

5. ESTADO DEL ARTE

La implementación de robots automáticos es uno de los ámbitos de desarrollo en los sistemas de manufactura flexible (SFM), donde el objetivo principal es la realización de tareas en el manejo de materiales buscando disminuir la intervención humana en labores repetitivas o inadecuadas (Dutra, Archila, & Lengerke, 2008). Según la definición ingenieril, los AGV son vehículos que admiten diferentes configuraciones mecánicas, conducidos mediante un sistema computarizado, usados para el transporte de materiales y herramientas entre distintas estaciones de trabajo (McGraw-Hill, 2003).

5.1 HISTORIA DE LOS AGV

La historia de los vehículos guiados automáticamente, empieza en 1954 cuando la compañía Barret Electronic de Northbrook, Illinois, U.S.A, diseña un vehículo de remolque para una empresa de alimentos, guiado por un cable ubicado en el suelo en lugar de un riel. Sin embargo el desarrollo de los vehículos auto pilotado se da entre los años 60 y 70 gracias a la revolución electrónica que permite que éstos sigan trayectorias sin la necesidad de que una persona esté a bordo (RX SHOWCASE, 2008).

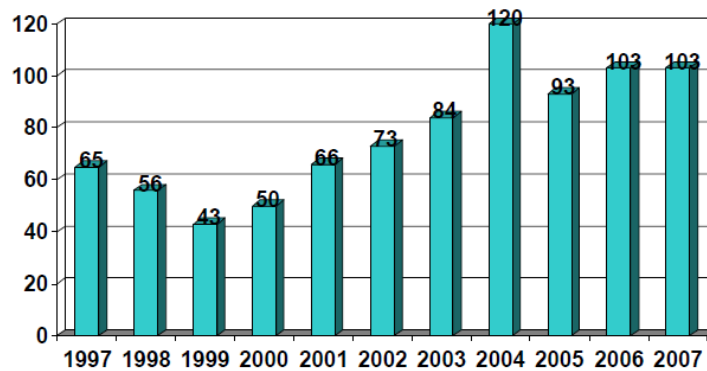
Hoy en día la tecnología sigue evolucionando, el cable magnético instalado en el suelo todavía está disponible para la aplicación adecuada. Sin embargo, muchos sistemas con más tecnología se han diseñado. Los vehículos cuentan con sofisticados equipos a bordo para comunicar, dirigir y administrar el sistema. También se han creado sistemas con posibilidad de acople y desacople automático de la carga (Savant Automation, 2011).

Actualmente, los AGV tienen grandes aplicaciones en la industria aeroespacial, automovilística, de papel y metales, hospitales, y en general en cualquier sistema de transporte y almacenamiento. Los AGV's también se emplean para mantener orden y seguridad, funcionando de forma impecable en áreas estrechas o bastante

concurridas por otros objetos o personas. Las colisiones, desplomes y daños normalmente asociados con el transporte de materiales son eliminados virtualmente utilizando este tipo de vehículos (FIB, 2010)

La sociedad americana de manejo de materiales MHIA tiene un registro del número (unidades) de grandes sistemas de AGV instalados por las compañías pertenecientes a esta sociedad (DEMATIC, EFACEC, EGEMIN AUTOMATION, FROG AGV SYSTEMS, JBT CORPORATION, JERVIS WEBB COMPANY, TRANSBOTICS CORPORATION) entre los años 1997 y 2007, como se muestra en el Gráfico 1.

Gráfico 1. Unidades de AGV instaladas por las compañías pertenecientes a MHIA.



Fuente: (MHIA, 2011)

Se puede observar que el desarrollo de la industria de AGV's ha sido lento, sin embargo su potencial de crecimiento parece estar mejorando. Además, cabe anotar que el gráfico no representa la totalidad del mercado.

5.2 GENERALIDADES AGV

El mercado industrial dispone de una amplia gama de vehículos AGV que posibilita el manejo de materiales con diferentes criterios:

1. Movimiento de cargas a grandes alturas.
2. Movimiento de cargas pesadas.

3. Distintos tipos de cargas.
4. Distintos tipos de manipulación; ya sea trilateral, bilateral.
5. Diferentes geometrías, contrapesadas, apiladores, retráctiles.
6. Zonas específicas.

Disponer de una gama tan grande posibilita que, en la mayoría de los casos, se encuentre la máquina deseada para la aplicación requerida en términos de funcionalidad, consiguiéndose optimizar la relación solución técnica vs. Costo. La mejora de dicha relación se enfatiza en las aplicaciones que requieren de máquinas pesadas, para las que la fabricación de una mecánica a medida sería muy costosa y necesitaría de una gran inversión de tiempo (ASTI, s.f.)

Estos vehículos se pueden clasificar según su función en (DEMAG, 1985):

5.2.1 Tow (arrastre).

Este tipo de vehículos utiliza un sistema de enganche (remolque) para movilizar objetos. Tiene la gran ventaja de poder transportar grandes cargas, hasta de 50 mil libras.

Ilustración 4. AGV Tow.



Fuente: (Direct Industry, 2011)

5.2.2 Load (carga).

Este tipo de AGV transporta elementos elevándolos, evitando el contacto del elemento con el piso cuidando así la integridad del producto. Son utilizados para aplicaciones de cargas hasta de 40 mil libras.

Ilustración 5. AGV Load.



Fuente: (JBT Corporation, s.f.)

5.2.3 Fork (Montacargas).

Estos vehículos utilizan un tenedor metálico para elevar sus cargas, la gran ventaja que tiene estos vehículos es la de poder recibir el objeto en una altura determinada y entregarlo a otra logrando así organizar las cargas cuando el espacio es limitado. Estos vehículos son de carga media (hasta 3600 lb).

Ilustración 6. AGV Fork.



Fuente: (Savant Automation, 2011)

5.2.4 Cart.

Son vehículos diseñados para el manejo de materiales de carga liviana (hasta 2000lb).

Ilustración 7. AGV Cart



Fuente: (indiamart, s.f.)

5.2.5 Vehículos líneas de ensamble.

Es una adaptación de varios sistemas de carga liviana usados para la producción en serie.

Ilustración 8. AGV Línea de ensamble.



Fuente: (Jervis B Webb Company, s.f.)

5.3 ALGUNAS APLICACIONES EN LA INDUSTRIA.

La industria está constantemente buscando nuevas soluciones para agilizar y sacar el máximo rendimiento a sus procesos de producción. Los AGV's son uno de los candidatos a ayudar en ese aspecto y por eso son utilizados en una gran variedad de sectores. (FIB, 2010)

5.3.1 Industria Automotriz.

La industria del automóvil está constantemente beneficiándose de las ventajas del uso de la tecnología AGV. En uno de los lugares donde se puede encontrar instalado este tipo de sistema es en la propia cadena de montaje del automóvil.

Ilustración 9. AGV en la Industria automotriz.



Fuente: (FIB, 2010)

5.3.2 Industria Papel.

En esta industria se suelen manipular rollos gigantes de papel, de un diámetro considerable, que se convierten en productos acabados, tales como toallas, servilletas de papel.

Tener que transportar este tipo de cargas implica la necesidad de dotar la zona de carga del AGV con un poste. Éste consiste esencialmente en una viga de acero situada en el centro del vehículo y que permite al AGV transportar fácilmente una

carga que normalmente es incómoda de llevar. Levantando la carga del centro mantiene el equilibrio y proporciona una medida adicional de seguridad.

Ilustración 10. AGV en la industria papel.



Fuente: (Moozakis, 2005)

Las ventajas adicionales para el cliente en este tipo de uso son: aumento en seguridad laboral y reducciones en costos de trabajo y daños materiales.

5.3.3 Industria Plástica.

La industria de los plásticos utiliza típicamente los AGV's para el transporte de material dentro de sus instalaciones de fabricación, desde el área de fabricación al almacén o a un área de salida para su posterior envío.

Ilustración 11. AGV Industria Plástica



Fuente: (JBT Corporation, s.f.)

5.3.4 Industria Fibra de Vidrio.

Los AGV's en un entorno de fabricación de fibra de vidrio permiten metas de producción que eran en antaño inalcanzables con la manipulación manual del material. En algunas aplicaciones estos sistemas realizan la fabricación de los hilados de la fibra de vidrio tirando del producto a través de las etapas de proceso. Una vez que los hornos comiencen a derretir el cristal, el producto debe continuar avanzando, una tarea difícil para los conductores manuales. En cambio los AGV's están siempre disponibles a lo largo del proceso de producción, sin tener que poner en peligro a los operarios.

Ilustración 12. Aplicación Industria Fibra de Vidrio.



Fuente: (FIB, 2010)

5.3.5 Almacenamiento.

Las ventajas que se alcanzan con un sistema acertado de AGV en un entorno de almacenamiento son notables, éstos infunden orden y disciplina. Los AGV's recogen la mercancía acabada de la producción o del empaquetado y la transportan a un lugar específico de almacenamiento. También son capaces de recopilar datos valiosos del inventario para hacer un seguimiento apropiado de los materiales.

Ilustración 13. Aplicación almacenamiento.



Fuente: (Egemin Automation, 2011)

5.4 FUNCIONES BÁSICAS DE LOS SISTEMAS AGV

En general todos los sistemas AGV cumplen con unas funciones básicas para realizar trabajos de manejo de materiales (DEMAG, 1985)

5.4.1 Guiado.

Es la habilidad del vehículo de seguir una ruta predeterminada de acuerdo al flujo de materiales que requiere la aplicación, el control de dirección permite al vehículo físicamente maniobrar por distintos caminos. Hay dos tipos básicos de dirección:

- Control de velocidad diferencial: utiliza dos ruedas fijas de tracción, el sistema varía la velocidad entre las dos ruedas para permitir así el giro del vehículo en cualquier sentido.
- Rueda de control de dirección: este sistema utiliza una rueda en la parte delantera del AGV que gira determinadamente para seguir el trayecto establecido.

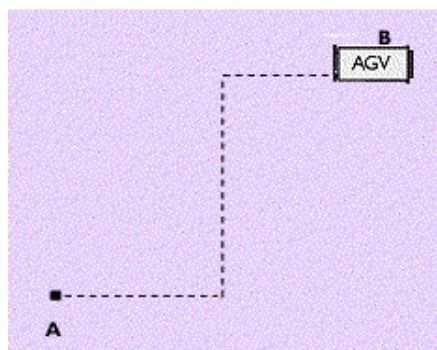
5.4.2 Navegación.

Es la habilidad del vehículo para tomar decisiones a lo largo del trayecto que le permitan cumplir con el trabajo deseado. Es decir, es la forma en la que el vehículo interactúa con su contexto para determinar en qué parte del trayecto se encuentra y que acciones debe realizar. En general hay dos distintos tipos de navegación que pueden utilizar los sistemas AGV:

- Ruta Fija.

En este método la trayectoria que debe seguir el vehículo es continua y fija, ésta es establecida en el suelo (ver ilustración 14).

Ilustración 14. Desplazamiento por ruta fija.



Fuente: (MHIA, s.f.)

Hay distintos tipos de tecnologías utilizadas para este tipo de ruta, tales como:

La tabla 1 presenta una tabla comparativa entre los distintos sistemas de navegación.

Tabla 1. Sistemas de navegación.

SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS	COSTO
Óptico	No hay necesidad de obra civil para la instalación, fácil modificación.	Alto mantenimiento en la pista para evitar la imprecisión en el control.	Bajo
Cinta Magnética	Precisión en el control, bajo mantenimiento de la pista	Necesidad de obra civil para enterrar el cable.	Medio
Láser	Alta precisión en el control, se puede controlar varios sistemas al tiempo y coordinar el vehículo con el proceso.	Necesidad de muchos equipos de control.	Alto
Giroscopio	Alta precisión del control, y se pueden coordinar varios vehículos con el proceso.	Necesidad de muchos equipos de control.	Alto

Fuente: Elaboración propia.

5.4.3 Gestión de tráfico.

Es la habilidad del vehículo para evitar colisiones contra toda clase de objetos que se interponen en su trayecto. Hay tres tipos de control de tráfico.

- Zona de control.

Es utilizado para controlar un sistema de manejo de materiales compuesto por más de un AGV, en el cual las ordenes a los sistemas le son enviadas de una manera secuencial de tal forma que los vehículos no se encuentren en la misma zona al mismo tiempo, éste a su vez puede ser dividido en tres tipos:

- Control distribuido por zonas: cada zona tiene su caja de control que detiene al AGV , cuando éste entra a cada etapa y sólo es reactivado para que continúe su marcha adelante cuando la etapa siguiente envíe una señal que indique que se encuentra vacía.

- Control central: funciona de la misma manera que el control por zonas a diferencia que sólo existe una caja de control que se comunica con cada zona para enviar una orden determinada.
- Control a bordo: cada vehículo posee una caja de control que se comunica con el resto de sistemas.
- Control por sensores.

Este tipo de control utiliza sensores que pueden ser: ópticos, ultrasónicos o físicos (bumper), para identificar obstáculos que se interpongan en el trayecto del vehículo.

- Control combinado.

Utiliza las dos técnicas nombradas anteriormente en manera conjunta.

5.4.4 Transferencia de la carga.

Es el método utilizado por el vehículo para recoger y repartir su carga. Este puede ser de varios tipos:

- Manual.
- Acople y desacople automático.
- Alimentación por correas rodillos o cadenas.
- Subir y bajar.
- Empujar y tirar.

5.4.5 Gestión del sistema.

Es el método de control utilizado para dictar la operación del sistema. Éste puede ser dividido en dos áreas: los métodos de expedición del vehículo y los métodos de monitoreo.

5.5 COSTOS

La sociedad industrial de manejo de materiales de América MHIA (*Material Handling Industry of America*), estima precios para este tipo de sistemas según la

complejidad, capacidad de carga y número de vehículos, los niveles de complejidad son determinados según las siguientes características:

Nivel 1 simple: Ruta fija, sin controlador central, sin interfaz para el usuario.

Nivel 2 medio: Con controlador central, rastreo de productos, múltiples opciones de ruta.

Nivel 3 mayor: acople y desacople automático, controlador central, interfaz de usuario, conexión Ethernet, rastreo de productos, múltiples opciones de ruta, múltiples opciones de altura de producto, entre otros.

En la Tabla 2 se listan los costos estimados por esta asociación.

5.5.1 Costos referentes.

Como reseña para el proyecto se referencian costos de proyectos similares de AGV de carga liviana, desarrollados en plantas de Renault en Europa (España, Francia y Eslovenia) cuyos precios han variado desde 8.000 hasta 22.000 Euros.

Tabla 2. Estimación de costos de sistemas AGV.

NUMBER OF VEHICLES	UNIT LOAD VEHICLES UP TO 6,000 LBS CAPACITY					
	COMPLEXITY - \$ (thousands) PER VEHICLE					
	1.		2.		3.	
	Low	High	Low	High	Low	High
1	50	250	100	300	150	350
2 to 4	50	200	115	225	130	325
5 and up	50	180	100	200	100	300

NUMBER OF VEHICLES	UNIT LOAD VEHICLES 10,000 LBS CAPACITY AND UP					
	COMPLEXITY - \$ (thousands) PER VEHICLE					
	1.		2.		3.	
	Low	High	Low	High	Low	High
1	75	360	110	360	190	500
2 to 4	90	340	125	340	180	515
5 and up	80	320	120	320	150	510

NUMBER OF VEHICLES	TOWING / TUGGER SYSTEMS WITH CAPACITY UP TO 12,000 LBS					
	COMPLEXITY - \$ (thousands) PER VEHICLE					
	1.		2.		3.	
	Low	High	Low	High	Low	High
1	55	170	90	210	120	250
2 to 4	60	115	90	180	110	240
5 and up	50	110	70	180	95	235

NUMBER OF VEHICLES	TOWING / TUGGER SYSTEMS WITH CAPACITY OVER 12,000 LBS					
	COMPLEXITY - \$ (thousands) PER VEHICLE					
	1.		2.		3.	
	Low	High	Low	High	Low	High
1	75	185	110	250	145	500
2 to 4	80	155	120	215	135	515
5 and up	70	150	100	210	120	510

Precios en dólares

Fuente: (MHIA, 2011)

5.6 REGULACIONES Y REGLAMENTACIONES

Una de las normas que regulan la fabricación de los vehículos guiados automáticamente es la ITSDF B56.5-2005 (ITSDF, 2005), reafirmación de la norma ASME B56.5-2004 (ASME, 2011). Esta norma indica todos los requerimientos relacionados con los elementos de diseño, operación y mantenimiento de todos los vehículos guiados automáticamente fabricados para aplicaciones industriales. En el capítulo número tres de esta norma se tratan las regulaciones que debe cumplir el fabricante de este tipo de sistemas.

A continuación se explican las pautas más significativas de este apartado aplicables a este proyecto en particular (ITSDF, 2005):

Estándares de diseño y construcción.

- Capacidad nominal de los vehículos de arrastre

En este numeral se especifica que para el diseño de todo AGV de arrastre se debe realizar cálculos de fuerza de empuje crítico, máximo y nominal. Que el coeficiente de fricción entre las ruedas y el suelo debe ser mínimo de 0.6. Además se especifican ciertas pruebas de fuerza de empuje que se le deben realizar al vehículo una vez construido.

- Placa informativa

En este numeral se especifica que todo AGV debe tener una placa técnica en material inoxidable que indique la siguiente información:

- Máxima fuerza de arrastre o rango en el que puede empujar (Newton)
- Promedio del peso que puede cargar KG
- Modelo y serial del vehículo
- Peso al vacío del carro sin baterías y sin carga
- La norma con la que cumple todos los estándares
- Tipo de baterías ,capacidad, dimensiones , peso, voltaje nominal
- Velocidad promedio
- Capacidad máxima a la carga nominal

- Guiado

Se habla de la desviación máxima permitida en el trayecto que sigue el vehículo 75 mm para sistemas guiados con referencias externas y 150 mm para guiados con referencias internas, en estos casos el vehículo debe realizar una parada de emergencia.

- Desempeño en la navegación

En este numeral se habla de todos los requerimientos con los que deben cumplir y los factores que afectan el desempeño en la navegación del sistema como: el control, dirección, rampas (anomalías del terreno) y la estabilidad.

- Funciones de frenado

Según este literal todos los vehículos deben tener los siguientes dispositivos de frenado:

Freno de emergencia: dispositivo mecánico que detiene el carro en caso de emergencias, previniendo posibles colisiones o una falla en el sistema.

Freno de parada: un freno que cuando el vehículo este parado evite posibles movimientos inesperados.

Freno de servicio: freno que reduzca la velocidad del sistema o lo detenga mientras está operando.

Todos estos dispositivos pueden ser integrados en uno que cumpla con todas las funciones anteriores.

- Dispositivos de advertencia

El vehículo debe tener dispositivos visuales o audibles que indiquen: que esta prendido, reversa, que esta fuera del trayecto y bajo nivel de batería entre otros.

- Controles y dispositivos de emergencia y Precaución.

En estos numerales se indican todos los controles y dispositivos de emergencia y precaución que debe tener el sistema.

- Dispositivos de detección de objetos

En este numeral se hablan de las características que deben cumplir los sensores encargados de la detección de objetos ya sean de no contacto o de contacto

(emergencia) como los bumpers, además de las distintas pruebas que deben ser sometidos para garantizar su buen funcionamiento.

- Manual de operación

Un manual de operación debe ser proveído junto al vehículo de acuerdo a las normas ITSDf B56.1, ITSDf B56.8 e ITSDf B56.9 (ITSDf, 2005).

- Guardas

Todas las partes móviles deben estar cubiertas por guardas de seguridad.

- Señales

De acuerdo a sus características, los sistemas y componentes del vehículo deben tener señales de advertencia y seguridad.

5.7 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS SISTEMAS AGV

Los AGV no implican modificaciones constructivas en la infraestructura de la industria, adicionalmente se pueden agregar en cualquier momento. Su Software de programación simplifica la expansión futura de cualquier tarea y se puede integrar con todo el control de cualquier proceso. Provee un servicio continuo que ahorra horas de trabajo, permite la flexibilidad ante el cambio, Ahorra espacio en la planta, además aumenta la seguridad en el manejo de materiales eliminando situaciones como colisiones o desplomes que pueden afectar seriamente la integridad de los trabajadores o del producto de cualquier planta. La gran desventaja y razón del lento desarrollo de este tipo de sistemas es el elevado costo inicial, pero si se realiza un análisis comparativo con los ahorros de horas de mano de obra y la eficiencia en la producción, genera beneficios en cuanto a costos.

6. SISTEMAS AGV EN EL ENTORNO LOCAL

6.1 DESARROLLO EN UNIVERSIDADES LOCALES

Como punto de partida del estudio de los sistemas AGV en el entorno local, se llevó a cabo un sondeo de las publicaciones afines realizadas en las universidades Colombianas. El resumen de la información encontrada se presenta en la tabla 3.

Tabla 3. Desarrollo de diferentes sistemas AGV en las universidades colombianas.

