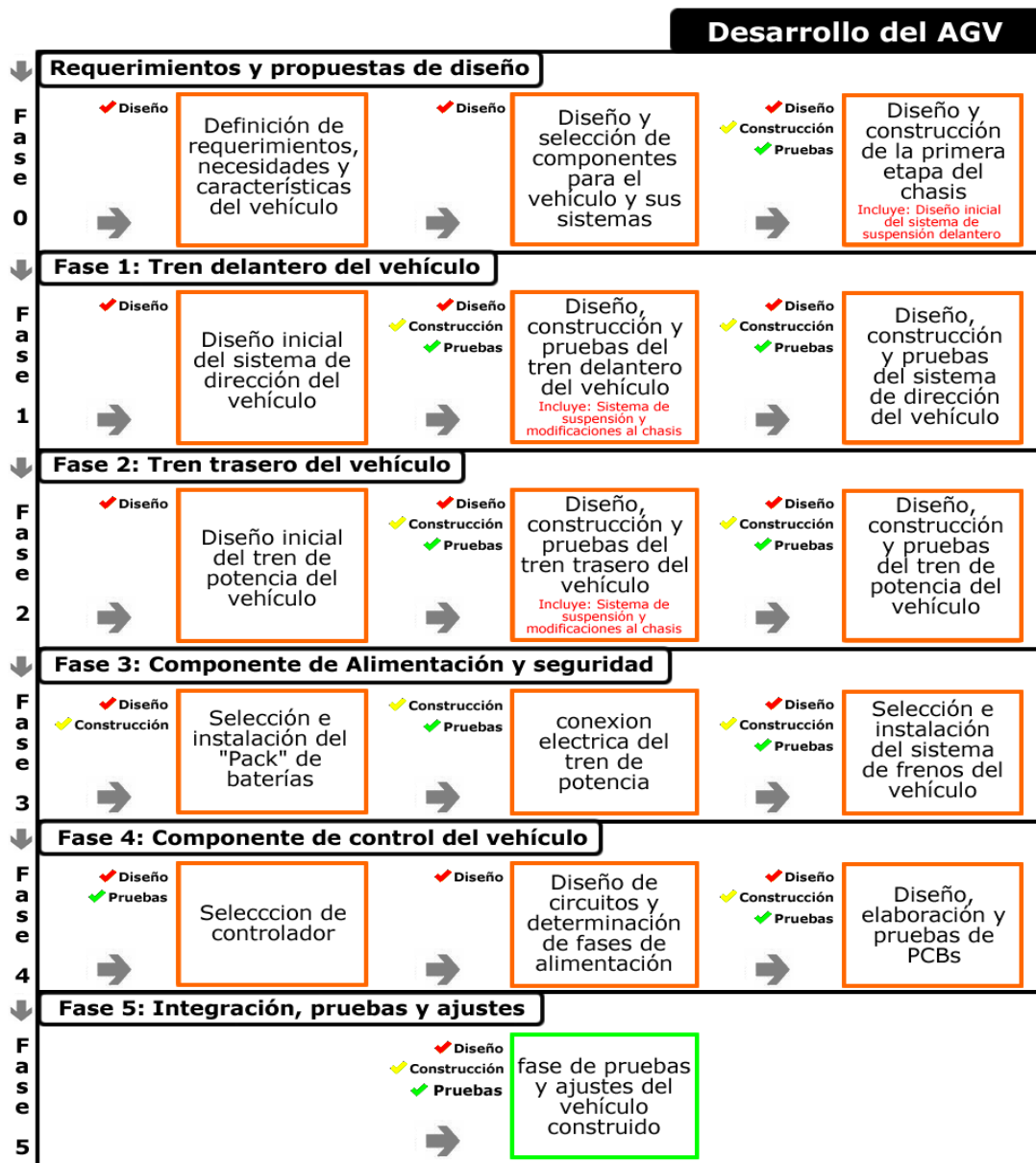


Figura 3.4: esquema del flujo de trabajo seguido en el proceso de desarrollo para la plataforma AGV. (Originales en colores)

4. DISEÑO

Este capítulo, comprende la generación de los diseños en detalle para todos los componentes y sistemas del vehículo. Los objetivos fundamentales, serán establecer y justificar, de acuerdo con las normas correspondientes, los parámetros de diseño y operación. Se espera que el diseño realizado para la plataforma AGV responda y de solución a las necesidades, requerimientos y restricciones propuestas.

4.1 PRELIMINARES: REQUERIMIENTOS Y PROPUESTAS DE DISEÑO.

Corresponden a una delimitación inicial del producto, de acuerdo con el compendio de necesidades, requerimientos y restricciones a los que la plataforma AGV debe responder, sin dejar de lado las características y los alcances propuestos para la misma. El desarrollo de este apartado se propone en tres acciones preliminares, primero, se aborda la definición de requerimientos, necesidades y características del vehículo. Posterior a ello, se hace mención del diseño y la selección de componentes para el vehículo y sus sistemas. Por último, el tema se centra en el diseño y construcción de la primera etapa del chasis.

A continuación, se presenta de forma más detallada que significa y/o comprende cada una de estas acciones.

4.1.1 DEFINICIÓN DE REQUERIMIENTOS, NECESIDADES Y CARACTERÍSTICAS DEL VEHÍCULO.

Para la plataforma AGV, las características, necesidades y requerimientos comparten en común, que todos son parámetros de definición previos al diseño conceptual; razón por la cual no se ve la necesidad de hacer ningún tipo de distinción entre ellos. Con base en esta aclaración, se procede a listar de forma específica y detallada cada uno de estos parámetros.

La plataforma AGV, desde su concepción inicial se pensó como un vehículo utilitario de carga por lo que, su diseño deberá estar orientado hacia el soporte y el desplazamiento de una carga cuyo valor se desea que sea de 100 [kg] aproximadamente. Con el fin de garantizar un mayor nivel de estabilidad y, por lo tanto, un mayor nivel de seguridad tanto para el vehículo como para la carga, se propone que el vehículo sea de 4 ruedas, como mínimo, con suspensión en cada una de ellas.

La capacidad de desplazarse por espacios cerrados del tipo pasillos y corredores industriales, fue otra característica que se pensó para el prototipo, por lo que será necesario buscar una norma relacionada con el desplazamiento de vehículos por pasillos y corredores, que guíe la delimitación de las dimensiones máximas del vehículo. Adicionalmente, se requiere que el vehículo sea compacto y que su chasis se elabore bajo una configuración de tipo skateboard. Por último, teniendo a consideración la posibilidad de que por los pasillos puedan circular personas al mismo tiempo que el vehículo se está desplazando, se deberá limitar la velocidad lineal máxima del vehículo. El límite propuesto es de máximo 40 [km/h].

Como parte del alcance del proyecto, se requiere que el vehículo construido sea completamente funcional y no tripulado. Esta última característica repercute de forma directa en las propuestas de diseño para los sistemas motrices y de control del prototipo, como lo son el tren motriz, la dirección y los frenos; pues adicional al diseño de los sistemas, se hace necesario considerar sus respectivos mecanismos de activación. Complementario a este requerimiento y con el propósito de enriquecer aún más el alcance del proyecto, se propone que el sistema de dirección sea steer by wire.

Para finalizar este subapartado, se requiere priorizar el factor económico en el desarrollo de la plataforma AGV, haciendo que el producto final sea un prototipo de vehículo eléctrico funcional, de bajo costo, elaborado a base de elementos comerciales y convencionales y de algunos otros elementos de vehículos donantes como lo son: el mecanismo de piñón y cremallera (caja de dirección) de un automóvil, **Renault 5** modelo 1985 (ver apéndice B – especificaciones técnicas Renault 5); los mecanismos amortiguadores de una motoneta **Italika DS150** (ver apéndice C –

especificaciones técnicas *Italika DS150*) y la tubería de acero A36 en la que fue elaborado el chasis del STB (se propone para la plataforma AGV que éste, sea el material principal para la fabricación del chasis).

4.1.2 DISEÑO Y SELECCIÓN DE COMPONENTES PARA EL VEHÍCULO Y SUS SISTEMAS.

Con el objetivo de reunir todos los elementos necesarios para generar un primer diseño esquemático (con medidas) del chasis, se propone definir de forma concreta las dimensiones de algunos componentes restantes. Dentro de estos se encuentran las llantas del vehículo y las horquillas de la suspensión.

Se da inicio con un análisis para la decisión de hacer o comprar, para cada componente. Como criterios a considerar, se tienen: costo (de la pieza o los materiales para su fabricación), tiempo para obtener el producto, confiabilidad del componente obtenido y disponibilidad de los recursos. Este último, tiene que ver, con todos los factores de los que depende la adquisición o la fabricación del componente, como pueden ser la disponibilidad de las máquinas y herramientas necesarias para fabricar el pieza en su totalidad; disponibilidad local, ya sea de las piezas en si o de las materias primas necesarias para su manufactura; disponibilidad de los recursos necesarios para la adquisición de los componentes o las materias primas (dinero, tiempo, capacidad de gestión según las normativas de compras de la institución, etc.); entre otros.

Antes de proceder, es necesario aclarar que, dentro de las instalaciones del CIMA, no se dispone de las herramientas necesarias para la fabricación de llantas (o alguno de sus componentes relacionados), por lo que de forma automática estos pasan a ser elementos para comprar. Teniendo en cuenta lo anterior y los lineamientos ya planteados, se pasa a tomar la decisión de hacer o comprar para el componente restante (las horquillas o brazos de suspensión) a través de una matriz de decisión (ver Tabla 4.1) con las siguientes características: cuatro factores de evaluación (cada uno con su respectivo peso o nivel de importancia), tres niveles de importancia para los pesos de los factores (1: no relevante, 3: medianamente relevante, 5: muy relevante), tres niveles de

evaluación para las opciones (1: no favorable, 3: medianamente favorable, 5: muy favorable).

De acuerdo con los resultados del proceso llevado a cabo, la mejor decisión es la de comprar los componentes evaluados, como se observa en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1

Matriz de decisión para la elección de hacer o comprar las horquillas de la suspensión.

HORQUILLAS DE SUSPENSIÓN	Costo (5)	Tiempo (3)	Confiabilidad (5)	Disponibilidad (3)	
Hacer (Fabricar)	3	1	5	3	
Comprar	5	5	5	3	

HORQUILLAS DE SUSPENSIÓN	Costo (5)	Tiempo (3)	Confiabilidad (5)	Disponibilidad (3)	Puntuación Final
Hacer (Fabricar)	15	3	25	9	57
Comprar	25	15	25	9	79

La selección de las autopartes se realizará haciendo un balance entre el costo del producto y la calidad de este. La selección de vehículos donantes se realizará tomando en cuenta cuales son los modelos más comerciales y accesibles del mercado. Por otra parte, el proceso de compras debe realizarse teniendo en cuenta ciertos lineamientos establecidos por la institución (en nuestro caso, el Tecnológico de Monterrey) a través de la cual, las compras serán realizadas, por los distribuidores disponibles localmente. Entre los lineamientos establecidos por la institución resaltan que, el distribuidor debe garantizar que la compra sea facturable y verificable; el distribuidor debe ser parte del catálogo de distribuidores de la institución o aceptar pagos con tarjeta

corporativa; las compras y/o pagos en línea no están permitidos; de preferencia el distribuidor debe ser local (misma ciudad o en su defecto, mismo estado).

Con base en lo anterior, junto con la aplicación y los requerimientos planteados para la plataforma AGV, se decide reducir el campo de búsqueda para los vehículos donantes a motocicletas. Esta decisión fue tomada teniendo en cuenta que la carga a soportar por rueda se espera sea menor a 100 [kg] por rueda (para el vehículo, con la carga de trabajo propuesta de 100 [kg]), también se ha planteado que el vehículo se desplazara a una velocidad reducida y por terrenos en buen estado, por lo que se prevé que las cargas dinámicas no serán significativas, lo que reduce la necesidad de piezas de gran tamaño (como las de un automóvil); característica que favorece la optimización del dimensionamiento del AGV (que se busca, sea el mínimo posible de acuerdo con las necesidades y los componentes a usar).

De nuevo, se propone una matriz de decisión para seleccionar al proveedor que pueda satisfacer de mejor manera las necesidades propuestas (ver Tabla 4.2). Para la matriz, se van a evaluar cuatro proveedores por medio de cuatro criterios de selección, cada uno con un peso (nivel de importancia) y con sus respectivos niveles de evaluación. En primer lugar, tres niveles de importancia (peso) para los criterios de selección (1: medianamente importante, 2: importante, 3: muy importante). Cinco niveles de evaluación para las opciones en los criterios de costo, requisitos de compra y tiempo de entrega (1: no favorable, 2: poco favorable, 3: medianamente favorable, 4: favorable, 5: muy favorable). Por último, cinco niveles de evaluación para el criterio de calidad (1: mala calidad, 2: calidad media, 3: buena calidad, 4: muy buena calidad, 5: excelente calidad).

Tabla 4.2

Matriz de decisión para la elección de un proveedor de autopartes óptimo.

Proveedores	Costo del componente (2)	Cumple con requisitos de compra (3)	Calidad de los componentes (2)	Tiempo de entrega (1)
ITALIKA	5	5	4	5
BAJAJ	4	3	4	3
YAMAHA	3	1	5	2
HONDA	3	1	5	2

Proveedores	Costo del componente (2)	Cumple con requisitos de compra (3)	Calidad de los componentes (2)	Tiempo de entrega (1)	Puntuación Final
ITALIKA	10	15	8	5	38
BAJAJ	8	9	8	3	28
YAMAHA	6	3	10	2	21
HONDA	6	3	10	2	21

Con el resultado obtenido y de acuerdo con las recomendaciones ya expuestas para la selección de los componentes, se procede a filtrar los modelos disponibles con el distribuidor más cercano. Finalmente, fueron seleccionados los modelos *DS125* y *ATV180* (ver apéndice D – especificaciones técnicas *Italika ATV180*) de *italika*, como los vehículos donantes para las llantas y las horquillas de suspensión, respectivamente.

Las especificaciones técnicas de cada modelo ofrecen los datos necesarios para realizar una aproximación sobre la carga de operación, para las que están diseñadas tanto el conjunto de horquillas de suspensión como las llantas seleccionadas. A continuación, en la Figura 4.1, se presenta un análisis aproximado sobre la carga que soporta la suspensión delantera de la ATV180 (las horquillas seleccionadas corresponden a las de la suspensión delantera de este vehículo).

Del análisis realizado, se obtiene que, para el vehículo a carga completa, la carga soportada por el eje delantero es de aproximadamente 165 [kg] (63.46% del peso del vehículo, aproximadamente). Debe tenerse en cuenta que la carga de este “eje delantero” en realidad se distribuye en dos conjuntos idénticos de horquillas (y posteriormente a las dos ruedas frontales), por lo que la carga para cada conjunto de horquillas será la siguiente:

$$\text{Carga Horquillas: } C_H = \left(\frac{W_F}{2}\right) = \left(\frac{165}{2}\right) = 82.5 \text{ [kg]} \quad (3.1)$$

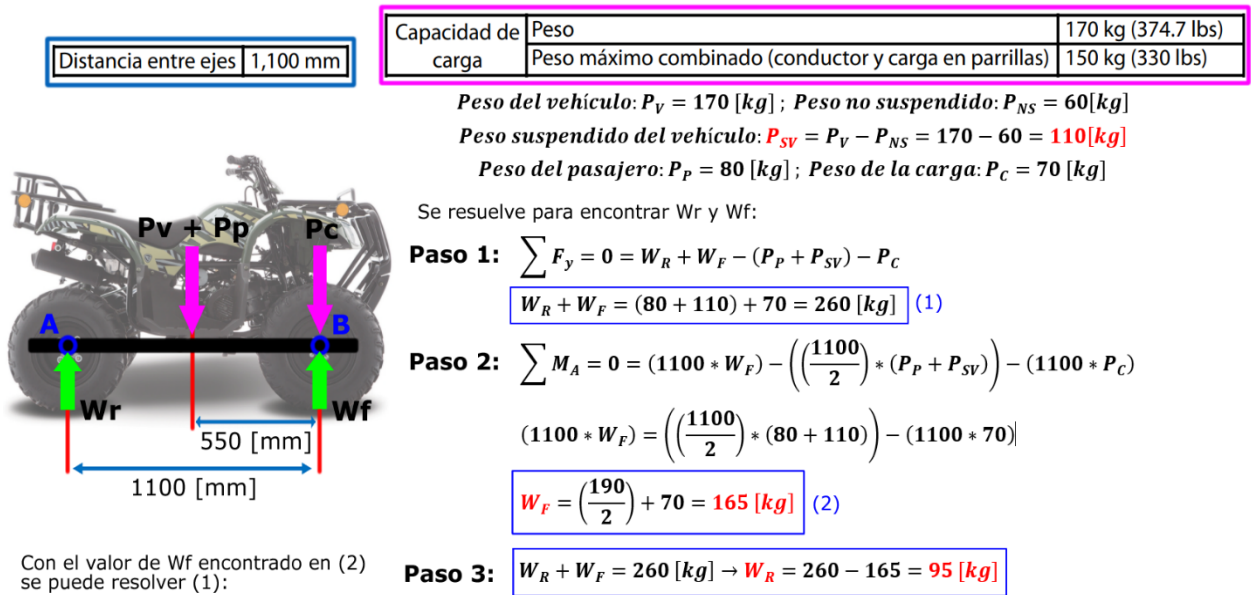


Figura 4.1: análisis para el cálculo aproximado de la carga por eje en la ATV180 (con la carga máxima de operación indicada por el fabricante). (Original en colores).

Continuando con las llantas seleccionadas, se procede a realizar un análisis similar, el cual se presenta a continuación en la Figura 4.2.

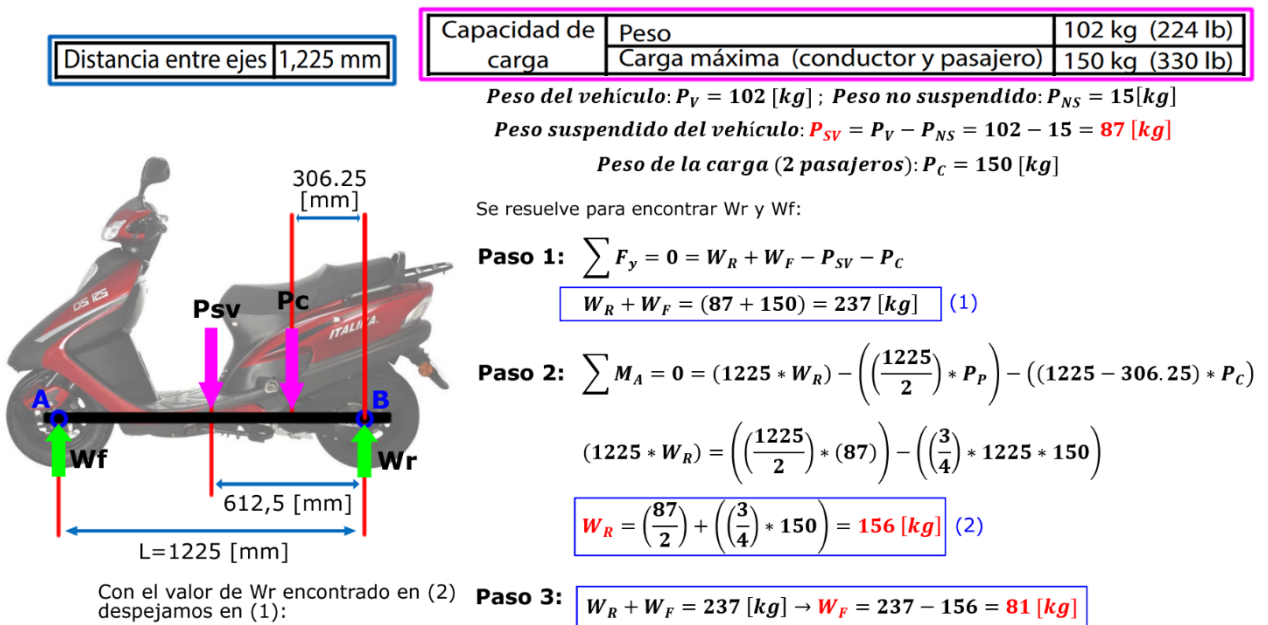


Figura 4.2: análisis para el cálculo aproximado de la carga por llanta en la moto DS 125 (con la

carga máxima de operación indicada por el fabricante). (Original en colores)

En este caso, los resultados nos muestran de forma directa las cargas aproximadas a las que están sometidas las llantas del vehículo. Dado que para la plataforma AGV se adquirieron dos pares de llantas, uno delantero y uno trasero, ambos resultados son de nuestro interés.

Carga llanta delantera: $W_F = 81 [kg]$; Carga llanta trasera: $W_R = 156 [kg]$ (3.2)

4.1.3 DISEÑO DEL CHASÍS: ETAPA INICIAL

Con todas las consideraciones ya mencionadas, se propone establecer de forma cuantitativa los lineamientos para el dimensionamiento del vehículo, que incluye las siguientes características: ancho máximo del vehículo, altura máxima del vehículo y distribución del espacio interno dentro del chasis.

Iniciando con el ancho máximo del chasis, este se establecerá en consideración con las necesidades de espacio para sus respectivos componentes, junto con la norma para la circulación de personas y vehículos de carga por pasillos industriales (NTP-434). Respecto al ancho máxima del vehículo, tiene una mayor influencia la norma que establece: “Para el caso de vías mixtas de vehículos en un sólo sentido y peatonales en sentido único la anchura mínima será la del vehículo o carga incrementada en 1 m. más una tolerancia de maniobra de 0,40 [m].” (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1997, p.3) [16]. De acuerdo con esto y teniendo en cuenta que el ancho de los pasillos y/o corredores ya se encuentran predispuestos, se buscará respetar el incremento de un metro que se menciona de forma inicial, por lo que, si se considera un ancho de pasillo mínimo de dos metros, el ancho máximo del chasis deberá ser menor o igual a un metro.

Siguiendo con la altura máxima del vehículo, se busca que sea la menor posible; esto teniendo en cuenta los requerimientos de elaborar un vehículo compacto con un chasis tipo skateboard. Para el aproximado de la altura máxima se tendrá en cuenta: la altura promedio de las baterías que se han usado en proyectos anteriores, la altura máxima de los componentes que van a ocupar el espacio

disponible dentro del chasis, las dimensiones del material en que el chasis será elaborado, el tamaño de las llantas y las horquillas de suspensión adquiridas. Como una nota adicional, la norma NTP 434, tiene un apartado con respecto a la altura máxima del vehículo y su carga: "... la altura mínima de las vías de circulación será la del vehículo o su carga incrementada en 0,30 [m]..." (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1997, p.3) [16], sin embargo, dada la altura de los pasillos dentro del laboratorio (2,5 [m] mínimo), esta restricción pierde relevancia pues siempre se va a cumplir.

