



**Diseño de la transmisión mecánica de
potencia de un vehículo eléctrico para el transporte humano en ciudades**

Camilo Andrés Morales Castro

Código: 21130639594

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá, Colombia

2023

Diseño de la transmisión mecánica de potencia de un vehículo eléctrico para el transporte humano en ciudades

Camilo Andrés Morales Castro

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Electromecánico

Director:

IM., M.Sc., Ph.D., Nicolás Giraldo Peralta

Línea de Investigación:

Eficiencia Energética y Transmisión de Potencia

Universidad Antonio Nariño

Programa Ingeniería Electromecánica

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Bogotá D.C., Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado:
Diseño de la transmisión mecánica de potencia de un
vehículo eléctrico para el transporte humano en ciudades,

Cumple con los requisitos para optar

Al título de

Ingeniero Electromecánico.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá, noviembre 2023.

Agradecimientos

A Dios por haberme dado la oportunidad llegar a este punto de mi proceso educativo, a mis padres por haberme dado la vida, crianza e inculcar valores en mí que son los que realmente te hacen persona, al señor Óscar Huertas en Villanueva – Casanare quien es un ser humano excepcional y una persona especial en muchos aspectos de la vida, siempre le estaré agradecido.

A mi tutor el ingeniero Nicolás Giraldo por su comprensión, orientación y paciencia en este proceso. También un agradecimiento especial al ingeniero Henry Moreno por la paciencia para enseñar porque gracias a eso despertó en mí el gusto y el entendimiento del diseño mecánico el cual es en mi opinión, la esencia de la ingeniería mecánica.

Contenido

Resumen	17
Abstract	19
Introducción.....	21
1 Planteamiento del proyecto	24
1.1 Antecedentes	25
1.2 Planteamiento del problema	28
1.3 Objetivos	30
1.3.1 General.....	30
1.3.2 Específicos.....	30
1.4 Justificación.....	31
1.5 Alcance.....	33
1.6 Metodología	33
2 Marco teórico.....	35
2.1. Introducción a los sistemas de transmisión	35
2.2. Tipos de transmisiones	36
2.2.1. Transmisión por ruedas de fricción	36
2.2.2. Transmisión por correas	37
2.2.3. Transmisión por cadena.....	38
2.2.4. Transmisión por engranajes.....	40
2.2.5. Transmisión tipo planetario	41

2.2.6. Ejes como elementos de transmisión de potencia	43
2.2.7. Características de los engranajes rectos.....	44
2.2.8. Perfil de involuta	44
2.2.9. Angulo de hélice.....	45
2.3. Descripción del vehículo eléctrico C1 de Lit Motors	46
2.3.1. Conceptos básicos de electrónica de potencia.....	46
2.3.2. Freno regenerativo (Sistema KERS)	47
2.4. Ecuaciones requeridas para el diseño de engranajes rectos	48
2.4.1. Relación de reducción de velocidad	48
2.4.2. Relación entre paso circular y paso diametral	49
2.4.3. Propiedades del diente de engranaje recto.....	49
2.4.4. Relación de reducción de velocidad	54
2.4.5. Velocidad de la línea de paso	54
2.4.6. Potencia	54
2.4.7. Fuerza tangencial.....	55
2.4.8. Par torsional.....	55
2.4.9. Fuerza radial	55
2.4.10. Fuerza normal.....	55
2.4.11. Número de esfuerzo flexionante S_t	55
3. Revisión de literatura vehículos eléctricos de dos ruedas	56
3.1 Definición y tipos de vehículos de dos ruedas	56
3.1.1. Historia y evolución de los vehículos de dos ruedas	56

3.1.2. Ventajas de los vehículos de dos ruedas.....	57
3.1.3. Impacto ambiental	57
3.1.4. Seguridad y consideraciones importantes.....	58
3.1.5. Mantenimiento y cuidados.....	58
3.2. Popularidad y tendencias actuales.....	58
3.3. Electrificación de los vehículos de dos ruedas.....	59
3.4. Transmisión de potencia en vehículos eléctricos de dos ruedas	63
4. Requerimientos de Diseño	65
4.1. Masa del EV	65
4.2. Velocidad del EV	65
4.3. Pendiente	65
4.4. Número de ruedas.....	65
4.5. Tren de transmisión.....	65
4.6. Fuente de energía eléctrica, batería recargable y electrónica de potencia	67
4.7. Sistemas de frenos, suspensión y dirección	68
5. Diseño del tren de transmisión.....	69
5.1. Requerimientos mecánicos del tren de transmisión	69
5.2. Estimaciones para calcular la potencia total requerida	70
5.2.1. Cálculo de la fuerza sobre el plano inclinado X.....	70
5.3. Factores que afectan el cálculo de la fuerza requerida para obtener la velocidad final .	71
5.3.1. Cálculo de la fuerza de rodadura o fuerza de fricción.....	73
5.3.2. Cálculo de la fuerza que ejerce la resistencia aerodinámica	76

5.3.3. Sumatoria de fuerzas que se oponen al avance del vehículo	76
5.3.4. Cálculo de la potencia total requerida	77
5.4. Determinación de rin y llantas	78
5.5. Cálculo de engranajes del tren planetario	80
5.5.1. Engrane sol o piñón de entrada.....	80
5.5.2. Engranajes planetarios.....	84
5.6. Corona de la transmisión planetaria	85
5.6.1. Cálculo de la corona	85
5.7. Selección del material para la fabricación de los engranes y la corona	88
5.7.1. Relación de contacto.....	89
5.7.2. Cálculo del número de ciclos de carga	91
5.7.3. Cálculo de resistencia a la picadura.....	93
5.8. Diseño del porta-planetarios.....	94
5.8.1. Características y condiciones de trabajo del portaplanetarios	95
5.8.2. Fuerzas sobre el soporte del engranaje	98
5.8.3. Selección del material para el porta-planetario	100
5.8.4. Selección del rodamiento para los engranajes planetarios	100
5.8.5. Características generales del rodamiento de agujas	100
5.9 Relación de transmisión	103
5.10. Selección de la unidad de potencia (Motor eléctrico)	103
6. Selección del freno regenerativo	107
6.1. Algunas de las ventajas del frenado regenerativo	108