UNIVERSIDADES	Universidad industrial de Santander	Universidad tecnologica de pereira	Universidad Nacional de Colombia-Bogotá
CARACTERISTICAS	Diseño de un sistema AGV, aplicando los conocimientos de la mecatronica, el prototipo diseñado realiza recorridos en línea recta, haciendo giros de 90° únicamente.	AGV, el cual realiza un proceso de inspección en una celda de manufactura flexible para controlar la calidad de los productos.	Automatización de un proceso productivo en la industria farmacéutica. El AGV recorre toda una repisa sensando cada producto e identificándolo.
ALCANCE	Diseño del prototipo. Programación específica del movimiento.	El alcance del proyecto es investigativo y semi-instructivo, se basa en simulación CAD / CAM para el análisis de resultados.	Desarrollo teórico e investigativo, profundización en el control a utilizar e investigación del sector industrial farmacéutico en Colombia.
CALCULOS	Cinemática y dinámica, electrónica y control	Estadística, Física Básica, lógica de control.	NO SE HICIERON

Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar según la Tabla 3 que el estudio de estos sistemas en Colombia ha sido incipiente. No se encuentra más información acerca de desarrollos en este tema aparte de los mencionados.

6.2 AGV'S EN LA INDUSTRIA LOCAL

Con el fin de investigar el estado de los sistemas AGV en la industria antioqueña, se diseñó una encuesta virtual para ser enviada a las empresas y recolectar información acerca del conocimiento de estos sistemas, el interés por ellos y las características de la logística interna implementada actualmente(ver anexo F). La encuesta, al ser enviada a algunas de la empresas más importantes del sector industrial antioqueño fue respondida por 28 de ellas; Estas fueron las siguientes: Sumicol, Yamaha, Peldar, Agrosan, Purina, Contegral, Fabrica de licores de Antioquia, Almacenes Éxito, Powerseal, Coltabaco, Setas Colombianas, Colcafe, Cartón de Colombia, Coltejer, Friko, Silicaucho, Pintuco, Colpisa, Postobon, CocaCola, Sofasa, Euroceramica, Corona, Estra, Procter and Gamble, Concreto, Colauto.

De los resultados arrojados por las empresas mencionadas anteriormente (ver anexo F) se hace el análisis de las respuestas correspondiente a cada una de las preguntas formuladas. Las afirmaciones que se pueden hacer a partir de los resultados son:

- Muy pocas empresas conocen información de vehículos AGV, haciendo necesario dar a conocer más este tipo de tecnología.
- La logística juega un papel fundamental en la producción, encontrando que la mayoría de las empresas utilizan más de tres personas para transporte de materiales haciendo recorridos repetitivos.
- Un 50% de la muestra de las industrias antioqueñas realizan cambios constantes en los procesos y la ubicación de la maquinaria, demandando sistemas de manufactura flexible.
- El método de transporte de materiales más común en las empresas es el montacargas, por encima de las bandas transportadoras y vagones enganchados.

- Los turnos de trabajo en el área de logística son comúnmente de ocho horas, aunque hay varios casos que se extienden hasta las diez horas.
- La mayoría de empresas hacen el transporte de materiales por terrenos planos, lo que facilita la implementación de estos sistemas.
- La realización de obras civiles es aceptada por las industrias con el fin de implementar un sistema AGV.
- Hay aceptación de los sistemas AGV fabricados a nivel nacional.
- Las cargas que son transportadas, frecuentemente sobrepasan los 500 Kg.
- Los materiales transportados son en su mayoría materia prima y producto terminado.

El análisis demuestra que las empresas antioqueñas están interesadas en conocer más sobre el tema y en estudiar una posible implementación de estos sistemas en sus plantas, siempre y cuando se evidencie el costo-beneficio y se cuente con un buen respaldo y asesoría. Esto hace interesante plantear la creación de una empresa especializada que desarrolle sistemas de AGV para aplicaciones específicas, ya que actualmente no se presenta este servicio en el sector.

7. DISEÑO CONCEPTUAL

Una vez realizada la definición del problema, el usuario, el contexto, las características del problema y el estado del arte, se procede a definir las especificaciones de desarrollo del producto (PDS) como base para el diseño conceptual de acuerdo a las necesidades del cliente y los requerimientos propios. En ellas se definen todas las características que debe cumplir el vehículo con sus respectivas métricas y objetivos cuantificables. El diseño conceptual tiene como fin partir de las necesidades descritas en el PDS y llegar a soluciones conceptuales. Se comienza haciendo un análisis funcional del sistema donde se definen las funciones que éste debe llevar a cabo para cumplir las necesidades, seguido de una búsqueda de soluciones para cada una de las funciones, una evaluación de dichas soluciones para la definición de posibles configuraciones y finalmente una evaluación de alternativas para seleccionar la más óptima.

7.1 PDS

Con el fin de establecer objetivos medibles del producto se recopilan las necesidades y deseos de: el cliente, el fabricante (propias) y las exigidas por las regulaciones y reglamentaciones, interpretándolas y asignándolas a un parámetro tangible. El PDS (*Product Design Specifications*) lista las especificaciones objetivo del producto que se definieron (Tabla 4).

Tabla 4. Especificaciones de diseño del producto.

CLASIFICACION	REQUERIMIENTO	ESPECIFICACION	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR	IMPORTANCIA (0-4)	ORIGEN	DEMANDA O DESEO
Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Materiales y diseño resistente	Resistencia Tracción	Pascales	> 300 M	4	Cliente	Demanda
Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Precio moderado	Costo	Pesos	< 15 M	4	Cliente	Demanda
Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Autonomía de un turno	Tiempo de funcionamiento	Horas	>8	4	Cliente	Demanda
Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Que tenga placa informativa (<i>nameplate data</i>)	Cantidad	Unidades	1	4	Regulaciones	Demanda
Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Partes eléctricas y de control industriales	N/A	N/A	N/A	4	Cliente	Demanda
Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Fácil funcionamiento	Tiempo de puesta en marcha	Horas	< 1	3	Cliente	Deseo
Desempeño o funcionamiento	Buen material de agarre de llantas al pavimento	Fricción	Coefficiente de Fricción	> 0,6	4	Regulaciones	Demanda
Desempeño o funcionamiento	Buen sistema de frenado	Desaceleración	m/s ²	0,4<x<1,0	4	Regulaciones	Demanda
Desempeño o funcionamiento	Que siga el trayecto establecido	Desviación	mm	< 75	4	Regulaciones	Demanda
Desempeño o funcionamiento	Que el trazado del circuito no requiera obra civil (Flexible)	# De obras civiles	Unidades	0	4	Cliente	Demanda
Desempeño o funcionamiento	Fuerza de jalado	Fuerza	Newton	> 200	4	Cliente	Demanda
Desempeño o funcionamiento	Instrucciones de fácil entendimiento	Tiempo	Horas	<1	4	Cliente	Deseo

CLASIFICACION	REQUERIMIENTO	ESPECIFICACION	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR	IMPORTANCIA (0-4)	ORIGEN	DEMANDA O DESEO
Desempeño o funcionamiento	Que cumpla con el trayecto en un tiempo determinado	Velocidad	m/s	0,5<x<1,0	4	Cliente	Demanda
Desempeño o funcionamiento	Estable al girar	Radio de giro a velocidad máxima	m	<3	3	Regulaciones	Demanda
Desempeño o funcionamiento	Silencioso	Ruido	dB	< 60	3	Propia	Demanda
Desempeño o funcionamiento	Eficiente energéticamente	Eficiencia energética	%	> 80	3	Propia	Deseo
Proceso de manufactura	Ensamble sencillo	Tiempo de ensamble	Horas	< 2	3	Propia	Deseo
Proceso de manufactura	Alto número de piezas estándar	Porcentaje de piezas estándar	%	> 70	3	Propia	Deseo
Proceso de manufactura	Procesos de manufactura asequibles en la ciudad	Porcentaje de procesos asequibles	%	100	3	Propia	Demanda
Proceso de manufactura	Piezas de manufactura asequible en la ciudad	Porcentaje numero de piezas asequible	%	> 90	2	Propia	Deseo
Seguridad	Que tenga señal de prendido	Cantidad	Unidades	1	4	Regulaciones	Demanda
Seguridad	Que tenga señal de reversa	Cantidad	Unidades	1	4	Regulaciones	Demanda
Seguridad	Que tenga señales de mal funcionamiento (guiado, velocidad, fallas control)	N/A	N/A	N/A	4	Regulaciones	Demanda
Seguridad	Que tenga un interruptor de desconexión	Cantidad	Unidades	1	4	Regulaciones	Demanda
Seguridad	Que tenga freno de emergencia, parqueo y servicio	Cantidad	Unidades	1 C/U	4	Regulaciones	Demanda
Seguridad	Confiable y seguro	N/A	N/A	N/A	4	Cliente	Demanda
Seguridad	Previsión de casos de	N/A	N/A	N/A	4	Cliente	Demanda

CLASIFICACION	REQUERIMIENTO	ESPECIFICACION	UNIDAD DE MEDIDA	VALOR	IMPORTANCIA (0-4)	ORIGEN	DEMANDA O DESEO
	incidentes						
Seguridad	Que tenga Guardas de seguridad	Cantidad	# elementos móviles	=	4	Regulaciones	Demanda
Seguridad	Que tenga todas las señales industriales	Cantidad	# De señales según Norma	=	4	Regulaciones	Demanda
Seguridad	Que tenga Bumper de emergencia	Fuerza	Newton	< 134	3	Regulaciones	Deseo
Seguridad	Asequibilidad a botones de stop	Botones Distribuidos	Número	> 3	3	Propia	Deseo
Seguridad	Visible fácilmente	Longitud de visibilización	Metro	> 5	3	Propia	Demanda
Seguridad y Mantenimiento	Manual de operación y mantenimiento	Cantidad	Unidades	1	4	Regulaciones	Demanda
Mantenimiento	Mantenimiento preventivo	Tiempo de Mtto/ Mes	Horas	< 1	4	Propia	Deseo
Tiempo para desarrollar el proyecto o cronograma	Entregable en el tiempo propuesto en el tiempo propuesto	Tiempo	semanas	< 16	4	Cliente	Demanda
Peso	Liviano	Peso	Kilogramos	< 150	3	Propia	Demanda
Tamaño	Volumen moderado	Volumen	m ³	< 0.5	2	Propia	Deseo
Estética	Apariencia agradable	N/A	N/A	N/A	1	Propia	Deseo

Fuente: Elaboración propia.

7.2 CAJA NEGRA

Como primera etapa del diseño conceptual y para identificar la función principal del producto así como sus flujos de entrada y de salida (materia, energía e información) se realiza la caja negra (Ilustración 16).

Ilustración 16. Caja negra



Fuente: Elaboración propia.

En ésta se ilustra la función principal que cumple el sistema AGV y cuáles son los flujos que debe transformar para lograr este objetivo. Dichos flujos son:

Entrada de materia: el stricker es el elemento a transportar por el AGV, los demás objetos del contexto con los cuales interactúa el sistema no son transformados por éste y por lo tanto no constituyen un flujo de materia.

Entradas de información: se consideran como flujos de información todas las señales que debe detectar el vehículo y que generan una reacción determinada. Para este tipo de flujos se tiene: el programa de control que es la secuencia de instrucciones que rigen el comportamiento del carro, la guía del circuito que es la forma de navegación utilizada por el vehículo, los obstáculos que son todos los elementos que se pueden interponer en el circuito del AGV (personas, vehículos, objetos en general), on/off (señal de prendido y apagado), marcas de control que son el código que determina en qué parte del circuito se encuentra el AGV y por consiguiente las paradas y acciones del sistema.

Entrada de energía: Energía eléctrica es el tipo de energía utilizada para la propulsión del vehículo.

Todos estos flujos de entrada ingresan al sistema y son procesados por las distintas estructuras funcionales que interactúan entre si para dar como resultado unas salidas. Éstas son:

Salida de materia: stricker transportado (función principal).

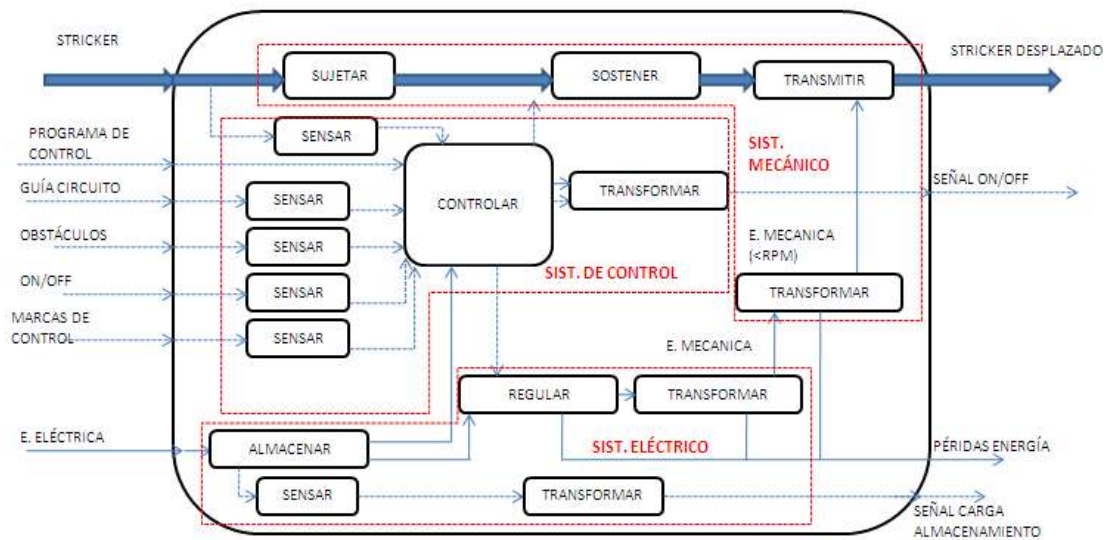
Salida de información: señal on/off, señal de carga de almacenamiento que indica el nivel de carga de los acumuladores de energía.

Salida de Energía: pérdidas de energía asociadas a efectos no deseados como vibración, calor, etc.

7.3 ESTRUCTURA FUNCIONAL

A partir de la caja negra y teniendo en cuenta las especificaciones se definen las funciones internas (sub-funciones) y las relaciones entre éstas, expresadas en el marco del análisis funcional que se observa en la ilustración 17.

Ilustración 17. Estructura funcional.



Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que el sistema contiene tres sub sistemas, éstos son:

- Eléctrico: Es el encargado principalmente de almacenar, distribuir y transformar la energía eléctrica.
- Mecánico: Éste se encarga de transmitir y transformar la energía mecánica y a su vez de dar soporte a todos los elementos del vehículo.
- Control: Es el encargado de recibir e interpretar todas las señales que ingresan al sistema, para así generar una serie de instrucciones que determinan el comportamiento del vehículo. Este sistema controla el movimiento del vehículo por medio de un sistema de guiado diferencial (numeral 5.4.1), teniendo en cuenta las funciones de arranque, giro y frenado.

7.4 MATRIZ MORFOLÓGICA

Para cada sub-función definida en la estructura funcional, se realiza una búsqueda de soluciones en la que se definen posibles portadores de función que se presentan en la matriz morfológica (Ilustración 18). Estos portadores fueron definidos mediante el uso de varios métodos: brainstorming (UCH-RRHH, 2002), búsqueda de catálogos, búsqueda web, sinéctica (Zarandona, 2009) y asesorías de expertos en el tema, como las brindadas por las empresas de automatización Comtitronic y Automatic Solutions de la ciudad de Medellín, Colombia.

Ilustración 18. Matriz morfológica.

FUNCIONES	PORTADORES DE FUNCIÓN				
	1	2	3	4	5
SENSAR GUÍA CIRCUITO	 GUIADO ÓPTICO	 GUIADO MAGNÉTICO	 GPS	 GIROSCOPIO	 GUIADO LASER
SENSAR OBSTÁCULOS	 SENSOR ÓPTICO	 SENSOR CAPACITIVO	 SENSOR ULTRASONIDO	 MICROSUICHE	 SENSOR LASER
SENSAR MARCAS DE CONTROL	 SENSOR ÓPTICO	 SENSOR MAGNÉTICO	 SENSOR ULTRASONIDO	 MICROSUICHE	 SENSOR LASER
SUJETAR STRICKER	 ENGANCHE REMOLQUE	 CARGA	 LEVANTE		
SENSAR STRICKER	 SENSOR ÓPTICO	 SENSOR MAGNÉTICO	 SENSOR ULTRASONIDO	 MICROSUICHE	 SENSOR LASER
TRANSFORMAR E. ELÉCTRICA EN E. MECÁNICA	 MOTOR DC	 MOTOR PASO A PASO	 SERVOMOTOR	 MOTOR AC	
TRANSFORMAR E. MECÁNICA (<RPM)	 CAJA REDUCTORA	 SISTEMA DE POLEAS	 SISTEMA DE CADENA		
ALMACENAR E. ELÉCTRICA	 BATERÍA PLOMO	 BATERÍA SECA	 BATERÍA LITIO-ION	 BATERÍA NI-CD	 BATERÍA ALCALINA
CONTROLAR	 MICROCONTROLADOR	 PLC	 COMPUTADOR A BORDO		
SENSAR E. MECÁNICA	 ENCODER	 TACOMETRO LASER			
SOPORTAR SISTEMA	 TUBERÍA CUADRADA	 TUBERÍA REDONDA	 TUBERÍA MODULAR		
TRANSMITIR E. MECÁNICA	 RUEDAS	 ORUGA			
SENSAR ON/OFF	 SUICHE	 PULSADORES	 LLAVE		

Fuente: Elaboración propia.

7.5 EVALUACIÓN DE PORTADORES DE FUNCIÓN

Los distintos portadores de función son sometidos a un análisis basado en los parámetros más relevantes de las especificaciones definidas anteriormente (PDS), Se utiliza una evaluación ponderada de alternativas de la metódica VDI 2225 donde los pesos de cada criterio son definidos por los evaluadores de acuerdo a la importancia que se percibe de cada uno de éstos.

Tabla 5. Evaluación de portadores de función.

FUNCIONES	CLASIFICACIÓN PDS	CRITERIO	PONDERACION	RANGO DE CALIFICACION	PORTADOR				
					# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
SENSAR GUÍA CIRCUITO	Desempeño o funcionamiento	*Flexibilidad	70%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	2	4	4	2
		*Costo	30%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	4	2	0	0	0
Calificación total					4	2	2,8	2,8	1,4
SENSAR OBSTACULOS	Desempeño o funcionamiento	Capacidad de medición todo tipo de material	60%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	2	4	2	4
		Costo	40%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	2	4	0	4	0
Calificación total					3,2	2,8	2,4	2,8	2,4
SENSAR MARCAS DE CONTROL	Desempeño o funcionamiento	Conocimiento tecnología por parte de SOFASA S.A	60%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	4	4	2	2
		Costo	40%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	2	4	0	4	0
Calificación total					3,2	4	2,4	2,8	1,2
SUJETAR STRICKER	Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	*Simplicidad de Tecnología	100%	0 -Baja 1-Regular 2-Media 3-Aceptable 4-Alta	4	3	0		
Calificación total					4	3	0		
SENSAR STRICKER	Desempeño o funcionamiento	Conocimiento tecnología por parte de SOFASA S.A	60%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	4	4	2	2
		Costo	40%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	2	4	0	4	0
Calificación total					3,2	4	2,4	2,8	1,2
TRANSFORMAR E. ELÉCTRICA EN E. MECÁNICA	Desempeño o funcionamiento	Costo	70%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	4	0	3	4	
		Facilidad control	30%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	2	2	2	0	
Calificación total					3,4	0,6	2,7	2,8	

FUNCIONES	CLASIFICACIÓN PDS	CRITERIO	PONDERACION	RANGO DE CALIFICACION	PORTADOR				
					# 1	# 2	# 3	# 4	# 5
TRANSFORMAR E. MECÁNICA (<RPM)	Desempeño o funcionamiento	Confiabilidad	70%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	4	0	2		
		Costo	30%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	2	2	2		
Calificación total					3,4	0,6	2		
ALMACENAR E. ELÉCTRICA	Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida/Mantenimiento	Costo	40%	(0-1) > 1 USD/ W.h (1-2) < 1 USD/W.h (2-3) < 0.5USD/W.h (3-4) < 0.2USD/W.h	4	4	2	1	4
		Densidad Energética	20%	(0-1) < 40 W.h/Kg (1-2) < 80 W.h/Kg (2-3) < 120 W.h/Kg (3-4) > 120 W.h/Kg	1	1	4	2	3
		*Complejidad del arreglo de baterías	25%	0 - Alto 2-Medio 4 - Bajo	4	4	4	4	0
		MTTO	15%	0 - Requiere 4 - Libre	0	4	4	0	4
Calificación total					2,8	3,4	3,2	1,8	2,8
CONTROLAR	Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Costo	50%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	2	2		
		*Confiabilidad	50%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	0	4	4		
Calificación total					2	3	3		
SENSAR E.MECANICA	Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Confiabilidad	50%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	4			
		Fácil Uso para control	30%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	0			
		Costo	20%	0 -> \$ 500.000 2-< \$500.000 4 -< \$200.000	2	4			
Calificación total					3,6	2,8			
SOPORTAR SISTEMA	*Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida/Proceso de manufactura	Resistencia	50%	0 - < 100 Mpa 2 - < 200 Mpa 4 - > 300 Mpa	4	4	4		
		Costo	25%	0 - > 10.000 \$/mt 2 - > 5.000 \$/mt 4 - < 5.000 \$/mt	4	4	0		
		Fácil manufactura	25%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	2	4		
Calificación total					4	3,5	3		
TRANSMITIR E. MECANICA	Desempeño o funcionamiento/Proceso de manufactura	Estabilidad	80%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	4			
		*Fácil recambio	20%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	4	0			
Calificación total					4	3,2			
SENSAR ON/OFF	Seguridad	Ergonomía y Seguridad	100%	0 - Baja 2-Media 4 - Alta	2	4	2		
Calificación total					2	4	2		

Fuente: Elaboración propia.