Finalmente, para la característica de distribución del espacio interno dentro del chasis, se hace referencia a la consideración de las dimensiones (reales o aproximadas) de los elementos que se planea, van a ir dentro del espacio del chasis como: el motor de tracción, el controlador, las baterías, entre otros; así como de algunos externos como lo son las llantas del vehículo (se debe considerar la rotación de las llantas debida al accionamiento del sistema de dirección). Con lo anterior, se espera establecer las dimensiones mínimas del chasis (especialmente con respecto al ancho y a su altura).

Ampliando lo mencionado sobre los componentes que van a ir dentro del chasis, entre los elementos más relevantes respecto a la altura del chasis sobresale el motor de tracción, 19.5 [cm]; el controlador ALTRAX, 22 [cm]; la batería ion-litio (opcional de batería), 22 [cm]; la batería ácido-plomo (opcional de batería), 17.5[cm]; La batería ácido-plomo de descarga profunda (opcional de batería), 22.5[cm].

En la Figura 4.3 se presenta un esquema que resume en gran medida todo lo expuesto en esta sección.

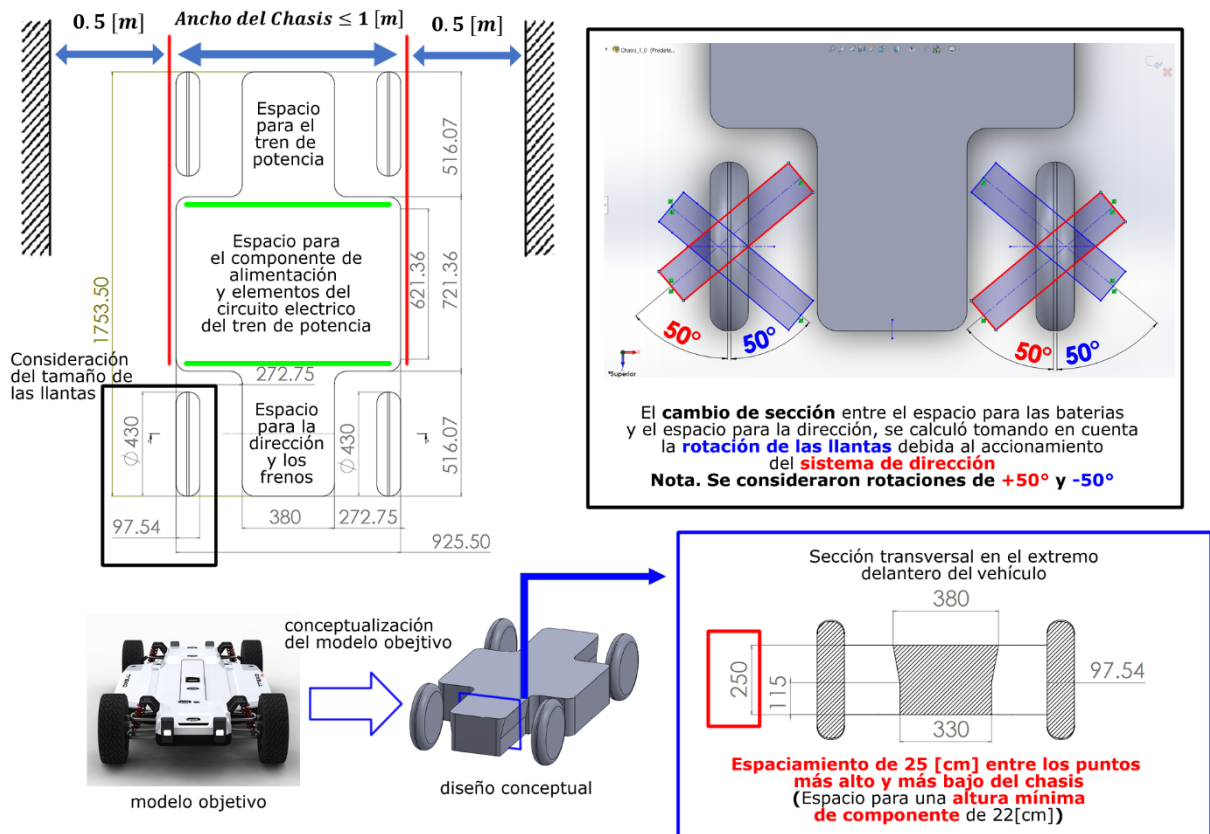


Figura 4.3: diseño inicial del chasis con sus respectivas recomendaciones. (Original en colores)

4.2 PRIMERA FASE: TREN DELANTERO DEL VEHÍCULO

Este subapartado del documento comprende las consideraciones y los requerimientos de diseño para los sistemas de dirección y suspensión delantera del prototipo.

4.2.1 PRELIMINARES: COMPONENTES DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN

Tal y como se mencionó en la sección 4.1.1, se deben considerar elementos de vehículos

donantes para el desarrollo de los sistemas del prototipo. En el caso de la dirección se cuenta con una caja de dirección (mecanismo de piñón y cremallera) de un Renault 5 modelo 1985. Entre sus características más relevantes destacan la máxima extensión de la cremallera, 141 [mm]; vueltas de dirección $3 \frac{1}{4}$; tipo de dirección delantera; ángulo de avance (caster ⁸) positivo (fue diseñada para ubicarse antes del eje delantero (más cerca al centro del vehículo)); longitud máxima del mecanismo, 550 [mm].

A partir de las características mencionadas, se recomienda seguir los parámetros establecidos por el fabricante en la ubicación del sistema de dirección; por lo que su posición óptima estará antes del eje de acción de las llantas delanteras (es decir, la dirección más cerca que el eje, al centro del vehículo). Por otro lado, considerando que para el AGV se desea un ancho máximo de 1 [m] o menor, se encuentra que la longitud total del mecanismo de dirección, de 55 [cm] (la cual, irá ubicada en relación al ancho del AGV), es algo grande teniendo en cuenta que aún no se definen las dimensiones de todos los elementos que hacen parte del sistema de dirección del vehículo.

Como un factor adicional, es necesario tener presente la relación que existe entre los sistemas de un vehículo. En su trabajo, Cerón (2014) [17] expone un argumento que apoya la afirmación: “...los sistemas que conforman un vehículo completo están totalmente interrelacionados y comprometidos entre ellos, un sistema de suspensión no puede diseñarse de forma efectiva si no se considera al sistema de frenos, al sistema de dirección, al sistema de tracción y el empaquetamiento de estos, por mencionar un ejemplo.” (p.4). En nuestro caso y de acuerdo con la experiencia adquirida en el desarrollo del VR1 y la STB, una de las relaciones más fuertes, es la existente entre el sistema de suspensión y el sistema de dirección; por lo que antes de establecer de manera precisa los parámetros de funcionamiento y operación para el sistema de dirección, se definirán los parámetros del sistema de suspensión, bajo las consideraciones ya tomadas.

4.2.2 TREN DELANTERO: SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y LLANTAS

⁸ Ángulo de avance: relacionado a los sistemas de suspensión y dirección del vehículo

Iniciando con las llantas del vehículo, su instalación en la plataforma AGV requiere de la fabricación de los respectivos elementos de apoyo y sujeción. El elemento encargado de la sujeción de la llanta se conoce como “**mangueta de dirección**” y su fabricación requiere de un diseño previo, cuyos detalles serán expuestos a continuación. Antes de continuar, es necesario aclarar que las manguetas podían ser adquiridas en conjunto con las llantas y las horquillas, sin embargo, debido al costo por pieza y a que dentro del CIMA se contaba con todo lo necesario (material, máquinas herramientas, personal calificado, experiencia, etc.) para su fabricación, su compra no se justificaba.

Según las consideraciones planteadas, las ruedas delanteras del AGV serán las impulsadas (en la sección anterior se decidió ubicar el sistema de dirección en el tren delantero) y las ruedas traseras serán las impulsoras. En el apartado 3.1.2 se mencionaba que la compra de las llantas se realizó para un par delantero y uno trasero, y específicamente para el modelo del vehículo donante, coincide que la llanta delantera es la impulsada mientras que la trasera es la impulsora, por lo que para la dirección de las manguetas de dirección se trabajara con el par de llantas delanteras adquiridas. Como un punto para aclarar, la principal diferencia entre las ruedas delanteras y traseras es que según el diseño del vehículo donante (*Italika DS 125*), las ruedas delanteras son las impulsadas y las traseras son las impulsoras. Esto se evidencia en el estriado que estas últimas poseen en la **maza** de la llanta, para su conexión directa con el tren de potencia. Por su parte, las llantas delanteras poseen rodamientos sobre los cuales se apoya el eje de sujeción (eje rígido, no rota) de la llanta. Este eje, es un perno de grado SAE de diámetro igual al diámetro interno de los rodamientos de la llanta.

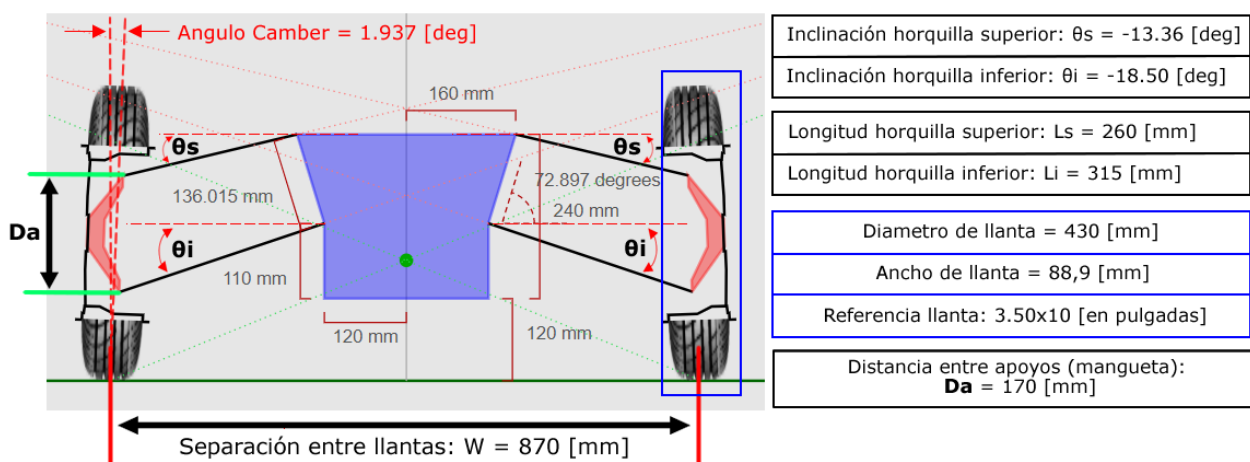
Uno de los mayores desafíos en el diseño de estas piezas, es el de adaptar componentes diseñados para un vehículo completamente diferente a la necesidades y requerimientos de otro. En este caso, se pretende adaptar las llantas de una moto a un vehículo de 4 ruedas, y diseñar a medida las manguetas de dirección para los elementos de un vehículo que no estaban diseñados para interactuar con un mecanismo de dirección. Sin embargo, con las consideraciones tomadas y las características mencionadas hasta ahora, se presenta un compendio con todos los parámetros a considerar en el diseño de las manguetas de dirección. Para empezar, se destaca que el diseño de las manguetas se realizará respecto a los ejes de las llantas delanteras (pernos M12x165 grado 8

SAE), el material disponible para su fabricación será bloque de aluminio 6061 de 2 ½ pulgadas de espesor, el dimensionamiento considerará el tamaño de la llanta y las dimensiones de las horquillas de suspensión

Correspondiente al sistema de suspensión, se decide implementar la configuración double wishbone o de doble horquilla para el tren delantero basándose principalmente en dos criterios. La experiencia en la construcción de los vehículos (VR1 y STB), que poseen esta configuración en sus respectivas suspensiones delanteras y, las horquillas adquiridas, están específicamente diseñadas para este sistema de suspensión (el vehículo donante, la ATV180, también posee la configuración de doble horquilla en su suspensión delantera).

Para su diseño, ya se cuenta con las dimensiones de las horquillas y las llantas (junto con el diseño para sus respectivas manguetas de dirección). En este punto, es necesario determinar las posiciones de los apoyos o los puntos de acople y/o sujeción de los brazos de suspensión. Se deberá considerar el ángulo camber ⁹ en este proceso.

Con la ayuda de la herramienta **Vsusp** [18] y tomando como datos de entrada las dimensiones de los componentes mencionados, se realizará una simulación cinemática de la suspensión delantera. Los resultados de la simulación, en conjunto con las dimensiones propuestas para el chasis, serán los parámetros a tener en cuenta para el posicionamiento de los puntos de sujeción de los brazos de suspensión, y la determinación de sus respectivos ángulos de instalación y operación.



⁹ Ángulo de caída o inclinación de las llantas: relacionado al sistema de suspensión.

Figura 4.4: simulación cinemática de la suspensión delantera en Vsusp. (Origina en colores).

Como se puede apreciar en los resultados obtenidos, la disposición de los elementos se realizó con la intención de obtener un ángulo camber negativo con el vehículo a carga libre (soportando su propio peso) y, que a medida que la carga sobre el mismo fuera aumentando (y por tanto su suspensión comprimiéndose y el vehículo acercándose al suelo) el camber se volviera aún más negativo, esto es, el camber es inversamente proporcional a la carga del vehículo. Característica deseada para favorecer la estabilidad del vehículo y en general para cualquier sistema de suspensión, según lo menciona en “*Vehicle Dynamics*” Rill (2009) [19]: “Una suspensión ideal, será aquella que incremente de forma negativa el camber de la rueda, a medida que la suspensión se flexiona hacia arriba...” (p.84); en otras palabras, y extrapolando la definición a la aplicación de nuestro interés, para el sistema de suspensión, se espera que, a mayor carga, mayor ganancia (incremento) negativa para el camber.

4.2.3 SISTEMA DE DIRECCIÓN DEL VEHÍCULO

Anteriormente, en la sección 4.2.1, se planteó que la longitud total de la dirección era grande para el vehículo (considerando que la dirección se debe ubicar a lo ancho del vehículo). Ahora, con los resultados obtenidos en el diseño del sistema de suspensión, se encuentra que efectivamente el tamaño del sistema de dirección es grande, pues con un tamaño de 55 [cm] representa más de la mitad del ancho máximo propuesto para la plataforma AGV.

Bajo las consideraciones de usar los elementos de vehículos donantes y optimizar los costos en el desarrollo del prototipo, se plantea la opción de modificar la caja de dirección con el objetivo de hacerla más compacta.

En un análisis del mecanismo de dirección disponible, el fabricante establece (ver el apéndice B) que el vehículo se conduce por la izquierda, esto coincide con que el mecanismo de dirección no es simétrico y que el punto de acción del piñón está orientado hacia un extremo del mecanismo. Por otro lado, aunque el mecanismo no es simétrico, la extensión de los extremos de la barra del

mecanismo si lo es (es decir, si se gira la mitad de las vueltas en sentido horario, la extensión de la barra en el extremo izquierdo, será la misma que se obtendría con un giro de igual magnitud pero en sentido contrario, para el extremo derecho de la barra de dirección), esto indica que la cremallera de la barra tiene una longitud reducida y, está ubicada de forma que proporcione una extensión simétrica del mecanismo. Del planteamiento realizado, se concluye que hay una longitud redundante para uno de los extremos del mecanismo de dirección, requerida para las necesidades del vehículo donante, pero de la que se puede prescindir para la plataforma AGV. Por lo que se decide modificar el tamaño tanto de la barra, como del housing ¹⁰ de manera que se preserve la característica principal que es la de tener la misma magnitud de extensión para ambos extremos del mecanismo. A continuación, se presenta un esquema (ver Figura 4.5) que resume el planteamiento realizado.

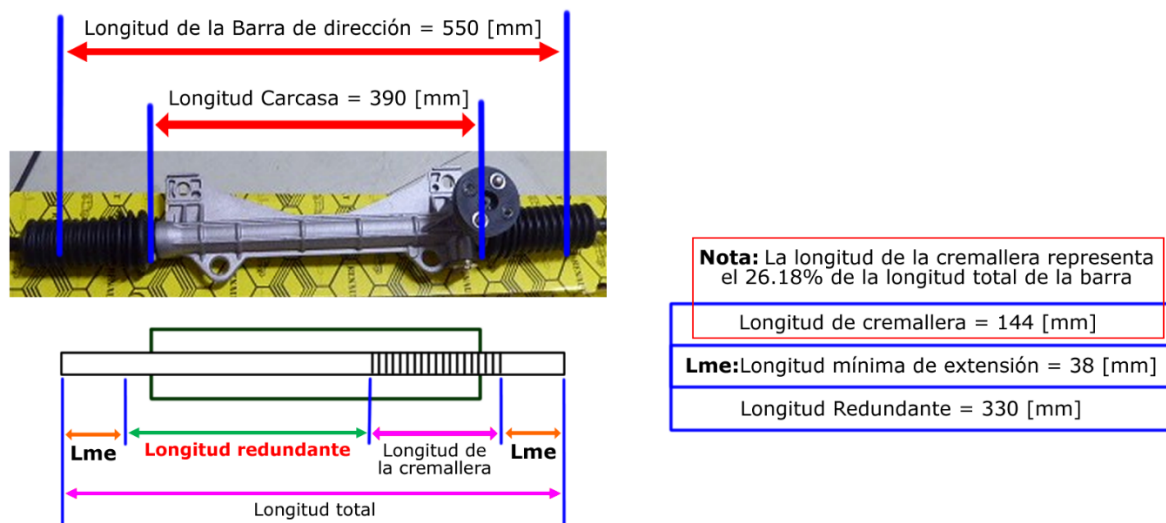


Figura 4.5: dimensiones del sistema de dirección del Renault 5. (Original en colores)

Se decide trabajar de acuerdo con la longitud de la cremallera, planteando que la barra sea simétrica respecto a la longitud del dentado. Esto es que la longitud entre el extremo derecho de la barra y el inicio de la cremallera sea la misma que hay, entre el final de esta y el extremo izquierdo

¹⁰ Terminio en inglés que hace referencia a la carcasa o bastidor de un elemento.

de la barra de dirección. La modificación de housing se realizará de acuerdo con las dimensiones resultantes. El nuevo diseño compacto del mecanismo de dirección posee las siguientes características: extensión máxima derecha de 118.5 [mm], extensión máxima izquierda de 141 [mm] y longitud total del mecanismo de 220 [mm].

Comparando nuevamente la longitud total (modificada) del mecanismo de dirección respecto al ancho máximo propuesto para el AGV en la sección anterior, se ve que corresponde a cerca del 20% ($220/1200=18.3\%$), lo cual es bastante aceptable en términos del uso del espacio disponible. Continuando con el diseño del sistema de dirección del vehículo y sus componentes (con sus respectivas características), es necesario decidir el tipo de dirección; con esto, se hace referencia a la configuración del sistema de dirección, que puede ser: ackerman ¹¹, paralela, inversa u otra (ver Figura 4.6).

Según lo propuesto por Jazar (2017) [20], en el capítulo dedicado a los sistemas de dirección (*Vehicle dynamics: Theory and Application*), o por Rill (2009) [19], en sus respectivos libros sobre dinámica de vehículos; es muy recomendable diseñar la dirección de un vehículo de baja velocidad para que cumpla con la condición de ackerman. A continuación, se presentan algunos parámetros relevantes en el diseño de una **dirección ackerman** (este término se usa para referirse a las direcciones que cumplen la condición de ackerman): distancia entre ejes del vehículo, ancho del vehículo de 866,2 [mm], ángulos de dirección para las llantas delantera.

¹¹ Término en inglés usado para referirse a un sistema de dirección que cumple con las condiciones geométricas de Langensperger & Ackerman.

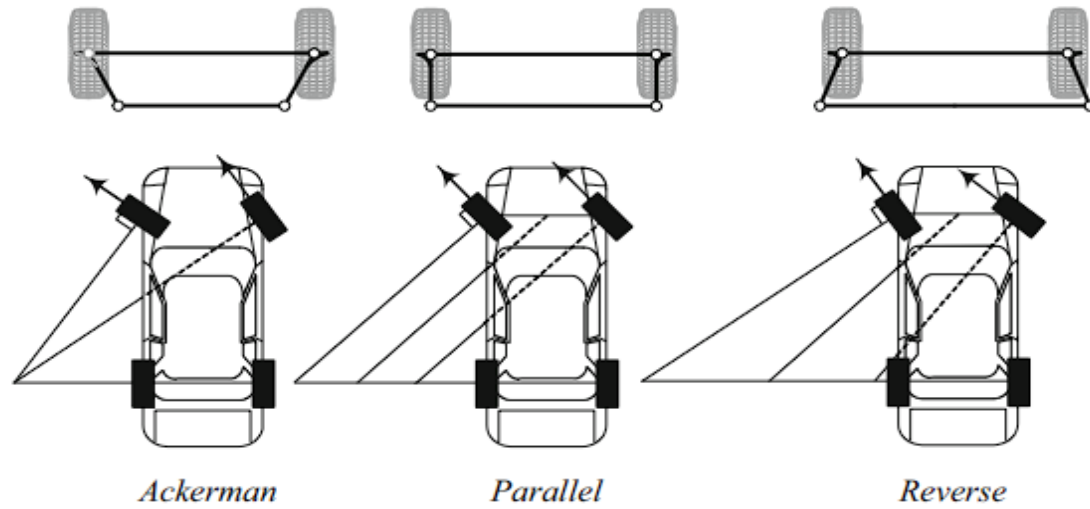


Figura 4.6: configuraciones más comunes para el sistema de suspensión. Tomado de Jazar (2017) [20].

Es importante la definición de estos criterios pues de ellos depende no solo el cumplimiento de la condición de ackerman sino también el radio de giro resultante de la plataforma AGV.

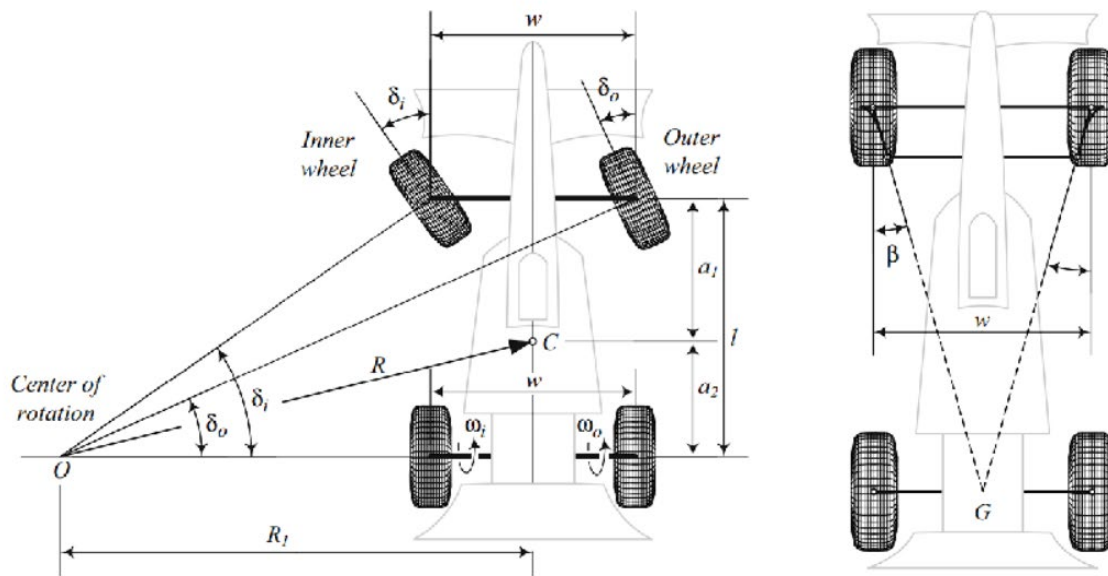


Figura 4.7: dirección ackerman en detalle. Tomado de Jazar (2017) [20].