6.2.	Algunas de las desventajas del frenado regenerativo.....	108
6.3.	Selección freno regenerativo para la aplicación en la unidad	110
7.	Mantenimiento de la unidad	111
7.1	Velocidad de paso entre los engranes	111
7.2	Fuerza de contacto de acuerdo al resultado del esfuerzo de contacto:.....	111
7.3	Tolerancia entre dientes del engrane:.....	111
7.3.1.	Propiedades y beneficios	113
7.3.2.	Capacidad de aceite lubricante de la transmisión mecánica de potencia	114
7.3.3.	Tabla de mantenimiento	115
	Conclusiones.....	117
	Recomendaciones.....	121
	Referencias Bibliográficas	122
	Anexos.....	132

Lista de Figuras

Figura 2-1 <i>Ruedas de fricción</i>	36
Figura 2-2 <i>Transmisión por polea y correa</i>	38
Figura 2-3 <i>Transmisión por cadena</i>	39
Figura 2-4 <i>Cadena y catarina de una moto</i>	40
Figura 2-5 <i>Transmisión tipo planetario de engranajes rectos</i>	42
Figura 2-6 <i>Transmisión planetaria básica</i>	42
Figura 2-7 <i>Eje de transmisión</i>	43
Figura 2-8 <i>Engranajes rectos, se aprecia el perfil de involuta</i>	45
Figura 2-9 <i>Fórmulas propiedades dientes de engranes rectos con ángulo de presión de 20°</i>	49
Figura 2-10 <i>Propiedades de pares de engranes</i>	50
Figura 2-11 <i>Características de los dientes de engranes rectos</i>	52
Figura 2-12 <i>Ángulo de presión</i>	53
Figura 4-1 <i>Partes básicas de una transmisión tipo planetario</i>	66
Figura 5-1 <i>Imagen de referencia vehículo eléctrico de 2 ruedas</i>	70
Figura 5-2 <i>Fuerzas que actúan sobre el EV en una pendiente</i>	71
Figura 5-3 <i>Fuerza de resistencia a la rodadura</i>	72
Figura 5-4 <i>Resistencia aerodinámica del vehículo</i>	74
Figura 5-5 <i>Coefficiente de arrastre</i>	75
Figura 5-6 <i>Diagrama de fuerzas que actúan sobre el vehículo</i>	77
Figura 5-7 <i>Ilustración diámetro y ancho de la rueda</i>	79
Figura 5-8 <i>Espesor del rin o espesor de pared</i>	79

Figura 5-9 <i>Engrane sol - piñón de entrada</i>	82
Figura 5-10 <i>Engranes planetarios</i>	84
Figura 5-11 <i>Corona de la transmisión planetaria</i>	86
Figura 5-12 <i>Factor de resistencia flexionante por ciclos de esfuerzo YN</i>	92
Figura 5-13 <i>Portaplanetarios con agujero estriado para fijación a un eje</i>	95
Figura 5-14 <i>Portaplanetarios del diseño</i>	96
Figura 5-15 <i>Fuerzas sobre el soporte del engranaje planetario</i>	97
Figura 5-16 <i>Diagrama de cuerpo libre, cortante y momento flector</i>	98
Figura 5-17 <i>Fuerzas de tensión y compresión en el soporte del engranaje, esfuerzo cortante torsional</i>	99
Figura 5-18 <i>Rodamiento K35/40/25</i>	102
Figura 6-1 <i>Representación gráfica del flujo de energía al frenar en un híbrido</i>	107

Lista de Tablas

Tabla 2-1 <i>Ficha técnica del vehículo C1 de Lit Motors</i>	46
Tabla 5-1 <i>Coefficiente de resistencia a la rodadura</i>	72
Tabla 5-2 <i>Pasos diametrales normalizados (Dientes / Pulgada)</i>	80
Tabla 5-3 <i>Número de dientes del piñón para asegurar que no haya interferencia</i>	81
Tabla 5-4 <i>Dimensiones características engrane sol</i>	84
Tabla 5-5 <i>Dimensiones características engranes planetarios</i>	85
Tabla 5-6 <i>Dimensiones características corona</i>	86
Tabla 5-7 <i>Factor de confiabilidad KR</i>	93
Tabla 5-8 <i>Dimensiones del rodamiento</i>	101
Tabla 5-9 <i>Rendimiento del rodamiento</i>	102
Tabla 5-10 <i>Dimensiones del rodamiento complemento figura 5-16</i>	103
Tabla 5-11 <i>Especificaciones motores Magnax</i>	106
Tabla 7-1 <i>Sistema de paso diametral (juego en pulgadas)</i>	112
Tabla 7-2 <i>Propiedades y beneficios del aceite Mobilube HD LS 80W-90</i>	113
Tabla 7-3 <i>Programa de mantenimiento</i>	116

Lista de abreviaturas

Abreviatura Término

<i>EV</i>	Vehículo eléctrico
<i>Pd</i>	Paso diametral
<i>p</i>	Paso circular
<i>Dp</i>	Diámetro de paso
<i>Dext. planeta</i>	Diámetro exterior engrane planetario
<i>Dsol</i>	Diámetro exterior engrane sol
<i>Dep</i>	Diámetro exterior engrane planetario
<i>Dc</i>	Diámetro exterior corona
<i>Dcorona</i>	Diámetro exterior corona
<i>Ncorona</i>	Número de dientes de la corona
<i>Fr</i>	Fuerza de rodadura
<i>F_{RA}</i>	Fuerza de resistencia aerodinámica (arrastre)
<i>CA</i>	Coefficiente de arrastre (Resistencia aerodinámica)
<i>F_{td}</i>	Fuerza total de desplazamiento
<i>R_T</i>	Relación de transmisión
<i>N_{CPL}</i>	Números de ciclos de carga engrane planetario
<i>P_{TE}</i>	Potencia total de entrada
<i>R_w</i>	Revoluciones en la llanta
<i>KERS</i>	Kinetic Energy Recovery System - Sistema de Recuperación de Energía Cinética.
<i>P_w</i>	Perímetro de la llanta
<i>V_m</i>	Volumen del motor
<i>V_a</i>	Volumen del alojamiento dentro del rin

Abreviatura Término

V_T	Volumen total
V_t	Volumen componentes de la transmisión

Resumen

La preocupación por bajar los índices de contaminación y la protección del medio ambiente han llevado a reflexionar sobre el uso desbordado de vehículos con motor de combustión interna para el transporte particular de pasajeros en ciudades como Bogotá. Se busca demostrar la viabilidad técnica para el desarrollo y ejecución del proyecto. Éste trabajo recopila y estudia información del presente y futuro del transporte de pasajeros en las grandes ciudades de latinoamerica y el mundo justificando así el diseño de una unidad de potencia que integra transmisión mecánica y motor eléctrico de corriente alterna con frenado regenerativo. Se considera que lo más importante es que el resultado será una disminución del uso de recursos para la construcción del dispositivo y el aprovechamiento energético. El proyecto se enmarca dentro del uso eficiente de recursos desde la construcción hasta el uso del dispositivo optimizando la utilización de la energía y los espacios al proyectar en el diseño el frenado regenerativo.