Se listan a continuación comentarios de algunos parámetros de evaluación:

- **SENSAR GUÍA CIRCUITO:** Se toma por flexibilidad, la posibilidad de hacer cambios en el trayecto sin necesidad de hacer obras civiles o adquisición de equipos. Los valores de costo fueron tomados cualitativamente ya que no se puede saber con certeza el precio de uso de algunas tecnologías que, además de equipos, necesitan obras civiles.
- **SUJETAR STRICKER:** El único factor considerado en este portador fue la simplicidad y conocimiento de la tecnología, es decir, entre los sistemas propuestos cuáles requerían menos actuadores, dispositivos y controles para su buen funcionamiento.
- **ALMACENAR ENERGIA ELÉCTRICA:** se toma como la complejidad en el arreglo de baterías, el número de celdas equivalente que se necesita de cada tipo de baterías para un mismo voltaje. Además, se considera si los acumuladores requieren un control de almacenamiento adicional.
- **CONTROLAR:** El factor más tenido en cuenta es la confiabilidad, es decir, la capacidad de estos dispositivos de no ver afectado su rendimiento por ruido electromagnético.
- **SOPORTAR SISTEMA:** Se toma como referencia tubería estructural de 1" calibre 2.5 mm ASTM G.C 500 y una análoga en la modular.
- **TRANSMITIR ENERGÍA MECÁNICA:** Fácil recambio se refiere a la facilidad de encontrar este elemento en el mercado en el momento que requiera ser cambiado.

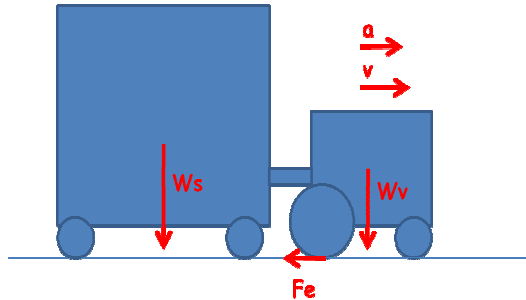
7.6 CALCULOS PRELIMINARES

Para dimensionar en forma general el sistema se realizan cálculos con el fin de determinar las características de los elementos principales del AGV. Son denominados elementos principales aquellos que tienen mayor influencia en la forma final y funcionamiento del vehículo. Para este caso son identificados como portadores primarios: Motor, Reductor, Controlador y Baterías.

7.6.1 Motores.

Para calcular la potencia necesaria del sistema motriz se parte de la necesidad de mover el stricker estando cargado completamente según se muestra en la ilustración 19.

Ilustración 19. Diagrama de cuerpo libre.



Fuente: Elaboración propia.

Utilizando la ecuación de movimiento y despreciando las fuerzas no conservativas:

$$\Sigma F_x = M * a_x$$

$$F_e = (M_s + M_v) * a_x$$

Donde:

ΣF_x : Sumatoria de fuerzas en el eje x

M : Masa

a_x : Aceleración en el eje x

F_e : Fuerza de empuje

M_s : Masa stricker

M_v : Masa vehículo

El stricker cargado tiene una masa (Ms) aproximada de 100kg, Se supone la masa del vehículo (Mv) de 100Kg y se define que la aceleración debe ser de 1m/s^2 (de modo que llegue a la velocidad deseada de 1m/s en un segundo). Se procede entonces a calcular la fuerza de empuje necesaria.

$$F_e = (100\text{kg} + 100\text{kg}) * 1\text{m/s}^2$$

$$F_e = 200\text{N}$$

Teniendo en cuenta la aceleración y la máxima velocidad, según el PDS (1m/s), se calcula la potencia mecánica necesaria.

$$P = W/t$$

$$P = F_e * d/t$$

$$d = v_0 * t + \frac{1}{2} * a_x * t^2$$

$$t = \frac{v_f - v_0}{a_x} = \frac{1 - 0}{1} = 1\text{s}$$

$$d = 0 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1\text{s} + \frac{1}{2} * 1 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * (1\text{s})^2 = 0,5\text{m}$$

$$P = 200\text{N} * 0,5\text{m}/1\text{s}$$

$$P = 100\text{W}$$

$$P_{\text{req}} = \frac{P}{\eta}$$

$$P_{\text{req}} = \frac{100}{0,8}$$

$$P_{\text{req}} = 125\text{W}$$

Donde:

P: Potencia

P_{req}: Potencia Requerida

η: Eficiencia general

V_x: Velocidad en el eje x

E: Energía

w: Trabajo

t: Tiempo

d: desplazamiento

V₀: Velocidad inicial

V_f: Velocidad final

Se define entonces que al ser direccionado por un motor en cada lado y dado el caso de acelerar con una sola rueda, ésta sola debe entregar la potencia necesaria, asumiendo una eficiencia del motor y el sistema de transmisión del 80% se necesitan entonces dos motores de 125W cada uno.

7.6.2 Baterías.

Para calcular el consumo de energía del vehículo durante el turno de trabajo (8 horas de autonomía) se estiman los tiempos de cada etapa de ciclo de trabajo (Tabla 6). El tiempo de recorrido en las etapas 1, 3, 5 y 7 es calculado con una velocidad promedio estimada de 0,6 m/s (según el PDS). Para las etapas 2, 4, 6 y 8 en las que se realiza la acción de liberar o sujetar el Stricker se suponen los tiempos de operación.

Tabla 6. Tiempos de funciones en circuito.

Etap	Función	distancia (m)	tiempo (s)
1	Llevar st. Lleno	8	12,7
2	Entregar st. Lleno	0	2,0
3	Ir por st. Vacío	16	25,5
4	Sujetar st. Vacío	0	5,0
5	Llevar st. Vacío	14	22,3
6	Entregar st. Vacío	0	2,0
7	Ir por st. Lleno	11	17,5
8	Sujetar st. Lleno	0	5,0
t total (s)			92,0
t total (Min)			1,5

Fuente: Elaboración propia.

El vehículo tarda 1,5 minutos en realizar el ciclo, al ser este tiempo menor al definido para abastecimiento de stricker (3 minutos), éste deberá permanecer en espera 1,5 minutos para cumplir el tiempo de ciclo. Conociendo así que durante el turno de 8 horas tendrá 4 horas de funcionamiento.

Partiendo del consumo de potencia de los motores y los tiempos de ciclo se dimensiona el almacenamiento de energía de acuerdo al caso más crítico, consumiendo 250W (los dos motores) durante las 4 horas operativas del turno de trabajo.

$$E = P * t$$

$$E = 250W * (4 * 3600)s$$

$$E = 3,6Mj$$

Partiendo de baterías comerciales de 12V y capacidad media de 24 Ah (amperios hora) se calcula la energía (en Joules) que pueden almacenar y posteriormente el número de baterías que se deben utilizar.

$$E = P * t$$

$$E = V * I * t$$

$$E = 12V * 24A * 3600s$$

$$E = 1,04 \text{ Mj}$$

$$N_{\text{Bat}} = \frac{3,6\text{Mj}}{1,04\text{Mj}} = 3,46$$

$$N_{\text{Bat req}} = N_{\text{Bat}} * fs$$

$$N_{\text{Bat req}} = 3,46 * 1,6 = 5,53 \approx 6 \text{ Bat}$$

Donde:

V: Diferencia de potencial eléctrico

I: Corriente eléctrica

N_{Bat}: Número de baterías teórico

t: Tiempo

N_{Bat req}: Número de baterías requerido

fs: Factor de seguridad

Teniendo en cuenta los arranques de los motores en los cuales el consumo de energía aumenta y su eficiencia, se especifica un factor de seguridad de 1,6 para el cálculo del número de baterías garantizando así la autonomía del vehículo durante todo su ciclo operativo.

7.6.3 Reductores y ruedas.

Se supone para el cálculo un diámetro de rueda de 20 cm ya que es un diámetro común en el mercado (8") para los vehículos de carga industrial. Se calculan las

capacidades necesarias de torque y factor de reducción para la reducción de velocidad.

$$T = F * r$$

$$T = 200 \text{ N} * 0,1\text{m}$$

$$T = 20\text{N.m}$$

Donde:

T: Torque necesario del motor

F: Fuerza de empuje

r: Radio de la rueda

La velocidad de giro de la rueda debe ser:

$$\omega = \frac{v}{r}$$

$$\omega = \frac{\frac{1\text{m}}{\text{s}}}{0,1\text{m}}$$

$$\omega = 10 \frac{\text{rad}}{\text{s}} = 95,5 \text{ rpm}$$

Donde:

ω : Velocidad angular de la rueda

v: Velocidad del vehículo

r: Radio de la rueda

Asumiendo que se va a usar un motor convencional (que funciona a 1800 RPM) se define la necesidad de un factor de reducción de 18:1 para lograr una velocidad de 1 m/s (máxima según el PDS).

7.6.4 Controlador.

Con el fin de dimensionar el controlador se listan las variables de entrada y salida del sistema en la Tabla 7.

Tabla 7. Señales de entrada y salida del controlador.

ENTRADAS		
#	DESCRIPCIÓN	TIPO
1	S. LINEA DER.	DIGITAL
2	S. LINEA IZQ.	DIGITAL
3	S. REV DER	DIGITAL
4	S. REV IZQ	DIGITAL
5	S MARCAS 1	DIGITAL
6	S MARCAS 2	DIGITAL
7	S MARCAS 3	DIGITAL
8	S. OBS FRENTE	DIGITAL
9	S. OBS DER	DIGITAL
10	S. OBS IZQ	DIGITAL
11	S. OBS REV	DIGITAL
12	S. ENGANCHE	ANÁLOGA
13	S. BUMPER 1	DIGITAL
14	S. BUMPER 2	DIGITAL
15	STOP	DIGITAL
16	START	DIGITAL

SALIDAS		
#	DESCRIPCIÓN	TIPO
1	MDER	ANÁLOGA
2	MIZQ	ANÁLOGA
3	ENGANCHAR	DIGITAL
4	SOLTAR	DIGITAL
5	SEÑAL ENCENDIDO	DIGITAL
6	SEÑAL ADELANTE	DIGITAL
7	SEÑAL ATRÁS	DIGITAL
8	SEÑAL EXTRAVIADO	DIGITAL
9	SEÑAL OBSTÁCULO	DIGITAL
10	SEÑAL COLISIÓN	DIGITAL

Fuente: Elaboración propia.

Se encuentra que el controlador debe tener como mínimo 1 entrada análoga, 15 digitales, 2 salidas análogas y 8 digitales.

7.7 RUTAS FACTIBLES

Para configurar rutas factibles entre los distintos portadores, se descartaron todos aquellos portadores cuya calificación total en la evaluación ponderada (ver tabla 5) fuese menor de 3, y posteriormente se establecieron tres configuraciones factibles teniendo en cuenta las dimensiones de componentes de acuerdo a los cálculos anteriores.

Las rutas fueron configuradas con base en tres criterios específicos:

Compatibilidad: todos los componentes de cada ruta son compatibles entre sí.



























Funcionalidad: la interacción entre todos los portadores de función debe concluir en la función principal del sistema.

Variedad: Cada configuración presenta una manera alterna o distinta de lograr el objetivo principal del sistema.

Para lograr una concepción gráfica de las distintas propuestas, éstas fueron dibujadas y posteriormente modeladas. Cabe anotar que estas representaciones son conceptuales por lo que no se representan elementos secundarios como sensores, uniones, dispositivos de seguridad, guardas exteriores. Sólo son ilustrados los elementos principales y su distribución espacial que a su vez determina la forma general del sistema.

El resultado se presenta en la ilustración 20.

Ilustración 20. Selección de rutas factibles.

FUNCIONES	PORTADORES DE FUNCIÓN				
	1	2	3	4	5
SENSAR GUÍA CIRCUITO	 GUIADO ÓPTICO				
SENSAR OBSTÁCULOS	 SENSOR ÓPTICO				
SENSAR MARCAS DE CONTROL	 SENSOR ÓPTICO	 SENSOR MAGNÉTICO			
SUJETAR STRICKER	 ENGANCHE REMOLQUE	 CARGA	 LEVANTE		
SENSAR STRICKER	 SENSOR ÓPTICO	 SENSOR MAGNÉTICO			
TRANSFORMAR E. ELÉCTRICA EN E. MECÁNICA	 MOTOR DC	 SERVOMOTOR			
TRANSFORMAR E. MECÁNICA (<RPM)	 CAJA REDUCTORA				
ALMACENAR E. ELÉCTRICA		 BATERÍA SECA	 BATERÍA LITIO-ION		
CONTROLAR		 PLC	 COMPUTADOR A BORDO		
SENSAR E. MECÁNICA	 ENCODER				
SOPORTAR SISTEMA	 TUBERÍA CUADRADA	 TUBERÍA REDONDA	 TUBERÍA MODULAR		
TRANSMITIR E. MECÁNICA	 RUEDAS	 ORUGA			
SENSAR ON/OFF		 PULSADORES			
OPCIONES	 CONFIGURACION 1	 CONFIGURACION 2	 CONFIGURACION 3		

Fuente: Elaboración propia.

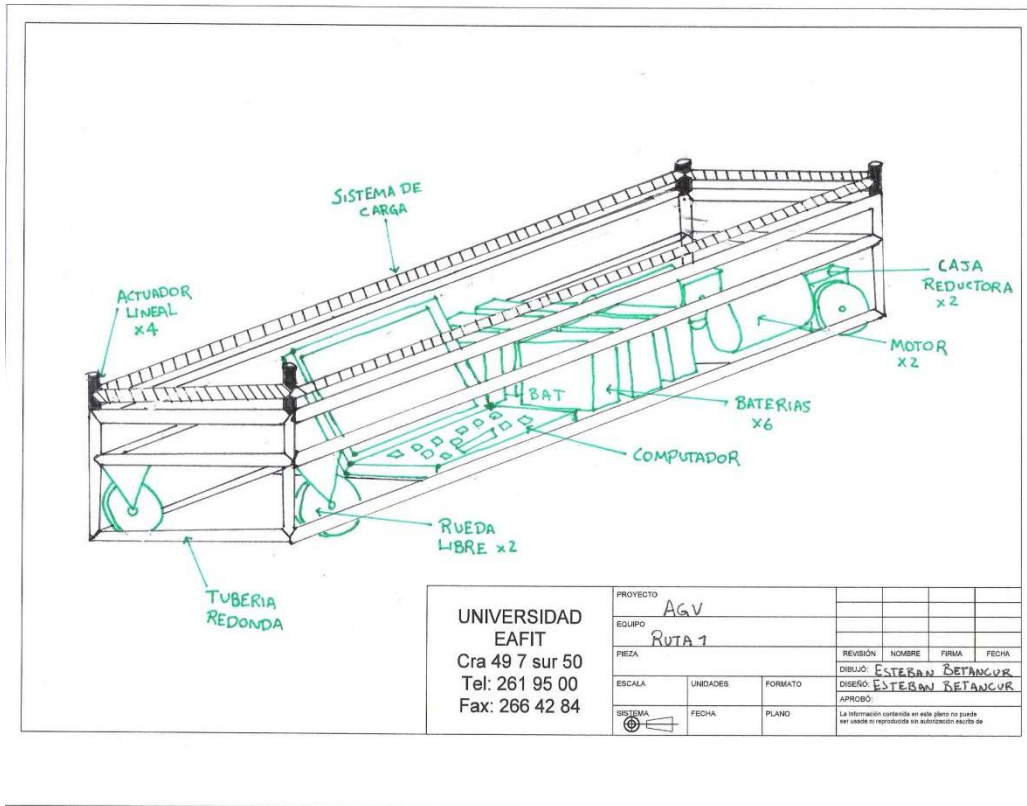
7.7.1 Bocetos.

Las configuraciones fueron plasmadas gráficamente a mano alzada para identificar la distribución espacial de los componentes principales en cada una de las rutas propuestas.

RUTA 1:

Esta propuesta contempla un sistema de carga de levante, por lo que sus dimensiones generales son proporcionales a las que se requieren para poder encajar debajo del stricker y levantarlo en su totalidad, el sistema de carga consiste en una cama de lámina que por medio de la acción de cuatro actuadores lineales produce el levantamiento del stricker, tiene dos ruedas delanteras giratorias y dos traseras fijas de tracción. Posee dos servomotores acoplados horizontalmente a los reductores, un sistema de almacenamiento de energía de baterías de litio y un sistema de control por computador (Ver ilustración 21).

Ilustración 21. Boceto de configuración 1.

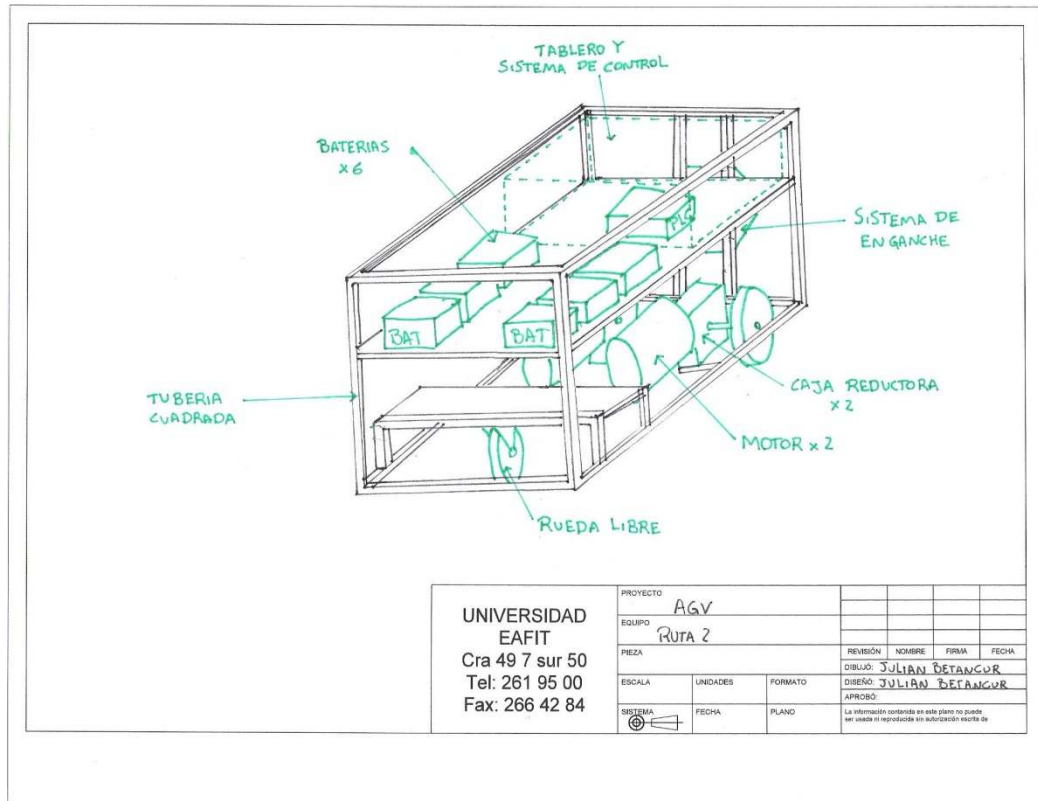


Fuente: Elaboración propia.

RUTA 2:

Las dimensiones generales del vehículo son determinadas por la distribución espacial de todos sus componentes. El prototipo tiene dos niveles, primer nivel de potencia y el segundo de almacenamiento de energía y control, este sistema tiene una rueda delantera giratoria y dos traseras fijas de tracción, posee dos motores acoplados horizontalmente a los reductores, un sistema de almacenamiento de energía de baterías secas y un sistema de control por medio de un PLC (Ver ilustración 22).

Ilustración 22. Boceto de configuración 2.