En la Figura 4.7 se puede ver que, para el mecanismo planteado, los “manguitos” de dirección

(las articulaciones que se conectan de forma directa a la rueda) tienen una orientación definida por la letra “ β ”. Esta orientación se define desde la mangueta de dirección del vehículo cuyo diseño fue abordado casi en su totalidad en la sección anterior.

Todo los parámetros analizados hasta el momento, son importantes para definir la distancia entre ejes y los ángulos de trabajo de la dirección, mientras se asegura el cumplimiento de la condición de ackerman, sin embargo, existe una dependencia entre la distancia entre ejes y los ángulos de giro de las ruedas (que comprenden a su vez, el radio de giro, la orientación de los manguitos de dirección entre otros), por lo que, va a ser necesario definir de manera arbitraria y a modo de iteración, uno de los parámetros de modo que sea posible definir las características restantes.

Priorizando la necesidad de desarrollar un vehículo compacto y con un radio de giro reducido, se elige la distancia entre ejes, parámetro que influye de forma directa sobre ambas características. Tomando como valor arbitrario una distancia entre ejes de 1[m], es posible calcular el ángulo de orientación β de la siguiente manera:

$$\tan(\beta) = \frac{\left(\frac{w}{2}\right)}{L} ; \text{despejando para } \beta \rightarrow \beta = \arctan\left(\frac{w}{2*L}\right) \quad (3.3)$$

Para $w = 866.2$ [mm] y $L = 1000$ [mm] $\rightarrow \beta = 23.41$ [deg]

Con los parámetros definidos hasta ahora, solo es necesario definir la posición del eje de acción de la dirección del vehículo para determinar la longitud de los manguitos y, dejar definidos los diseños tanto del sistema de dirección como de las manguetas del vehículo.

Respecto a la posición horizontal de la caja de dirección, por indicaciones del fabricante, se ubicará atrás del eje de acción del tren delantero del vehículo (es decir, más cerca al centro del vehículo). En consideración con el tamaño de la mangueta de dirección, se recomienda un espaciamiento máximo de 10 [cm] entre los dos ejes mencionados. Correspondiente a la posición vertical, esta se define de acuerdo con la suspensión delantera de modo que se evite el fenómeno conocido como bump steer ¹², en el que el accionamiento de la suspensión provoca perturbaciones

¹² Terminio en inglés usado para referirse al fenómeno de cambio de Toe producto del movimiento vertical de la suspensión (hacia arriba o hacia abajo).

en la dirección del vehículo. Para evitarlo, se debe buscar que las articulaciones que unen la mangueta con la caja de dirección se posicionen en una inclinación igual o muy próxima a la inclinación efectiva de las horquillas de suspensión.

Las características mencionadas, en conjunto con longitud de las articulaciones de empuje y arrastre, definen el **“TOE”** o ángulo de alineación de las llantas delanteras. La definición cuantitativa de todas las variables que se han introducido hasta ahora, deberán realizarse con el objetivo de asegurar un ángulo de alineación neutro o positivo (también conocido como **“TOE IN”**) según lo recomendado por Jazar (2017) [20] para vehículos comerciales convencionales.

Por último, el parámetro que se debe definir es el caster o ángulo de avance del vehículo. Según Cerón (2014) [17], para vehículos de carga ligera y pasajeros, se recomienda un ángulo menor a 4 grados, sin embargo, en Jazar (2017) [20] se expone que, para las mismas categorías de vehículos, se maneja un rango que va de los 4 a los 6 grados. Teniendo en cuenta que, a mayor ángulo de avance, mayor estabilidad, se opta por implementar un ángulo de avance de 6 grados para el sistema de dirección del vehículo.

4.3 SEGUNDA FASE: TREN TRASERO DEL VEHÍCULO

Según los requerimientos planteados y el diseño realizado para el tren delantero del vehículo, los sistemas a trabajar en el tren trasero del vehículo son: tren de potencia y sistema de suspensión trasero. Ambos se abordan en la presente sección.

4.3.1 PRELIMINARES: TREN DE POTENCIA DEL VEHÍCULO

El diseño inicial del tren de potencia se planteó inicialmente bajo el esquema de *“direct drive motor”* o motor directo a una rueda (en este caso, del tren trasero del vehículo), según los montajes propuestos en un artículo sobre transmisiones para prototipos de vehículos eléctricos, BFF Design

Ltd. (2008) [21]. Esta configuración plantea la conexión, por medio de una reducción de potencia (banda, cadena o engranajes), del eje del motor con el eje de una de las llantas traseras del vehículo. Aunque es poca la investigación que se ha realizado respecto a este sistema, principalmente porque son la antesala de los motores in-wheel (que acaparan un buen porcentaje de la atención en el tema de los vehículos eléctricos), algunas características del uso de este montaje son el diseño y manufactura del montaje relativamente sencillo (menor tiempo y costo); la tracción en una sola rueda; la posibilidad de deslizamiento en la rueda con tracción durante curvas (no se asegura una distribución del torque para las ruedas); la posibilidad de desbalanceo de cargas y desgaste no uniforme para los componentes del tren trasero y la confiabilidad en el sistema de tracción del vehículo inversamente proporcional a su carga de trabajo.

Teniendo en cuenta que, en su mayoría, las características mencionadas no son necesariamente buenas y ante la oportunidad de disponer de un diferencial de grado automotriz, se evalúa la posibilidad de hacer un cambio en la propuesta para el tren de potencia del vehículo (Figura 4.8). Para esto, se hace una contraposición de las características principales del diferencial con las del montaje direct drive motor y se elige la opción que represente más ventajas para la plataforma AGV.



Figura 4.8: concepto de los esquemas propuestos para el tren de potencia del vehículo. (Original en colores).

Nuevamente se propone una matriz de decisión (ver Tabla 4.3), bajo las siguientes métricas y/o parámetros de evaluación. Dos opciones para evaluar, esquema direct drive motor y tren trasero con diferencial. Adicional a lo previo, seis parámetros de evaluación (cada uno, con un factor de importancia que va de 1 a 3): diseño y manufactura del montaje (2), tipo de tracción (1), deslizamiento en las ruedas traseras (1), balanceo de cargas (2), desgaste uniforme de componentes (3) y confiabilidad del tren de potencia (3). Por último, tres niveles de calificación: no conveniente (1), medianamente conveniente (3) y conveniente (5).

Según la evaluación realizada, es claro que es una mejor opción la implementación del diferencial como elemento de transmisión de potencia entre los ejes del motor y las llantas traseras, ya que realiza su función de una forma mucho más completa, dando solución a los problemas que supone la instalación del esquema de transmisión directo.

Tabla 4.3

Matriz de decisión: esquema de transmisión de potencia para el tren trasero del AGV.

	Direct drive motor		Diferencial	
Diseño y manufactura del montaje (2)	Complejo		Más complejo	
	5	10	3	6
Tipo de tracción (1)	1 rueda		2 ruedas	
	3	3	5	5
Deslizamiento en las ruedas traseras (1)	Si		No	
	3	3	5	5
Balanceo de cargas (2)	No		Si	
	3	6	5	10
Desgaste uniforme de componentes (3)	No		Si	
	1	3	5	15
	Media		Buena	

Confiabilidad del tren de potencia (3)	3	9	5	15
Total	34		56	

4.3.2 TREN TRASERO DEL VEHÍCULO: SISTEMA DE SUSPENSIÓN Y LLANTAS

El diseño de la suspensión trasera del vehículo, parte de los siguientes requerimientos: se deben usar las mismas horquillas usadas en la suspensión delantera del vehículo; las posiciones de los apoyos para los brazos de suspensión también serán los mismos; la configuración implementada para la suspensión deberá permitir la instalación de los mecanismos correspondientes para la transmisión de potencia desde las salidas del diferencial (ver sección anterior) hasta las llantas.

De acuerdo con lo anterior, es claro que para la suspensión trasera será necesario implementar una configuración diferente a la implementada en la suspensión delantera, pues la transmisión de potencia a las ruedas es una nueva restricción a tener en cuenta. Opciones comunes para la suspensión trasera de un vehículo son las siguientes: de tirante, de eje rígido, double wishbone y “*mcpherson strut*”. Sin embargo, ninguna de estas opciones se ajusta a las restricciones de espacio que se tienen para el vehículo y tampoco pueden hacer uso de las horquillas disponibles.

Examinando más a fondo, se encuentra en los vehículos de la Fórmula 1, ver Divisione La Repubblica (2012) [22], una posible solución con una configuración poco conocida y no muy convencional para la suspensión conocida con el nombre de push rod (ver Figura 4.9). Esta configuración es aplicable bajo un sistema de doble horquilla, que aprovecha el espacio disponible y da como resultado un sistema compacto en el que se usa un sistema de extensión guiada hacia un balancín para transmitir la carga y el movimiento, al elemento amortiguador de la suspensión.

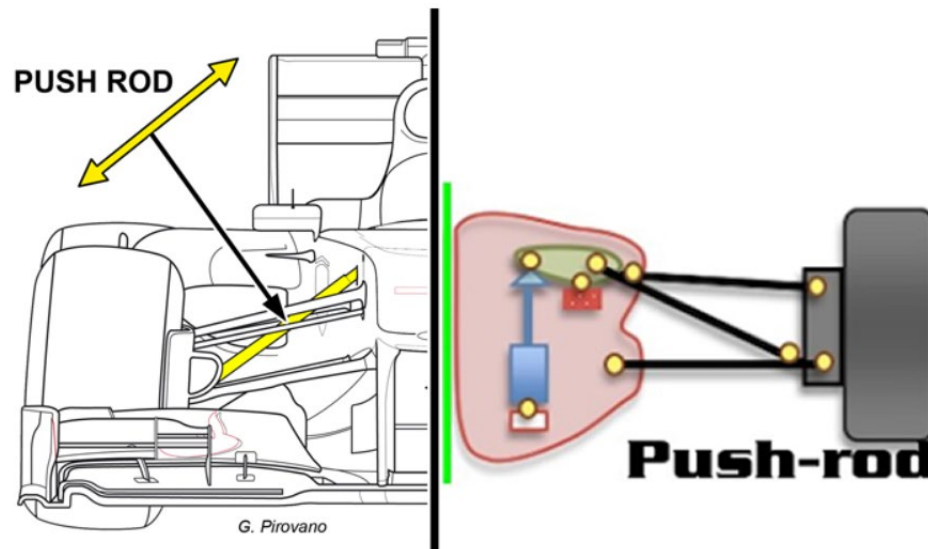


Figura 4.9: suspensión push rod: Esquema básico. (Nota: la imagen de la derecha fue tomada de Divisione La Repubblica (2012)) [22]. (Original en colores).

Teniendo en cuenta las ventajas que ofrece la configuración push rod, se elige para su implementación en el AGV. Se requiere el diseño de los componentes restantes, siendo el balancín el de mayor importancia (es el componente central de toda la configuración). Su diseño toma en cuenta dos aspectos principales que son: la transmisión del movimiento y la ganancia en la transmisión de la carga. El primero se refiere a específicamente a la característica del balancín para transformar su movimiento natural de rotación en uno de traslación, de modo que los componentes unidos al mismo trabajen bajo el modo de carga deseado (carga axial: tensión-compresión) durante la transmisión del movimiento. El segundo, se refiere a la posibilidad de controlar la rigidez del sistema de suspensión por medio de una ganancia inducida a través de la manipulación de las dimensiones del balancín; en otras palabras, se puede jugar con la relación que el balancín induce entre la carga de la suspensión (debida al movimiento de las llantas que produce una rotación en las horquillas y por tanto, el accionamiento del sistema) y la carga del elemento amortiguador.

Como resultado del diseño (ver Figura 4.10), los parámetros del balancín son una relación aproximada de 1.75:1 entre la carga del amortiguador y la carga de la suspensión, con rangos de movimiento traslacional de 20 [mm] para el extremo que va al amortiguador y, 10 [mm] para el extremo que conecta con las horquillas; ambas, para una rotación del balancín de 15 [deg]

aproximadamente.

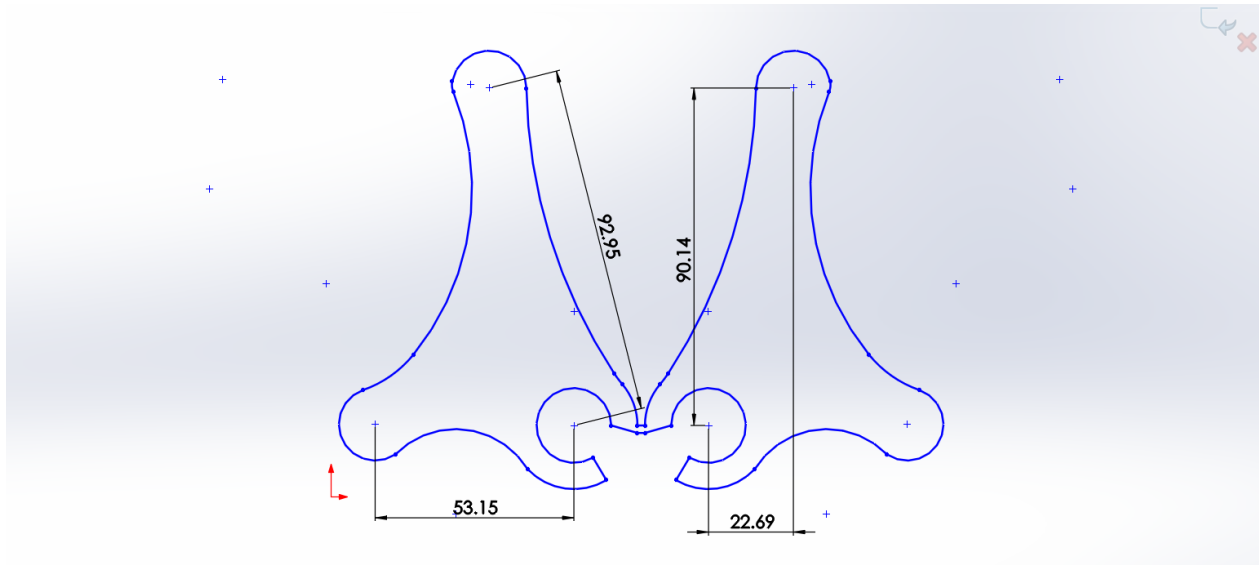


Figura 4.10: diseño balancines para el mecanismo de suspensión push rod de tren trasero. (Original en colores).

Como elemento final a considerar, las manguetas para la suspensión trasera van a mantener todas las características de diseño empleadas para el diseño de las manguetas del tren delantero, excepto por una adaptación para los ejes de transmisión de potencia que comunicaran la salida del diferencial con cada una de las llantas del tren trasero. Esta adaptación consiste en la instalación de un par de cojinetes sobre los cuales el eje de transmisión de potencia va a poder descansar y rotar libremente. La elección de los cojinetes fue realizada principalmente con base en el diámetro externo del eje, 20 [mm], considerando un ancho de mínimo 10 [mm] como factor de seguridad y el mínimo diámetro externo accesible para las dos características planteadas. Se eligieron rodamientos de cilindro (el montaje no estará diseñado para carga axial, pues la aplicación no lo requiere).

4.3.3 TREN DE POTENCIA DEL VEHÍCULO

Con la inclusión del diferencial como elemento intermediario entre el motor y las llantas traseras, y teniendo en cuenta la ventaja que este elemento ofrece al redireccionar la potencia de forma transversal desde la salida del motor hacia las llantas impulsoras, solo queda por considerar el diseño del elemento encargado de transmitir la potencia desde las salidas del diferencial hasta las llantas del vehículo. El desarrollo de este diseño debe plantearse de acuerdo con características que ya se han ido estableciendo como el dimensionamiento aproximado del chasis y su posicionamiento respecto al suelo, el tamaño de las llantas, el tamaño del diferencial entre otros.

El desafío radica en la diferencia de altura que hay entre los ejes de acción de las llantas traseras y los ejes las salidas de potencia del diferencial, teniendo como desventaja la ubicación que va a tener este mecanismo dentro del vehículo (principalmente entre las horquillas de suspensión), el movimiento de las ruedas con el accionamiento de la suspensión y la necesidad de un mecanismo compacto que no interfiera con otros componentes a su alrededor. Como ventajas, se tiene que los ejes de acción mencionados son paralelos y que existe una buena separación entre las salidas del diferencial y las entradas a las llantas.

Se plantea el uso de *Cardanes* o juntas universales, que según lo que establece Jazar (2017) "...son mecanismos usados para conectar ejes que se interceptan a un determinado ángulo." (p.363) [20]. Característica que se ajusta a la necesidad planteada de transmitir potencia, por medio de ejes cuyo movimiento es rotatorio, sin embargo, los ejes a comunicar son paralelos por lo que será necesaria la inclusión de un tercer eje que se intercepte con el eje del diferencial y el eje de la llanta (para cada lado del vehículo).

Dada la diferencia de alturas entre los ejes y teniendo en consideración la necesidad de evitar el fenómeno de junta de velocidad variable para la transmisión de potencia, se propone el arreglo de la Figura 4.11. Este arreglo, siempre y cuando cumpla con la característica del mismo ángulo de intersección para los dos ejes conectados, elimina el fenómeno de transmisión de potencia a velocidad variable; que como es bien sabido, se induce con el ángulo de intercepción entre los ejes rotacionales y cuyo efecto se intensifica con el incremento de dicho ángulo.

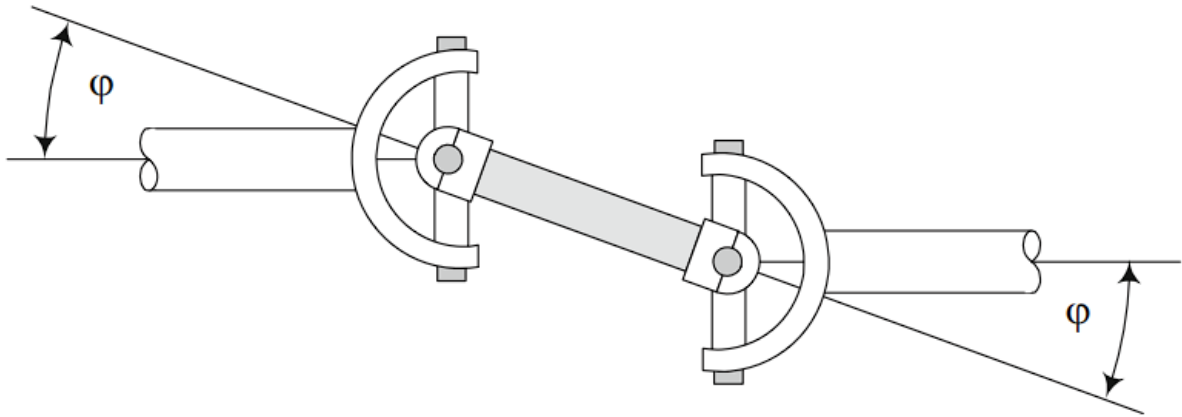


Figura 4.11: arreglo de cardan propuesto para la transmisión de potencia entre el diferencial y las llantas. Tomado de Jazar (2017) [20].

4.4 TERCERA FASE: COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN Y SEGURIDAD

4.4.1 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS DEL VEHÍCULO

Para un vehículo no tripulado, se había declarado al sistema de dirección como el componente de control más importante; sin embargo, respecto a la seguridad del vehículo y del ambiente que lo rodea (puede llegar a incluir personas), la responsabilidad recae en el sistema de frenos. Teniendo en cuenta las necesidades del vehículo y los requerimientos planteados para su desarrollo, se decidió implementar frenos en las cuatro ruedas.

La selección del sistema para el tren delantero se consideró desde la selección de las ruedas. En la sección de diseño y selección de componentes (ver sección 4.1.2), se definió el uso de las ruedas de una motocicleta *italika* DS125 (vehículo donante). Una característica de gran importancia para las ruedas seleccionadas es que incluyen el sistema de freno de tambor en el diseño de su maza.

Teniendo en cuenta que son frenos de grado automotriz usados ampliamente en vehículos de transporte y, que el tren delantero del AGV es el tren impulsado, se decidió implementar la configuración de frenos de tambor en las ruedas delanteras.

Respecto a las ruedas traseras, se implementó un sistema de freno de disco. Esta decisión se justifica principalmente en la necesidad de cambiar la maza de las llantas traseras por una que fuera conveniente para la transmisión de potencia con el tren trasero del vehículo y la recomendación de usar frenos de disco para el vehículo, al menos, en sus ruedas impulsoras.

Como medio de accionamiento para ambos sistemas fue seleccionado el sistema de accionamiento por cable. Esta decisión se justifica en que los elementos disponibles ya disponían de este sistema de accionamiento, además de ser un sistema más económico con componentes más accesibles (tanto en precio como en disponibilidad) de forma local.

4.4.2 SELECCIÓN DEL COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN

Como opciones para el componente de alimentación del vehículo, se tienen baterías de ion litio y baterías de ácido-plomo de descarga profunda (por su corta duración de carga y la incapacidad de mantener un voltaje de salida fijo a regímenes de carga altos y/o constantes, se descartan las baterías de ácido-plomo convencionales). Dado que las baterías son elementos para adquirir, se debe considerar el costo y la disponibilidad de compra como criterios de selección.

Teniendo en cuenta que para las baterías de ion litio no hay disponibilidad de un proveedor local y tanto su costo como el tiempo de entrega son elevados, se descartan como opción. Resulta necesario ahora evaluar la disponibilidad de las baterías de descarga o ciclado profundo; haciendo una búsqueda de proveedores, se encuentra en el fabricante LTH una opción disponible de forma local y que puede responder a las necesidades del AGV.

Especificaciones del Producto									
BCI	Aplicación	Voltaje	Polaridad	Dimensiones			Peso (kgs)	Garantía (meses)	
				Largo	Ancho	Alto*		Sin Costo	Prorrata
27	Ciclado Profundo	12	(+) / (-)	324	174	230	22.8	12	0

*La altura máxima incluye el poste

Amperios / Hora				Descarga (Amperios)				Capacidad de Reserva (Minutos)			Energía (kWh)		
@ 5Hrs.	@ 10Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.	@ 5Hrs.	@ 10Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.	@ 25 Amps.	@ 56 Amps.	@ 75 Amps.	@ 5Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.
76	85	96	105	15.2	8.5	4.8	1.1	160	-	42	0.91	1.15	1.26

Figura 4.12: especificaciones técnicas para batería de descarga profunda LTH 27MDC (ver apéndice E). (Original en colores).