Se recopiló y estudió información sobre el uso actual de motores eléctricos y tipos de transmisiones usadas en vehículos eléctricos, se calcularon los engranajes del sistema planetario, se estableció el método de lubricación y se calculó la relación de engranajes para conseguir la velocidad máxima establecida en el diseño. La metodología usada se basó en la búsqueda, recolección, clasificación y análisis de información mayormente en internet y el fundamento valioso que encontré en el libro “Diseño de Elementos de Maquinas” 4ta edición de Robert Mott. El aprendizaje autónomo en el desarrollo del proyecto fue enriquecedor, la aplicación y adquisición de nuevos conocimientos obtenidos en el avance del trabajo valió el tiempo y el trabajo invertidos. Los antecedentes dan a conocer el estado del arte sobre el desarrollo y aplicación tecnológica de las transmisiones en los vehículos eléctricos y las generalidades de estos vehículos.

El creciente interés de los fabricantes por instalar transmisiones a los vehículos eléctricos, el desarrollo y la aplicación de motores eléctricos de alta eficiencia como los de flujo axial son elementos que permiten pensar en crear nuevos diseños aplicables en la realidad.

Palabras clave: Transmisión mecánica, eficiencia energética, vehículo eléctrico, batería recargable y frenado regenerativo.

Abstract

Concern about lowering pollution rates and protecting the environment has led to reflection on the excessive use of vehicles with internal combustion engines for private passenger transportation in cities like Bogotá. The aim is to demonstrate the technical viability for the development and execution of the project. This work compiles and studies information on the present and future of passenger transportation in the large cities of Latin America and the world, thus justifying the design of a power unit that integrates mechanical transmission and alternating current electric motor with regenerative braking. It is considered that the most important thing is that the result will be a decrease in the use of resources for the construction of the device and energy use. The project is framed within the efficient use of resources from construction to the use of the device, optimizing the use of energy and spaces by projecting regenerative braking into the design.

Information on the current use of electric motors and types of transmissions used in electric vehicles was collected and studied, the gears of the planetary system were calculated, the lubrication method was established and the gear ratio was calculated to achieve the maximum speed established in the design. The methodology used was based on the search, collection, classification and analysis of information mostly on the Internet and the valuable foundation that I found in the book “Design of Machine Elements” 4th edition by Robert Mott. The autonomous learning in the development of the project was enriching, the application and acquisition of new knowledge obtained in the progress of the work was worth the time and work invested. The background reveals the state of the art on the development and technological application of transmissions in electric vehicles and the generalities of these vehicles. The growing interest of

manufacturers in installing transmissions in electric vehicles, the development and application of high-efficiency electric motors such as axial flow motors are elements that allow us to think about creating new designs applicable in reality.

Keywords: Mechanical transmission, energy efficiency, electric vehicle, rechargeable battery and regenerative braking.

Introducción

Desde el siglo XIX, a pesar de sus limitaciones comenzaron a surgir los vehículos con motor eléctrico como una solución rápida para el transporte de personas de un lugar a otro. El estado del arte da cuenta de la antigüedad en el diseño y uso de este tipo de vehículos. El coche eléctrico fue uno de los primeros automóviles desarrollados en la historia de la industria automovilística, hasta el punto de que se desarrolló antes que el coche con motor de combustión de 4 tiempos. El vehículo eléctrico dominó el mercado del transporte desde mediados de la década de 1830 hasta aproximadamente 1918 y prácticamente desapareció de la escena en 1930 cuando ya se producían en serie los vehículos con motor a gasolina, uno de ellos el FORD [1]. Los altos volúmenes de gases contaminantes aportados a la atmosfera por los vehículos convencionales que usan combustibles de origen fósil, son la motivación más fuerte para volver la mirada al vehículo eléctrico. A comienzos del siglo XX existían miles de vehículos eléctricos, tales como carros, taxis, autobuses, entre otros tipos de vehículos. Sin embargo, el petróleo se convirtió en esa década en un combustible de bajo precio y los carros a gasolina podían arrancar su motor de combustión por medio de un motor eléctrico y una batería. La alta densidad de energía de la gasolina permitía que un vehículo pudiera recorrer 50 km con solo 8 kg de gasolina, mientras que un vehículo eléctrico necesitaba un banco de 270 kg de baterías de plomo ácido para hacer el mismo recorrido. En otras palabras, la poca autonomía que ofrecían los vehículos eléctricos, el alto costo de las baterías y el largo tiempo para su recarga fueron las principales causas de la desaparición de estos vehículos como medio de transporte humano en esa época. Los vehículos eléctricos que se mantuvieron fueron aquellos que se utilizaban para el desplazamiento de personas discapacitadas, aplicaciones en manejo de carga y los carritos de golf.

Al final del siglo XX se comenzó a considerar el problema de la contaminación ambiental producida por los vehículos de combustión interna y aparecieron los autos híbridos, los cuales se están utilizando en la actualidad. Estos autos híbridos funcionan con gasolina y electricidad, lo cual hace que su rendimiento sea mucho mayor al del vehículo de combustión interna. Hoy en día, con el uso de las baterías de iones de litio, se ha podido obtener una densidad de energía unas ocho veces superior a la de las baterías de plomo ácido. Esto ha motivado a volver al diseño y uso de los vehículos eléctricos como medio de transporte humano.

Este escenario ha permitido el desarrollo del vehículo eléctrico. Grandes empresas como Tesla Motors o BMW están consiguiendo modelos innovadores y muy funcionales, que incluso superan a los vehículos convencionales en muchos aspectos. En Latinoamérica, son pocos los emprendedores que están diseñando y fabricando este tipo de vehículos, a pesar de que en Chile, Argentina y Bolivia se encuentran las mayores reservas mundiales de litio, el cual es la principal materia prima para desarrollar baterías de alta densidad de energía.