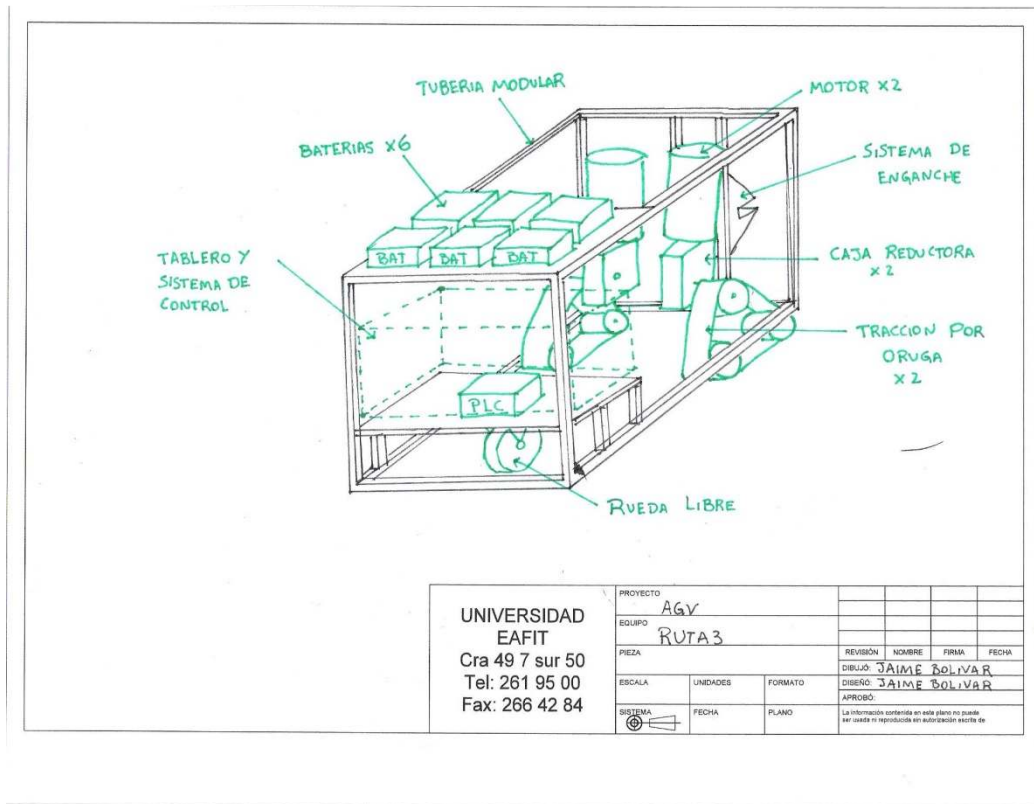


Fuente: Elaboración propia.

RUTA 3:

Las dimensiones generales del vehículo son determinadas por la distribución espacial de todos sus componentes, este sistema tiene una rueda delantera giratoria y un sistema de tracción por orugas en la parte trasera, posee dos motores acoplados verticalmente a los reductores un sistema de almacenamiento de energía de baterías de litio y un sistema de control por medio de un PLC (Ver ilustración 23).

Ilustración 23. Boceto de configuración 3.



Fuente: Elaboración propia.

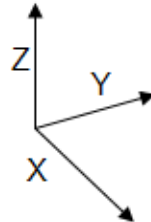
7.7.2 Modelación.

La modelación de las propuestas se realizó con base en las ideas plasmadas en los bocetos. Se determinaron las propiedades físicas generales de los elementos principales que componen cada ruta, realizando una búsqueda web de componentes afines a los parámetros determinados en los cálculos previos. Esto con el fin de establecer las características principales de cada configuración (peso, volumen, centro de gravedad). La modelación fue realizada en el programa CAD ProEngineer Wildfire 5.0.

El cálculo del centro de gravedad de todas las configuraciones se realiza determinando un sistema coordenado de referencia en el extremo posterior,

izquierdo e inferior de cada estructura, para el sentido de los ejes coordenados se utiliza la siguiente convención:

Ilustración 24. Convención de ejes coordenados.



- Ruta 1.

Ilustración 25. Modelación y dimensiones generales de configuración 1.

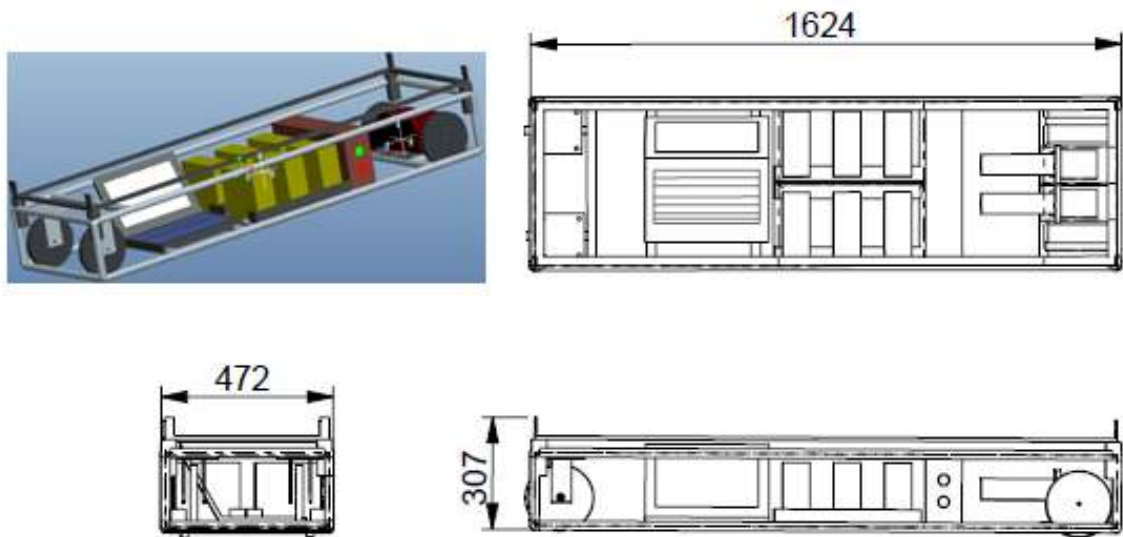


Tabla 8. Propiedades de configuración 1.

VOLUMEN [m3]	0.144
PESO [KG]	71,9
CENTRO DE GRAVEDAD [mm]	739.3 X 234.7 Y 120 Z

- Ruta 2.

Ilustración 26. Modelación y dimensiones generales de configuración 2.

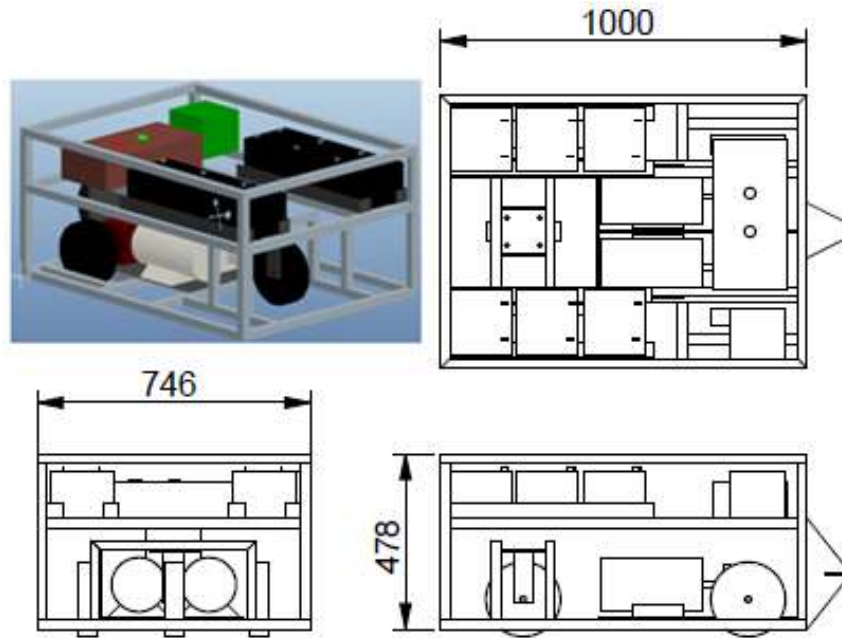


Tabla 9. Propiedades de configuración 2.

VOLUMEN [m3]	0.3567
PESO [KG]	118,7
CENTRO DE GRAVEDAD [mm]	497.8 X 372.4 Y 224.2 Z

- Ruta 3.

Ilustración 27. Modelación y dimensiones generales de configuración 3.

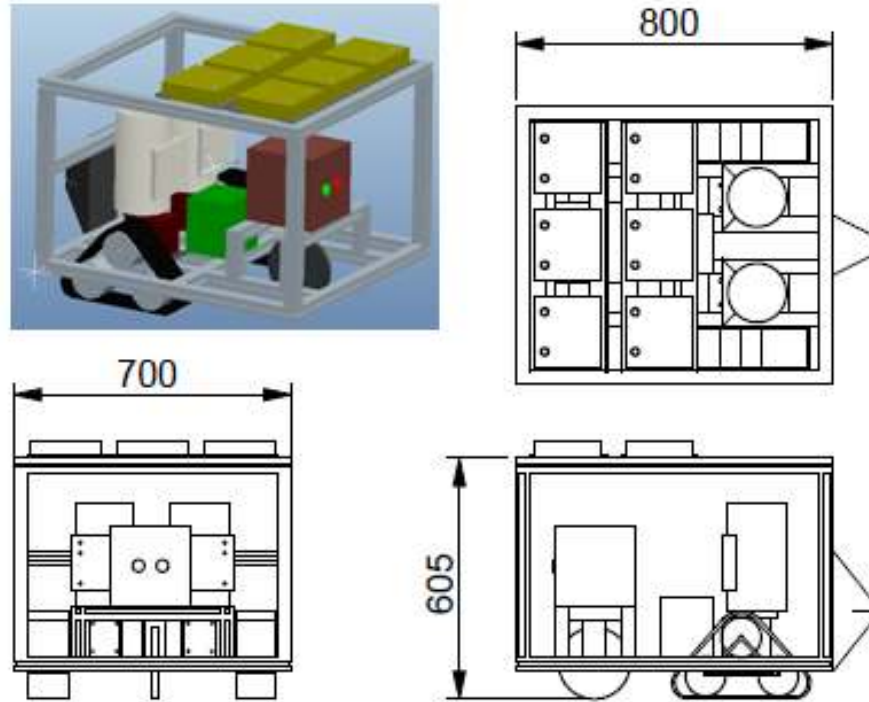


Tabla 10. Propiedades de configuración 3.

VOLUMEN [m3]	0.295
PESO [KG]	104
CENTRO DE GRAVEDAD [mm]	337.2 X 349.5 Y 253.4 Z

7.7.3 Evaluación y selección.

Las tres rutas escogidas son sometidas a un análisis basado en los parámetros más relevantes de las especificaciones definidas anteriormente (PDS). Se utiliza una evaluación ponderada de alternativas propuesta por la norma VDI 2225 (ver Tabla 11).

Tabla 11. Calificación de configuraciones.

CLASIFICACIÓN PDS	CRITERIO	PONDERACION	RANGO DE CALIFICACION	CONFIGURACION		
				# 1	# 2	# 3
Calidad, confiabilidad, durabilidad o ciclo de vida	Costo	30%	0- Muy Alto 1- Alto 2- Moderado 3- Bajo 4- Muy Bajo	1	3	2
Proceso de manufactura	Piezas y manufactura asequibles	20%	0- Muy complicada 1- Complicada 2- Apenas Tolerable 3- Sencilla 4- Muy Sencilla	1	3	2
Desempeño o funcionamiento	Simplicidad de funcionamiento	15%	0- Muy complicada 1- Complicada 2- Apenas Tolerable 3- Sencilla 4- Muy Sencilla	2	3	3
Desempeño o funcionamiento	Estabilidad dinámica	10%	0- Insatisfactoria 1- Apenas tolerable 2- Buena 3- Adecuada 4- Muy buena	2	3	3
Tamaño	Volumen	10%	0- > 0.5m ³ 1- > 0.4m ³ 2- > 0,3m ³ 3- > 0,2m ³ 4- < 0,2 m ³	4	2	3
Peso	Masa	10%	0- > 120 Kg 2- < 120 Kg 4- < 80 Kg	4	2	2
Estética	Apariencia agradable	5%	0- Insatisfactoria 1- Apenas tolerable 2- Buena 3- Adecuada 4- Muy buena	1	2	3
TOTAL				1.85	2.75	2.4

Fuente: Elaboración propia.

Para complementar la descripción de los criterios tenidos en cuenta en la evaluación de las configuraciones, se listan a continuación comentarios de algunos parámetros de evaluación:

- **COSTO:** Los costos fueron determinados con base en búsquedas web y asesorías de expertos. Se compara cualitativamente el precio de las tecnologías utilizadas en cada configuración mas no de componentes en particular.
- **PIEZA Y MANUFACTURA ASEQUIBLE:** para determinar la dificultad de manufactura de cada configuración se tuvieron en cuenta: facilidad de empates de la estructura así como procesos de soldadura y ensamble de componentes.
- **SIMPLICIDAD DE FUNCIONAMIENTO** para estimar este criterio se analizó: el nivel de conocimiento de las tecnologías utilizadas en cada configuración, el control requerido por los elementos de cada ruta y el número de mecanismos utilizados por cada propuesta.
- **ESTABILIDAD DINÁMICA:** este criterio fue evaluado con base en dos parámetros: la distribución equitativa del centro de gravedad en los ejes (X, Y, Z) respecto a un eje coordenado de referencia y la facilidad de girar teniendo en cuenta la forma del vehículo.

De acuerdo al resultado de la evaluación se escoge la ruta con mayor puntaje. En este caso se elige la propuesta número dos con un resultado total de 2.75, en una escala de (0-4), obteniendo un mejor desempeño en los aspectos evaluados respecto a las otras dos propuestas. En relación al costo se puede apreciar que la propuesta contempla el uso de motores DC y baterías secas que reducen notablemente el precio general del sistema respecto a sistemas que usan servomotores y baterías de litio, además su estructura en tubería cuadrada facilita el empate entre elementos, el ensamble y soldadura de platinas y demás elementos de unión. Su sistema de transporte (arrastre) es más sencillo que un transporte de carga ya que requiere menos actuadores y mecanismos para su funcionamiento, además las baterías secas en contraste con las baterías de litio no requieren sistema de gestión de almacenamiento simplificando el control del vehículo en general, por otro lado la ubicación del centro de gravedad y su forma

suponen un buen comportamiento en movimiento y en las curvas, igualmente sus propiedades físicas y estéticas cumplen con los parámetros establecidos en el PDS. Como resultado final de la etapa de diseño conceptual la ruta número dos será la base de todo el diseño detallado posterior a esta etapa.

Se listan las características del prototipo elegido (Tabla 12).

Tabla 12. Características elegidas.

FUNCION	DESCRIPCION
Guiado	Control de velocidad diferencial
Navegación	Ruta fija – Sensor óptico
Gestión de trafico	Control por Sensores
Transferencia de carga	Acople y desacople automático de remolque
Gestión del sistema	Control a bordo

Fuente: Elaboración propia.

8. DISEÑO DE DETALLE

Una vez definidos los portadores defunción y las características conceptuales del vehículo se realiza el diseño detallado de todos sus sistemas y componentes.

8.1 SELECCIÓN DE COMPONENTES PRINCIPALES

Como punto de partida para el desarrollo del diseño de detalle, se seleccionan los componentes estándar principales del sistema de acuerdo con las especificaciones definidas en los cálculos preliminares.

Tabla 13. Componentes principales.

COMPONENTE	REFERENCIA	MARCA	DESCRIPCIÓN	PESO [kg]
Motores	CDP3410-V24	BALDOR	Motor DC 1800RPM 0.25 HP /24VDC	13
Baterías	N/A	CGB	Batería Carga Seca 12V/24AH 166X175X125	8
PLC	TWDLCDE40DRF	TELEMECANIQUE	24 VDC 14 Entradas- 14 Salidas	0.5
Reductores	MU 40	SITI	Reductor 30:1 Acople Motor Horizontal	2
Llantas	N/A	N/A	2 ruedas de goma para pavimento industrial 8" diámetro exterior, 2" de ancho de pista, 1 rueda de igual características con soporte giratorio.	N/A

Fuente: Elaboración propia.

Estos componentes fueron escogidos con base en los siguientes criterios:

Motores: los motores fueron escogidos con base en la especificación de potencia previa (numeral 7.6.1). Además se tuvieron en cuenta recomendaciones de

proveedores establecidos por la empresa Sofasa S.A en cuanto a características de voltaje y marca.

Baterías: los acumuladores escogidos fueron las baterías secas de la mayor capacidad encontrada en el mercado local.

PLC: La marca de este elemento fue establecida por la empresa Sofasa S.A con base en exigencias de estandarización del departamento eléctrico. Características como el número de entradas y salidas fueron determinadas por las especificaciones previas (numeral 7.6.4), y su voltaje escogido fue de acuerdo al voltaje de alimentación de potencia determinado por las necesidades del motor y las características de las baterías.

Reductor: se decidió aumentar la relación de reducción previa establecida (numeral 7.6.3), acatando recomendaciones de proveedores de la empresa de reducir la velocidad del sistema, esta nueva relación (30:1) y el diámetro exterior de las ruedas fueron determinados asegurando que la velocidad del sistema permaneciera en el rango establecido por el PDS (Tabla 4). La marca de este elemento fue determinada con base a criterios económicos.

Llanta: se escogieron ruedas disponibles en el stock del almacén de la empresa ensambladora.

Con los elementos principales ya determinados se recalculan las propiedades físicas generales del sistema (Ver tabla 14).

Tabla 14. Propiedades físicas del vehículo.

VOLUMEN [m3]	0.3567
PESO [KG]	130
CENTRO DE GRAVEDAD[mm]	515.2 X 372.4 Y 235.9 Z

Fuente: Elaboración propia.

8.2 DISEÑO MECÁNICO

Para realizar el diseño mecánico del vehículo se parte del modelo seleccionado en el diseño conceptual, se detalla la modelación de éste con ayuda del software CAD ProEngineer Wildfire 5.0 y a partir de ella se hace el análisis mecánico completo. Una vez el modelo definido con sus dimensiones, se procede a hacer el análisis cinemático en donde se describe el desplazamiento que realiza de acuerdo al movimiento de sus motores, seguido de un análisis dinámico en donde se describe las causas y restricciones para su movimiento. Por otro lado, se definen tres estados de carga para el vehículo calculando las fuerzas que ingresan al sistema para encontrar las más críticas y con base en ellas verificar su resistencia mecánica. La resistencia de la estructura se analiza computacionalmente por medio de elementos finitos, y la resistencia de ejes pernos y platinas se calcula mediante fórmulas de resistencia de materiales y resistencia a la fatiga. Una vez comprobada la resistencia y realizadas las modificaciones necesarias, se elaboran los planos de detalle del modelo para su construcción.

8.2.1 Análisis cinemático.

El vehículo usa, como se definió anteriormente, una tracción diferencial donde se utilizan dos ruedas convencionales como ruedas motrices y una rueda giratoria para darle soporte y estabilidad.

Como base para el análisis se definen ciertas suposiciones y aclaraciones (Camarena, 2009). Se parte de que el vehículo tiene las dos ruedas motrices

paralelas entre sí y con sus ejes colineales, el vehículo no tiene partes flexibles (esto permite hacer el análisis como un cuerpo rígido), el vehículo se mueve siempre sobre una superficie plana y sin irregularidades (movimiento plano) y finalmente no existe deslizamiento entre las ruedas de tracción y el suelo.

Suponiendo que el vehículo se desplaza en el plano XY se tienen las siguientes ecuaciones que describen el movimiento del vehículo en un instante determinado (Camarena, 2009)(Ver ilustración 28).

$$\dot{x} = \frac{(w_d + w_i)r}{2} \cos \varphi$$

$$\dot{y} = \frac{(w_d + w_i)r}{2} \sin \varphi$$

$$\dot{\varphi} = \frac{(w_d - w_i)r}{2l}$$

Donde:

\dot{x} : velocidad en el eje x de punto medio entre las dos ruedas sobre su eje

\dot{y} : velocidad en el eje y de punto medio entre las dos ruedas sobre su eje

φ : ángulo del eje de simetría del vehículo respecto al eje x

$\dot{\varphi}$: velocidad angular del vehículo

w_d : velocidad angular de la rueda derecha

w_i : velocidad angular de la rueda izquierda

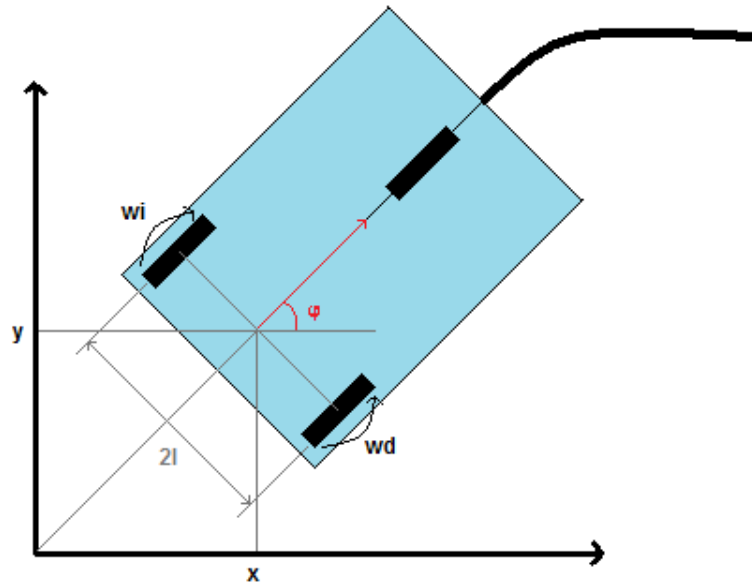
r : radio de las ruedas

$2l$: separación entre las ruedas

La velocidad del vehículo se calcula como la resultante de las dos componentes.

$$v = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$$

Ilustración 28. Medidas de desplazamiento del vehículo.