La batería LTH 27-MDC, tiene la capacidad de proporcionar una carga constante de 25 [A] por un tiempo aproximado de 160 [min]. Cantidad que es suficiente para satisfacer las necesidades del vehículo, cuyo consumo no se espera que sobrepase los 15 [A] a un voltaje de 48 [V]. Se resalta como características a tener en cuenta la altura máxima de la batería de 230 [mm], que está muy cerca de lo considerado para el espaciado vertical del chasis y también el peso, pues para cumplir con la demanda de 48 [V] será necesario un mínimo de 4 baterías funcionando en serie sobre el vehículo, lo que supone una carga más alta de la considerada para el vehículo por parte de su componente de alimentación.

4.4.3 CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL TREN DE POTENCIA

Tomando como referencia los números de serie del motor y el controlador disponibles desde el inicio del proyecto, se realiza una búsqueda en los archivos del fabricante que da como resultado un circuito de conexión guía para el motor del tren de potencia del vehículo.

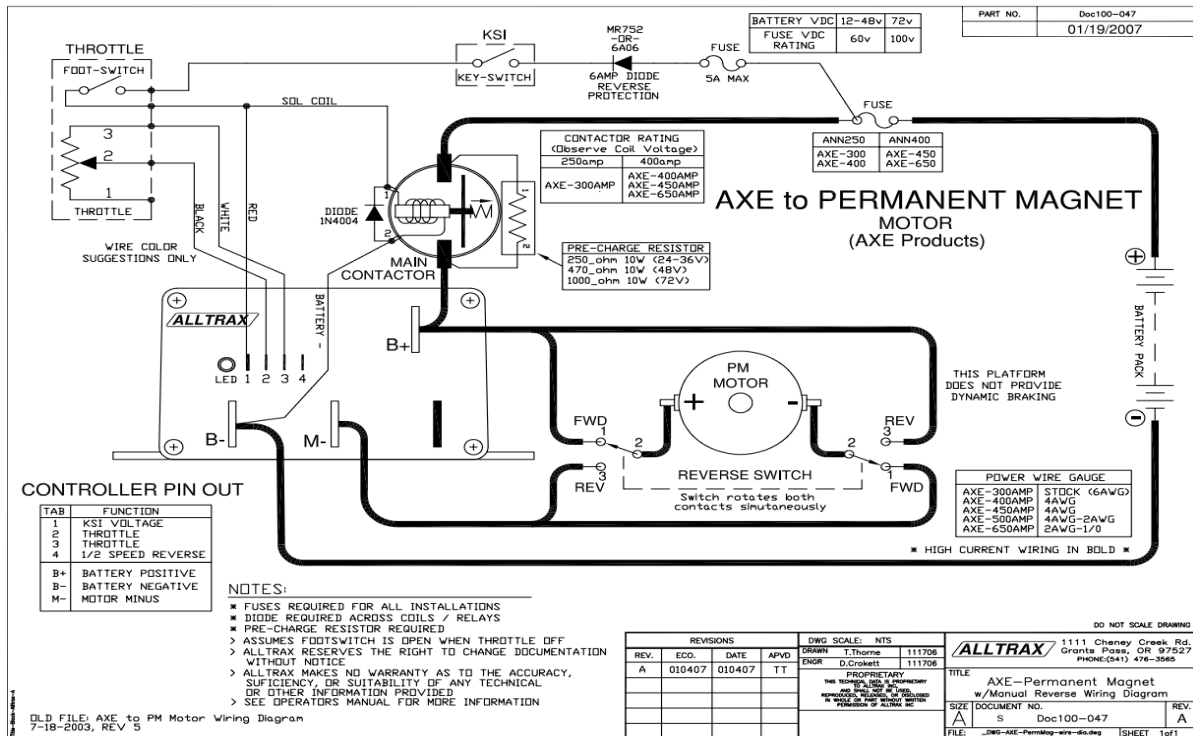


Figura 4.13: circuito de conexión para el suministro de potencia al motor por medio del controlador ALTRAX.

En la Figura 4.13 se presenta el diagrama de conexión sugerido por el fabricante del controlador, para un montaje con cambio de marcha (en nuestro caso, marcha adelante y reversa) y control de velocidad. Como se puede apreciar en el diagrama, el fabricante muestra una serie de elementos recomendados para el funcionamiento óptimo del montaje. Dentro de estos, es necesario adquirir los siguientes: Diodo de potencia de 6 [A] MR752 o 6A06; dos fusibles de 5 [A] y 100 [A] de grado automotriz, respectivamente; un contactor principal de 250 [A]; diodo 1N4004 y resistor de potencia de 470 [ohm] (para 10 [W] a 48 [V]); dos interruptores de 5[A] mínimo, dos contactores o relés de 100 [A] (grado automotriz); un potenciómetro de 50 – 100 [ohm].

4.5 CUARTA FASE: COMPONENTE DE CONTROL DEL VEHÍCULO

4.5.1 SELECCIÓN DEL CONTROLADOR

Para la selección del controlador, se tendrá en cuenta la recomendación de usar node-red como interfaz de desarrollo para el aplicativo web (su uso no es obligatorio, por lo que la incapacidad de usarse en alguna de las opciones encontradas no será motivo para descartarla).

De acuerdo con la búsqueda realizada y retomando nuevamente los criterios de compra expuestos en la sección 4.1.2 (costo, cumplimiento de los requerimientos de compra, calidad del producto/componente, tiempo de entrega), se tomaron en cuenta las siguientes opciones: “*Arduino*” (costo bajo, menor capacidad de procesamiento, uso para aplicaciones web/mobiles limitado o requiere de hardware adicional); “*Raspberry Pi*” (costo medio-bajo) (capacidad de procesamiento media, buen nivel de flexibilidad: ofrece varias opciones de interfaz de desarrollo (entre ellas, node-red)); “*Nvidia Jetson*” (costo alto, mayor capacidad de procesamiento y mayor flexibilidad para la elección de la interfaz a usar (permite el uso de node-red con la configuración y el software adecuado))

4.5.2 DISEÑO DE CIRCUITOS DE CONTROL Y DE POTENCIA

Se parte de dos fases preliminares, una de control de muy baja potencia (tanto en voltaje como en corriente debido al uso del controlador *raspberry pi*) y una de potencia diseñada para el suministro de un amperaje constante de aproximadamente 15 [A]. Es necesario que ambas fases puedan interactuar entre sí de una forma segura, esto implica el uso de pre actuadores y elementos aisladores y fases de corriente adicionales que permitan la interacción entre las señales de control emitidas por la *raspberry* y los motores de actuación de los sistemas de dirección, frenos, cambio o selección de marcha y tracción. A continuación, se presentan los circuitos diseñados para el control de los sistemas de tracción, dirección y frenos.

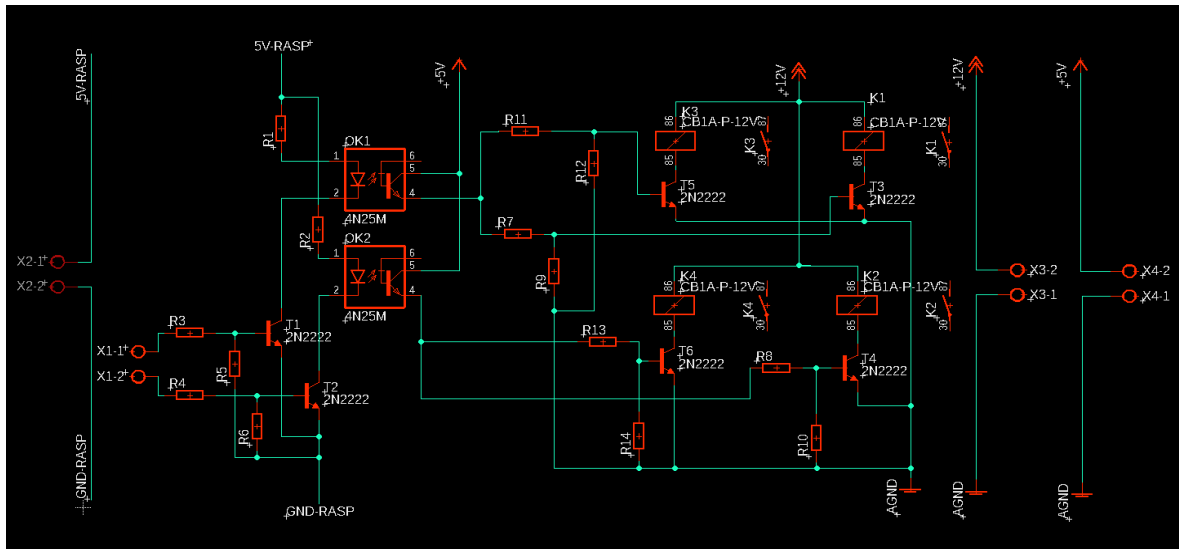


Figura 4.14 – Circuito de control para el sistema de dirección del AGV. (Original en colores).

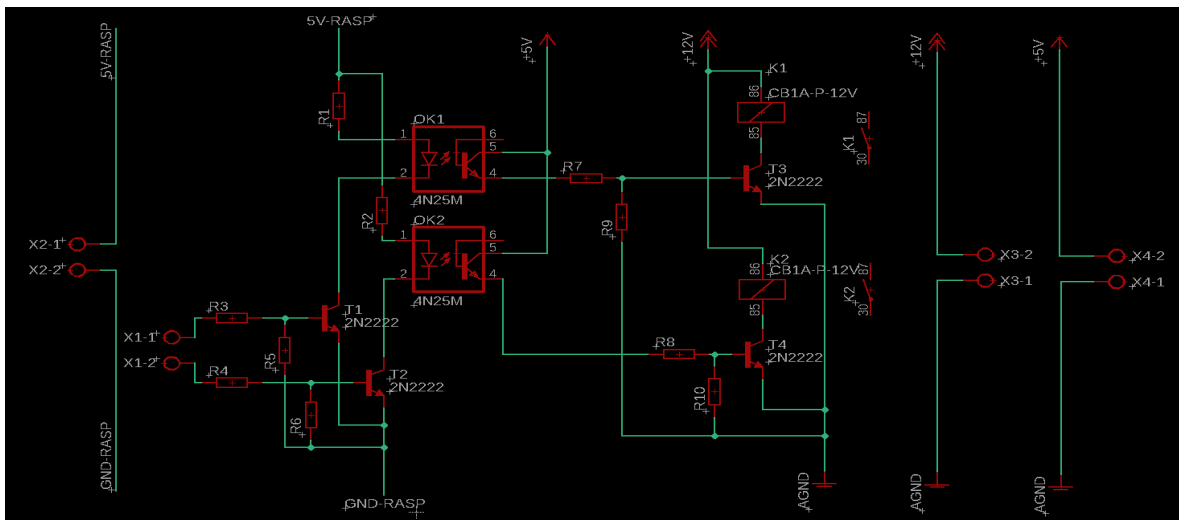


Figura 4.15: Circuito de control para los sistemas de tracción y frenos del AGV. (Original en colores).

4.5.3 DISEÑO DE TARJETAS INTEGRADAS PCB

El uso de las tarjetas de PCB se justifica principalmente en la necesidad de garantizar un nivel

de confiabilidad de los circuitos, una vez que se encuentren dentro del vehículo. Se parte de los diseños de los circuitos para el control de la dirección, los frenos y la tracción, del apartado anterior. A continuación, se presentan los diseños realizados para las tarjetas, realizados con el software *Eagle* de la firma *Autodesk*.

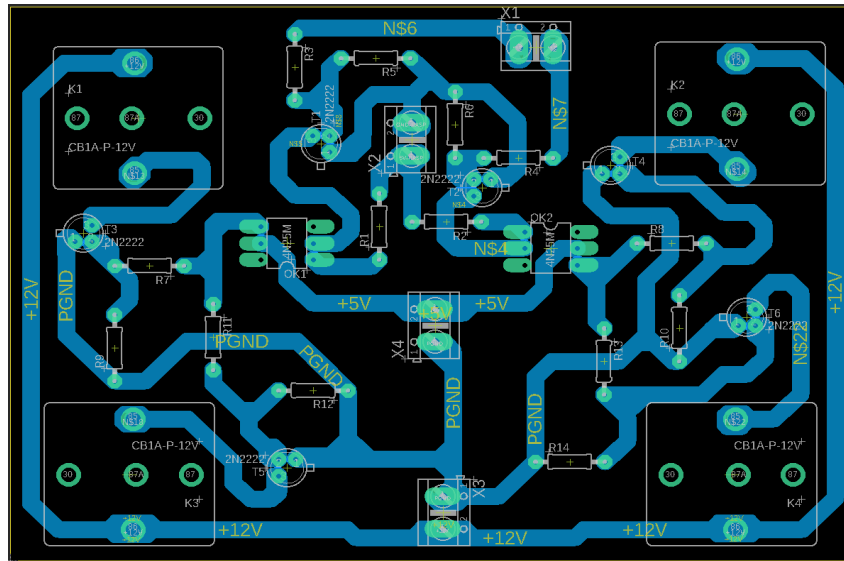


Figura 4.16: tarjeta integrada PCB para el sistema de dirección y frenos del AGV. (Original en colores).

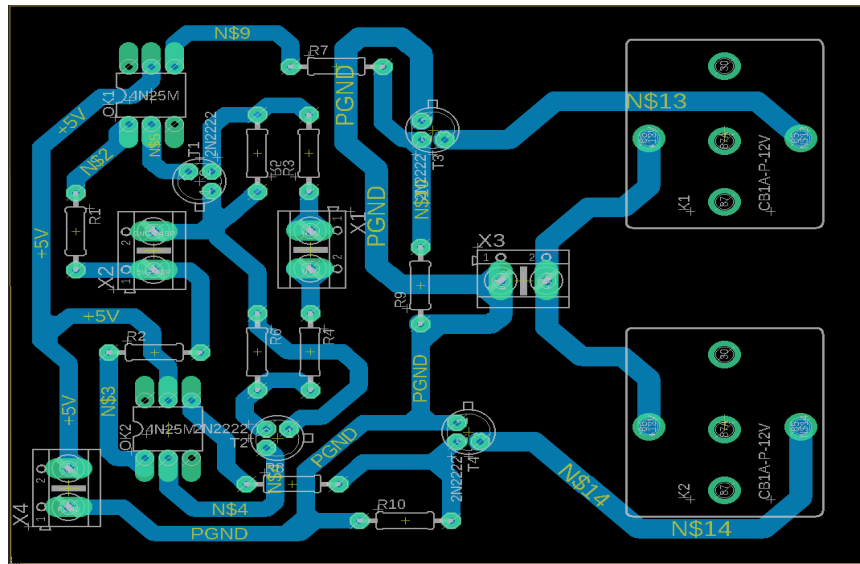


Figura 4.17: tarjeta integrada PCB para los sistemas de tracción y frenos del AGV. (Original en colores).

5. CONSTRUCCION

Las máquinas que se tuvieron a disposición para el desarrollo de la plataforma AGV incluyen máquinas herramientas convencionales, centros de maquinado automatizados y equipos de soldadura. A continuación, se enlistan lo más relevantes: torno convencional, fresa convencional, dobladora de tubo (dado de 6" para tubo de 3/4"), electroerosionadora de hilo, fresa CNC y equipos de soldadura MIG y por electrodo.

5.1 FASE PRELIMINAR: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LA PRIMERA ETAPA DEL CHASÍS

En la sección 4.1 se delinee la primera etapa del chasis de acuerdo con las necesidades y los requerimientos generales para el prototipo. Se parte del dimensionamiento realizado, en conjunto con el material adquirido (tubo de acero A36 de 3/4" de diámetro externo), la máquina disponible para la manipulación de los tubos (dobladora de tubo con Dado de 6" de diámetro) y la soldadora MIG, para la fabricación del exterior del chasis. A continuación, se presenta la primera etapa del chasis con sus dimensiones finales.

Respecto a la dobladora, se resaltan dos características principales: debido al tamaño del dado, los dobleces en la tubería del chasis van a tener un radio de curvatura de 3", adicional a esto, por el diseño de la máquina, solo es posible trabajar con un nivel de precisión aceptable en un solo plano, por lo que todos los dobleces estarán ubicados sobre un solo plano de construcción.

También es necesario mencionar que la construcción del chasis se realizó de tal forma que las estructuras horizontales (es decir, las que se encuentran todas a una misma altura), tuvieran que

soldarse el mínimo de veces posible. Lo anterior con el objetivo de mejorar la resistencia de la estructura. En la Figura 5.1 se presenta el resultado de la primera etapa de construcción.

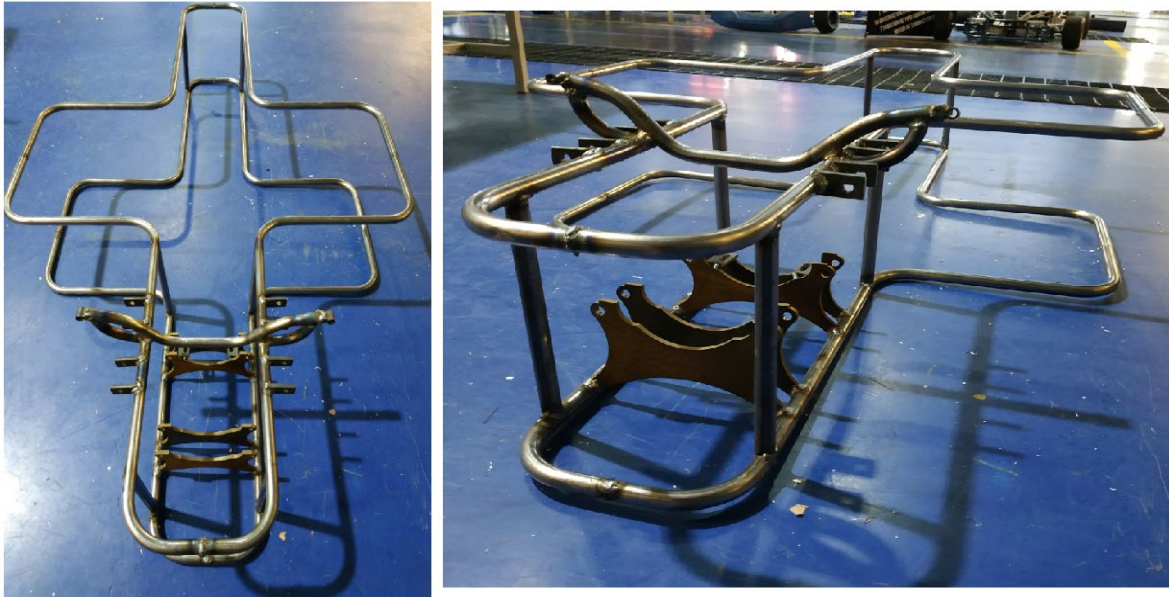


Figura 5.1: exterior del chasis del AGV (primera fase de la manufactura). (Original en colores).

5.2 FASE 1: TREN DELANTERO DEL VEHÍCULO

La construcción del tren delantero comprende los procesos para la generación de los apoyos de los brazos de suspensión y la manufactura de las manguetas de dirección para la instalación de las llantas. Por su parte, en la construcción del sistema de dirección se realizó la modificación en el tamaño del mecanismo de piñón y cremallera (o caja de dirección) y, se finalizó con la instalación de todo el sistema steer by wire, haciendo la respectiva conexión con las ruedas a través de las barras y los manguitos de dirección.

5.2.1 SUSPENSIÓN DELANTERA E INSTALACIÓN DE RUEDAS

En la sección 4.2.2 se definieron los parámetros a tener en cuenta para la fabricación de las manguetas de dirección, junto con un diseño aproximado de la suspensión delantera. De acuerdo con el diseño realizado, el primer paso abordado en la construcción del tren delantero del vehículo es la manufactura de las manguetas de dirección. En este caso el diseño de la suspensión delantera es útil para delimitar un tamaño máximo de pieza para la mangueta. De acuerdo con las características y parámetros propuestos se genera un croquis inicial para ser manufacturado en la EDM. A continuación, en la Figura 5.2 se presenta un resumen de este proceso.

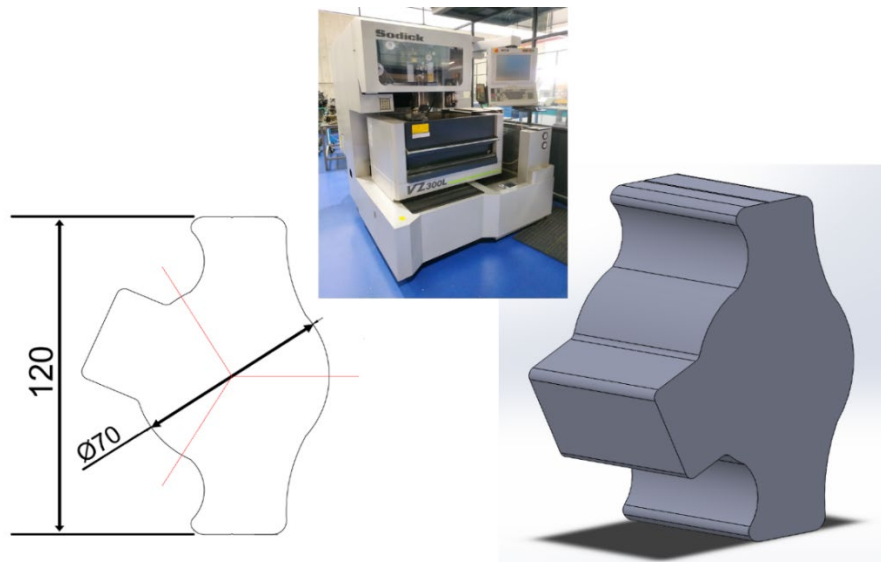


Figura 5.2: primera fase de la manufactura de las manguetas de dirección. (Original en colores).

Desde su diseño, se planeó que los detalles y la finalización de la pieza se realizaran a través de las máquinas convencionales (torno y fresa). Un claro ejemplo de esto se evidencia en el croquis ubicado en la parte izquierda de la Figura 5.2, en la que se marca el espaciado angular realizado en la pieza como un ajuste basado en las mordazas del torno convencional (que se encuentran espaciadas cada una a 120 [deg] de la otra). Luego de los respectivos procesos realizados en el torno y la fresa, el resultado final es el que se muestra a continuación (ver Figura 5.3).