La masificación de la producción de vehículos a combustión interna ha traído varios problemas en las zonas urbanas del mundo entero, la densidad del tráfico y el más grave de ellos, la contaminación producida por los gases de efecto invernadero. Por todos estos motivos, desde hace varias décadas se buscan cambios en la sociedad que ofrezcan alternativas basados en la sostenibilidad y en la no dependencia de los combustibles fósiles. De acuerdo con las estadísticas mundiales, más del 30% de la producción de dióxido de carbono proviene del sector transporte, lo cual es un índice bastante alarmante, ya que es un hecho de que este gas es el principal causante del efecto invernadero en el planeta tierra.

Este trabajo recopila información de libros en línea, páginas de internet de perfil técnico, páginas de internet de organismos internacionales como el BID y la Organización Panamericana de la Salud y basa el diseño en el procedimiento indicado en el libro Diseño de elementos de máquinas, cuarta edición de Robert L. Mott. La estructura del trabajo es la siguiente:

En el capítulo 1 se hace el planteamiento del proyecto exponiendo claramente la motivación y razones por las cuales se lleva a cabo el trabajo y la viabilidad del mismo.

El capítulo 2 contiene el marco teórico del trabajo, el cual inicia con una presentación básica de los sistemas de transmisión, involucra los temas de estudio e incluye los conceptos necesarios y ecuaciones para el desarrollo del proyecto.

El capítulo 3 revisa literatura sobre vehículos eléctricos de dos ruedas presentando una visión general de su evolución, ventajas y desventajas.

El capítulo 4 describe punto a punto los requerimientos de diseño del proyecto.

El capítulo 5 desarrolla el diseño de la transmisión planetaria la cual es el núcleo de este trabajo, incluye cálculos de los elementos y selección de los materiales para la fabricación.

El capítulo 6 describe los diferentes tipos de freno regenerativo y hace la selección de uno de ellos para la posible aplicación en el proyecto.

El capítulo 7 se refiere al mantenimiento del EV y propone la tabla de mantenimiento general y para la transmisión planetaria.

1 Planteamiento del proyecto

Actualmente la velocidad promedio de desplazamiento en Bogotá es de 23.2 km/h datos actualizados en abril de 2023 por la propia secretaría de movilidad de la ciudad, lograr una mejora en ese promedio de velocidad depende de varios factores, entre ellos se cuenta el espacio que ocupa cada vehículo en la vía y la eficiencia con que es usado, es decir, cuántos pasajeros transporta versus el espacio que ocupa y la cantidad de recursos que usa para cumplir la función. Los viajes urbanos en ciudades como Bogotá son en su mayoría realizados por particulares que se dirigen a sus trabajos, a sus lugares de estudio, a citas médicas o diligencias personales las cuales no exigen una capacidad de carga ni siquiera mediana, las personas que realizan los viajes urbanos generalmente llevan consigo una maleta de mano o equipaje de mano en la cual llevan alimentos, documentos y/o elementos pequeños que se pueden transportar con facilidad, se estima un peso promedio de 3 a 6 kilogramos, lo cual equivale a un 4% a 8% de 75 kilogramos que es el peso promedio de una persona, lo que si se requiere en gran medida para los desplazamientos urbanos es la agilidad en el desplazamiento, la facilidad y practicidad del parqueo del vehículo en que se movilizan las personas, la economía en el combustible y por supuesto, que sea un vehículo de bajas o nulas emisiones contaminantes. Estas demandadas características de viaje urbano plantean la necesidad de diseñar un vehículo eléctrico que aproveche mejor los espacios, sea capaz de transportar ágilmente a dos personas y sea amigable con el medio ambiente.

El proyecto a continuación se enfoca en el diseño de la transmisión de potencia a la rueda trasera de un EV tipo motocicleta que busca la mayor eficiencia en varios aspectos, espacio, eficiencia mecánica y energética.

1.1 Antecedentes

Los vehículos eléctricos tienen varias diferencias en su mecánica de funcionamiento con respecto a los vehículos convencionales con motor de combustión interna y allí una de las diferencias más marcadas es la forma en que se transmite la potencia del motor a las ruedas. Este proyecto propone el diseño de una transmisión que integra unidad de potencia y transmisión mecánica de potencia por lo cual es importante y necesario revisar el estado del arte con respecto a la transmisión de potencia de los vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos no equipan una caja de cambios o transmisión automática, en lugar de ello cuentan con un eficiente mecanismo de transmisión que aprovecha el torque constante y las altas revoluciones que alcanza un motor eléctrico. En la actualidad vehículos eléctricos como el Porsche Taycan o el Audi e-tron GT equipan una transmisión de 2 velocidades [2] la cual proporciona en la primera relación mejor rendimiento en el arranque mejorando la aceleración y hasta los 120 km/hora y la segunda relación mejor rendimiento a altas velocidades del vehículo sin necesidad de usar altísimas RPM en el motor eléctrico, por ejemplo, el motor eléctrico que impulsa al Tesla Model S Plaid 2021 puede girar hasta 23.308 RPM [3] lo cual lo convierte en una máquina muy eficiente sobre todo si se tiene en cuenta que no usa una caja de cambios, la eficiencia en la transmisión de energía desde la fuente de potencia, en este caso el motor eléctrico a las llantas es incomparable con la eficiencia de la transmisión de energía de los vehículos con motor de combustión interna, el EV con una eficiencia de transmisión de energía de entre el 89% y el 98% dependiendo del vehículo contra un terrible 26% [4] del vehículo con motor de combustión interna debido a las ya conocidas pérdidas de energía en forma de calor y las muchas piezas que intervienen en la transmisión de energía.