Fuente: Elaboración propia.

Para girar, el vehículo debe variar la velocidad de cada una de las ruedas, teniendo el radio de giro y la velocidad tangencial se calcula la velocidad de cada rueda (Ver ilustración 29).

$$w_i * r = V_t + \omega * l$$

$$w_d * r = V_t - \omega * l$$

$$\omega = \dot{\phi} = \frac{V_t}{R}$$

Combinando las ecuaciones:

$$w_i = \frac{V_t}{r} \left(1 + \frac{l}{R} \right)$$

$$w_d = \frac{V_t}{r} \left(1 - \frac{l}{R}\right)$$

Donde:

V_i : Velocidad lineal de la rueda izquierda

V_d : Velocidad lineal de la rueda derecha

V_t : Velocidad tangencial del vehículo

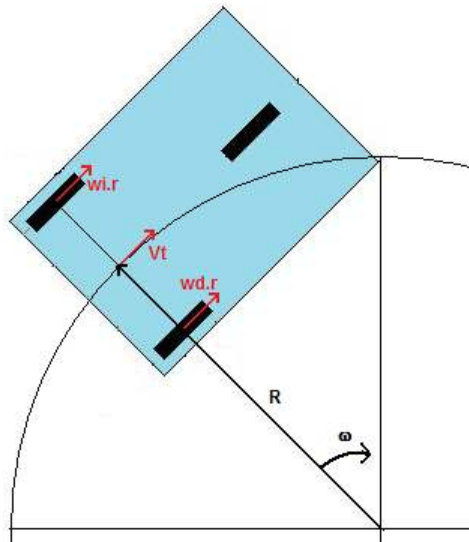
ω : Velocidad angular del vehículo

R : radio de giro de la trayectoria

l : distancia entre la rueda y el eje de simetría del vehículo

r : radio de las ruedas

Ilustración 29. Desplazamiento en curva del AGV.

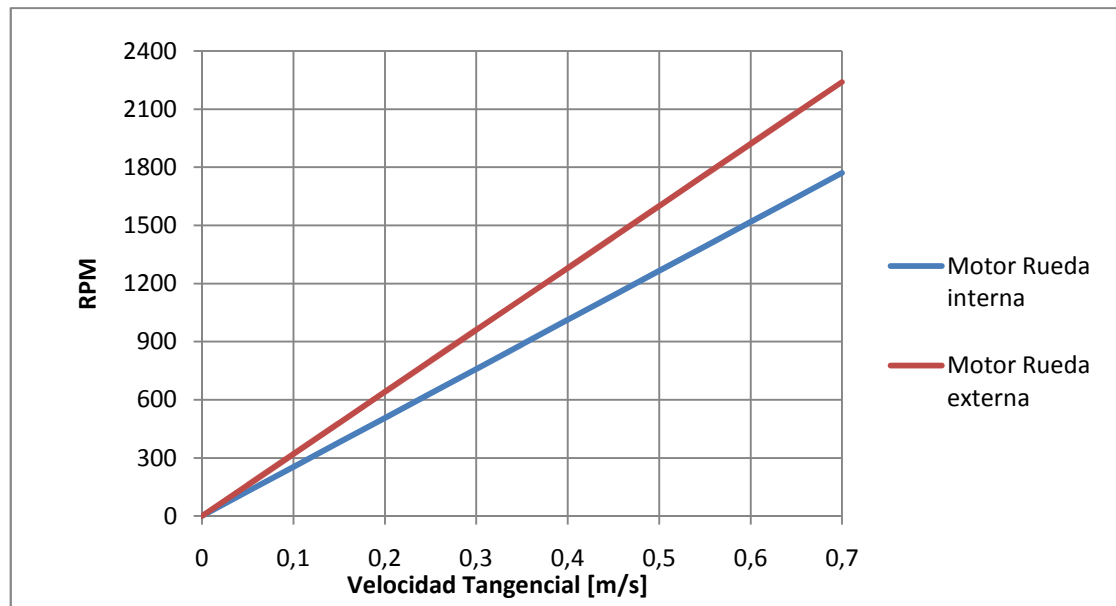


Fuente: Elaboración propia.

Definiendo un radio de giro de 2m, conociendo que la distancia l para el vehículo es de 0,234 m y, además, sabiendo que el factor de reducción de la transmisión es

de 30:1, se calculan las RPM necesarias de los motores para seguir una curva con diferentes velocidades tangenciales (Ver gráfico 2).

Gráfico 2. Velocidades de giro de los motores de acuerdo a la velocidad tangencial del vehículo, RPM Vs. Velocidad tangencial, Radio de giro de 2 metros.



Fuente: Elaboración propia.

Para movimiento en línea recta se asume que el radio de giro (R) tiende a infinito, obteniendo que las velocidades angulares de las ruedas sean iguales y la velocidad angular del vehículo se haga cero.

$$w_i = w_d = \frac{V_t}{r}$$

$$\dot{\varphi} = \frac{V_t}{R} = 0$$

8.2.2 Análisis dinámico.

El modelo dinámico del vehículo comprende el análisis de los desplazamientos, velocidades y aceleraciones de acuerdo con las fuerzas que actúan sobre él

(torque sobre las ruedas). La segunda ley de Newton expresa el movimiento según la ecuación (Camarena, 2009).

$$(m_v + m_s) \frac{dv}{dt} = F_t - (m_v + m_s)g \operatorname{sen} \alpha - \frac{1}{2} \rho AC v^2 - (m_v + m_s) g f_r \operatorname{c} \alpha$$

Donde:

m_v : masa total del vehículo

m_s : masa total del stricker

$\frac{dv}{dt}$: aceleración lineal del vehículo

F_t : fuerza de tracción total

g : aceleración de la gravedad

α : ángulo de inclinación de la superficie

ρ : densidad del aire

A : area frontal del vehículo

C : coeficiente de resistencia aerodinámica

v : velocidad del vehículo

f_r : coeficiente de resistencia por rodamiento

El vehículo se desplazará siempre en una superficie plana, por ello el ángulo α se hace cero, la fricción con el aire es despreciable en este caso y se puede omitir así como la fuerza de rozamiento que es mínima. La ecuación resultante entonces es:

$$(m_v + m_s) \frac{dv}{dt} = F_d + F_i$$

Para:

F_d : Fuerza de tracción del motor derecho

F_i : Fuerza de tracción del motor izquierdo

Se procede a calcular las fuerzas de tracción a partir del torque entregado por los motores, se desprecia la masa de las ruedas.

$$F = \frac{N\eta T}{r}$$

Donde:

F : Fuerza de tracción de cada rueda

N : Factor de reducción de velocidad

η : Eficiencia de la reducción y transmisión de velocidad

T : torque teórico entregado por el motor

r : radio de la rueda

Al desplazarse en línea recta, el vehículo hace igual uso de los dos motores. Conociendo que los dos motores al igual que las transmisiones son iguales ($F_d=F_i$), se despeja para hallar la aceleración máxima del vehículo.

$$a = \frac{2N\eta T}{(m_s + m_v)r}$$

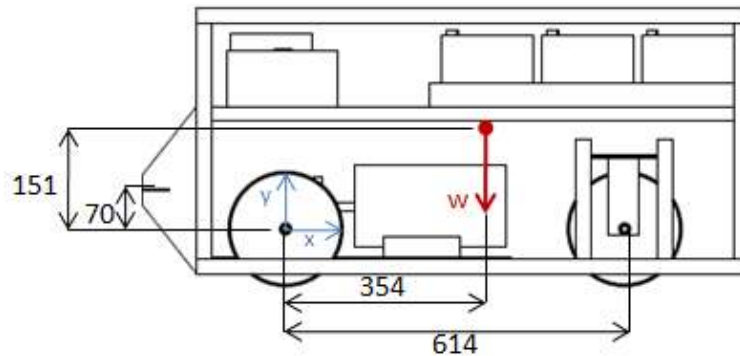
Para este caso se obtiene,

$$a = \frac{2 * 30 * 0,9 * 1,02N.m}{(100 Kg + 130 Kg)0,1m} = 2,39 m/s^2$$

8.2.3 Estados de carga.

Se determinan las magnitudes de las fuerzas que ingresan al sistema según tres casos del funcionamiento del AGV: estático, acelerando y frenando.

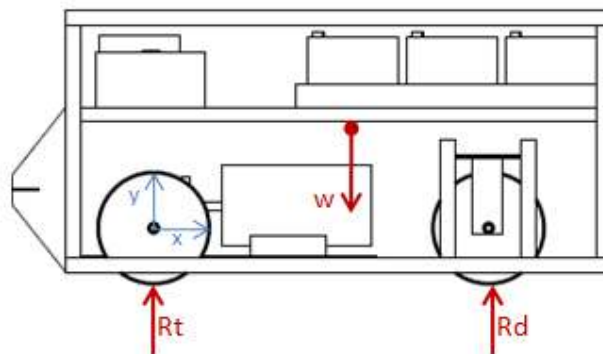
Ilustración 30. Dimensiones para cálculos de cargas.



Fuente: Elaboración propia.

- Estático (Ver ilustración 31).

Ilustración 31. Cargas para estado estático.



Fuente: Elaboración propia.

$$\Sigma FY: Rd + 2Rt - w = 0$$

$$\Sigma M_{(0,0)}: w * x_c - Rd * x_d = 0$$

$$Rd = \frac{w * x_c}{x_d}$$

$$Rt = \frac{w - Rd}{2}$$

- Acelerando (Ver ilustración 32).

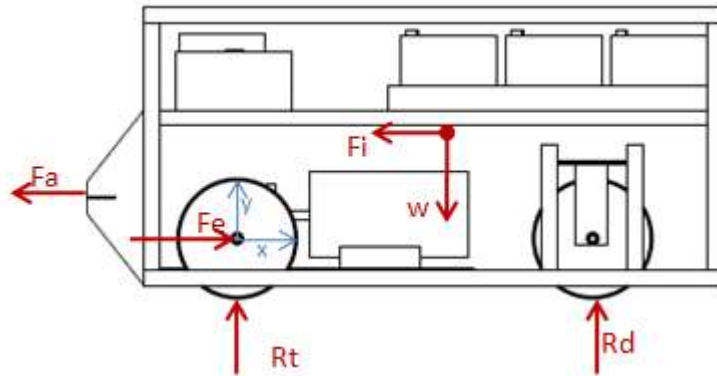
$$F_e = \frac{(T_i + T_d)}{N * r}$$

$$a = \frac{(m_s + m_v)}{F_e}$$

$$\Sigma FY: Rd + 2Rt - w = 0$$

$$\Sigma M_{(0,0)}: Fa * y_a + Fi * y_c - w * x_c + Rd * x_d = 0$$

Ilustración 32. Cargas para estado acelerando.



Fuente: Elaboración propia.

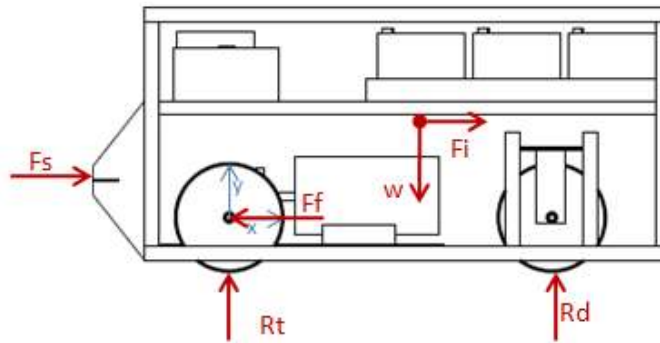
- Desacelerando (Ver ilustración 33).

$$F_f = (m_s + m_v) * a$$

$$\Sigma FY: Rd + 2Rt - w = 0$$

$$\Sigma M_{(0,0)}: -F_s * y_a - F_i * y_c - w * x_c + Rd * x_d = 0$$

Ilustración 33. Cargas para estado desacelerando.



Fuente: Elaboración propia.

Para el cálculo de las reacciones se usaron los valores mostrados en la tabla 15, Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 16.

Tabla 15. Valores utilizados para cálculos de estados de carga.

Valores	
Masa vehículo [Kg]	130
Masa stricker [Kg]	100
x centroide [mm]	354
x ruedas [mm]	614
y centroide [mm]	151
y engancho [mm]	70
aceleración [m/s ²]	2,61
desaceleración [m/s ²]	1
diámetro ruedas traseras [mm]	203,2
torque motor [N.m]	1,02
Reducción transmisión	30

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 16. Resultados de cálculos de estados de carga.

ESTÁTICO	
Reacción delantera [N]	735,3
Reacción trasera (cada rueda) [N]	270,0

ACELERANDO	
Reacción delantera [N]	622,0
Reacción trasera (cada rueda) [N]	326,6
Fuerza de empuje [N]	600,5
Coef fricción necesario	0,92
Torque en el eje [N.m]	30,5

FRENANDO	
Reacción delantera [N]	778,6
Reacción trasera (cada rueda) [N]	248,3
Fuerza de frenado [N]	230,0
Coef fricción necesario	0,46

Fuente: Elaboración propia.

8.2.4 Análisis de elementos finitos.

Para validar la resistencia de los elementos que componen la estructura del vehículo (platinas y chasis, ver anexo D), se realiza un análisis por medio de los métodos de elementos finitos con ayuda del paquete computacional CAE (*computer aided engineering*) ANSYS 11.0. Para este estudio, el chasis del AGV es sometido a cargas según tres situaciones determinadas: cuando está en estado de reposo, cuando acelera y cuando frena.

Para cada una de las situaciones planteadas el procedimiento de análisis fue el siguiente:

- 1) El modelo CAD es importado desde el programa PROE/ENGINEER WILDFIRE 5.0 con las características de materiales ya asignadas desde ese mismo programa.
- 2) Se definen las características de la malla inicial, número de elementos y sus respectivos nodos.
- 3) Se introducen las fuerzas que ingresan al sistema.

- 4) Se definen las restricciones de desplazamiento pertinentes para cada caso.
- 5) Se define el tipo de análisis y los criterios de solución buscados. Para este estudio se utiliza los criterios de deformación total y el de esfuerzo máximo equivalente de von mises (Hibbeler, 2006).
- 6) Se procede con el análisis y una vez obtenido el resultado se identifican las magnitudes y la posición de los esfuerzos y deformaciones máximas, con el fin de establecer estos datos como parámetros para la refinación del mallado.
- 7) Posteriormente se realizan varios análisis más, aumentando el número de elementos y sus respectivos nodos (refinamiento del mallado) y se comparan los resultados obtenidos con los de los mallados anteriores, para así verificar la coherencia del análisis, Para la refinación del mallado se utiliza el parámetro “relevance” del software ANSYS, que determina el número de elementos y nodos que se utilizan en el análisis. Este parámetro varía en un rango entre -100 y 100.
- 8) Una vez el resultado no presenta una variación significativa entre un mallado y otro, es decir, converge en un valor aproximado, se registran los datos obtenidos para realizar un análisis de resistencia.

- Consideraciones previas.

Partiendo de los cálculos de fuerzas para los tres casos (Realizados en el numeral 8.2.4) se definen las cargas que ingresan al chasis, se asume siempre que el vehículo se encuentra en una superficie plana, que el torque entregado por el motor es el nominal presentado por el fabricante y que la rueda delantera (libre) gira sin fricción y su único fin es soportar al vehículo sin generar ningún otro esfuerzo.

Para el análisis de todas las situaciones, el peso de las cajas reductoras, las chumaceras, los ejes, ruedas, tablero de control y sensores es despreciado ya que representa alrededor del 6 % del peso total del vehículo y no es relevante para el

análisis, además las platinas de sujeción de los sensores no son sometidas a los análisis por que sus esfuerzos son mínimos.

Para el control de la precisión relativa de los resultados se utiliza el método de refinación del mallado. Los parámetros de convergencia no son alterados para el refinamiento del resultado y se utilizan los que por defecto contiene el programa para este tipo de análisis, que para este caso son:

Tabla 17. Parámetros para convergencia.

CARACTERÍSTICA	VALOR
MÉTODO	Convergencia adaptativa "Adaptive convergence"
MAXIMO REFINAMIENTO DE BUCLES "LOOPS"	1
PROFUNDIDAD DEL REFINAMIENTO	2

(ANSYS 11.0 WORKBENCH)

Se utilizan las características por defecto del mallado para análisis mecánicos, del programa ANSYS 11.0, los parámetros automáticos generales de esta aplicación se pueden observar en la siguiente tabla:

Tabla 18. Parámetros de mallado.

CARACTERÍSTICA	DEFINICIÓN
REFERENCIA FISICA	Mecánica
METODO DE CONTROL	"Patch conforming/swepping"
TIPO DE ELEMENTO	Cuadrilátero "Quad-Surface"

(ANSYS 11.0 WORKBENCH)

Las propiedades mecánicas de los materiales de los dos conjuntos analizados son:

Tabla 19. Propiedades de los materiales de la estructura.

PROPIEDAD	CHASIS	PLATINAS
MATERIAL	Tubería estructural	AISI/SAE 1020
NORMA	ASTM 500 G.C	ASTM A108
ESFUERZO DE FLUENCIA	345 Mpa	205 Mpa
ESFUERZO MAXIMO	427 Mpa	380 Mpa
MODULO DE ELASTICIDAD	205 Gpa	205 Gpa

Fuente: Elaboración propia.

Para todos los casos se asume que el vehículo está empotrado (frenado) en sus ruedas de tracción traseras, y en su rueda delantera tiene libre movimiento en el eje x en donde ocurre el desplazamiento del vehículo, el estado de restricciones para esta situación se resume en la Tabla 20 (0 significa que no se permite ningún tipo desplazamiento en esa dirección).

Tabla 20. Restricciones para en análisis de elementos finitos.

LUGAR DE APLICACIÓN	RESTRICCIÓN		
	X	Y	Z
Ranuras de sujecion llanta delantera	Libre	0	0
Ranuras de sujecion Reductor	0	0	0
Ranuras de sujecion chumacera	0	0	0

Fuente: Elaboración propia.

- Estado de reposo.

Se analiza este estado como estado natural del vehículo, se supone que se encuentra sobre una superficie totalmente plana y que no le ingresa ninguna carga externa aparte de los pesos de los componentes.

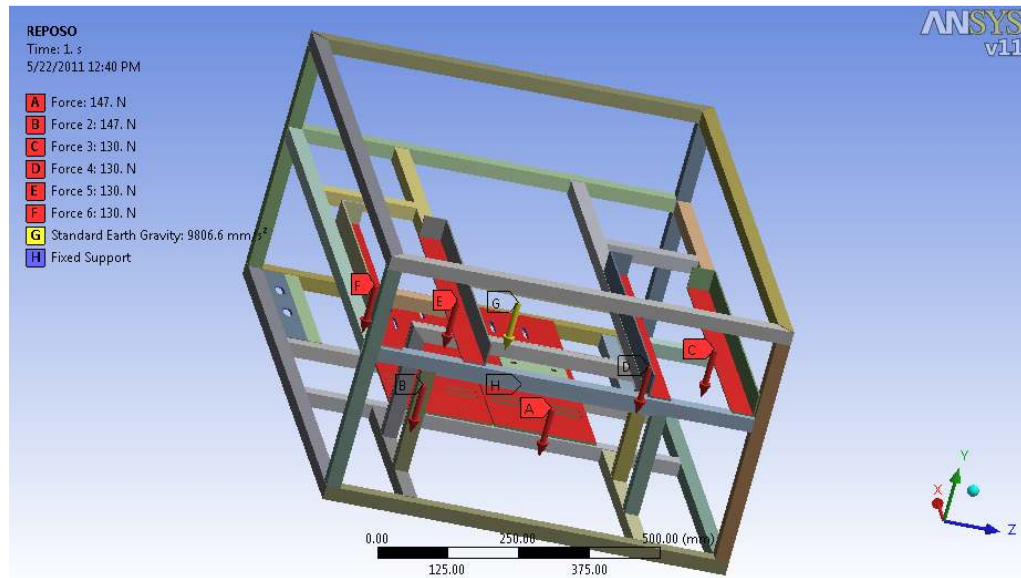
En este caso son consideradas las fuerzas que actúan sobre el AGV cuando está detenido, éstas son únicamente los pesos de todos los elementos que componen el sistema y, como se explicó anteriormente, se fijan restricciones sobre los agujeros que sujetan las cajas reductoras y las chumaceras (soportes de los ejes de tracción), al igual que los que sujetan la rueda delantera. De esta forma se simula la aplicación de los pesos sobre la estructura apoyada en sus tres ruedas. En la tabla 21 se especifica la asignación de cargas para este modelo, la tabla 22 muestra los resultados obtenidos y la ilustración 34 enseña el modelo con las cargas aplicadas.