Con las manguetas de dirección manufacturadas, se procede con la fabricación de los apoyos para la sujeción de las horquillas respecto al chasis del AGV. Las piezas y componentes necesarios se generan de acuerdo con los ángulos de trabajo de las rotulas (que unen la mangueta con los

brazos de suspensión), las dimensiones del chasis y la separación horizontal y vertical entre los puntos de sujeción de los apoyos (propuesta en la simulación de la suspensión delantera – ver sección 4.2.2). Además, se considera la posición del amortiguador, paso que antecede el ajuste de la precarga del sistema, parámetro de gran importancia para la construcción, la instalación y el posterior desempeño de la suspensión. Para el tren delantero se considera una precarga de 100 [kg] distribuida en los dos amortiguadores

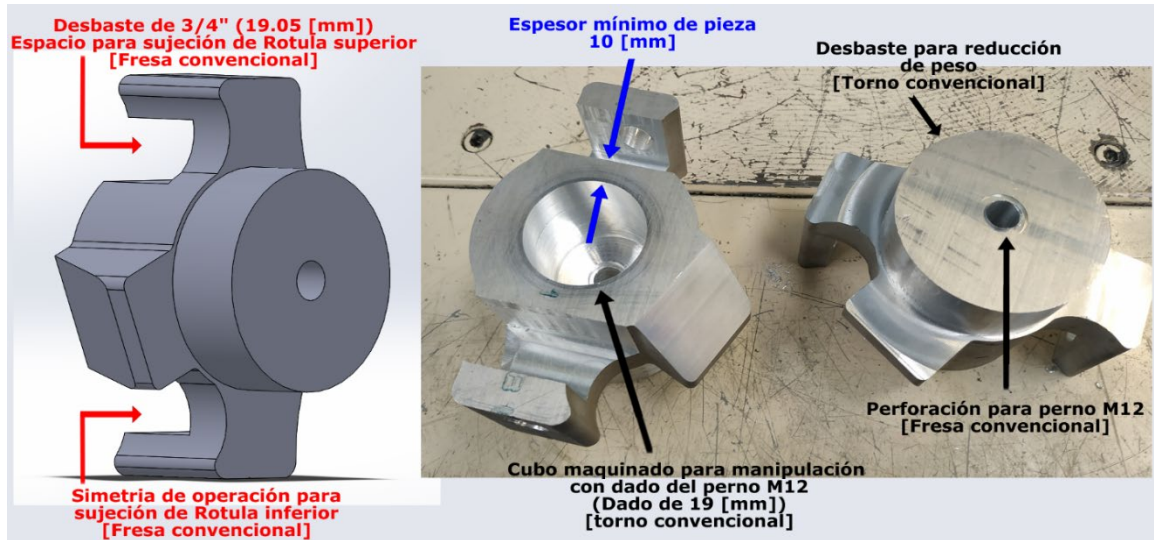


Figura 5.3: manguetas de dirección manufacturadas (características principales). (Original en colores).

Según las observaciones realizadas, el nivel de precarga mencionado requiere de una compresión de 15 [mm] para el resorte del componente en cuestión. La precarga es necesaria para dar un nivel adecuado de rigidez al sistema y para aumentar la altura libre del vehículo (la altura natural del vehículo sin carga de trabajo, únicamente con su peso suspendido). Como resultado de todas las consideraciones, en la Figura 5.4 se muestra el sistema de suspensión delantero del AGV.

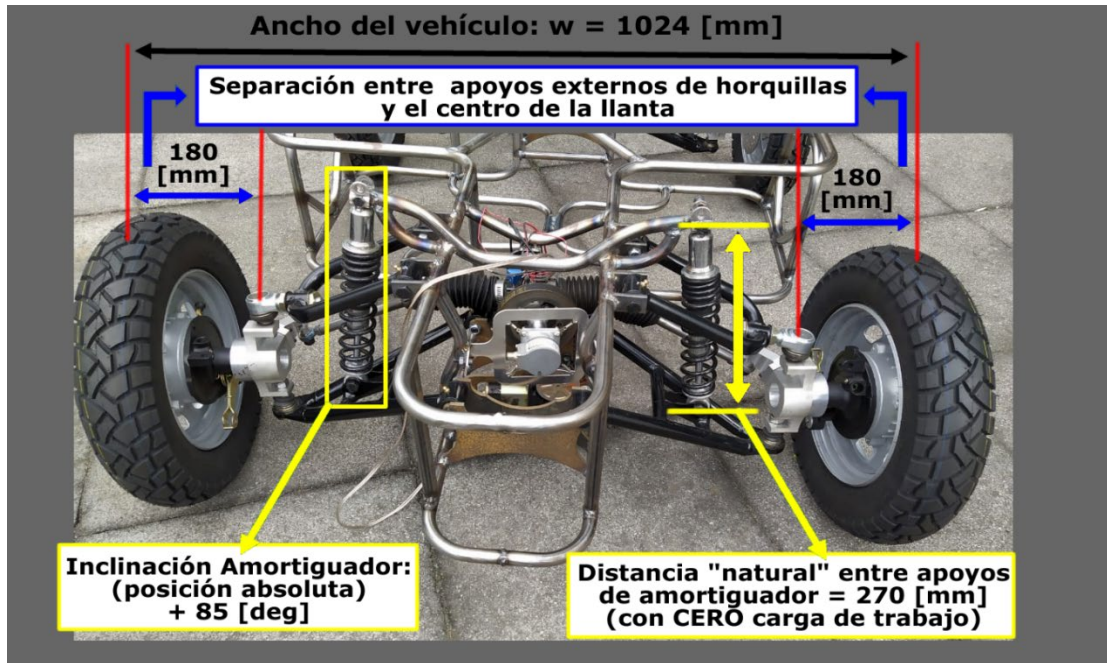


Figura 5.4: suspensión delantera de la plataforma AGV. (Original en colores)

5.2.2 SISTEMA DE DIRECCIÓN DEL VEHÍCULO

En la sección 4.2.3 se propuso ajustar las dimensiones del mecanismo de dirección del vehículo con el objetivo de hacerlo más compacto. Retomando las consideraciones realizadas, se hizo una modificación en su extremo más largo, eliminando lo que se había propuesto como una longitud redundante del mecanismo que comprendía una sección de 330 [mm] para la cremallera o barra de dirección (correspondiente al 60% de su longitud inicial) y una sección correspondiente del housing de 310 [mm] (que corresponde al 80.3 % de su longitud inicial). Con base en lo anterior, se presenta el mecanismo de dirección modificado, con sus respectivas características principales.

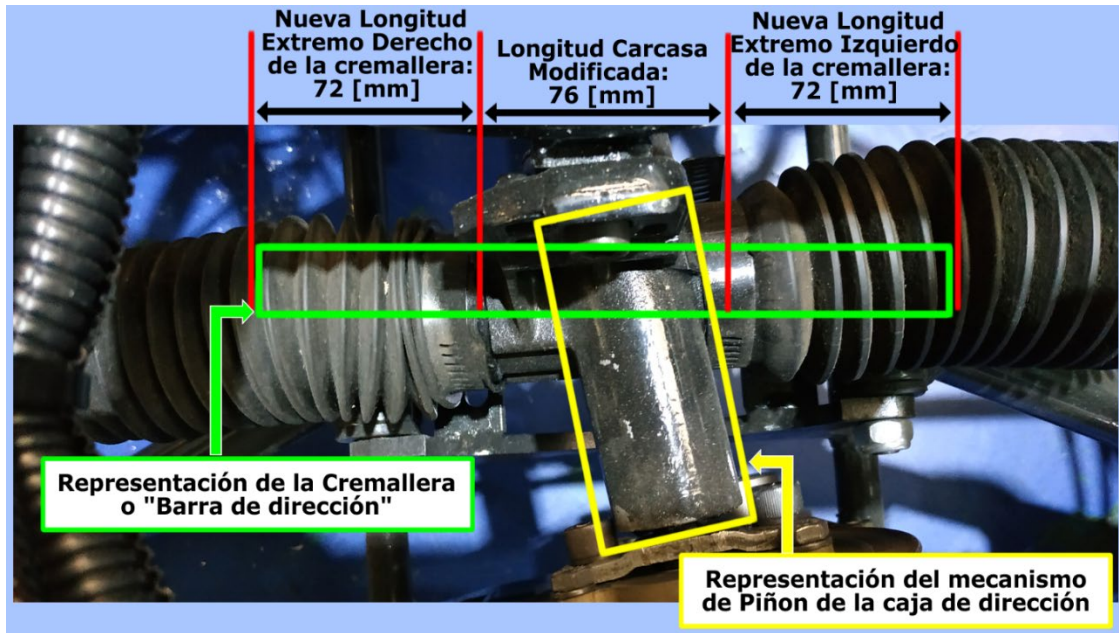


Figura 5.5: mecanismo de dirección modificado (Nota: las dimensiones y el posicionamiento corresponden a un ángulo de dirección cero o neutro para el vehículo). (Original en colores).

Con un mecanismo de dirección compacto y las manguetas de dirección manufacturadas, se procede a manufacturar los manguitos de dirección, siguiente paso en el desarrollo de este sistema. El objetivo de estos componentes es el de actuar como brazo de accionamiento para la rotación de las llantas sobre su vertical, para esto, se deben cuidar dos parámetros importantes: la orientación β definida en la sección 4.2.3 y, la longitud efectiva del centro de la llanta a las barras de dirección.

En consideración con las máquinas y los procesos disponibles para la manufactura de componentes, se decide dar solución a estas características de forma separada, abordando el requerimiento de la orientación β desde la mangueta de dirección (por medio de una modificación) y, dando respuesta a la característica de la longitud efectiva a través del manguito únicamente.

En la sección 4.2.3 se determinó un ángulo β de 23.41 [deg], sin embargo, se decide aproximar a 25 [deg] para favorecer una característica mencionada por Aucapiña (2018) [23] en su trabajo, para el desarrollo de un sistema de dirección para un vehículo de competencia SAE eléctrico, con Ackerman aumentado; que va a disminuir el radio de giro que sigue la rueda interna del vehículo al dar una curva. En cuanto a la longitud efectiva, se ajusta con la longitud de los manguitos de modo que las barras de dirección queden en una orientación neutral respecto al eje de acción de la

caja de dirección, desde una vista vertical del vehículo (es decir, desde una vista superior del AGV, las barras de dirección deben verse paralelas al eje de acción del mecanismo de piñón y cremallera).

Respecto a las barras de dirección, se optó por usar barras de acero con extremos roscados, diseñados para el uso de juntas de bola con dos grados de rotación en sus extremos, de modo que se acomoden a la traslación relativa que se genera con el accionamiento de la dirección hacia uno u otro sentido. Desde una vista frontal de la plataforma, las barras tienen una inclinación de 20 [deg] que corresponde al ángulo equivalente de los brazos de la suspensión delantera, condición necesaria para evitar que se presente el fenómeno de bump steer en la dirección.

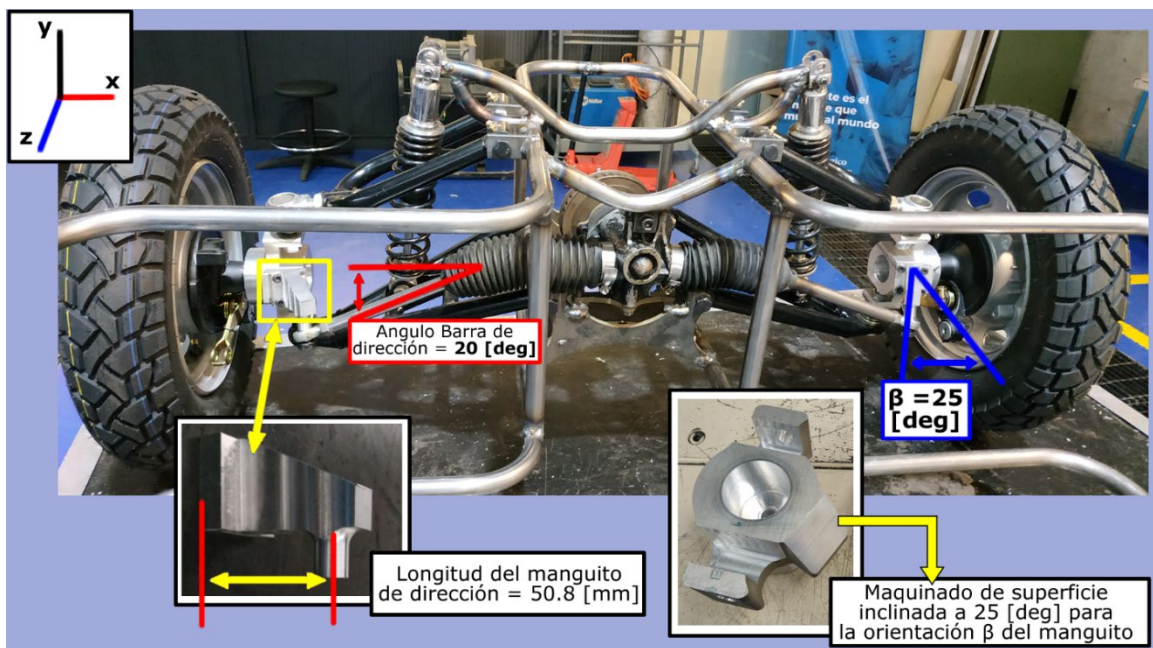


Figura 5.6: componente mecánico del sistema de dirección de la plataforma AGV. (Original en colores).

En este punto, solo hace falta implementar el mecanismo de accionamiento del sistema. La implementación de una dirección steer by wire sirve para abordar este último componente del sistema. Este esquema requiere la selección e instalación de un actuador electromecánico en conjunto con un mecanismo de transmisión de potencia que conecta la caja de dirección con el actuador previamente seleccionado.

Como actuador se selecciona e instala un motor levanta cristales de grado automotriz con alimentación de 12 [V] y una capacidad de carga aproximada de 12 [N-m] [24], según información del fabricante, tomada en conjunto con la caracterización realizada por Enciso (2015) [25], en su trabajo para la caracterización de un sistema de elevación de cristales de vehículos automotores. Por otro lado, como mecanismo de transmisión de potencia entre el actuador y la caja de dirección, se implementa un mecanismo de transmisión por banda con una reducción de velocidad de 2.3:1. Para este mecanismo se implementó una banda dentada para evitar deslizamientos y posteriores imprecisiones en el control remoto de la dirección del AGV. A continuación, en la Figura 5.7, se presenta la dirección steer by wire.

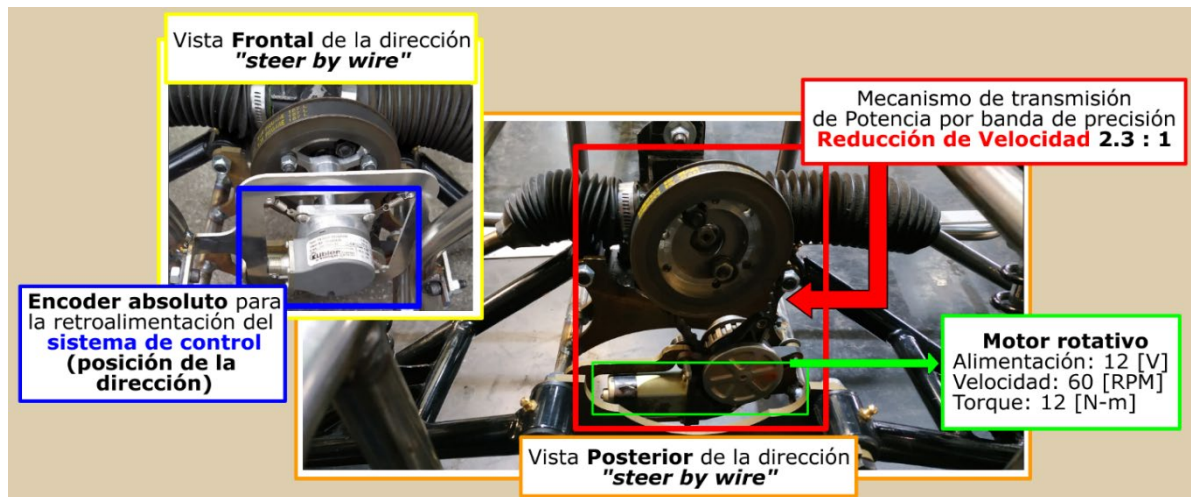


Figura 5.7: esquemático del sistema de dirección steer by wire. (Original en colores).

5.3 FASE 2: TREN TRASERO DEL VEHÍCULO

En esta sección, se describen los procesos de acondicionamiento llevados a cabo para la instalación de la suspensión trasera y el tren de potencia del vehículo; detallando para este último la inclusión del diferencial que comprendió un proceso de reparación y puesta a punto de todo el componente.

5.3.1 SUSPENSIÓN TRASERA E INSTALACIÓN DE RUEDAS

Tal y como se definió en la sección 4.3.2, el posicionamiento de los brazos de suspensión traseros se hará a modo de espejo de la instalación realizada en la suspensión delantera. Se parte de esta configuración para instalar el mecanismo de balancín – amortiguador característico de la suspensión push rod, seleccionada para el tren posterior de la plataforma AGV.

La manufactura del balancín se planeó para que el componente rote sobre un eje de 12 [mm] (perno M12x65), manteniendo un nivel de fijación óptimo para la estabilidad de su eje de rotación durante el accionamiento de la suspensión, característica que se logra a través de la incorporación de un buje de acero, fijo en uno de los extremos del balancín, con la capacidad de rotar libremente respecto al eje mencionado. Fueron fabricados dos balancines, cada uno con lamina de acero de 1/8” o 3.175 [mm] a doble capa (es decir, dos laminas por balancín), lo anterior en consideración con la carga a la que estarán sometidos, característica de importancia crítica para la ganancia añadida en la carga del amortiguador.

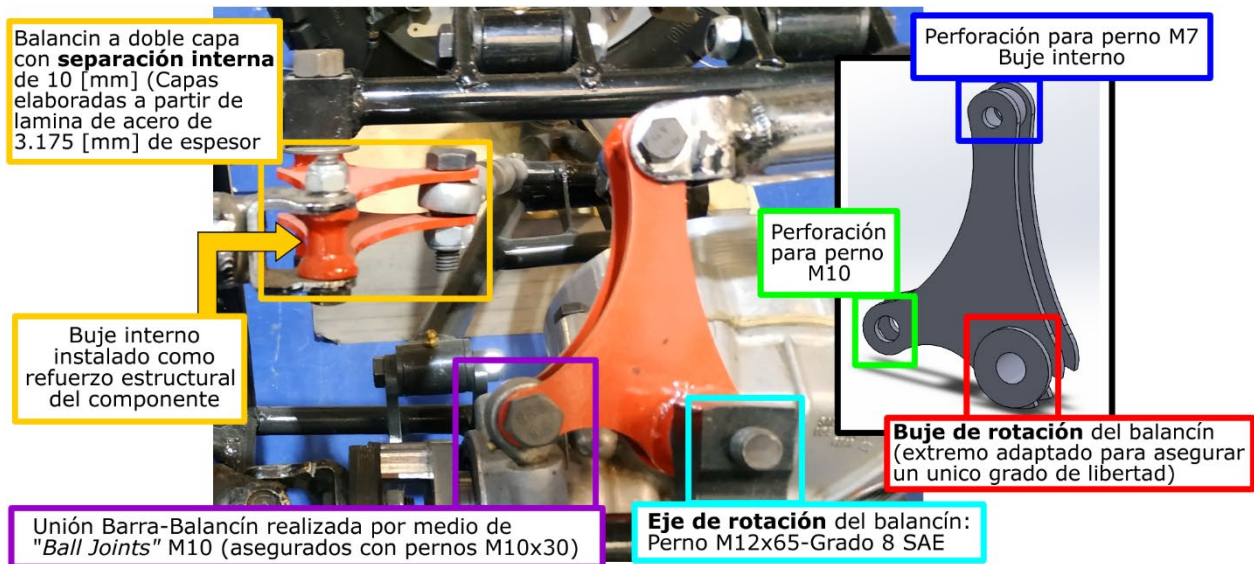


Figura 5.8: balancines de la suspensión push rod (suspensión del tren trasero de la plataforma AGV). (Original en colores)

Por último, es necesario abordar las barras que conectan al balancín con los brazos de suspensión. La manufactura de estos componentes se realizó a partir de barras de aluminio de 1", 25.4 [mm] de diámetro, adaptadas a un diseño experimental de longitud ajustable. El objetivo de este diseño es controlar el nivel de carga y, por tanto, el nivel de rigidez de la suspensión trasera. Para esto se optó por un diseño modular de dos barras concéntricas, unidas por un perno de ajuste longitudinal, mecanismo que le da al componente la capacidad de tener longitud ajustable. El perno de ajuste longitudinal corresponde a un tornillo tipo esparrago de doble rosca (derecha e izquierda).

Al igual que con la suspensión delantera, fue considerada una precarga de 100 [kg] para la suspensión trasera. De este modo, la suspensión del vehículo tendrá un diseño para una carga suspendida resultante de aproximadamente 200 [kg], para una condición de carga libre, es decir, con carga de trabajo nula o igual a cero. La inducción de la precarga en el sistema supuso una compresión de 10 [mm] en la carrera de trabajo de los amortiguadores traseros, es de resaltar la diferencia en la compresión debida a la precarga, para los amortiguadores del tren delantero y trasero del vehículo. Sistemas que, aunque usan un mismo modelo de componente, presentan un nivel de compresión diferente para una misma carga de 100 [kg]. Este fenómeno se debe a la amplificación inducida por el balancín para la carga del amortiguador, haciendo que, en la suspensión trasera, la compresión del elemento sea menor para un mismo nivel de carga. A continuación, se presenta la suspensión trasera del vehículo.

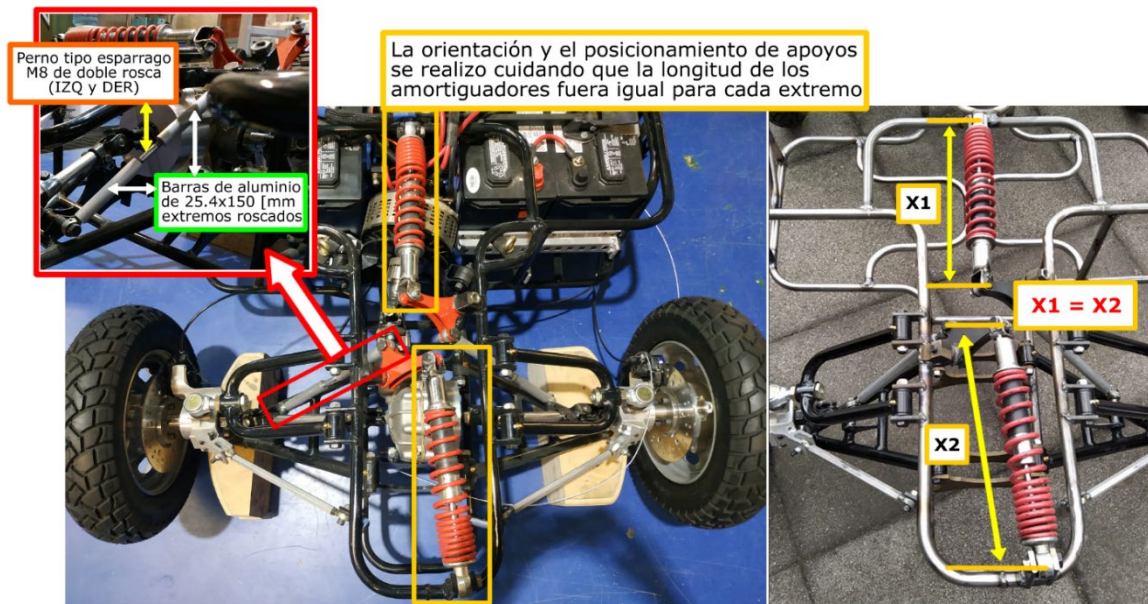


Figura 5.9: suspensión trasera del prototipo – Configuración: “Push-rod”. (Original en colores).