La instalación de una transmisión conviene desde el punto de vista de economía de energía eléctrica lo cual mejora la autonomía del vehículo eléctrico [5] el desarrollo de las transmisiones de potencia para los EV toman cada vez más relevancia con un argumento técnico muy importante y válido, seguir mejorando la eficiencia energética de estos vehículos, así lo evidencia el diseño de una transmisión de 2 velocidades para vehículo eléctrico lo cual hace del EV un vehículo aún más eficiente al permitirle bajas revoluciones tanto en ciudades como en autopistas de alta velocidad sin sacrificar batería por un exceso de RPM del motor eléctrico [6]. En las grandes ciudades el espacio es cada vez más escaso y a su vez su uso es privilegiado, desde los espacios ofrecidos por las constructoras en las nuevas unidades de vivienda hasta los espacios públicos se reducen debido a la alta ocupación, en Bogotá, por ejemplo, el consejo de la ciudad por medio del DANE estimó que su población para el año 2023 será de 7.968.095 habitantes [7] y una densidad poblacional de 24.643 personas por kilómetro cuadrado [8] lo cual deja a la ciudad en uno de los puestos más altos a nivel mundial en términos de densidad poblacional, lo anterior indica lo valioso del espacio y presenta el reto de optimizar el uso de los espacios públicos y el aprovechamiento energético, sumado a esto, la preocupación por la conservación del medio ambiente ha llevado a las grandes ciudades a comprometerse con programas de sostenibilidad y migración a energías limpias como es el caso de La Paz – México que con el apoyo del BID llevaron a cabo el proyecto de autogeneración a partir de plantas de energía solar fotovoltaica [9] por ello el proyecto propone la transmisión mecánica de potencia tipo planetario la cual en una misma carcasa contiene la unidad de potencia la cual será un motor eléctrico de corriente alterna. Otro caso es el de China donde los planeadores y administradores de sus sobrepobladas ciudades han vengo migrando a soluciones de transporte más amigables con el medio ambiente, más convenientes y prácticas para

las personas, así, por ejemplo, Shanghái, Guangzhou, Wuhan y Nanjing han venido cambiando incluso el diseño del espacio público (calles) e implementando el uso de bicicletas eléctricas compartidas para recorridos cortos a medianos. [10] Migrar al uso de energías limpias ya no es un reto, es un deber de los fabricantes de soluciones de movilidad, el objetivo principal es hacerlos ambientalmente convenientes y sostenibles, y con el desarrollo de nuevas tecnologías en las fuentes de energía para uso en la movilidad, también vienen los desarrollos tecnológicos de los sistemas de transmisión de potencia, los fabricantes se han encaminado a nuevas arquitecturas y diseños de sus componentes que optimizan el uso del espacio y otros recursos, una de las mejoras en las transmisiones de potencia para los vehículos eléctricos, la plantea BMW que ha instalado un eje cardan en sus motos eléctricas lo cual permite instalar el motor de forma longitudinal respecto a la rueda y al eje de transmisión aprovechando así su sentido de giro, la transmisión puede ser directa a la llanta o por medio de engranajes planetarios [11] la creciente inclinación de las personas por unirse al cuidado del medio ambiente y ser parte de la solución ha llevado a las grandes compañías fabricantes de coches a realizar generosas inversiones en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías que siempre apuntan al mejoramiento de la eficiencia energética, por ejemplo la compañía Británica “Ricardo” viene desarrollando transmisiones de potencia para EV de última generación y alto rendimiento [12] de esta forma podemos evidenciar que los desarrollos e investigaciones alrededor de las transmisiones de potencia para los vehículos eléctricos vienen en auge y están en pleno desarrollo lo cual le da pertinencia y fuerza a este proyecto, considero que el proyecto es viable e interesante desde el punto de vista de la eficiencia en la transmisión de energía y el aprovechamiento energético con la regeneración de la energía eléctrica facilitada por las altas revoluciones que proporciona el sistema planetario al ser éste el

que impulse el eje del motor eléctrico al desacelerar, descender pendientes o activar el freno regenerativo como primera etapa de frenado.

1.2 Planteamiento del problema

El gran crecimiento demográfico en las principales ciudades del país como consecuencia de la concentración de las industrias, las instituciones educativas, el desplazamiento de personas y otros factores de tipo socioeconómico y cultural ha traído consigo un gran problema de movilidad en estas urbes.

Tal vez el aspecto más relevante e importante es que, debido a las actividades de desarrollo humano en general, la cantidad de CO₂ liberada a la atmósfera ha estado en constante aumento [13] de manera alarmante durante los últimos 150 años. Como resultado, ha sobrepasado la cantidad de CO₂ que es capaz de absorber la biomasa, los océanos y otros sumideros. Se ha presentado un crecimiento de la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de aproximadamente 280 ppm en 1850 a 364 ppm en el año 1998, básicamente debido a las actividades realizadas por los humanos durante y después de la revolución industrial, la cual dio inicio en 1850. Los seres humanos hemos venido aumentando la cantidad de dióxido de carbono en el aire con el uso de combustibles fósiles, la producción de cemento, la tala y quema de bosques para limpiar áreas dedicadas posteriormente a cultivo o ganadería. Aproximadamente el 22% de la actual concentración de CO₂ en la atmósfera es consecuencia del desarrollo de estas actividades humanas.

El uso del vehículo eléctrico viene en aumento [14] por ejemplo en Europa, modelos como el Renault Zoe, VW e-Golf y BMW i3 movieron la tabla de las ventas significativamente. Noruega aumentó en 74 por ciento sus ventas con 36.300 unidades, mientras que Alemania registró 72 por

ciento de diferencia (33.000), Francia, 38 por ciento (24.300) y Holanda 118 por ciento (se ubica de octavo en la tabla con 17.800 modelos vendidos, aunque fue el mercado que más creció). Canadá incrementó en 37 por ciento el apetito por esta tecnología con 13.100 piezas comercializadas durante el primer semestre del año, y el Reino Unido alcanzó 62 por ciento de aumento con 12.700 ventas, mientras que Japón se ubicó en el puesto 10 de la tabla con un negativo de -27 por ciento y, aun así, logró colocar 11.000 unidades eléctricas en su territorio. En Colombia se han comercializado apenas 3.167 vehículos entre eléctricos (1.421), híbridos (1.120) e híbridos enchufables (626) desde el año 2011 a julio del 2019. A pesar de que inexplicablemente los híbridos no gozan del beneficio de exención del pico y placa en Bogotá, que es una plaza potencialmente interesante, son los de mayor desarrollo, y en la actualidad, el líder de todas estas tecnologías es el Kia Niro con 545 ventas totales en dos años y 366 de esas en lo que va corrido del 2019. A julio del 2019, en autos eléctricos puros manda el Renault Twizy (99) y en híbridos conectables apareció la Mercedes GLC, con 66 clientes.

Con base en lo anteriormente expuesto, este proyecto se propone el diseño de la transmisión mecánica de potencia a la rueda trasera y la selección del motor eléctrico con capacidad de regeneración para un vehículo eléctrico para el transporte de seres humanos con las siguientes características, vehículo biplaza, de dos llantas tipo motocicleta, tracción y freno regenerativo trasero y una velocidad máxima de 60km/hora, montado sobre un chasis del cual se adopta un diseño ya existente y del que no se incluyen detalles ni diseño en este proyecto.