Tabla 21. Cargas aplicadas para estado estático

NOMBRE	APLICACIÓN	DIRECCION	MAGNITUD	# DE CARGAS	REF GRAFICO	COMENTARIOS
PESO MOTORES	Ranuras de la platina motor reductor	-Y	147 N	2	A-B	La carga debe ser aplicada tanto en las ranuras de la platina derecha como en la izquierda
PESO CHASIS	Centro de gravedad	-Y	9.81 m/s ²	1	G	La carga es introducida como la aceleracion gravitacional
PESO BATERIAS	Superficie horizontal del perfil en L	-Y	130 N	4	C-D-E-F	La carga es la mitad del peso de una cama de baterias, por lo que se debe introducir en cada una de las caras de los cuatro perfiles

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 34. Modelo con cargas de estado estático.



(ANSYS 11.0 WORKBENCH)

Tabla 22. Resultados de refinación de mallado (estático).

RELEVANCE	# NODOS	# ELEMENTOS	ESFUERZO MAXIMO		DEFORMACION MAXIMA	
			LUGAR	MAGNITUD [Mpa]	LUGAR	MAGNITUD[mm]
0	45682	9382	PLATINA LLANTA	71.872	Perfiles L	0.57011
10	48883	10125	PLATINA LLANTA	68.335	Perfiles L	0.57042
20	50874	10417	PLATINA LLANTA	68.394	Perfiles L	0.57361
30	53302	10514	PLATINA LLANTA	68.372	Perfiles L	0.57315
40	53552	10363	PLATINA LLANTA	71.5	Perfiles L	0.57768
50	57656	11214	BARRA J	68.23	Perfiles L	0.58052
60	59613	11857	BARRA J	70.565	Perfiles L	0.58513
70	66156	13454	BARRA J	70.566	Perfiles L	0.587
80	68534	14111	BARRA J	76.186	Perfiles L	0.58894
90	78794	17485	BARRA J	85.103	Perfiles L	0.59505

- Acelerando.

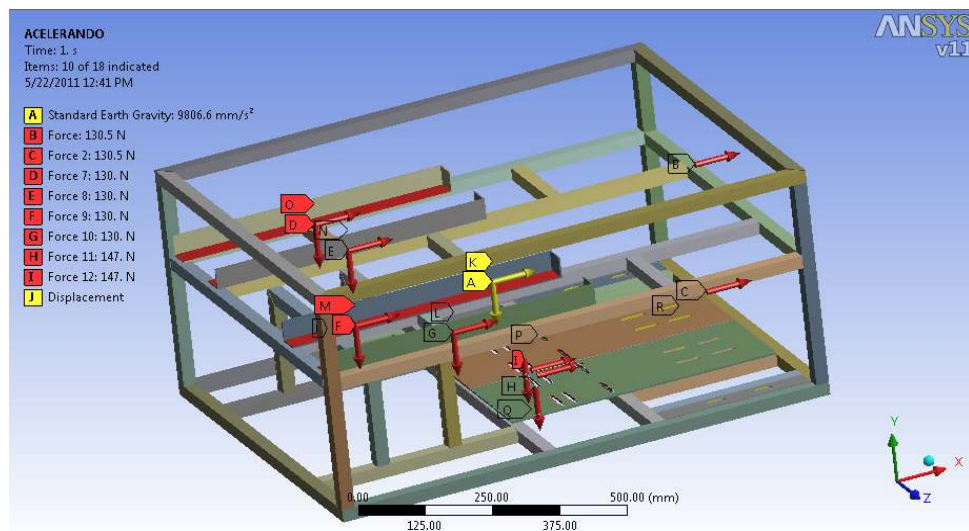
Se define este caso como el momento en que parte del reposo, se asume que acelera en línea recta sobre una superficie plana, haciendo uso de ambos motores y con un torque entregado por cada motor de 1,02 N.m (Especificaciones técnicas Baldor, Ver Anexo L), generando así una aceleración del sistema de $2,61 \text{ m/s}^2$.

Para esta situación son asumidas todas las cargas que experimenta el vehículo cuando acelera para vencer el estado de reposo. En este caso se consideran los pesos de los elementos, las fuerzas que debe ejercer sobre el stricker para remolcarlo (con la misma aceleración) y las fuerzas inerciales generadas por la masa de todo el sistema al acelerar. Para el análisis en elementos finitos se ingresan todas las reacciones que genera la aceleración y se restringe los agujeros por donde se transmitiría la fuerza de aceleración de las ruedas al chasis. De esta forma se aprecia la forma en que se transmite el empuje de las ruedas al resto de componentes. En la tabla 23 se especifica la asignación de cargas para este modelo, la tabla 24 muestra los resultados obtenidos y la ilustración 35 enseña el modelo con las cargas aplicadas.

Tabla 23. Cargas aplicadas para estado acelerando

NOMBRE	APLICACIÓN	DIRECCION	MAGNITUD [N]	# DE CARGAS	REF GRAFICO	COMENTARIOS
PESOS COMPONENTES		VER TABLA ESTADO DE REPOSO			D-E-F-G-H-I	
INERCIA CHASIS	Centro de gravedad	X	2.6 m/s ²		K	Las fuerzas inerciales que produce el chasis, son introducidas como una aceleracion en el sentido contrario a la aceleracion que experimenta el vehiculo.
INERCIA BATERIAS	Superficie horizontal del perfil en L	X	34.6 N	4	N-O-L-M	El peso de las baterias introduce una fuerza inercial en el chasis contraria a la aceleracion que experimenta el vehiculo.
INERCIA MOTORES	Ranuras de la platina motor reductor	X	39.2 N	2	P-I	El peso de los motores introduce una fuerza inercial en el chasis contraria a la aceleracion que experimenta el vehiculo.
FUERZA REMOLQUE	Superficie barras de apoyo del enganche	X	339.3 N	2	B-C	La fuerza transmitida por el peso del stricker se transmite en cantidades iguales a las dos superficies de apoyo del remolque.

Ilustración 35. Modelo con cargas de estado acelerando.



(ANSYS 11.0 WORKBENCH)

Tabla 24. Resultados de refinación de mallado (acelerando).

RELEVANCE	# NODOS	# ELEMENTOS	ESFUERZO MAXIMO		DEFORMACION MAXIMA	
			LUGAR	MAGNITUD [Mpa]	LUGAR	MAGNITUD[mm]
0	45682	9382	PLATINA LLANTA	71.738	Perfiles L	0.59478
10	48883	10125	PLATINA LLANTA	77.073	Perfiles L	0.59548
20	50874	10417	PLATINA LLANTA	77.897	Perfiles L	0.5976
30	53302	10514	PLATINA LLANTA	74.742	Perfiles L	0.59824
40	53552	10363	PLATINA LLANTA	81.144	Perfiles L	0.60313
50	57656	11214	PLATINA LLANTA	78.721	Perfiles L	0.6063
60	59613	11857	PLATINA LLANTA	80.241	Perfiles L	0.61248
70	66156	13454	PLATINA LLANTA	78.345	Perfiles L	0.6129
80	68534	14111	PLATINA LLANTA	79.748	Perfiles L	0.61565
90	78794	17485	PLATINA LLANTA	84.146	Perfiles L	0.62162

Fuente: Elaboración propia.

- Frenando.

Se analiza la estructura en el momento de disminuir la velocidad para detenerse, se asume una desaceleración de 1 m/s^2 .

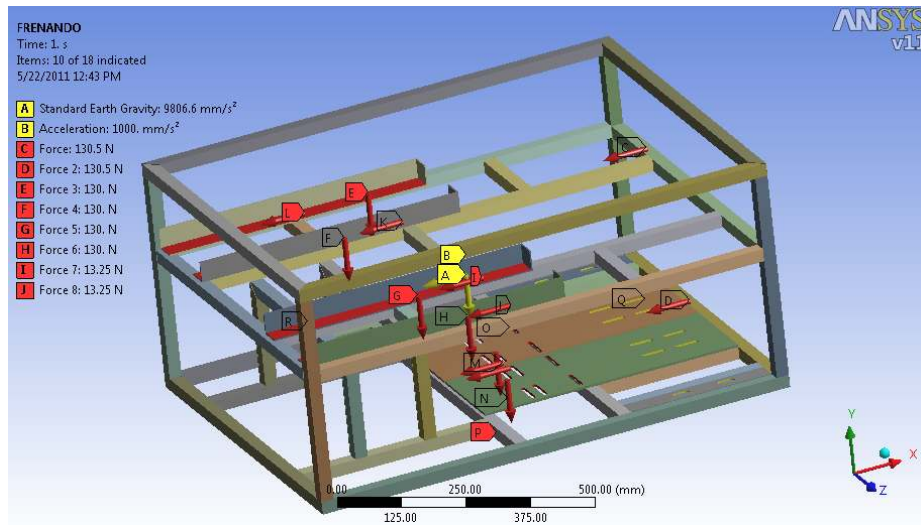
Este escenario se analiza de la misma forma que la aceleración. Se ingresan los pesos de todos los elementos, las fuerzas inerciales generadas en este caso por la aceleración negativa y la fuerza de empuje que ejerce el stricker sobre el vehículo al frenar. En la tabla 25 se especifica la asignación de cargas para este modelo, la tabla 26 muestra los resultados obtenidos y la ilustración 36 enseña el modelo con las cargas aplicadas.

Tabla 25. Cargas aplicadas para estado frenando.

NOMBRE	APLICACIÓN	DIRECCION	MAGNITUD [N]	# DE CARGAS	REF GRAFICO	COMENTARIOS
PESOS COMPONENTES		VER TABLA ESTADO DE REPOSO			E-F-G-H-O-P	
INERCIA CHASIS	Centro de gravedad	-X	1 m/s ²	1	B	Las fuerzas inerciales que produce el chasis, son introducidas como una aceleracion en el sentido contrario a la aceleracion que
INERCIA BATERIAS	Superficie horizontal del perfil en L	-X	13.25 N	4	K-L	El peso de las baterias introduce una fuerza inercial en el chasis contraria a la aceleracion que experimenta el vehiculo.
INERCIA MOTORES	Ranuras de la platina motor reductor	-X	15 N	2	M-N	El peso de los motores introduce una fuerza inercial en el chasis contraria a la aceleracion que experimenta el vehiculo.
FUERZA REMOLQUE	Superficie barras de apoyo del enganche	-X	130.5 N	2	C-D	La fuerza transmitida por el peso del stricker se transmite en cantidades iguales a las dos superficies de apoyo del remolque.

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 36. Modelo con cargas de estado frenando.



(ANSYS 11.0 WORKBENCH)

En la siguiente tabla se muestra el proceso de refinación del mallado para este caso:

Tabla 26. Resultados de refinación de mallado (frenando).

RELEVANCE	# NODOS	# ELEMENTOS	ESFUERZO MAXIMO		DEFORMACION MAXIMA	
			LUGAR	MAGNITUD [Mpa]	LUGAR	MAGNITUD[mm]
0	45682	9382	PLATINA LLANTA	88.221	Perfiles L	0.62533
10	48883	10125	PLATINA LLANTA	94.77	Perfiles L	0.62455
20	50874	10417	PLATINA LLANTA	95.763	Perfiles L	0.62583
30	53302	10514	PLATINA LLANTA	91.864	Perfiles L	0.63109
40	53552	10363	PLATINA LLANTA	99.71	Perfiles L	0.63241
50	57656	11214	PLATINA LLANTA	96.759	Barra_C	0.63626
60	59613	11857	PLATINA LLANTA	101.17	Perfiles L	0.6396
70	66156	13454	PLATINA LLANTA	96.369	Perfiles L	0.64208
80	68534	14111	PLATINA LLANTA	98.108	Platina M-R	2.1441
90	78794	17485	PLATINA LLANTA	102.4	Perfiles L	0.64863

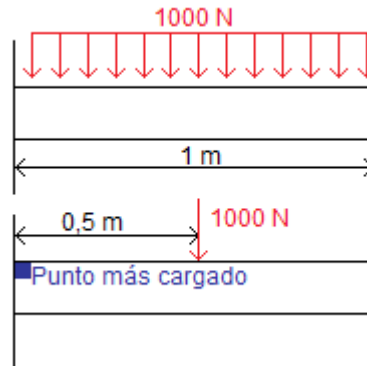
Fuente: Elaboración propia.

- Análisis de resultados.

Se realiza como ejercicio de referencia, el cálculo del esfuerzo máximo de Von Mises de un modelo simple de una barra en voladizo sometida a una carga determinada. Esto con el fin de contrastar los resultados arrojados por el programa ANSYS contra los determinados mediante los modelos de cálculos convencionales, y así estimar en que valor del parámetro relevance el resultado es el más aproximado al real.

De una barra de sección rectangular cuadrada de 100 mm x 100 mm con longitud de 1000 mm, empotrada en uno de sus extremos y sometida a una fuerza distribuida en su cara superior de 1000 N, se determina el esfuerzo máximo de von mises teórico y por el método de elementos finitos.

Ilustración 37. Cargas de barra.



Fuente: Elaboración propia.

$$\sigma = \frac{M * c}{I}$$

$$\sigma = \frac{500 \text{ N.m} * 0,05 \text{ m}}{\frac{(0,1\text{m})^4}{12}} = 3 \text{ MPa}$$

Al ser el punto más cargado en un extremo el esfuerzo cortante es cero, por lo tanto el esfuerzo máximo Von Mises es igual al esfuerzo axial y en su dirección (3 MPa).

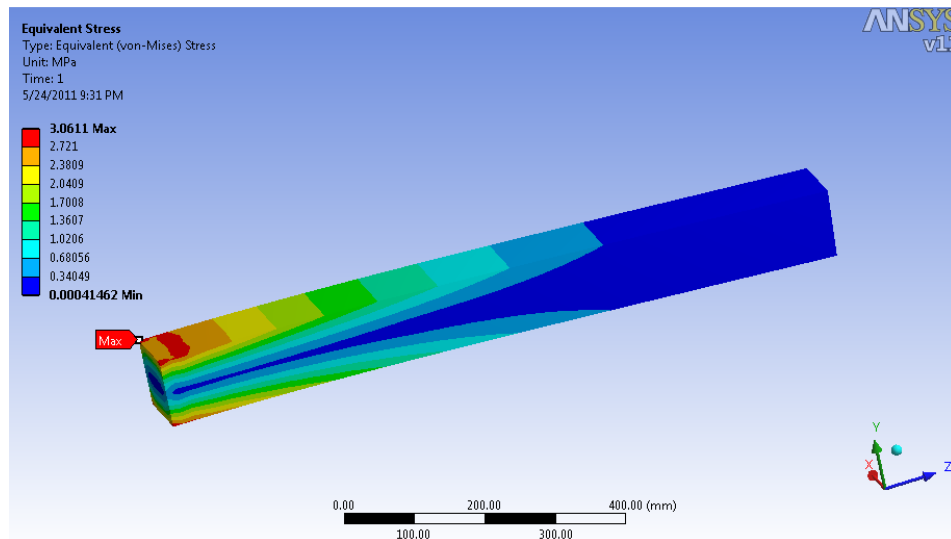
Realizando el proceso de refinación del mallado en elementos finitos de igual forma que se realizó para el análisis de las situaciones del vehículo el resultado obtenido se presenta en la tabla 27.

Tabla 27. Resultados de refinación de mallado (ensayo de barra).

RELEVANCE	# ELEMENTOS	# NODOS	ESFUERZO MAXIMO MAGNITUD [Mpa]
0	80	621	2.92
10	189	1216	2.8915
20	207	1328	2.9016
30	216	1384	2.9113
40	225	1440	2.9115
50	234	1496	2.9187
60	243	1552	2.9211
70	261	1664	2.9239
80	270	1720	2.9245
90	496	2855	3.0611

Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 38. Esfuerzos en la barra (relevance: 90)



(ANSYS 11.0 WORKBENCH)

El esfuerzo determinado mediante este método converge al valor teórico aproximadamente en el relevance 90, por lo que se decide utilizar como valores de referencia los esfuerzos correspondientes al relevance 90 en cada uno de los casos.

Según la consideración anterior los valores obtenidos para cada caso son:

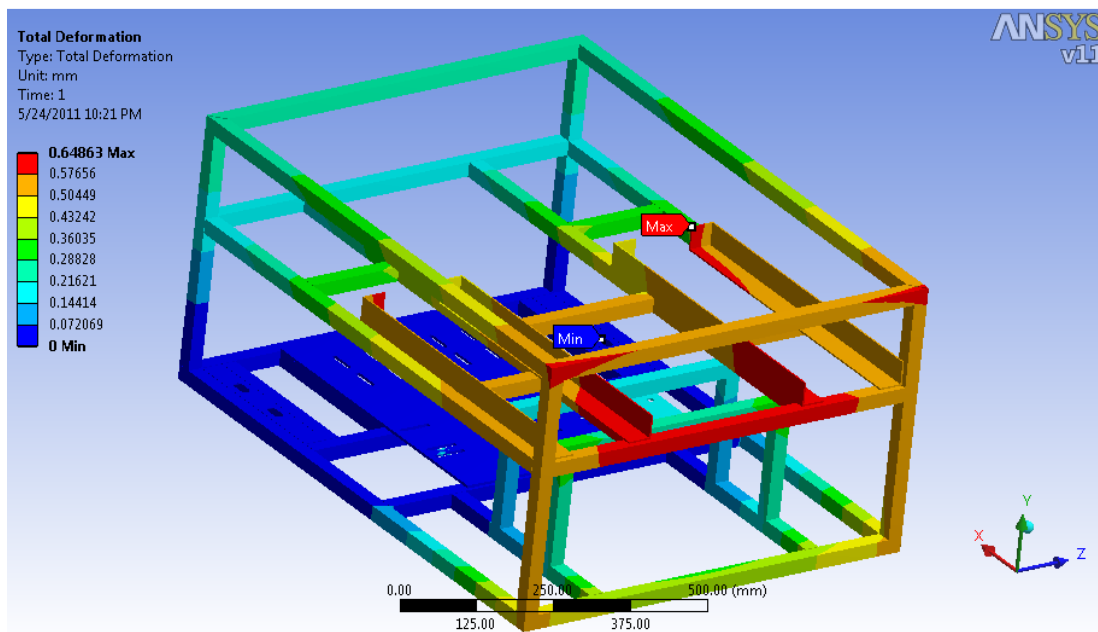
Tabla 28. Esfuerzos máximos para tres casos.

ESF ESTATICO [Mpa]	ESF ACELERANDO [Mpa]	ESF FRENANDO [Mpa]
85.103	84.146	102.4

Fuente: Elaboración propia.

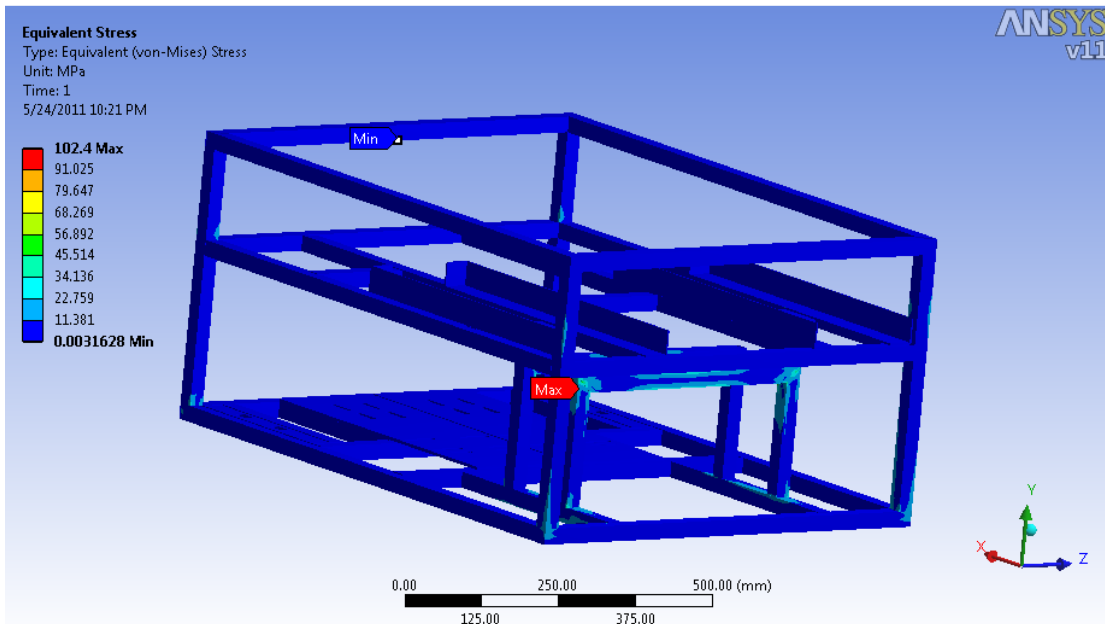
Se determina el escenario frenando como la situación más crítica ya que de los tres casos es el que mayor esfuerzo presenta. A continuación se ilustran los resultados del análisis de elementos finitos para este caso:

Ilustración 39. Deformaciones del modelo.