5.3.2 TREN DE POTENCIA DEL VEHÍCULO

Se da inicio con el montaje del mecanismo diferencial, componente central del tren de potencia y respecto al cual se va a definir la posición de los demás componentes del sistema; entre ellos, el motor (su posicionamiento se hará en consideración con el tamaño del componente y el espacio disponible en el chasis del prototipo).

El proceso llevado a cabo inicia con la construcción de una de las dos tapas de la carcasa del diferencial, destruida en su totalidad durante su uso en un vehículo de competencia de la categoría BAJA SAE. El diferencial, es original de una *ATV Yamaha Wolverine 350* modelo 95-98 (vehículo donante), pesa 15 [kg] y su relación de reducción es de 33/9 o 3.67 (ver apéndice F – Especificaciones del fabricante para la *ATV Yamaha Wolverine 350*). Para la construcción de la tapa se utilizó aluminio 6061 y su diseño fue realizado con base en los componentes funcionales del diferencial.

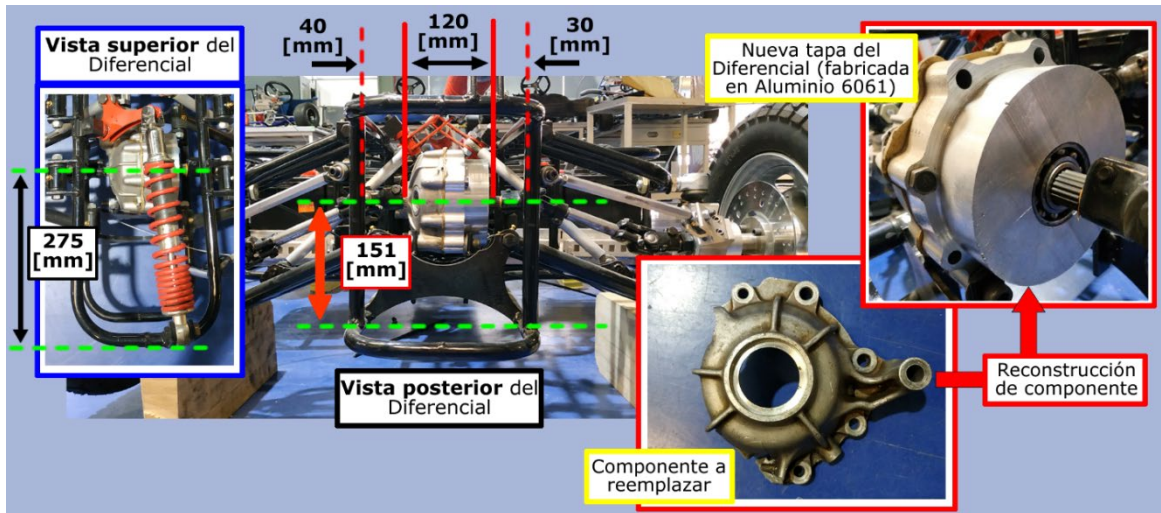


Figura 5.10: diferencial reconstruido e instalado. (Original en colores).

Continuando con la instalación del motor, se deben abordar dos características importantes: la ubicación del motor dentro del espacio disponible y el acople del motor con el diferencial. Respecto a la ubicación del motor, deberá realizarse teniendo en cuenta las dimensiones del componente, que con su respectiva base o carcasa mide 185x185x195 [cm] (largo x ancho x alto); además, deberá cuidarse que la posición del motor no invada el espacio designado para las baterías del vehículo. En cuanto al acoplamiento del motor con el diferencial, se elige una transmisión de potencia por junta universal o cardan, dado que se ajusta muy bien a la definición de dos ejes que se cruzan. Para la instalación y el posicionamiento del motor, deberá cuidarse que el ángulo de intersección de los dos ejes no supere los 15 [deg], de acuerdo con lo planteado por Jazar (2017) [20], para evitar el fenómeno de junta de velocidad variable en el cardan. A continuación, en la Figura 5.11 se presenta el esquema de conexión del motor con el diferencial, realizado en consideración con las características mencionadas.

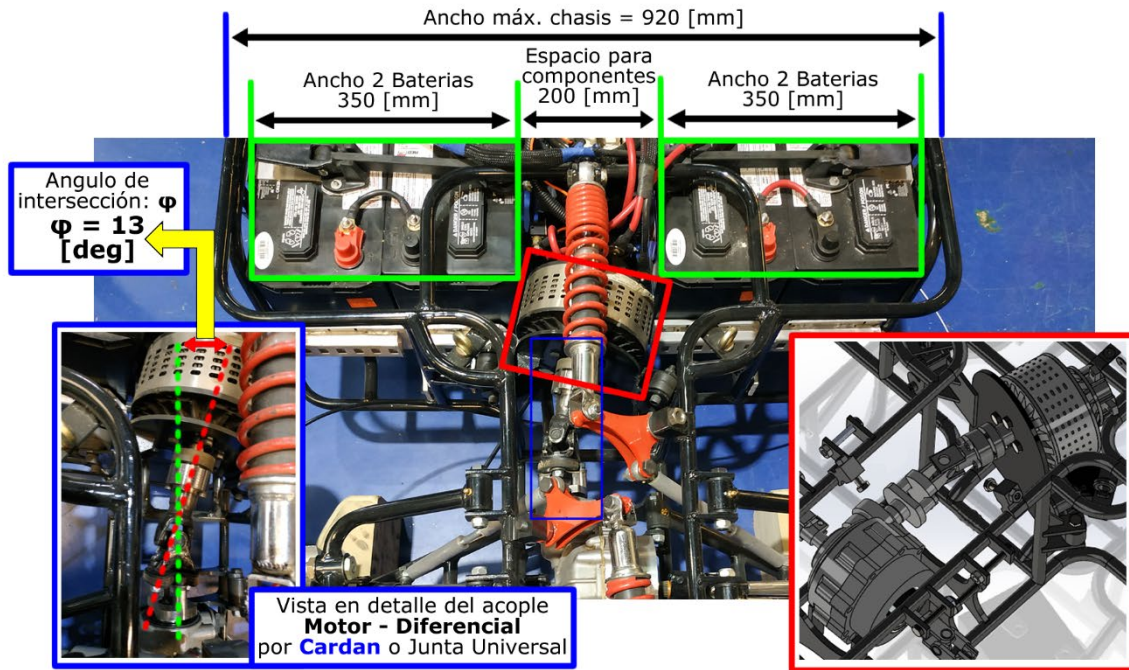


Figura 5.11: instalación del motor y acople con el diferencial. (Original en colores).

Siguiendo adelante con el proceso, el foco de atención se traslada a las llantas traseras. Según se estableció en la sección para la selección de componentes del vehículo (ver sección 4.1.2), las ruedas traseras de la plataforma AGV corresponden a un par de la rueda trasera de una motocicleta *Italika DS 125*. Una particularidad de estas ruedas es que, según su diseño, no cuentan con un mecanismo que impida el movimiento axial sobre su eje de rotación (pues esta no es una necesidad que se tenga con el modelo de vehículo donante seleccionado), situación que supone un desafío para el montaje de estos componentes en el vehículo. Se decide abordar este problema desde el diseño de las llantas, replanteando el diseño de las mazas para que se ajusten perfectamente a la geometría de las llantas y, a la vez que permitan el acople de las llantas con los brazos de suspensión y restringen el desplazamiento axial sobre sus ejes de rotación (ver Figura 5.12).

Para finalizar, se muestra el proceso de manufactura para los componentes que conectan al diferencial con las llantas traseras. En el capítulo de diseño, en el apartado para el tren de potencia (ver sección 4.3.3), se estableció el uso de un mecanismo de cardan doble sobre un eje intermediario para cada llanta del tren trasero. La manufactura de los ejes fue realizada con especial cuidado debido al requerimiento particular de tener puntas estriadas a diferentes profundidades y

pasos, para la conexión de cada componente. Las juntas universales, corresponden a los cardanes de dirección de un *Nissan Tsuru* modelo 2002. Los ejes fueron fabricados en acero 1045 y maquinados con el torno y la electroerosionadora de hilo.

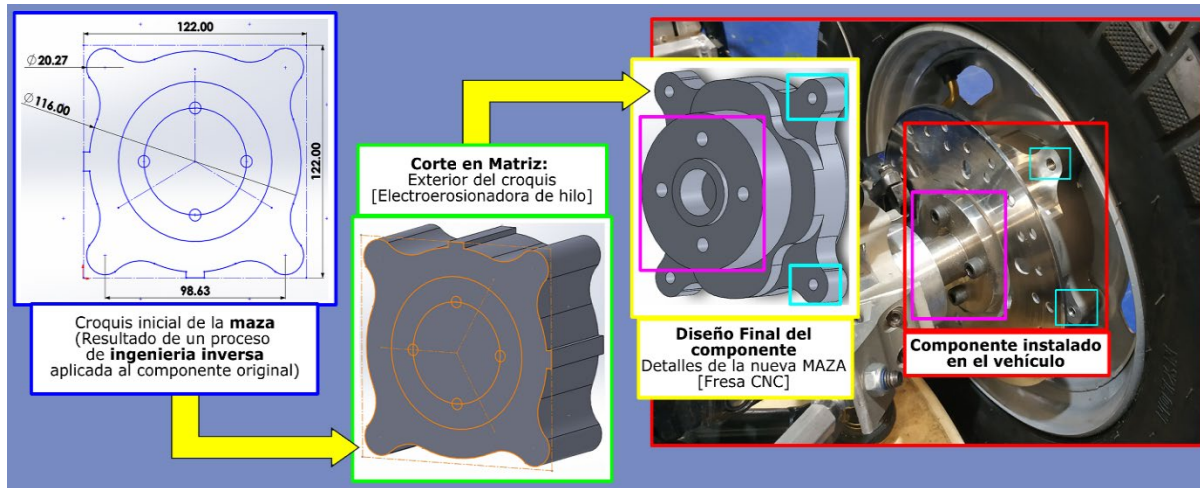


Figura 5.12: proceso de manufactura para las mazas de las llantas traseras y montaje en prototipo. (Original en colores).

5.4 FASE 3: COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN Y SEGURIDAD

A continuación, se aborda el desarrollo de los sistemas de frenos y alimentación del vehículo. En este apartado se da fin al componente mecánico y se inicia con el componente eléctrico y electrónico del vehículo.

5.4.1 INSTALACIÓN DEL SISTEMA DE FRENOS DEL VEHÍCULO

El montaje de este sistema consiste en la instalación de los mecanismos de freno para las ruedas delanteras y traseras, la instalación de un mecanismo intermediario entre el actuador y el freno de

cada llanta y la instalación del actuador.

Iniciando con los mecanismos de cada rueda, para el tren delantero, según lo establecido en el capítulo de diseño para el sistema de frenos (ver sección 4.4.1), las ruedas escogidas incluyen en su diseño el mecanismo para freno de tambor, el cual hace parte de la maza de la llanta. En este caso, se requirió de la manufactura de un elemento capaz de soportar el mecanismo de accionamiento en su lugar durante el funcionamiento de las llantas (tanto en su movimiento de rotación natural como en la rotación inducida por la dirección). Por otro lado, con la intención de dotar al prototipo de un mayor nivel de seguridad, se decidió implementar frenos de disco en el tren trasero; decisión que influyó en el rediseño de las mazas para las llantas del tren trasero (ver sección anterior) y que, al igual para el sistema de frenos delantero, requirió la manufactura de algunas piezas para soportar los mecanismos de accionamiento, en el caso del tren trasero: los cáliper ¹³.

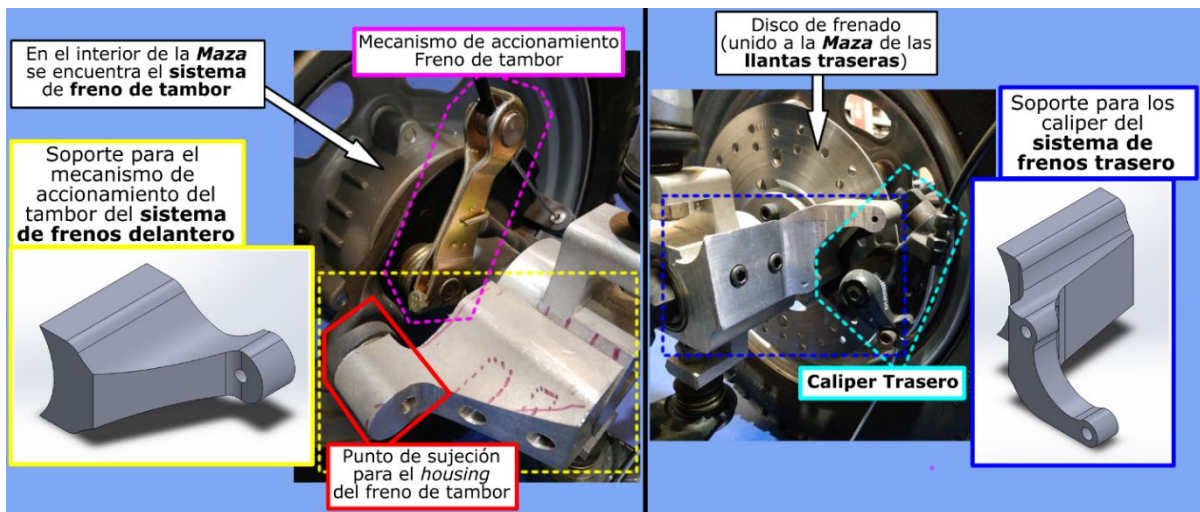


Figura 5.13: proceso de manufactura para las mazas de las llantas traseras y montaje en prototipo. (Original en colores)

Se complementa el montaje del sistema de frenos con la instalación del actuador y del

¹³ Nombre con el que se conoce normalmente a los actuadores (elementos que sujetan las pastillas de frenado) de un sistema de frenos de disco.

mecanismo de transmisión de potencia. Como actuador se dispone de un motor rotatorio levanta-cristales y como mecanismo para la activación de los elementos en cada llanta, se determina el uso de cable o “chicote”; esto último, de acuerdo con el diseño y los requerimientos de los componentes instalados (caliper y tambores). Aunque el sistema de activación por cable supone una gran ventaja en términos de instalación, comparado con un sistema hidráulico, también requiere de un ajuste para encontrar un balance entre la carrera de activación de los mecanismos y la capacidad del actuador.

5.4.2 INSTALACIÓN DEL COMPONENTE DE ALIMENTACIÓN DEL VEHÍCULO

Según se definió en el capítulo anterior (ver sección 4.4.2), el componente de alimentación comprende cuatro baterías marinas de ciclado profundo de 12 [V] y hasta 90 [A] cada una. Para garantizar un mayor nivel de seguridad, se implementó un bastidor de ajuste cerrado para el *pack* de baterías con el objetivo de dar un nivel de sujeción adecuado y, evitar vibraciones de gran amplitud que pueden conducir a fallos en la sujeción de elementos de conexión y posteriores accidentes (como cortocircuitos o apagones repentinos del vehículo y/o sus sistemas). El bastidor se desarrolló partiendo de la necesidad de tener las baterías dispuestas de una forma que facilite su conexión en serie, para lograr el voltaje requerido por el motor y que, además, dé fácil acceso a los bornes de conexión.

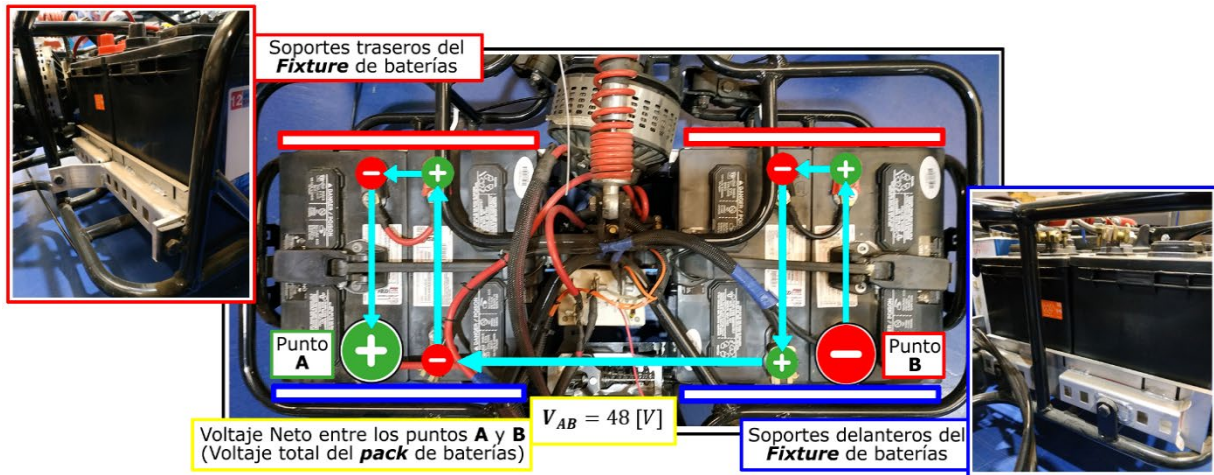


Figura 5.14: componente de alimentación instalado en la plataforma.

5.4.3 CONEXIÓN ELÉCTRICA DEL TREN DE POTENCIA

A lo largo del proceso de desarrollo, se han tenido en cuenta varias consideraciones respecto al posicionamiento de ciertos componentes, de modo que se dé una distribución más estratégica en la conexión eléctrica de los elementos que hacen parte del tren de potencia. Con esto en cuenta, se definió que todos los elementos relacionados al componente eléctrico del tren de potencia se ubicaran en el centro del vehículo, con la excepción de los mandos de control para el encendido y el apagado (tanto de la alimentación como del componente de control), que por motivos de diseño y accesibilidad, fueron ubicados en el frente del vehículo (ver Figura 5.15).

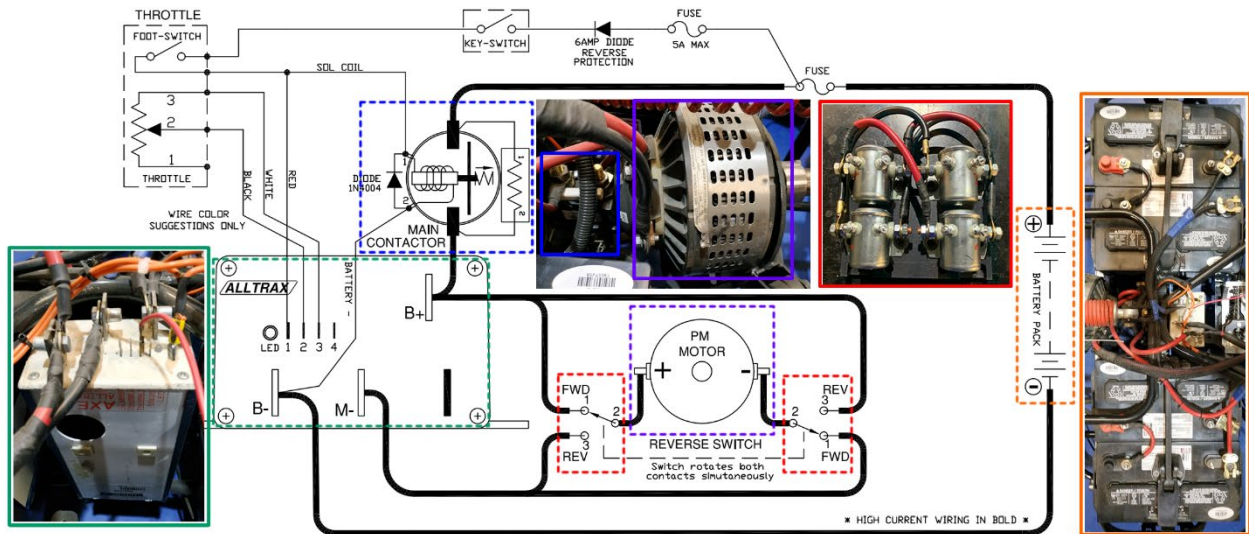


Figura 5.15: circuito eléctrico del tren de potencia instalado. (Original en colores).

5.5 FASE 4: COMPONENTE DE CONTROL Y COMUNICACIÓN DEL VEHÍCULO

Como último paso para completar los procesos de construcción del componente eléctrico de la plataforma y del vehículo como tal, se tiene la manufactura de las tarjetas integradas PCB para los circuitos de control de los sistemas de tracción, dirección y frenos.

5.5.1 ELABORACIÓN DE TARJETAS INTEGRADAS PCB

Se parte de los diseños presentados en el capítulo anterior (ver sección 4.5.3) para los tres sistemas en cuestión. La manufactura de las tarjetas fue realizada en su mayor parte en una estación de trabajo especializada *Protomat E33*, con capacidad para tarjetas de hasta 229x305 [mm]. La estación cuenta con un software especializado que permite verificar y ajustar los diseños previos de las PCB (hechos en: EAGLE – Autodesk) a los parámetros de la máquina, el tamaño del material

y su ubicación en la mesa de corte.

6. PRUEBAS

Como finalización del proceso de desarrollo del prototipo, se hace necesaria una validación inicial de sus componentes y/o sistemas más críticos, por separado, y luego una valoración de la interacción de todos los sistemas como uno solo.

Se parte de la presentación de las características finales del prototipo desarrollado las cuales se listan en la tabla que se muestra a continuación (ver tabla 6.1)

Tabla 6.1

Características del prototipo desarrollado.

Característica	Especificaciones
Dimensiones máximas (largo x ancho)	160x115 [cm]
Ancho del vehículo	102,4 [cm]
Distancia entre ejes	106 [cm]
Claro entre el piso y el chasis	10 [cm]
Peso total del AGV	227 [kg]
Peso suspendido	191 [kg]
Peso no suspendido	36 [kg]
Capacidad de carga del vehículo	100 [kg]
Voltaje pack de baterías	48 [V]
Corriente máxima pack de baterías	90 [A]
Voltaje motor tracción	48 [V]
Potencia motor tracción	3750 W a 48 [V]
Voltaje motor sistema de dirección	12 [V]
Voltaje motor sistema de frenos	12 [V]

Dentro de este capítulo se abordarán pruebas relacionadas al componente mecánico de la plataforma, su componente eléctrico, electrónico y de control. Antes de proceder con la descripción en detalle de cada prueba, es necesario aclarar que algunas de las pruebas que se desarrollaran a

continuación se exponen como propuestas para futuras investigaciones.