1.3 Objetivos

1.3.1 *General*

Diseñar un sistema que integre transmisión mecánica de potencia y motor eléctrico regenerativo para aplicación en un vehículo eléctrico biplaza para el transporte humano en ciudades, cuya fuente principal de energía proviene de una batería recargable (enchufable) y como fuente secundaria está el frenado regenerativo.

1.3.2 *Específicos*

- Investigar, recopilar y analizar información relativa a las tecnologías y desarrollos aplicados a los vehículos eléctricos utilizados en ambientes urbanos.
- Diseñar unidad de potencia que integre motor eléctrico, mecanismo de transmisión de potencia y freno regenerativo a la rueda trasera.
- Calcular mecanismos de transmisión de potencia (ejes, engranajes, corona etc.) con base en las cargas máximas de arranque más el factor de diseño.
- Seleccionar el motor eléctrico (potencia, RPM) con capacidad regenerativa que cumpla con la expectativa de diseño del vehículo en cuanto a masa y velocidad objetivo.
- Crear tabla de mantenimiento y establecer tipo y cantidad de lubricante para la “unidad de potencia”.
- Calcular relación de transmisión para obtener la velocidad objetivo.

1.4 Justificación

El proyecto se justifica dentro del marco del ahorro, la eficiencia energética y el desarrollo de una movilidad sostenible, debido a que hoy en día los medios de transporte particulares son costosos, sin embargo, son una necesidad en los centros urbanos. Si a esto se le suma la posibilidad de aportar el diseño de una parte en el desarrollo de un vehículo que no contamine y use eficientemente la energía, se convertirá en una solución a los problemas principales de transporte y movilidad que se presentan en las grandes ciudades de Colombia y el mundo, con la ventaja adicional de no ser afectado por la diferencia de la presión atmosférica en ciudades de mayor altitud como Bogotá o La Paz, en este sentido, el empleo a gran escala de vehículos pequeños y frenado regenerativo como carga complementaria, aportará soluciones al problema de la contaminación ambiental y el tráfico denso.

Otro aspecto importante es que los vehículos impulsados por energía eléctrica de origen limpio serán mucho más confiables, ya que no utilizarían una gran cantidad de piezas como las que conforman los vehículos a gasolina, los cuales requieren de mucho mantenimiento. En otras palabras, este vehículo alternativo no utilizará aceite de motor, filtros, complejos mecanismos de transmisión de potencia, tubo de escape, radiador, inyectores, bujías, correas de accesorios y/o distribución, ni otras tantas piezas que aumentan la probabilidad de fallo en un vehículo automotor que utilice algún combustible fósil.

El desarrollo de este tipo de vehículo es completamente viable, de acuerdo a la previsión del mercado para los sistemas de frenos [15] (2017-2026) se concluye que el frenado regenerativo será un mercado importante en los próximos años. El valor de mercado de los sistemas de frenos

regenerativos alcanzará los 24.520 millones de dólares en 2026, con una tasa de crecimiento de 36,47% durante el período 2017 -2021.

La invención y el uso del freno regenerativo no es precisamente una tecnología nueva, el origen de este desarrollo data de 1967 [16] sin embargo, en los últimos años, ha tenido gran impulso y aplicación en los vehículos eléctricos debido a que logra recuperar hasta el 70% de la energía cinética que lleva el vehículo al momento de accionar el freno. El crecimiento demográfico casi sin control en ciudades como Bogotá ha traído consigo consecuencias negativas en varios aspectos, uno de ellos y tal vez el que más reviste relevancia es el ambiental por los conocidos efectos negativos en la calidad del aire y el aporte de CO₂ a la atmosfera. También con consecuencias en el aspecto social, por ejemplo, el desmejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de estas grandes urbes debido al tiempo que deben invertir en los recorridos rutinarios ya sea para desplazarse al trabajo, estudio u otras actividades, por otro lado la contaminación auditiva por el uso constante de bocinas y pitos por parte de los conductores en su afán de presionar el movimiento de los vehículos y podemos mencionar más consecuencias negativas importantes como el efecto nocivo sobre el sistema respiratorio de las personas.

La tendencia mundial de las tecnologías enfocadas a la movilidad de las personas sobre todo en las grandes ciudades apuesta a las unidades de potencia eléctrica lo cual ha traído consigo la necesidad de dar solución a la transmisión de potencia desde la unidad de potencia eléctrica hasta las ruedas sin perder de vista ni salirse del concepto de lo energéticamente eficiente, por lo anterior considero pertinente e importante plantear el diseño de una unidad de potencia que integre el motor eléctrico y los elementos mecánicos de la transmisión de energía hasta la rueda trasera.

1.5 Alcance

Para el desarrollo del proyecto según su delimitación y requerimientos de diseño se estimarán las siguientes especificaciones:

- Vehículo de dos ruedas con tracción y frenado regenerativo trasero.
- Masa total del vehículo incluidos los pasajeros 516kg.
- Diámetro externo de la rueda motriz 0.5m.
- Ancho de la rueda motriz 0.175m.
- Velocidad final máxima de desplazamiento 60km/h
- Tiempo estimado para la realización de este trabajo 12 semanas.

1.6 Metodología

- Diseñar unidad de potencia, se llevó a cabo la recopilación y estudio de la información general sobre los tipos de vehículos eléctricos y qué transmisiones usan actualmente a fin de tener una idea más aterrizada del estado del arte y desarrollo en ese aspecto con el objeto de plantear mejoras y/o no cometer errores de diseño que ya hayan sido resueltos en la industria.
- Cálculo de mecanismos, basado en los requerimientos de diseño y siguiendo el procedimiento indicado en el libro Diseño de elementos de máquinas cuarta edición de Robert Mott, se calcularon las piezas del mecanismo de transmisión de potencia a la rueda motriz teniendo en cuenta que para efectos de tamaño y configuración será una

unidad que integrará el motor eléctrico y la transmisión mecánica de potencia en un solo componente (tipo motor-reductor)

- Se hizo la selección del motor eléctrico basado en los resultados de los cálculos de potencia requerida para alcanzar la velocidad objetivo, adicionalmente se tuvo en cuenta que el diseño contempla la integración del motor eléctrico y el mecanismo de transmisión de potencia en una sola unidad (housing) lo cual fue una condición desde el inicio del proyecto.
- Conservando la esencia del proyecto, la cual es el uso eficiente de la energía en todos los sentidos, se especificó el tipo de lubricante adecuado para la transmisión planetaria, la cantidad necesaria para dar servicio y se planteó periodo de mantenimiento del componente y del EV en general.
- Con base en el requerimiento de diseño referente al límite de diámetro de la llanta motriz de 0.50 metros, se diseñó una relación de transmisión que favorece el funcionamiento del motor, el resultado obtenido junto al porcentaje adicional de potencia que se aplicó en la selección del motor eléctrico, asegura que la unidad de potencia estará en capacidad de mover y llevar el EV hasta la velocidad objetivo incluso en las condiciones más exigentes.