(ANSYS 11.0 WORKBENCH)

Ilustración 40. Esfuerzos del modelo.



(ANSYS 11.0 WORKBENCH)

Se compara el esfuerzo máximo que experimenta la estructura del vehículo con las propiedades de los elementos que la componen. Para así verificar la resistencia de la misma.

Tabla 29. Análisis esfuerzo máximos.

PARÁMETRO	CHASIS	PLATINAS
Esfuerzo [MPa]	102.4	102.4
Esfuerzo de fluencia [MPa]	345	205
Evaluación	Resiste	Resiste
Factor de seguridad	3.37	2.00

Fuente: Elaboración propia.

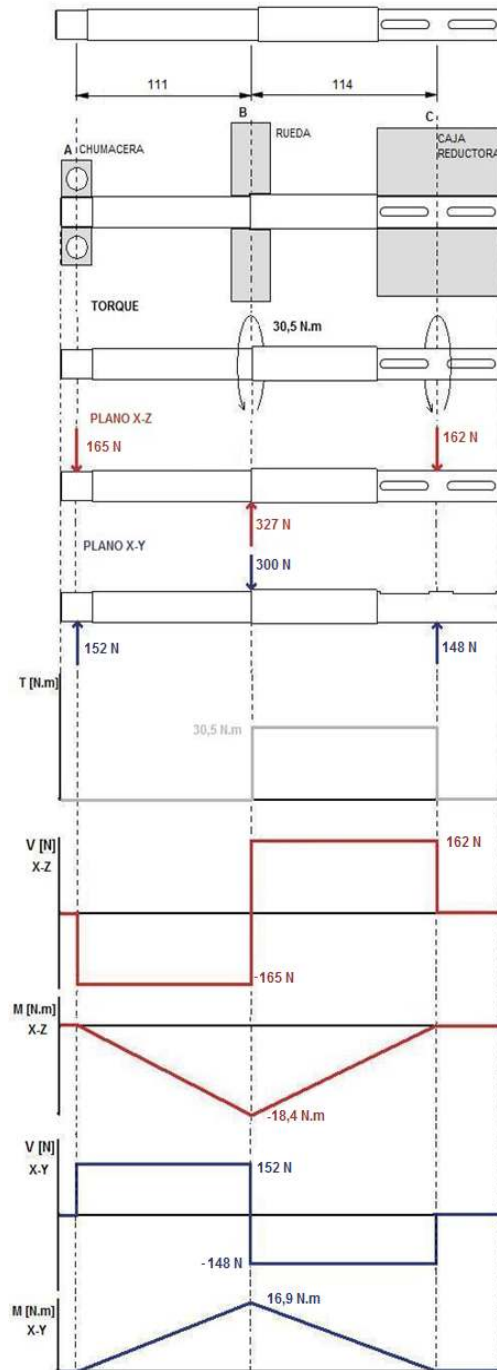
Según los datos observados en la tabla 29 el esfuerzo máximo se presenta en la platina de la llanta delantera por lo que el factor de seguridad global de resistencia del vehículo es 2.

En general las magnitudes y lugares de los esfuerzos y deformaciones máximas para cada malla, en cada uno de los tres escenarios son similares lo que indica una coherencia y precisión en los resultados obtenidos. Se puede apreciar además que todos los análisis indican que los mayores esfuerzos se presentan en la parte delantera del vehículo donde se apoya la rueda, por lo que, en el caso de una falla mecánica, ésta podría presentarse con más probabilidad en dicha zona de la estructura.

8.2.5 Cálculo de ejes.

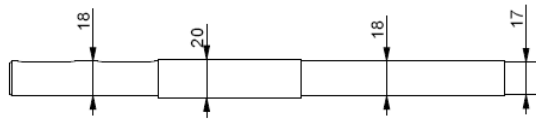
Los ejes se calculan para la situación de aceleración que es el caso más cargado para esta pieza. La ilustración 41 muestra las fuerzas a las que están sometidos.

Ilustración 41. Diagramas de cargas de ejes.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 42. Diámetros de eje.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 30. Propiedades del material de los ejes.

Material	ACERO AISI/SAE 1060
SUT (Resistencia última a la tensión) [MPa]	1080
SY (Resistencia última a la fluencia) [MPa]	765

Fuente: Elaboración propia.

Límite de resistencia a la fatiga del material (S_e')

$$S_e' = (0,5) * S_{ut} = 540 \text{ MPa}$$

(Budynas & Nisbett, Fallas por fatiga resultantes de cargas variables, 2008)

Límite de resistencia a la fatiga de la pieza (S_e)

$$S_e = K_a * K_b * K_c * K_d * K_e * K_f * S_e'$$

(Budynas & Nisbett, Fallas por fatiga resultantes de cargas variables, 2008)

Donde:

K_a = Factor de modificación de la condición superficial

K_b = Factor de modificación del tamaño

K_c = Factor de modificación de la carga

K_d = Factor de modificación de la temperatura

K_e = Factor de confiabilidad

$K_f =$ Factor de modificación de efectos varios

Para este caso:

Tabla 31. Valores para factores de modificación.

K_a	0,71
K_b	0,91
K_c	1
K_d	1
K_e	0,90
K_f	1

(Budynas & Nisbett, Fallas por fatiga resultantes de cargas variables, 2008)

$$S_e = 0,71 * 0,91 * 1 * 1 * 0,90 * 1 * 540 = 312,3 \text{ MPa}$$

Se hace el análisis en el punto B del eje (altura de la rueda) por ser el más cargado utilizando el criterio de falla por fatiga de Goodman y combinando los esfuerzos mediante la teoría de distorsión.

$$\frac{1}{n} = \frac{16}{\pi * d^3} \left\{ \frac{1}{S_e} \left[4(K_f * M_a)^2 + 3(K_{fs} * T_a)^2 \right]^{1/2} + \frac{1}{S_{ut}} \left[4(K_f * M_m)^2 + 3(K_{fs} * T_m)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

(Budynas & Nisbett, Ejes, flechas y sus componentes, 2008)

Donde

n : Factor de seguridad [Adim]

S_e : Límite de resistencia a la fatiga de la pieza [Mpa]

S_{ut} : Resistencia del material a la tensión [MPa]

K_f : Factor de concentración de esfuerzo normal por fatiga [Adim]

K_{fs} : Factor de concentración de esfuerzo cortante por fatiga [Adim]

M_a : Momento flexionante alternante [N.m]

M_m : Momento flexionante medio [N.m]

T_a : Par de torsión alternante [N.m]

T_m : Par de torsión medio [N.m]

Se calcula el factor de seguridad partiendo de los siguientes valores, para este caso el momento flexionante medio y el par de torsión alternante son cero.

Tabla 32. Valores utilizados para el cálculo de resistencia de los ejes.

Torque medio[N.m]	30,5
M alternante[N.m]	25,0
Se [MPa]	312,3
Sut [MPa]	1080
K_f [Adim]*	1,81
K_{fs} [Adim]*	1,36

* (Budynas & Nisbett, Fallas por fatiga resultantes de cargas variables, 2008)

Obteniendo un factor de seguridad (n goodman) de 3,21.

Se procede a calcular el factor de seguridad contra la fluencia, determinando un esfuerzo máximo de von Mises equivalente.

$$\sigma'_{m\acute{a}x} = \left[\left(\frac{32K_f(M_m + M_a)}{\pi d^3} \right)^2 + 3 \left(\frac{16K_{fs}(T_m + T_a)}{\pi d^3} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

(Budynas & Nisbett, Ejes, flechas y sus componentes, 2008)

Obteniendo:

Tabla 33. Resultados del cálculo de resistencia de los ejes.

σ_{max} (Pa)	141,8E+6
ny (f.s contra la fluencia)	5,39

Se comprueba entonces que los ejes resisten con factores de seguridad de 3,21 y 5,39 contra la fatiga y la fluencia respectivamente.

8.2.6 Cálculo de platinas.

Se calcula la platina con mayor carga por aplastamiento en los agujeros, la cual corresponde a la carga que soporta las chumaceras. Se comprueba que se pueden utilizar platinas de espesor 3 mm de acero 1020 ($S_{yp}=324\text{MPa}$), con pernos de 10 mm de diámetro nominal. La fuerza de empuje ejercida por el eje sobre la chumacera es soportada por dos pernos.

$$\sigma = \frac{F}{D_{perno}t}$$

$$F = \frac{151,8 N}{2} = 75,9 N$$

$$\sigma = \frac{75,9}{0,01 * 0,003} = 2,53 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\sigma_y}{f.s} = \frac{324 \text{ MPa}}{2}$$

$$2,53 \text{ Mpa} < 162\text{Mpa}$$

Donde:

σ : Esfuerzo normal sobre la platina

D_{perno} : Diámetro del perno

t : Espesor de la platina

F : Fuerza ejercida por el perno sobre la platina

σ_{adm} : Esfuerzo máximo admisible para la platina

σ_y : Esfuerzo de fluencia del material

$f.s$: Factor de seguridad

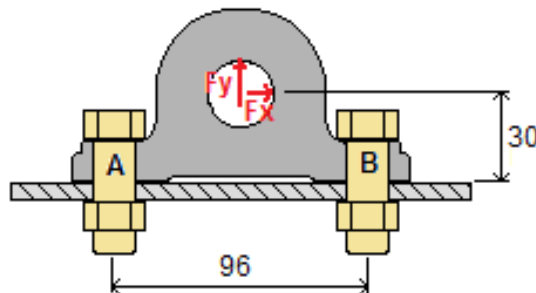
Al comprobar la resistencia de la platina se aprueba el uso de platinas de espesor 3 mm para todos los casos.

8.2.7 Cálculo de pernos.

Los pernos más cargados son los dos que soportan cada chumacera y los cuatro que soportan cada caja reductora, cada uno de ellos está sometido tanto a cargas normales como cortantes. El cálculo de estos pernos se hace en el caso en el que el vehículo está acelerando (más esforzados).

- Pernos De Chumacera

Ilustración 43. Dimensiones y cargas sobre chumacera.



(Elaboración propia)

Tabla 34. Valores de cargas sobre chumacera.

Fy [N]	165
Fx [N]	152

$$F_x^A = F_x^B = \frac{F_x}{2} = 76 \text{ N}$$

$$F_y^A = \frac{F_y}{2} + \frac{F_x * 30}{48} = 178 \text{ N}$$

$$F_y^B = \frac{F_y}{2} - \frac{F_x * 30}{48} = -12,5 \text{ N}$$

El perno A es el más cargado, se analiza los esfuerzos sobre este.

$$\sigma = \frac{F_y^A}{A}$$

$$\tau = \frac{F_x^A}{A}$$

Donde:

F_x^A : Fuerza en el eje x sobre el perno A (Cortante)

F_x^B : Fuerza en el eje x sobre el perno B (Cortante)

F_y^A : Fuerza en el eje y sobre el perno A (Normal)

F_y^B : Fuerza en el eje y sobre el perno B (Normal)

σ : Esfuerzo normal

τ : Esfuerzo cortante

A: Area de la sección transversal del perno

El perno a analizar es M10 (diámetro 10 mm) con especificación 8.8 expresando que es de acero de medio carbono con temple y revenido y una resistencia de prueba mínima (resistencia que excede el 99% de los sujetadores) de 600MPa (Budynas & Nisbett, Tornillos, sujetadores y diseño de uniones no permanentes, 2008). El área de esfuerzo a tensión para un perno de diámetro nominal 10 mm y paso 1,5 mm es de 58 mm² (Budynas & Nisbett, Ejes, flechas y sus componentes, 2008) con lo que se procede a calcular los esfuerzos.

$$\sigma = \frac{178 \text{ N}}{58 * 10^{-6} \text{ m}^2} = 3,06 \text{ MPa}$$

$$3,06 \text{ MPa} < \frac{600 \text{ MPa}}{2}$$

$$\tau = \frac{76 \text{ N}}{58 * 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,31 \text{ MPa}$$

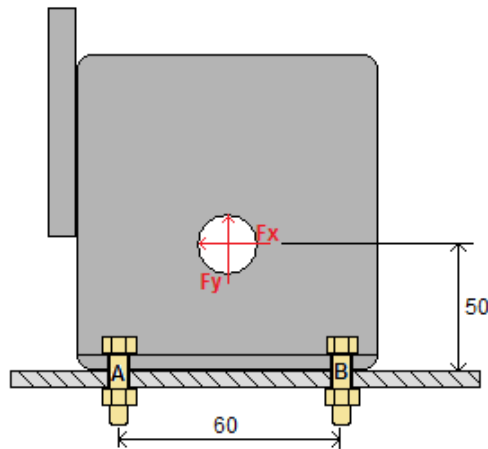
$$1,31 \text{ MPa} < \frac{(0,5)600\text{MPa}}{2}$$

Se comprueba la resistencia de los pernos para sujetar la chumacera.

- Pernos De Caja Reductora

Se hace el cálculo de la misma forma que los pernos de la caja reductora.

Ilustración 44. Dimensiones y cargas sobre caja reductora.



(Elaboración propia)

Tabla 35. Valores de cargas sobre caja reductora.

F_y [N]	162
F_x [N]	148

$$F_x^A = F_x^B = \frac{F_x}{2} = 74 \text{ N}$$

$$F_y^A = \frac{F_y}{2} - \frac{F_x * 50}{30} = -166 \text{ N}$$

$$F_y^B = \frac{F_y}{2} + \frac{F_x * 50}{30} = 328 \text{ N}$$

Se analiza el perno B por ser el más cargado. Al ser cuatro pernos, la fuerza real sobre el perno B es un medio de las fuerzas calculadas anteriormente. El perno es M6 (Diámetro 6 mm) y su especificación es 8.8 al igual que los de la chumacera, se toman sus mismas propiedades. Su área de esfuerzo a tensión es 20,1 mm² (Budynas & Nisbett, Tornillos, sujetadores y diseño de uniones no permanentes, 2008).

$$\sigma = \frac{164 \text{ N}}{20,1 * 10^{-6} \text{ m}^2} = 8,16 \text{ MPa}$$

$$8,16 \text{ MPa} < \frac{600 \text{ MPa}}{2}$$

$$\tau = \frac{37 \text{ N}}{20,1 * 10^{-6} \text{ m}^2} = 1,84 \text{ MPa}$$

$$1,31 \text{ MPa} < \frac{(0,5)600 \text{ MPa}}{2}$$

Se comprueba la resistencia de los pernos M6 a estos esfuerzos, aceptando la implementación de éstos para sujetar la caja reductora.

8.2.8 Planos de detalle.

A partir de la modelación del vehículo y la verificación de la resistencia mecánica de sus componentes, se obtuvo las características físicas de todos los elementos, así como la del ensamble completo. Con ellas se crearon planos de detalle de cada una de las piezas, sub-ensambles y ensambles completos para realizar la fabricación del vehículo. En el anexo D se presentan todos los planos de detalle del AGV y sus partes.

8.3 DISEÑO ELÉCTRICO

Una vez definido el tipo y número de baterías junto con las especificaciones de los motores se procede a diseñar el circuito eléctrico que entregará la energía eléctrica necesaria para mover y controlar el vehículo. Se debe tener en cuenta los

elementos de seguridad necesarios, así como los cables y componentes que satisfagan las necesidades.

8.3.1 Circuito de Potencia.

La alimentación energética del vehículo está dada por una cama de baterías conectadas en bloques de a tres baterías en paralelo y los dos bloques en serie obteniendo en las salidas una diferencia de potencial de 24 VDC (Voltios corriente directa). El circuito de potencia consta de un par de disyuntores (*Breakers*) de 50 Amperios para proteger los componentes de una sobrecarga, un contactor controlado por el PLC para aislar el circuito y una tarjeta de control de motores que recibiendo la alimentación, y la señal análoga del PLC, controla el sentido, la velocidad y el arranque de los motores (Ver planos eléctricos, Anexo B).

La tarjeta seleccionada es un driver para motores SABERTOOTH 2X25 diseñado para controlar dos motores que consuman máximo 25 Amperios cada uno y que permite la inversión de giro inmediata y el control análogo de velocidad (Ver Anexo L) cumpliendo todas las necesidades.

8.3.2 Selección de Cables.

El calibre de los cables de alimentación de cada motor se determinó basándose en la norma: “Los conductores de los circuitos ramales que alimenten un solo motor deben tener una capacidad de corriente no menor al 125 % de la corriente nominal del motor a plena carga.” (ICONTEC, 2002).

$$I_c = I_m * 1,25$$

$$I_c = 19,6 * 1,25 = 24,5$$

Donde:

I_c : Capacidad mínima del conductor [A]

I_m : Corriente nominal de cada motor a plena carga [A]

Los cables de alimentación de todo el circuito (entre baterías y tablero) se calcularon de acuerdo con la norma: "...Los conductores de suministro de varios motores o un motor(es) y otra(s) carga(s) deben tener una capacidad de corriente como mínimo igual a la suma de las corrientes a plena carga de todos los motores, más el 25 % de la capacidad de corriente del mayor motor del grupo, más la capacidad de corriente de todas las demás cargas." (ICONTEC, 2002)

$$I_c = (I_{m1} * 1,25) + I_{m2} + I_{cc}$$

$$I_c = (19,6 * 1,25) + 19,6 + 2 = 46,1$$

Donde:

I_c: Capacidad mínima del conductor [A]

I_{m1}: Corriente nominal de un motor a plena carga [A]

I_{m2}: Corriente nominal de un motor a plena carga [A]

I_{cc}: Corriente máxima del circuito de control [A]

Se usarán cables de cobre flexibles "encauchetados" que permitan el movimiento de los componentes y que sean resistentes a la abrasión, tensión y aplastamiento, su referencia es CENTELSA ST-C cuyas capacidades se ilustran en la tabla 36.

Tabla 36. Características y capacidades de cables CENTELSA ST-C.

1. Conductor		Número de Conductores	Diámetro del Núcleo	Diámetro Exterior	Peso Total Aproximado	Resistencia DC a 20°C	Capacidad de Corriente (A)	
Calibre	Diámetro						(*)	(**)
AWG	mm	No	mm	mm	kg/km	Ohm/Km	(*)	(**)
18	1,17	2	2,34	6,66	62	21,42	11	8
		3	2,52	7,05	74			
		4	2,82	7,71	90			
16	1,48	2	2,96	7,28	79	13,45	15	11
		3	3,19	7,72	96			
		4	3,57	8,46	117			
14	1,89	2	3,78	8,10	105	8,44	22	17
		3	4,07	8,60	130			
		4	4,56	9,45	160			
12	2,38	2	4,76	9,08	142	5,31	28	22
		3	5,13	9,66	178			
		4	5,75	11,41	241			
10	2,99	2	5,98	10,30	197	3,34	35	27
		3	6,44	11,75	271			
		4	7,22	12,88	336			
8	3,75	2	7,50	14,90	372	2,10	45	34
		3	8,08	15,81	462			
		4	9,05	18,35	612			
6	4,75	2	9,50	18,44	576	1,32	65	50
		3	10,24	19,55	717			
		4	11,47	21,39	886			

(*) Hasta tres conductores transportando corriente

(**) Cuatro conductores transportando corriente

Fuente: (CENTELSA, s.f.)

Se define que se necesitan para la conexión de cada motor: cables calibre 12 AWG. Para la alimentación del circuito de potencia y el de control: cables calibre 6 AWG.