6.1 SISTEMA DE SUSPENSIÓN DELANTERO

6.1.1 CAPACIDAD DE RESTITUCIÓN Y RESPUESTA

De forma general, se puede decir que un sistema de suspensión es funcional cuando cumple con las siguientes características: Mantiene la altura libre del vehículo para una carga de trabajo igual a cero, su accionamiento como resultado de la aplicación de una carga, se traduce en una modificación (en este caso, una reducción) en la altura libre del vehículo y, por último, devuelve al vehículo a su altura libre original, una vez que se ha dejado de aplicar la carga sobre el vehículo.

Las características mencionadas corresponden al proceso normal de funcionamiento para el sistema de suspensión; proceso que se da en un periodo de tiempo que se desarrolla en dos etapas características. La primera etapa corresponde a una etapa transitoria en la que el sistema reacciona a la perturbación, seguida de la etapa estable en la que el sistema se estabiliza en su posición resultante.

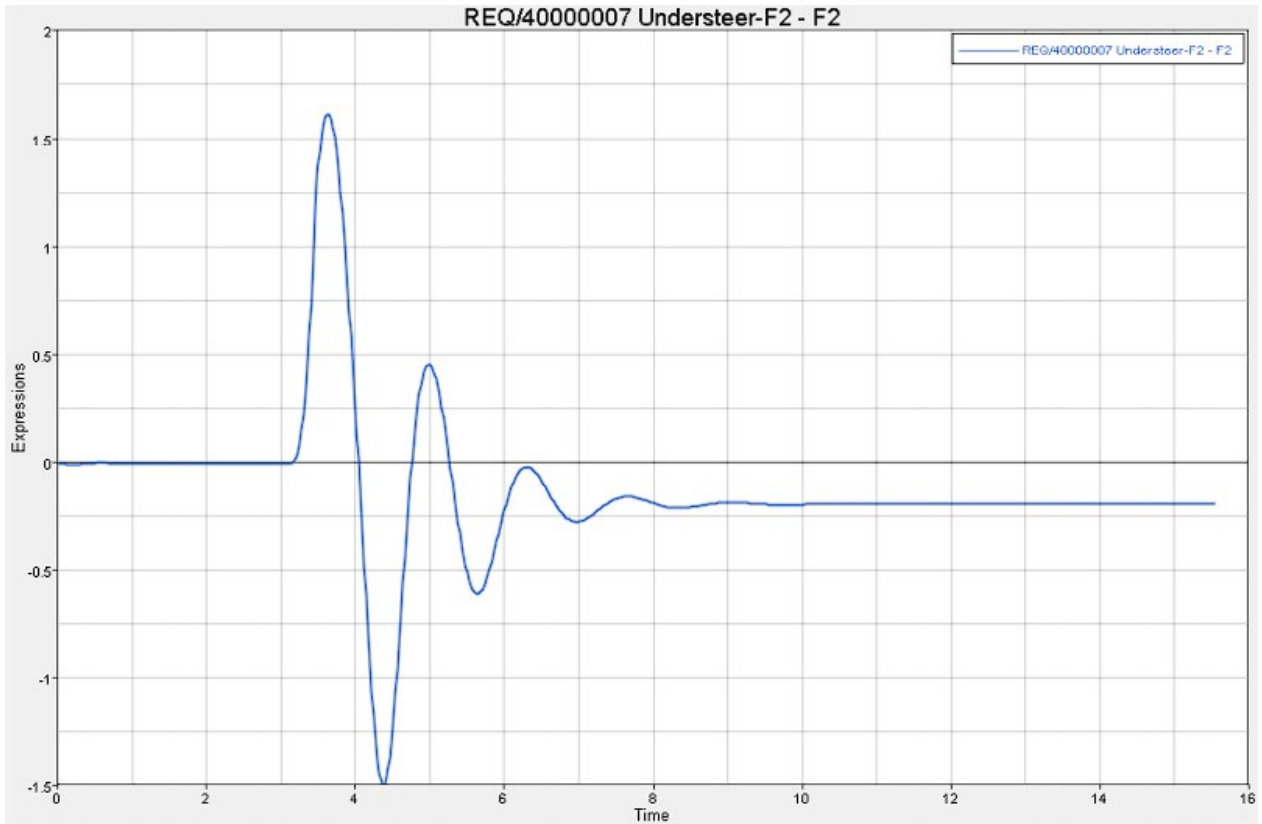


Figura 6.1: grafica de desplazamiento vs tiempo para una perturbación de carga. Tomado de Cerón (2014) [17]. (Original en colores).

Respecto a la respuesta del sistema, se espera que el sistema presenta un alto grado de repetibilidad y de exactitud. Esto es, que para una misma prueba sea capaz de lograr resultados precisos (es decir, que sean muy similares entre sí) que se encuentren dentro de un rango de exactitud admisible.

6.1.2 VALIDACIÓN DEL SISTEMA INSTALADO

Respecto a la suspensión delantera, se sugiere una validación de acuerdo con los componentes o las zonas críticas del sistema. Como bien se sabe, los elementos de la suspensión son los que soportan el peso del vehículo (peso suspendido), y la confiabilidad del sistema depende principalmente de la resistencia estructural de sus componentes y de la capacidad dinámica de los

mismo para responder a las necesidades de carga del vehículo.

Teniendo en cuenta que las horquillas fueron elementos adquiridos de un vehículo donante comercial, no se considera necesario validarlos estructuralmente por las siguientes razones: Primero, como elementos comerciales deben poseer niveles de seguridad y confiabilidad de grado automotriz y segundo, su diseño no se encuentra disponible y tampoco su material de fabricación, por lo que los resultados estarían sujetos a la precisión en el diseño inverso y las suposiciones realizadas.

En cuanto a la validación estructural, el foco de atención debe estar en los apoyos de las horquillas y del amortiguador con respecto al chasis, pues son los puntos en donde se realiza la mayor concentración de carga para el sistema, en término estructurales. Algunos elementos relevantes para considerar son: Material del chasis (tubería de acero negro A36 de 3/4" de diámetro externo, calibre 14), los amortiguadores en conjunto se instalaron bajo una precarga de aproximadamente 100 [kg] y el peso normal del vehículo, sin carga de trabajo, es de 227 [kg] aproximadamente.

Una forma de conseguir esta validación puede ser mediante el análisis del chasis (componente dentro del cual se incluyen los apoyos de la suspensión delantera que se desean analizar) bajo diferentes modos y distribuciones de carga, de manera que se verifique, por medio de un análisis de tensión de Von Mises u otro similar, que los esfuerzos no van a sobrepasar el límite elástico del material que es de 250 [MPa] para material con espesores menores a 8 pulgadas.

Pasando al análisis dinámico, se tiene que además de las horquillas los únicos componentes dinámicos restantes son el amortiguador y la llanta (para cada lado de la suspensión). Sin embargo, En este caso el elemento de mayor interés es el amortiguador pues es principalmente de este componente del que depende la capacidad de respuesta del sistema de suspensión.

Como escenarios de validación se plantean dos posibles (bajo la premisa de que la viabilidad de cada uno va a depender entre otras cosas, de la capacidad y la disponibilidad de cómputo y procesamiento, disponibles para su realización). El primero es un escenario iterativo en el que se propone evaluar la configuración instalada en la suspensión delantera para diferentes constantes de elasticidad del resorte y evaluar la respuesta del sistema en el tiempo de manera que se encuentre un rango óptimo para la constante de elasticidad. En el segundo escenario, la propuesta es más

compleja pues se espera calcular la constante de elasticidad óptima para el sistema instalado en las condiciones de carga máxima, escenario que plantea la resolución de un sistema de ecuaciones que en algunos escenarios podría resultar más complejo para determinar el valor óptimo de la incógnita que se plantea.

6.2 SISTEMA DE DIRECCIÓN

6.2.1 CAPACIDAD DEL SISTEMA DE DIRECCIÓN Y RADIO DE GIRO

El concepto de capacidad del sistema, aplicado a la dirección del vehículo tiene que ver directamente con rango máximo para los ángulos de dirección que el mecanismo puede lograr. Desde el diseño del vehículo (ver sección 4.1) se propuso un rango de dirección de -35 a $+35$ [deg] para la plataforma, de modo que se mantuviera por fuera del rango de baja maniobrabilidad mencionado por Zhang et al. (2017) [13] y que también obedece a uno de los límites tomado por estos autores en el desarrollo de su prototipo de vehículo eléctrico.

La comprobación puede ser realizada de forma tanto práctica como teórica. En el primer caso, luego de colocar las llantas delanteras a un ángulo de dirección neutral (de cero grados), posición coincidente con la mitad de las vueltas del mecanismo de piñón y cremallera, se deberá accionar la caja de dirección en sentido horario o antihorario en una cantidad de $1 \frac{5}{8}$ vueltas, que corresponde a la mitad de la carrera angular del piñón y calcular el ángulo de las ruedas interna y externa. El proceso debe repetirse para el otro sentido de la dirección siguiendo el mismo orden de pasos. La realización de esta prueba puede aprovecharse para medir la variación en el ángulo camber de la llanta con el accionamiento de la dirección.

En cuanto a la comprobación teórica, esta puede realizarse con un cálculo geométrico a partir de las dimensiones de los componentes y la extensión máxima de la barra de dirección cuando la caja es accionada en un sentido o en otro. Este planteamiento puede ser extrapolado a un análisis con el diseño CAD en donde se validen y comprueben los resultados obtenidos.

Siguiendo con el radio de giro del vehículo, al igual que con lo planteado anteriormente para la capacidad del sistema, se tienen dos escenarios de comprobación: uno teórico y uno práctico. El escenario práctico consiste entre medio arco o un arco completo de circunferencia para un ángulo de dirección constante, correspondiente al ángulo máximo. El resultado de esta prueba sería el radio de giro mínimo posible.

Por su parte, la comprobación teórica se realizará con un cálculo geométrico que tendrá como datos de entrada, la distancia entre ejes, el ancho del vehículo y los ángulos de dirección máximos para las llantas interna y externa de la plataforma.

6.2.2 FENOMENO DE BUMP STEER

Anteriormente ya se había mencionado que el bump steer es el accionamiento de la dirección (visto como rotación en las llantas y en el volante, para los vehículos de pasajeros) producido por el desplazamiento vertical del vehículo y, por tanto, del accionamiento de la suspensión.

Se propone inicialmente una simulación cinemática del ensamble de los sistemas de dirección y suspensión en la que se analice la rotación de la llanta respecto a su eje vertical o de la mangueta de dirección para un componente de entrada de rotación en los brazos de suspensión. El resultado de esta prueba deberá ser una gráfica que muestre el ángulo de rotación de la llanta o la mangueta contra los ángulos de rotación para las horquillas de la suspensión.

Una prueba más elaborada podría realizarse con la instalación de un IMU con giroscopio integrado, en la mangueta de la dirección que permita registrar las perturbaciones en los ángulos de dirección, producto del accionamiento de la suspensión para un recorrido en línea recta ya sea por un terreno irregular o para el vehículo estático o sobre rodillos en un escenario de carga variable.

6.2.3 VALIDACIÓN DE ESQUEMA STEER BY WIRE

La validación del esquema de dirección steer by wire tiene que ver con dos componentes principales: la capacidad del actuador y el componente de retroalimentación. La capacidad del

actuador está ligada a su consumo de potencia y su evaluación deberá ser realizada ante un escenario altamente demandante. Se propone el siguiente escenario: Una prueba estática para el vehículo a carga máxima sobre el piso (sin rodillos). Se deberá accionar el mecanismo hasta el máximo ángulo de dirección para cada sentido, llevando un registro del consumo de corriente durante su accionamiento.

Para el componente de retroalimentación, se debe verificar que, para un accionamiento normal del sistema de dirección, el ángulo registrado por el encoder ¹⁴ absoluto corresponde con el ángulo avanzado por la rueda, unida al piñón del mecanismo. El enfoque de la prueba se orienta a determinar la efectividad del ajuste en los parámetros de la programación del encoder y su interacción con el controlador elegido.

6.3 SISTEMA DE SUSPENSIÓN TRASERO

Al igual que se realizó con el sistema de suspensión delantero, se plantea un análisis para evaluar la capacidad de respuesta y restitución de la suspensión trasera de la plataforma. Se pueden seguir los lineamientos planteados en la sección 6.1.1 para la evaluación de este sistema, teniendo en cuenta que respecto a la capacidad de restitución se espera que el vehículo pueda volver (luego de la aplicación de una carga) a una altura que cumpla con la siguiente expresión.

$$\text{altura final} = \text{altura libre} \pm 5\%$$

Partiendo de esto, se procede a realizar la propuesta para la validación de los componentes considerados críticos dentro del sistema implementado.

6.3.1 VALIDACIÓN DEL SISTEMA INSTALADO

¹⁴ Nombre común para un sensor de posición angular.

Inicialmente, se propone una validación estructural de los componentes críticos del sistema, que en este caso son el balancín y la barra de extensión ajustable (para cada lado). Luego de esto, se sugiere una validación dinámica para el desempeño del sistema cuyo objetivo sea el de analizar la posición resultante de la suspensión en función de la carga aplicada sobre el vehículo y como el sistema distribuye la carga entre los dos extremos de la suspensión.

En cuanto al análisis estructural del balancín, el objetivo será determinar el estado de esfuerzos en que se encuentra el elemento para la carga transferida, producto del accionamiento del sistema. En su evaluación se recomienda tener en cuenta algunas características que incluyen propiedades geométricas relevantes y las propiedades del material, siendo algunas de estas: El espesor de cada capa (correspondiente al espesor del material usado) es de 3.175 [mm], la separación entre capas es de 10 [mm] y el material es acero negro A36 (límite de fluencia de 250 [MPa]).

Siguiendo con las barras de extensión variable, se desea evaluar la efectividad de su diseño y la viabilidad de los materiales escogidos para su manufactura. Algunos factores de gran interés para su validación son los siguientes: El estado de esfuerzos en las uniones roscadas para condiciones de carga máxima en el AGV, de acuerdo con el tamaño de rosca elegido, la confiabilidad del aluminio como material elegido para los extremos de las barras y el análisis de esfuerzos en el eje intermedio roscado y determinación de su factor de seguridad de acuerdo con las condiciones de carga máxima del vehículo.

Por último, el análisis para el desempeño del sistema tendrá como objetivo verificar que, para el mecanismo instalado, la distribución de carga hacia cada lado de la suspensión se hace de forma simétrica. Para el análisis se propone trabajar con el modelo para el tren trasero del vehículo (o del vehículo completo en caso de disponer de la capacidad de cómputo necesaria) y determinar, para una entrada de carga máxima sobre el AGV (para varias posiciones y/o distribuciones) las cargas resultantes transmitidas por el sistema hasta las llantas junto con la posición resultante del chasis, producto del desempeño del sistema. Se espera que para cargas aplicadas de forma simétrica sobre el eje longitudinal central del vehículo (también, eje de simetría longitudinal), la posición resultante del chasis sea completamente horizontal o con orientación neutra y que la distribución de carga desde los elementos de la suspensión hasta las llantas sea equivalente a las características y la posición de la carga.

6.4 TREN DE POTENCIA

6.4.1 DESEMPEÑO DEL SISTEMA

Se propone realizar una prueba para determinar la variación en el desempeño del vehículo como una función de la carga aplicada sobre el mismo. Para esto se puede diseñar un recorrido (preferiblemente lineal) controlado en el que se pueda determinar la influencia de la carga sobre una variable como por ejemplo la velocidad que se alcanza para un determinado porcentaje de accionamiento por parte del controlador, al mismo tiempo que se va registrando la demanda de carga por parte del motor, al componente de alimentación.

También se podría determinar, por medio de aproximaciones si es necesario, el área efectiva frontal del vehículo junto con el coeficiente de arrastre para intentar probar el vehículo con el dinamómetro de motor y determinar sus curvas características de velocidad y potencia.

Con la determinación de estos coeficientes, también es posible reunir los parámetros necesarios para realizar determinar el desempeño longitudinal del vehículo mediante el uso de modelos matemáticos de modo que se pueda realizar una comparación entre el desempeño experimental y el desempeño estimado de manera teórica.

6.4.2 ANALISIS A COMPONENTES CRÍTICOS

Según se mencionó en el capítulo de construcción, la transmisión de potencia entre el motor, el diferencial y las llantas, requirió de la integración de una serie de mecanismos para la conexión mecánica entre estos componentes. Para algunos de ellos, se considera de gran interés evaluar su efectividad y confiabilidad dadas las condiciones de carga a las que estarán sometidos.

Con base en el montaje realizado, se puede inferir que los elementos más críticos son los ejes usados en los mecanismos de cardan que conectan al diferencial con las llantas traseras, siendo los

extremos dentados las zonas de mayor interés para evaluar en términos de resistencia mecánica.

Partiendo de que se conoce la potencia suministrada al motor y por tanto el torque que es capaz de transmitir al vehículo y la relación de transmisión del diferencial, es posible tener un estimado del torque al que se someten estos ejes en sus extremos dentados durante la etapa más crítica que es el arranque a carga de trabajo máxima. Lo anterior se sustenta en el hecho de que además del torque que le transmite el motor al sistema, los ejes deben luchar contra la inercia de todo el vehículo que se encuentra en reposo, lo que representa una carga adicional.

Dado todos los componentes que se tendrían que tener en cuenta para llevar a cabo una simulación dinámica que considere todo lo que se ha mencionado hasta ahora, se recomienda calcular un estimado de esa carga inercial aplicada a los ejes de transmisión de potencia en conjunto con el torque que puede transmitir el motor en el arranque, para determinar por medio de un análisis estático el estado de esfuerzos del componente según sus dimensiones y características, que permita intuir el nivel de confiabilidad del elemento dentro de la plataforma AGV.

6.4.3 AUTONOMÍA Y VELOCIDAD MÁXIMA DEL VEHÍCULO

Los parámetros de autonomía y velocidad máxima son criterios de gran interés a la hora de hablar de un vehículo eléctrico, esto toma especial relevancia, cuando se considera la posibilidad de llevar estos vehículos a un entorno comercial. Dicho esto, es de gran interés conocer la autonomía del vehículo para sus futuras aplicaciones en estudios relacionados con los vehículos autónomos. Para esto se propone el desplazamiento del vehículo en una ruta controlada (en condiciones de tránsito y de distancia) partiendo de un nivel de carga máximo hasta un porcentaje límite de descarga recomendado del 20%, para no afectar las baterías.

En cuanto a la velocidad máxima del vehículo, estará limitada por la configuración del controlador. Se recomienda determinar la velocidad máxima que se puede alcanzar para varias configuraciones en el esquema de potencia del controlador y en cada una de estas, la velocidad como función de la carga transportada por el vehículo.

6.5 SISTEMA DE FRENOS

6.5.1 PRUEBAS ESTÁTICAS

Para las pruebas estáticas del sistema de frenos, se propone montar las llantas traseras del prototipo sobre rieles mientras que las llantas del tren delantero pueden descansar sobre alguna otra superficie que ayude a mantener el vehículo a nivel o con orientación neutra.

Para diferentes porcentajes de la potencia de salida, se deberá acelerar el tren trasero a su máximo posible, dejar de acelerar y frenar, llevar un registro del tiempo que le toma al sistema de frenos detener por completo las llantas. Para este escenario, que es el menos demandante de los que se van a proponer, el sistema deberá tener la capacidad de detener las llantas rápidamente y por completo, de lo contrario, se deben hacer ajustes en los actuadores de modo que haya un mejor ajuste al momento del frenado y se ejerza mayor presión sobre el disco de frenos (en el caso del tren trasero).

Se debe aprovechar la oportunidad para evaluar la capacidad del actuador y su consumo para todas las pruebas realizadas, de modo que se valide su capacidad dentro del sistema.

6.5.2 PRUEBAS DINÁMICAS EN AMBIENTE CONTROLADO

Obedece al escenario ya propuesto para la validación del tren de potencia y consiste en hacer llevar al vehículo a una velocidad límite, dejar de acelerar y accionar el sistema de frenos mientras se lleva un registro del tiempo de frenado, y de ser posible, de la distancia recorrida hasta que el vehículo se detenga. En caso de que la plataforma logre alcanzar velocidades considerablemente altas, esta deberá ser limitada a un máximo de 40 [km/h] (límite correspondiente a la velocidad límite de diseño para el prototipo). El objetivo de esta prueba será evaluar diferentes configuraciones del controlador para varios límites de velocidad de la plataforma que permitan encontrar un equilibrio entre una distancia de frenado razonable (se sugiere que sea de un máximo de 5 [m]) frente a una velocidad máxima del prototipo. De ser posible, se recomienda llevar un

registro del consumo del actuador del sistema para los diferentes escenarios, puesto que, para el caso de pruebas dinámicas, el sistema de frenos deberá lidiar con la inercia de las llantas y del vehículo al mismo tiempo.

6.6 SISTEMA DE CONTROL

6.6.1 CAPACIDAD DE LA ARQUITECTURA INSTALADA

Para la arquitectura de control propuesta, se debe probar que el controlador seleccionado tiene la capacidad para manipular la red de potencia del vehículo. Siendo más específicos, el controlador seleccionado (**Raspberry 3 B+**) tiene un voltaje de salida de 3 [V] y un corriente límite por pin de 15 [mA]. Por otro lado, los pre-actuadores seleccionados para el manejo de la red de potencia son relés mecánicos de grado automotriz que requieren de un mínimo de 100 [mA] para su accionamiento. Teniendo en cuenta esto, es necesario evaluar si el controlador, a través de los esquemas de control diseñados e implementados, tiene la capacidad para accionar los pre-actuadores de la red de potencia.

Se propone como primera medida la evaluación de un sistema con tan solo dos entradas, que en este caso puede ser el sistema de tracción o frenos. Luego de conectar la tarjeta integrada a las respectivas alimentaciones y elementos. A través del accionamiento, vía software, de los pines del controlados, se debe verificar el accionamiento de los pre-actuadores y, además, registrar el consumo de corriente tanto para la *raspberry* como para los pre-actuadores.

En conjunto, los 28 pines disponibles como señales de salida para la tarjeta controladora solo pueden ofrecer un total de 50 [mA] por lo que hay un gran interés en verificar que por lo menos se van a poder accionar 8 pines al tiempo (esto bajo la suposición errónea de un escenario en que se activaran todos los circuitos al tiempo, acción que nunca debe ocurrir).

CONCLUSIONES

Este trabajo supone una contribución al Centro de Investigación en Mecatrónica Automotriz y a su objetivo de incursionar en el campo de los vehículos autónomos, por medio de un prototipo de vehículo eléctrico funcional que podrá ser usado como plataforma de pruebas en futuras investigaciones.

Así mismo, constituye un aporte a la literatura, con la propuesta de un método específico de seis fases, eficiente en tiempo y con enfoque en economía circular en términos de materiales, para la construcción de prototipos de vehículos eléctricos de bajo costo, que posibilitará a centros de investigación de presupuesto limitado, construir sus propias plataformas de pruebas, contribuyendo así al avance investigativo en la materia.