2 Marco teórico

2.1. Introducción a los sistemas de transmisión

Se podría decir que los sistemas de transmisión de potencia nacieron al tiempo con los motores y unidades de generación de energía cualquiera que sea su origen, combustibles fósiles, eólico, fotovoltaico y claro la energía eléctrica. Una transmisión de potencia es un mecanismo que permite transferir energía desde una fuente hasta otro mecanismo actuador que consume la energía generalmente para realizar un trabajo, el sistema puede incrementar, mantener o decrecer la velocidad y el torque de salida. Otra manera de decirlo, es un sistema que otorga la conducción de potencia de una fuente a otro tipo de mecanismo. Para ejecutar su función usa el movimiento de cuerpos sólidos tales como ejes, engranajes, poleas, correas, cadenas y catarinas. Con ello se incrementa, mantiene o decrece la velocidad y la fuerza que se entrega en el mecanismo actuador. (El autor). Una transmisión mecánica o accionamiento mecánico cumple las siguientes funciones; recibe la potencia de algún tipo de fuente giratoria, como un motor eléctrico, motor de combustión interna, turbina de gas, motor hidráulico o neumático, una turbina de vapor o de agua o hasta del movimiento manual que realiza un operador, en el caso típico la transmisión causa algún cambio en la velocidad de rotación de los ejes que forman la transmisión, para que el eje de salida trabaje con más lentitud o mayor velocidad que el eje de entrada. Existen mayor cantidad de reductores de velocidad que incrementadores de ésta. Cuando hay una reducción de velocidad existe un incremento correspondiente en el par torsional transmitido, por el contrario, un incremento de la velocidad causa una disminución del par torsional de salida en comparación con la entrada. [17].

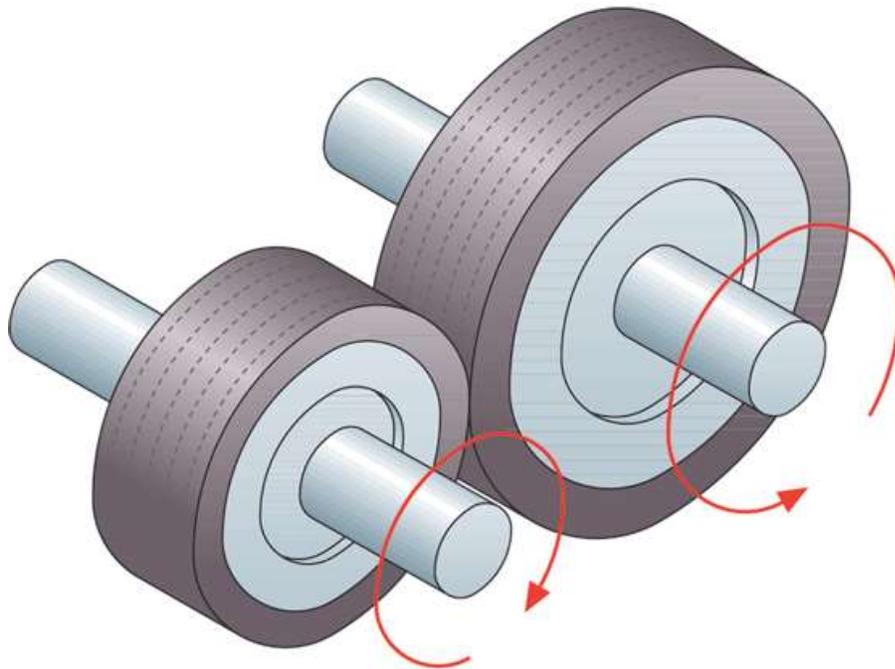
2.2. Tipos de transmisiones

2.2.1. Transmisión por ruedas de fricción

Es un sistema que, por medio del contacto de la periferia entre dos ruedas, transmiten la potencia entre ejes, presentan la desventaja del patinamiento al transmitir cargas altas, su uso se da fundamentalmente en aplicaciones livianas donde la transmisión de potencia no es exigente o que el patinamiento sea un problema, por ejemplo, en atracciones mecánicas de vaivén.

Figura 2-1

Ruedas de fricción



Nota. Fuente [18]

2.2.2. *Transmisión por correas*

Consiste en un sistema que transmite la potencia de un eje motriz por medio de una polea a otra polea que a su vez entrega la potencia a un eje conducido permitiendo así que este último realice una tarea específica.

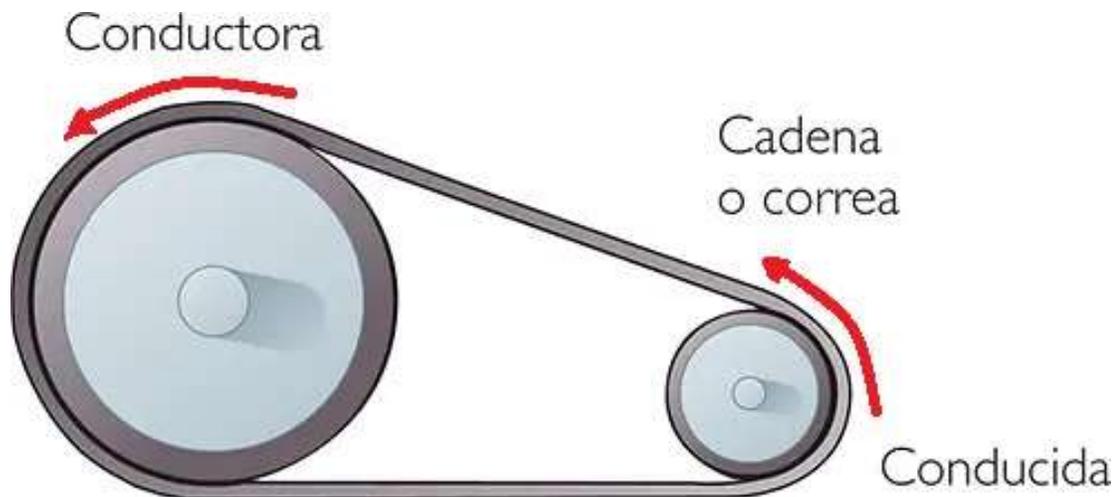
Es un sistema de transmisión flexible entre ejes y árboles caracterizado por el uso de una correa y dos o más poleas unidas fijas a los ejes o árboles entre los que se desea transmitir el movimiento. El sistema básico de transmisión es por rozamiento entre la correa y las poleas, aunque cuando se utilizan correas sincronizadas la transmisión es por empuje de los dientes. [19] Las bandas y las cadenas son los tipos principales de elementos flexibles de transmisión de potencia. Las bandas trabajan con poleas mientras que las cadenas trabajan con ruedas dentadas llamadas catarinas. Una banda es un elemento flexible de transmisión de potencia que asienta firmemente en un conjunto de poleas acanaladas. [20]