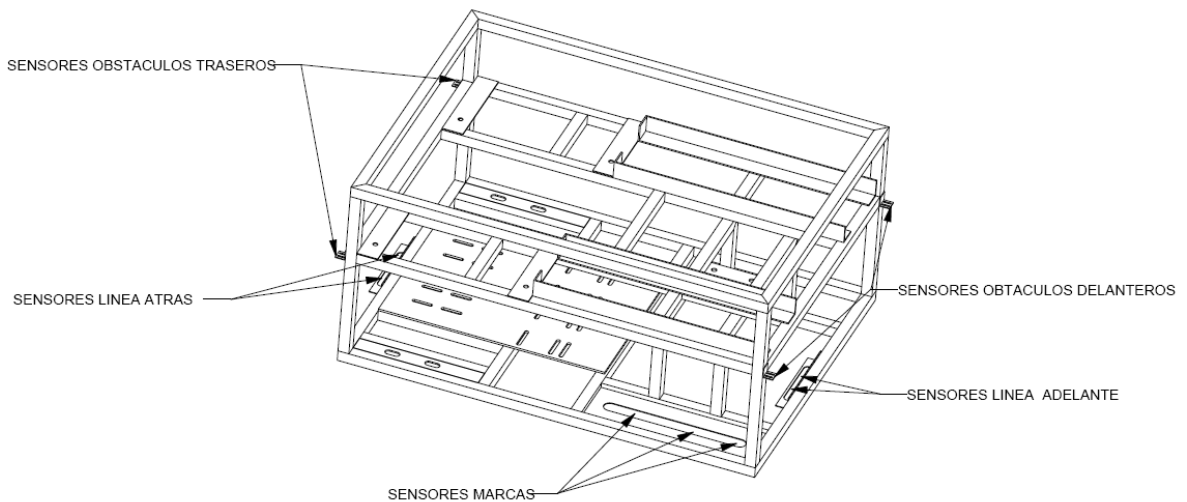
8.4 DISEÑO DEL CONTROL

La función principal del vehículo es transportar el stricker siguiendo una trayectoria definida. Como se definió anteriormente, la trayectoria estará marcada por una línea pintada en el piso de un color contrastante con su borde de modo que sensores infrarrojos puedan detectar si el vehículo está o no sobre la trayectoria. Con el uso de dos sensores (uno en el lado derecho y otro en el izquierdo de la línea) se logra que el vehículo detecte a qué lado debe girar para corregir su posición y no desviarse de su trayectoria. De la misma forma utiliza dos sensores traseros para desplazarse en reversa.

Otro requerimiento importante es la detección de obstáculos para evitar que el vehículo impacte algo mientras se desplaza, el uso de dos sensores ópticos con un rango de un metro aproximadamente permite al vehículo localizar obstáculos que se interpongan en su recorrido. Los sensores empleados para detectar las marcas en el suelo son inductivos (detectan metales magnéticos) evitando así que haya interferencia con la demarcación del circuito o otras señales.

La ubicación de los sensores en el vehículo se muestra en la ilustración 45.

Ilustración 45. Ubicación de los sensores en el vehículo.



Fuente: Elaboración propia.

8.4.1 Circuito de control.

El circuito de control se encuentra alimentado por las mismas baterías del circuito eléctrico (Ver numeral 8.3.1). A la entrada del circuito de control se tienen como elementos de seguridad dos fusibles (uno para cada terminal) de 6 Amperios. Luego se alimenta el controlador PLC y su módulo de expansión para salidas análogas. De éste circuito también se alimentan todas las entradas digitales del controlador (sensores, pulsadores y selectores), controlando su alimentación por medio de un selector (S1). Los planos en el anexo B muestran las conexiones de este circuito.

Entre las entradas se tiene:

- 1 Selector manual (S2) ubicado en el gabinete que enciende las entradas I1 o I2 excluyentemente. Éste permite escoger el modo de funcionamiento del control. I1 significa manual e I2 automático.
- 4 Pulsadores manuales ubicados en el mando remoto. Éstos se tienen en cuenta a la hora de tener el vehículo en el modo manual para dar ordenes de desplazarse adelante, atrás, girar a la derecha o izquierda definidos como las señales I3, I4, I5 e I6 respectivamente.
- 2 sensores fotoeléctricos auto-reflex para la detección de obstáculos con las señales I7 e I8.
- 3 sensores inductivos dedicados a la detección de marcas en el suelo para las diferentes funciones. Éstas con las señales I9, I10 e I11.
- 4 sensores infrarrojos para la detección de la línea guía del recorrido, dos para el caso de desplazarse hacia adelante y dos hacia atrás asignados a las entradas I12, I13, I14 e I15.
- Finalmente dos pulsadores manuales para las señales de START y STOP y un botón tipo hongo para PARO DE EMERGENCIA ubicados en el gabinete cuyas señales entran al PLC con las asignaciones I16, I17 e I18.

Por otro lado, las salidas del controlador están destinadas al control de los dos motores, enganche, señal de funcionamiento y seguridad. Los motores son

controlados por señales análogas enviadas del PLC a la tarjeta de control que varían entre 0 y 5V, siendo 0V el giro a máximas RPM impulsando el vehículo hacia adelante, 2,5V la detención del motor y 5V el giro a máximas RPM en el sentido contrario, teniendo en cuenta que se puede definir la velocidad requerida del vehículo asignando un valor proporcional en la señal análoga. Estas señales análogas salen del módulo de expansión del PLC y sus asignaciones son QW1.0 y QW1.1.

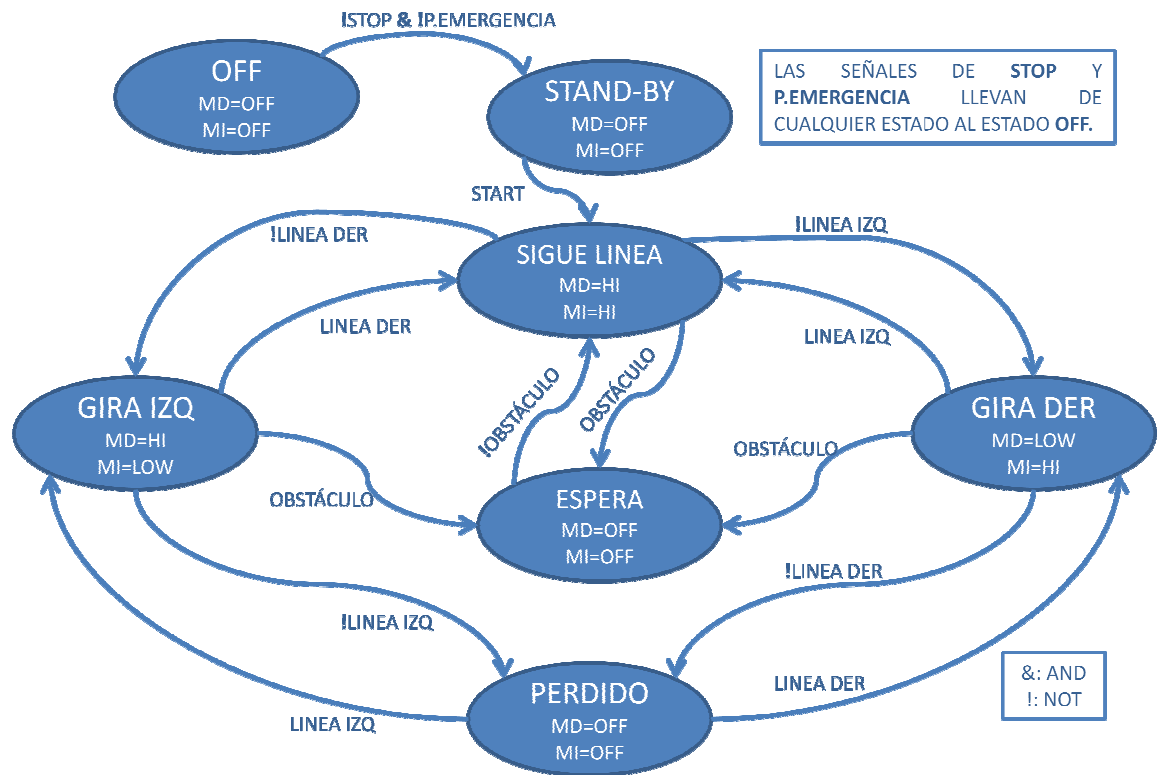
Las salidas Q2 y Q3 del PLC están destinadas a controlar los actuadores del sistema de enganche, la salida Q4 controla el bombillo verde ubicado en el gabinete y la salida Q5 controla el contactor para cerrar el circuito de potencia.

8.4.2 Programación del controlador.

El control del vehículo se realiza por medio del PLC que recibe la señal de todos los sensores y, de acuerdo a ello, define la actuación de los motores y demás salidas.

La programación del vehículo se basa principalmente en la máquina de estado finito presentada en la Ilustración 46. Al estar en Stand-BY y presionar el botón de START, el vehículo comienza a controlar sus motores de acuerdo a la señal entregada por los sensores de línea y siempre y cuando no detecte ningún obstáculo. Al recibir una señal de obstáculo se detiene y espera hasta que esta señal haya desaparecido para reanudar su seguimiento de línea. De igual forma si ningún sensor de línea se encuentra detectándola, el vehículo se detiene por completo.

Ilustración 46. Máquina de estado finito para programación básica del controlador.



Fuente: Elaboración propia.

MD: Motor Derecho, MI: Motor izquierdo, OFF: Detenido, HI: Altas RPM, LOW: Bajas RPM

Además de las funciones básicas de seguidor de línea, el vehículo debe realizar ciertas acciones como reversar, esperar o soltar el stricker de acuerdo a las necesidades del usuario, estas funciones serán indicadas por medio de las marcas metálicas en el piso que serán detectadas por medio de sensores inductivos.

De acuerdo a la máquina de estado finito definida en la Ilustración 46, se creó la secuencia del programa en lenguaje *Ladder* (por ser el usado para programar esta marca de PLC). En el anexo C se presenta la programación usada para seguir la línea, y de acuerdo con las marcas en el suelo detenerse para reversar siguiendo la línea igualmente. Como se aclaró anteriormente de acuerdo a las funciones

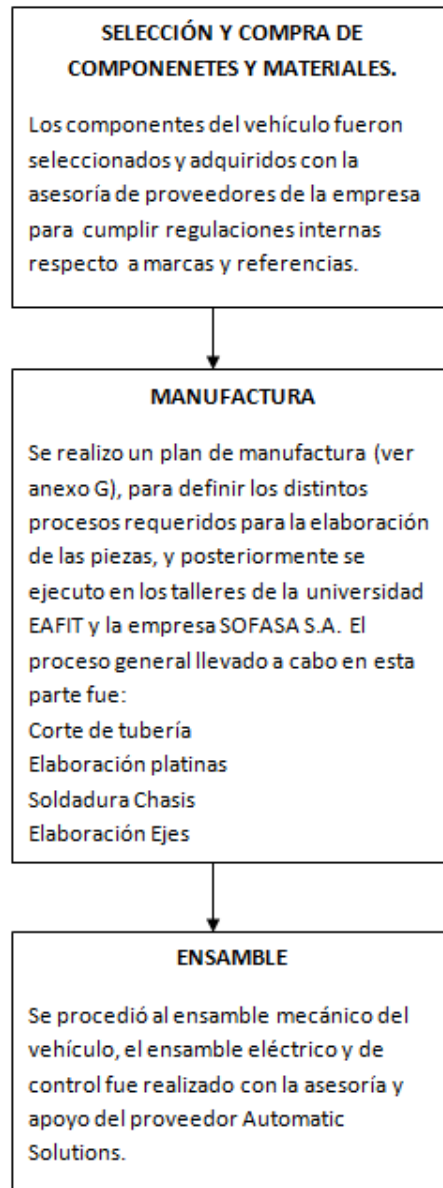
específicas del vehículo es posible modificar este programa para realizar diferentes acciones.

Por otro lado se realiza la programación del control manual (por medio del control remoto), de forma tal que si se posiciona el selector en modo manual, pueda ser desplazado haciendo uso de los botones del control sin recurrir a ningún sensor.

9. CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

El proceso de construcción del vehículo se puede observar en el siguiente diagrama de flujo:

Ilustración 47. Proceso de construcción.



Fuente: Elaboración propia.

9.1 COMPONENTES

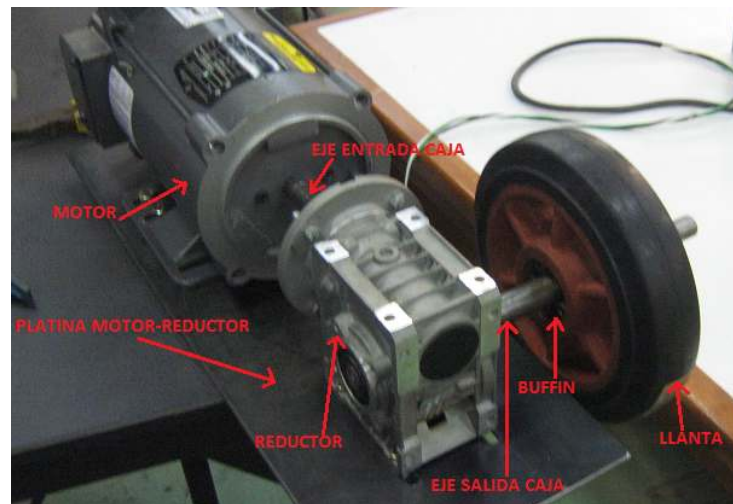
A continuación se ilustran los componentes reales del prototipo construido.

Ilustración 48. Estructura del vehículo.



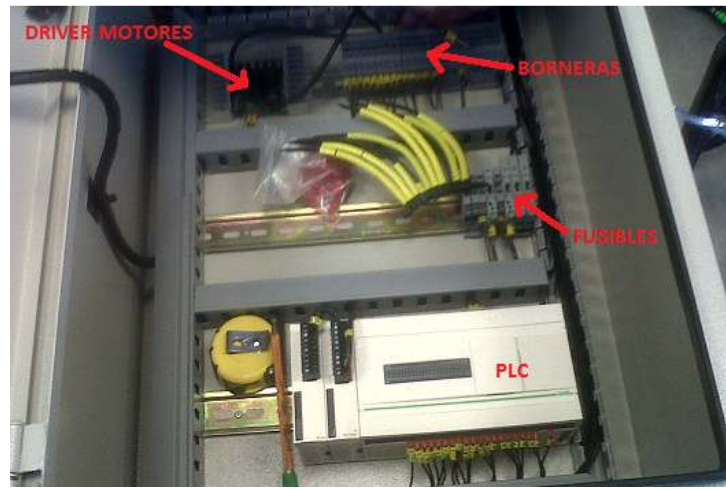
(Elaboración propia)

Ilustración 49. Transmisión del prototipo.



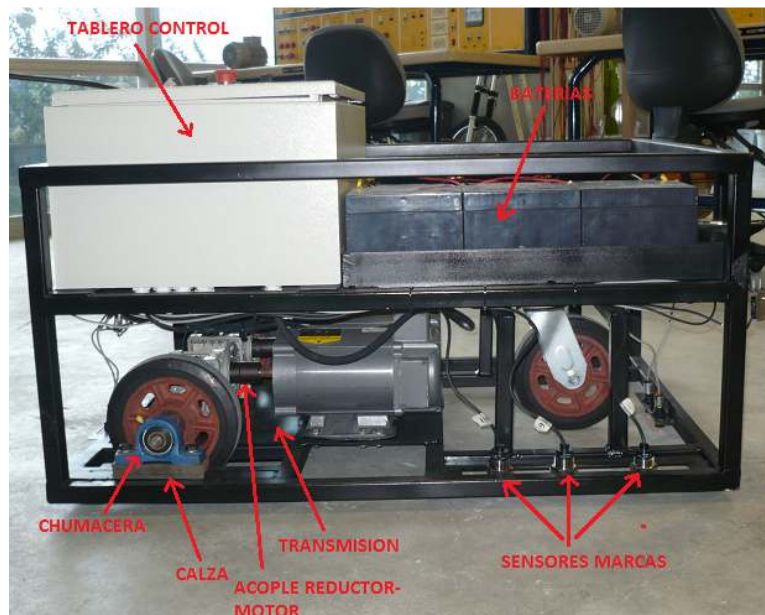
(Elaboración propia)

Ilustración 50. Tablero de control del prototipo.



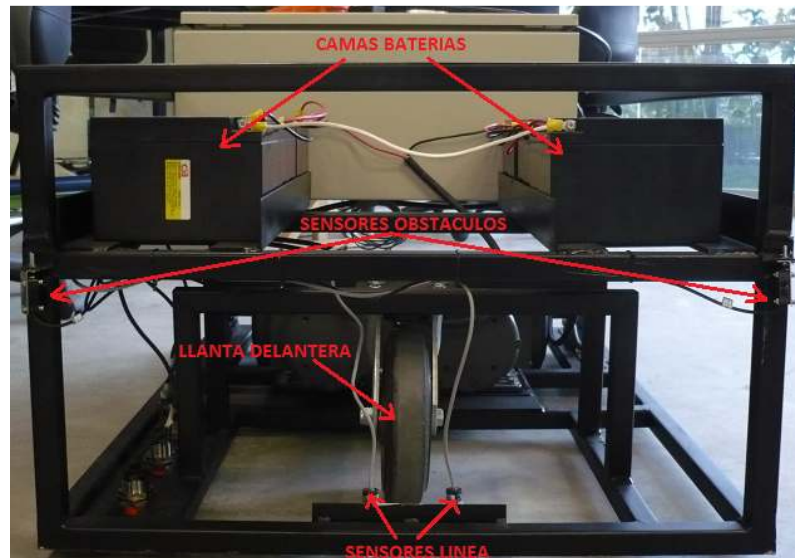
(Elaboración propia)

Ilustración 51. Ensamble del prototipo (lateral).



(Elaboración propia)

Ilustración 52. Ensamble del prototipo (frontal).



(Elaboración propia)

El AGV construido tiene la capacidad de seguir un trayecto determinado y tomar acciones indicadas mediante marcas metálicas, la función de enganche automático no fue contemplada para la construcción de este prototipo por solicitud de SOFASA debido a limitaciones internas para la ejecución del proyecto.

9.2 COSTOS DEL PROTOTIPO

Los costos del prototipo fueron estimados con base en la información suministrada por la empresa SOFASA S.A de cotizaciones referentes al proyecto (Ver anexo K), y adicionalmente de precios comerciales de los elementos de los que no se conoció costo real que representó para la empresa. En la Tabla 37 se presenta un resumen de los costos generales del prototipo.

Tabla 37. Costos de fabricación del prototipo.

REFERENCIA	MARCA	CANTIDAD	COSTO	PROVEEDOR	TOTAL
Baterías CB 12250 12V 25,0Ah	CGB	12	\$ 142,100	Suconel	\$ 1,705,200
Perfiles L x 6m		1	\$ 68,000	Ferrasa	\$ 68,000
Material platinas AISI/SAE 1020		1	\$ 80,000	Ferrasa	\$ 80,000
Tubería cuadrada (26mm x 26mm, espesor 2mm) X 6m		2	\$ 23,000	Ferrasa	\$ 46,000
Reductor 30:1 MU40 Sin Fin	SITI	2	\$ 420,000	Traincol	\$ 840,000
PLC (14E, 14S) 104	Telemecanique	1	\$ 1,750,000	Comtitronic	\$ 1,750,000
Motor DC 1/2HP 24V	Baldor	2	\$ 975,000	Comtitronic	\$ 1,950,000
Llantas BF8" EJE 1"		3	\$ 24,000	Distriuedas	\$ 72,000
Soporte giratorio llanta		1	\$ 31,000	Distriuedas	\$ 31,000
Chumacera FAG 203		2	\$ 24,000	Rodamientos	\$ 48,000
Buffin Serie S 18x47mm	Intermec	2	\$ 47,000	Intermec	\$ 94,000
Sabertooth 2X25	Dimension Engineering	1	\$ 300,000	Automatic Solutions	\$ 300,000
Tornillería		1	\$ 45,000	Mundial de tornillos	\$ 45,000
Servicio Automatic solutions					
Modulo 2 salidas análogo		1			
Sensor fotoeléctrico PNP autoreflex		2			
Tablero de Control		1			
Sensor inductivo Rasante PNP D30mm		3			
Sensor Infrarrojo seguidor de línea		4			
Pulsadores start stop		2	\$ 5,939,000	Automatic Solutions	\$ 5,939,000.00
Paro de emergencia	VER ANEXO B	1			
Selector de 2 posiciones		2			
Mando remoto inalámbrico con 2 pulsadores		1			
Cableado interno del tablero		1			
Conexión en laboratorio Eafit		1			
Elementos de cableado		1			
COSTO TOTAL COMPONENTES					\$ 12,968,200.00
COSTO TOTAL PROCESOS DE MANUFACTURA (VER ANEXO H)					\$ 383,640.00
COSTO TOTAL FABRICACION DEL PROTOTIPO AGV					\$ 13,351,840.00

Fuente: Elaboración propia.

Se puede apreciar que el costo del AGV es relativamente bajo comparado con los costos referentes de otros prototipos similares desarrollados en otras plantas ensambladoras de vehículos RENAULT en el mundo (enunciados en el numeral 5.5.1).

9.3 PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO

Con el vehículo ensamblado se realizaron las pruebas de funcionamiento en el laboratorio de mecatrónica de la universidad EAFIT. El objetivo de esta etapa es verificar el buen desempeño del vehículo antes de ser entregado a la empresa ensambladora. Se establecieron metas de funcionamiento, para estipular un orden y objetivos a seguir durante las pruebas, el resumen del plan de pruebas se ilustra en la Tabla 37. Las ilustraciones 53, 54, 55 y 56 enseñan las pruebas realizadas.

Ilustración 53. Ensayos de funcionamiento #1.



(Elaboración propia)