El método propuesto, desarrolló un prototipo de vehículo eléctrico funcional, con un diseño orientado al transporte de carga en entornos industriales y que cuenta con una arquitectura de control con capacidad para la implementación de algoritmos y/o esquemas de control que permitan la operación remota del vehículo e incluso, la navegación autónoma del mismo, lo cual constituye un diferenciador de alto valor agregado que permitirá proveer a la industria y a la academia con prototipos de AGV de buena calidad y a bajo costo.

Se realizó una incursión en el área de las direcciones asistidas con la implementación de un sistema de dirección bajo el esquema steer by wire, construido a partir de una caja de dirección donada y un motor rotatorio de levantacristales. El sistema construido, tiene la capacidad para desempeñarse ante condiciones de carga máximas, esto es el peso del vehículo (227 [kg]) con el peso de la carga máxima (100 [kg]), registrando un consumo pico de 8 [A].

El prototipo final tiene unas dimensiones máximas de 160x115 [cm] (largo x ancho) y un radio

de giro aproximado de 2.4 [m] para un ángulo de giro de 35 [deg], dándole cumplimiento a los requerimientos de diseño compacto y alta maniobrabilidad. El dimensionamiento del vehículo se realizó de acuerdo con los lineamientos dispuestos por la norma NTP-434, que regula temas relacionados a la seguridad en el trabajo, para pasillos con circulación o tránsito de vehículos de carga.

La serie de pruebas propuestas tienen el propósito de validar la efectividad del método y de las consideraciones realizadas tanto en el desarrollo de los sistemas como en el desarrollo de los componentes. Por otro lado, se busca evaluar el desempeño de la integración de todos los sistemas, tema que representa el reto principal de todo el trabajo realizado, pues de forma general, en el desarrollo de los prototipos la validación se suele hacer de manera individual y aislada, razón por la que, en muchas ocasiones, no es posible la reproducibilidad de los métodos propuestos. Así las cosas, el desempeño integrado de todos los sistemas, representará en sí mismo un aporte a la literatura y al avance en la investigación en este campo.

TRABAJO A FUTURO

Se propone que futuras investigaciones se enfoquen en el desarrollo de las pruebas de validación propuestas en este trabajo, que evalúen la efectividad del método y el desempeño de la integración de todos los sistemas y sus componentes,

En línea con lo anterior, se propone la realización de trabajos futuros que propongan, implementen y validen los ajustes requeridos de los sistemas. Lo anterior representará el punto de partida para el prototipo construido en su uso como objeto de pruebas en futuros trabajos de investigación relacionados con la navegación autónoma.

Por último, se resalta el potencial del método presentado en este documento y se invita a la realización de procesos de mejora de modo que un futuro se logre ajustar y validar para obtener como resultado una metodología para el desarrollo de prototipos de vehículos eléctricos, propia del tecnológico de monterrey. Aporte que se espera, contribuya a un posicionamiento internacional para la institución en temas de vehículos eléctricos y autónomos.

REFERENCIAS

- [1] HERNÁNDEZ, S., 2019. Alternativa energética; en el camino del transporte eléctrico. El Sol de Toluca, [online] Available at: <<https://www.elsoldetoluca.com.mx/doble-via/ciencia/alternativa-energetica-en-el-camino-del-transporte-electrico-2975498.html>>
- [2] CÁRDENAS, I., 2020. Tec Toluca: líder en México en desarrollo y consultoría automotriz. Conecta, [online] Available at: <<https://tec.mx/es/noticias/toluca/investigacion/tec-toluca-lider-en-mexico-en-desarrollo-y-consultoria-automotriz>>
- [3] MULLER, T., *Automated guided vehicles*. UK/Berlin: IFS (Publications) Ltd/Springer-Verlag., 1983, 290 p.
- [4] GÖTTING, H.H., Automation and Steering of Vehicles in ports. *Port Technology International*., 2000, Vol. 10, p. 101-111.
- [5] VIS, I.F.A., Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research*., 2006, Vol. 170, N° 3, p. 677–709.
- [6] HAEFNER, L.E.; BIESCHKE, M.S. ITS opportunities in port operations. *Transportation Conference Proceedings*, 1998, p. 131-134.
- [7] VAN DER HEIJDEN, M.C. *et al.* Using simulation to design an automated underground system for transporting freight around Schiphol Airport. *Interfaces*, 2002, Vol. 32, N° 4, p. 1-19.
- [8] LIM, R.; SIONG, L.B.; HO, N.C. Development and implementation of an intelligent flexible manufacturing system. *Journal of Mechanical Working Technology*, 1989, Vol. 20, p. 389-402.
- [9] TURESSON, J. (2016). *Control remoto de un AGV: desarrollo de una interfaz de usuario para vehículos automatizados* [Tesis de maestría, Chalmers tekniska högskola]. Repositorio digital de Chalmers.

- [10] KOLLMORGEN AUTOMATION, AB. (2016). Total Commitment for Lower Total Costs. url: http://ndcsolutions.com/wp/wp-content/uploads/2016/07/35200-005H_NDC_Solutions.pdf.
- [11] WANG, H. F.; CHANG, C. M. Facility layout for an automated guided vehicle system. *Procedia Computer Science*, 2015, Vol. 55, p. 52-61.
- [12] ZHAN, M.; YU, K. Wireless communication technologies in automated guided vehicles: Survey and analysis. *Proceedings: IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2018, p. 4155-4161.
- [13] ZHANG, Z. *et al.* A Novel Steering System for a Space-Saving 4WS4WD Electric Vehicle: Design, Modeling, and Road Tests. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2017, Vol. 18, N° 1, p. 114-127.
- [14] CHENGALVA, M.; BLETSIS, R.; MOSS, B. Low-Cost Autonomous Vehicles for Urban Environments, *SAE Int. J. Commer. Veh.*, 2009, Vol. 1, N° 1, p. 516-526.
- [15] JULIO, J. *Analysis and implementation of dynamics equations in the development of an electronic differential for an electric vehicle*. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey] Repositorio Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- [16] Notas Técnicas de Prevención [NTP]. NTP 434: Superficies de trabajo seguras. Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 1997 (España).
- [17] CERÓN, E. *Metodología para el diseño y simulación dinámica de un sistema de suspensión para vehículos ligeros*. [Tesis de maestría, Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey] Repositorio Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey.
- [18] Vehicle Suspension: Front View Online Suspension Simulator, [Online]. Available: <https://www.vsusp.com/>
- [19] RILL, G. *Vehicle Dynamics: Lecture Notes*. Ratisbona, Alemania: Hochschule Regensburg University Of Applied Sciences, 2009, 189 p.
- [20] Jazar, R. N. (2017). *Vehicle Dynamics: Theory and Application: Third Edition*. Melbourne, VIC, Australia: Springer International Publishing AG, 2017, 1012 p.
- [21] BFF DESIGN LTD. (2008). DIY EV Mechanical Transmissions. url: <http://buggies.builtforfun.co.uk/Howtoos/>
- [22] DIVISIONE LA REPUBBLICA. (2012). Scuderia Ferrari. url: <https://www.repubblica.it/static/speciale/2012/formulauno/scuderie/ferrari.html>

- [23] AUCAPIÑA, C.A. *Diseño y construcción del sistema de dirección de un vehículo de competencia formula SAE eléctrico*. [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana] Repositorio Universidad Politécnica Salesiana.
- [24] BROSE. (24 de mayo de 2021). Systems for vehicle doors and liftgates. url: <https://www.brose.com/mx-es/products/technology-for-vehicle-doors-and-liftgates/>
- [25] ENCISO, C.R. *Caracterización de un sistema de elevación de cristales para vehículos automotores*. [Tesis de pregrado, Instituto Politécnico Nacional-México]. Repositorio Instituto Politécnico Nacional-México.

APÉNDICES

APÉNDICE A: NORMA NTP 343.

Se señalan los apartados B y C de la norma NTP 434, de la sección de Medidas preventivas: Vías de circulación, considerados en el dimensionamiento del ancho máximo y la altura máxima, respectivamente, del AGV.

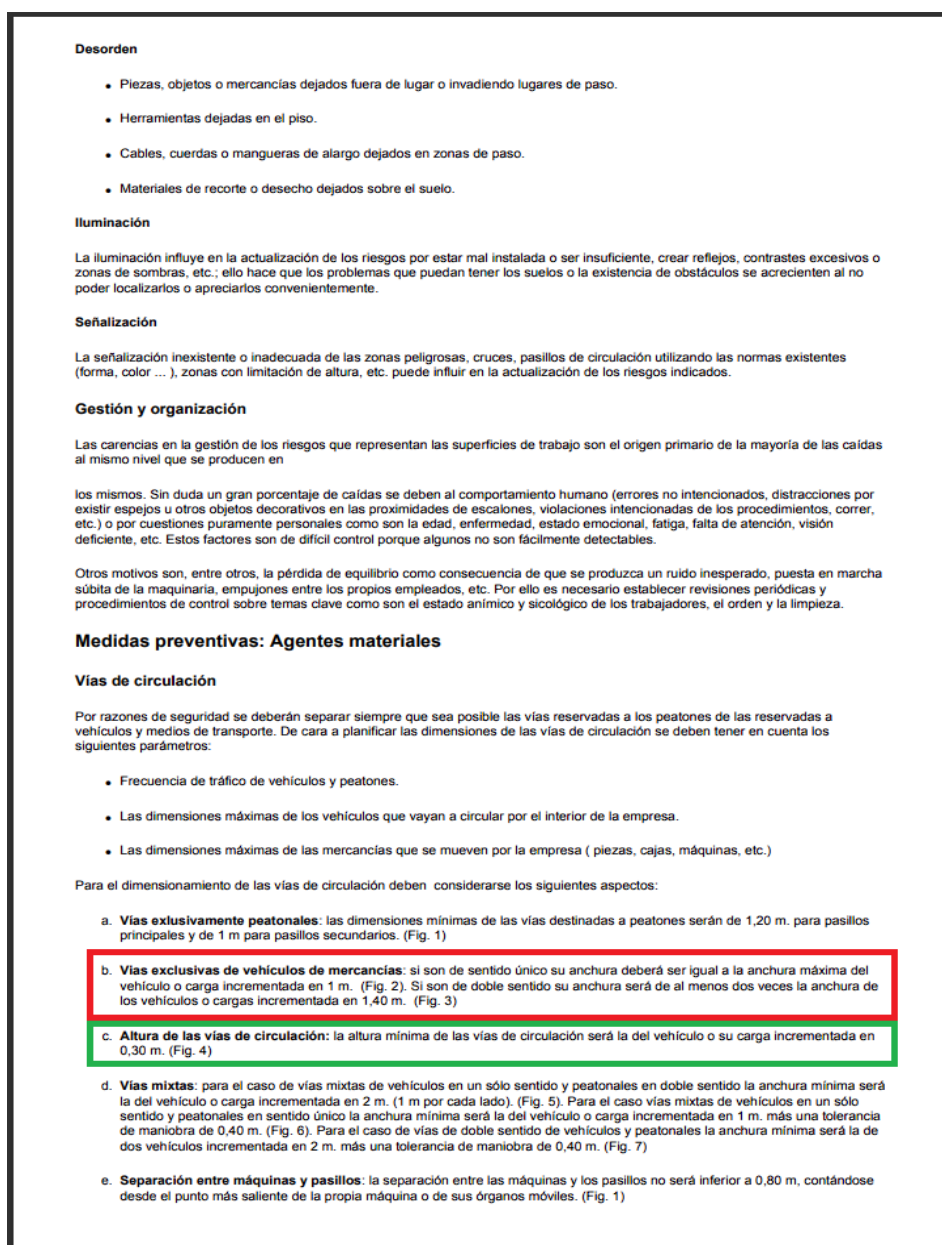


Figura A1: apartados B y C de la Norma NTP 434.

APÉNDICE B: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHÍCULO DONANTE – RENAULT 5.

Se presentan las especificaciones técnicas relacionadas al sistema de dirección y la maniobrabilidad del vehículo, puesto que este modelo coincide con el del vehículo donante para la caja de dirección implementada en el AGV.

Características Técnicas y Equipo del Renault Mirage "LS" y Renault 5.	Renault 5	Mirage LS		Renault 5	Mirage LS
Carrocería:			accionado por termostato.	♦	♦
Peso aproximado vacío: 790 Kgs.	♦	♦	Sistema Eléctrico:		
Peso aproximado cargado: 1,190 Kgs.	♦	♦	Batería: 12 volts.	♦	♦
Capacidad de cajuela: 270 a 900 dm ³ .	♦	♦	Alternador: 55 amperes.	♦	♦
Capacidad de carga: 400 Kgs.	♦	♦	Dirección:		
Motor:			De piñón y cremallera.	♦	♦
Delantero de 4 cilindros verticales en línea.	♦	♦	Diámetro del volante: 390 mm.	♦	♦
Diámetro por carrera 73 x 77 mm.	♦	♦	Radio de giro entre muros: 5.05 mts.	♦	♦
Cilindrada 1289 cm ³ .	♦	♦	Radio de giro entre aceras: 4.87 mts.	♦	♦
Relación de compresión. 8:1	♦	♦	Transmisión:		
Potencia 56.3 caballos SAE.	♦	61.3	Tipo: Manual con tracción delantera.	♦	♦
Capacidad de lubricante: 3 litros.	♦	♦	Par cónico de diferencial 8 x 31.	♦	♦
Cambio de lubricante: cada 5,000 kilómetros sin filtro.	♦	♦	Relaciones de la caja de velocidades:		
cada 10,000 kilómetros con filtro.	♦	♦	1ra. 3.83:1	♦	♦
Sistema de Combustible:			2da. 2.27:1	♦	♦
Carburador Bocar 35 S.E.I.A. 76B.	♦	♦	3ra. 1.52:1	♦	♦
Tipo de combustible: 81 octanos (NOVA).	♦	♦	4a. 1.02:1	♦	♦
Capacidad del tanque: 41 litros.	♦	♦	Reversa 3.54:1	♦	♦
Rendimiento en tráfico urbano: 12.70 Kms. por litro.*	♦	♦	Suspensión:		
Rendimiento en tráfico carretera: 18.0 Kms. por litro.*	♦	♦	Independiente en las 4 ruedas.	♦	♦
*(Prueba oficial SEPAPI).			Delantero:		
Sistema de Enfriamiento:			Barras de torsión longitudinales.	♦	♦
Por líquido antioxidante en circuito hermético: 6.3 litros.	♦	♦	Barra estabilizadora.	♦	♦
Ventilador eléctrico independiente			Amortiguadores de doble acción.	♦	♦

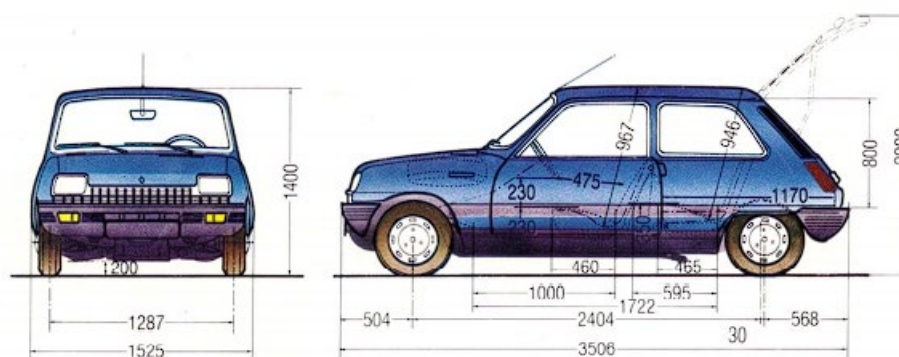


Figura B1: especificaciones técnicas Renault 5.

APÉNDICE C: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHÍCULO DONANTE – ITALIKA DS150.

En este apéndice, son presentados los “datos técnicos” provenientes del fabricante para el vehículo donante mencionado (motocicleta Italika DS125), destacando aquellos que tienen una relación directa con el componente adquirido (en este caso las llantas) y que además, fueron considerados en las etapas iniciales del diseño del vehículo. Los datos señalados son: Capacidad de carga del vehículo, distancia entre ejes del vehículo, sistema de frenos en cada llanta y tamaño de llanta.

	CONCEPTO	ESPECIFICACIÓN
Dimensiones	Modelo	<i>DS125</i>
	Dimensión largo x ancho x alto	1,790 x 680 x 1,110 mm
	Distancia entre ejes	1,225 mm
Capacidad de carga	Peso	102 kg (224 lb)
	Carga máxima (conductor y pasajero)	150 kg (330 lb)
Motor	Tipo	4 tiempos
	Sistema de enfriamiento	Aire
	Potencia del motor	7.94@7,500 Hp/rpm
	Torque	7.2@5,500 Hp/rpmn (5.3 lbs.ft)
	Modo de arranque	Eléctrico/Pedal
	Volumen de desplazamiento	124.6 cc
Sistema eléctrico	Modo de ignición	CDI
	Fusible	10 A
	Batería	12 V, 7Ah

Figura C1: especificaciones técnicas del Italika DS150, parte 1.

	CONCEPTO	ESPECIFICACIÓN
Frenos	Freno delantero	Tambor
	Freno trasero	Tambor
Capacidad de combustible y aceite	Volumen del tanque de combustible	5.8 L
	Volumen del aceite del motor	800 ml
Llantas	Llanta trasera	3.50-R10
	Llanta delantera	3.50-R10
	Presión llanta delantera sin carga (en frío)	28 psi
	Presión llanta trasera sin carga (en frío)	30 psi
	Presión llanta delantera con carga (en frío)	30 psi
	Presión llanta trasera con carga (en frío)	32 psi
Transmisión	Por banda	Automática

Figura C2: especificaciones técnicas del Italika DS150, parte 2.

APÉNDICE D: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHÍCULO DONANTE – ITALIKA ATV180.

De igual forma que con el Apéndice C, se presentan los datos técnicos para el vehículo donante, Italika ATV180, directamente del fabricante y nuevamente son señalados aquellos que guardan relación con los componentes adquiridos (las horquillas, superior e inferior, de la suspensión delantera) y que también fueron consideradas en las primeras etapas del diseño del vehículo.

	CONCEPTO	ESPECIFICACIÓN
Dimensiones	Modelo	ATV
	Dimensión largo x ancho x alto	1,700 x 950 x 1,120 mm
	Distancia entre ejes	1,100 mm
Capacidad de carga	Peso	170 kg (374.7 lbs)
	Peso máximo combinado (conductor y carga en parrillas)	150 kg (330 lbs)
Motor	Tipo	4 tiempos
	Potencia del motor	9.38 @ 6,500 Hp-rpm
	Torque	11 @ 5,500 Nm-rpm (110 lbs.ft)
	Modo de arranque	Eléctrico
	Velocidad máxima	65 km/h (40 millas/h)
	Volumen de desplazamiento	177.3 cc
Sistema eléctrico	Modo de ignición	CDI
	Fusible	15 A
	Batería	12 V, 9 Ah

Figura D1: especificaciones técnicas del Italika ATV180.

APÉNDICE E: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS, BATERÍAS DE DESCARGA PROFUNDA LTH 27MDC.

Especificaciones de las baterías de ciclado profundo de ácido-plomo, adquiridas para el pack de baterías del AGV. Se señalan las especificaciones más importantes: Voltaje de salida, amperaje de descarga para diferentes intervalos de tiempo, dimensiones del componente y voltaje de carga.

Especificaciones del Producto

BCI	Aplicación	Voltaje	Polaridad	Dimensiones			Peso (kgs)	Garantía (meses)	
				Largo	Ancho	Alto*		Sin Costo	Prorrata
27	Ciclado Profundo	12	(+) / (-)	324	174	230	22.8	12	0

*La altura máxima incluye el poste

Amperios / Hora				Descarga (Amperios)			Capacidad de Reserva (Minutos)			Energía (kWh)			
@ 5Hrs.	@ 10Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.	@ 5Hrs.	@ 10Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.	@ 25 Amps.	@ 56 Amps.	@ 75 Amps.	@ 5Hrs.	@ 20Hrs.	@ 100Hrs.
76	85	96	105	15.2	8.5	4.8	1.1	160	-	42	0.91	1.15	1.26

Voltaje del Sistema	Ajustes de Voltaje de Cargadores (@25°C)					
	6V	12V	24V	36V	48V	60V
Carga Lenta	7.40	14.80	29.60	44.40	59.20	74.00
Carga Flotante	6.60	13.20	26.40	39.60	52.80	66.00
Carga de Nivelación	7.75	15.50	31.00	46.50	62.00	77.50




Terminales	
MARINE	WITH HEX
	
SAE	TYPE M

Figura E1: especificaciones técnicas baterías del AGV.

APÉNDICE F: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHÍCULO DONANTE - ATV YAMAHA WOLVERINE 350.

Se presentan las especificaciones relacionadas con la transmisión del vehículo, dentro de las reducciones mostradas se busca la que corresponde al diferencial del vehículo.

GENERAL SPECIFICATIONS		SPEC	
Model		YFM350FWB	
Differential gear case oil		0.18 L (0.16 Imp qt, 0.19 US qt)	
Periodic oil change		0.18 L (0.16 Imp qt, 0.19 US qt)	
Total amount		0.2 L (0.18 Imp qt, 0.21 US qt)	
Air filter:		Wet type element	
Fuel:		Regular gasoline	
Type		Regular gasoline	
Fuel tank capacity		10 L (2.20 Imp gal, 2.64 US gal)	
Fuel reserve amount		1.3 L (0.29 Imp gal, 0.34 US gal)	
Carburetor:		BST34/1	
Type / quantity		BST34/1	
Manufacturer		MIKUNI	
Spark plug:		D8EA/X24ES-U : for USA DR8EA : for Canada	
Type		D8EA/X24ES-U : for USA DR8EA : for Canada	
Manufacturer		NGK/NIPPONDENSO NGK	
Spark plug gap		0.6 ~ 0.7 mm (0.024 ~ 0.028 in)	
Clutch type:		Wet, centrifugal automatic	
Transmission:		Spur gear	
Primary reduction system		76/24(3.167)	
Primary reduction ratio		Shaft drive	
Secondary reduction system		27/25 × 24/18 × 33/09 (5.280)	
Secondary reduction ratio		27/25 × 24/18 × 33/09 (5.280)	
Transmission type		Constant mesh 5-speed	
Operation		Left foot operation	
Gear ratio		1st 38/13 (2.923)	
		2nd 34/18 (1.889)	
		3rd 30/22 (1.364)	
		4th 26/25 (1.040)	
		5th 25/33 (0.758)	
Reverse gear		22/17 × 35/15 (3.020)	
Chassis:		Steel tube frame	
Frame type		2°	
Caster angle		11 mm (0.43 in)	
Trail		820 mm (32.28 in)	
Tread (STD) rear		834 mm (32.83 in)	
Tread (STD) front		0 ~ 10 mm (0 ~ 0.39 in)	
Toe-in			
Tire:		Tubeless	
Type		AT25X8-12	
Size front		AT25X10-12	
Size rear		DUNLOP	
Manufacturer front		DUNLOP	
Manufacturer rear		KT404	
Type front		KT405B	
Type rear			

2 - 2

Figura F1: especificaciones técnicas del ATV Yamaha Wolverine 350.