Las poleas son máquinas simples diseñadas para transmitir fuerza y operar como un mecanismo de tracción, reduciendo la cantidad de fuerza necesaria para mover una carga o mecanismo, en la antigüedad fue muy usada para suspender en el aire un peso. Consiste en una rueda que gira sobre un eje central y que está provista de un canal en su periferia por donde pasa una cuerda o banda. [21]

La figura 2-2 muestra el acoplamiento de poleas y correa.

Figura 2-2

Transmisión por polea y correa



Nota. Fuente [22]

2.2.3. Transmisión por cadena

De forma básica, es una transmisión conformada por dos ruedas dentadas y una cadena que transmite potencia por el arrastre de los dentados, la cadena es un elemento de transmisión de potencia formado por una serie de eslabones unidos con pernos. Este diseño permite tener flexibilidad, y permite además que la cadena transmita grandes fuerzas de tensión.

Cuando se transmite potencia entre ejes giratorios, la cadena entra en ruedas dentadas correspondientes a catarinas. La cadena más común es la de rodillos, en la que el rodillo sobre cada perno permite tener una fricción excepcionalmente baja entre la cadena y las catarinas.

Existen otros tipos de cadena como por ejemplo los de eslabón extendido que se usan principalmente en transportadores o con la denominación H que son para trabajo pesado o manejo de grandes cargas. [23]

En la figura 2-3 se identifican claramente las partes de una transmisión por cadena, allí se encuentran, piñón, cadena y catarina, este tipo de transmisión es ampliamente utilizada, desde bicicletas hasta transportadores que arrastran varias toneladas. [24]

Figura 2-3

Transmisión por cadena



Nota. Fuente [25]

La figura 2-4 muestra la transmisión de potencia convencional de una motocicleta, se ilustran cadena y catarina.

Figura 2-4

Cadena y catarina de una moto



Nota. Fuente [26]

2.2.4. Transmisión por engranajes

Son ruedas dentadas cilíndricas que se usan para transmitir movimiento y potencia desde un eje giratorio hasta otro. Los dientes de un engrane conductor encajan con precisión en los espacios entre los dientes del engrane conducido. Los dientes del impulsor empujan a los dientes del impulsado, lo cual constituye una fuerza perpendicular al radio del engrane. Con esto se transmite un par torsional y como el engrane es giratorio también se transmite potencia. [27] de los principales tipos de engranes aquí mencionaremos los engranes helicoidales y rectos, estos últimos con mayor énfasis ya que este proyecto adopta este tipo de engrane dentro del diseño.

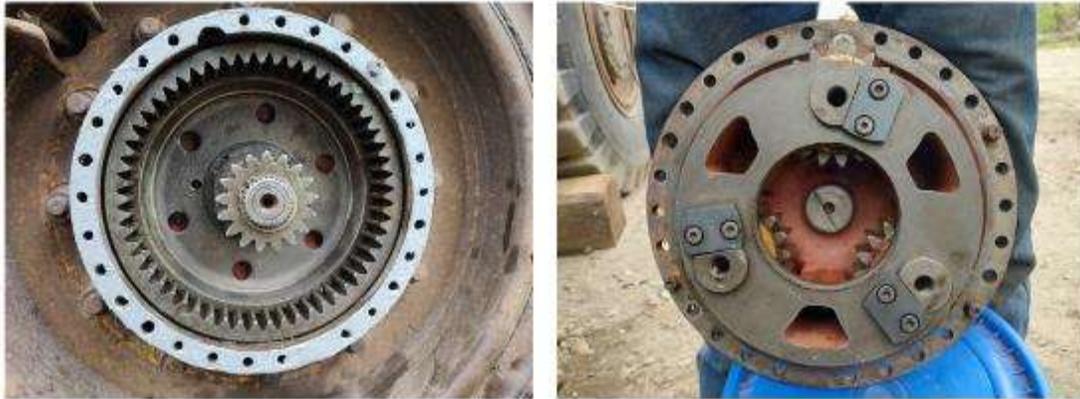
2.2.5. *Transmisión tipo planetario*

Es un conjunto de engranes o tren de engranajes que gracias a su configuración mantienen alineada la entrada y la salida del par torsional, de forma básica se componen de 4 partes, eje o engrane sol que es por donde entra el par torsional, engranes satélites o planetarios que son los elementos de transferencia de par, el porta planetarios que es la pieza que comúnmente sirve de salida o entrega de par torsional y la corona que se puede entender como el anillo con dentado interno sobre la cual engranan y se trasladan de forma circular los engranes planetarios al tiempo que lo hacen sobre el engranaje sol. [el autor]

Una caja de cambios planetaria es una caja de cambios con el mismo centro de rotación tanto para la entrada como para la salida, esto significa que el centro del engranaje de entrada gira alrededor del centro del engranaje de salida, y el eje de entrada y el eje de salida están alineados. La estructura de la caja de engranajes planetarios reduce la relación de velocidad de transmisión mientras aumenta proporcionalmente el par motor. Los reductores planetarios se utilizan en diversas aplicaciones en las que se necesita eficiencia y altos índices de reducción en un espacio reducido. [28] Lo compacto y eficiente del tren planetario lo hace muy deseable para este tipo de aplicaciones donde se requiere transmitir alto torque sin usar mucho espacio.

Figura 2-5

Transmisión tipo planetario de engranajes rectos

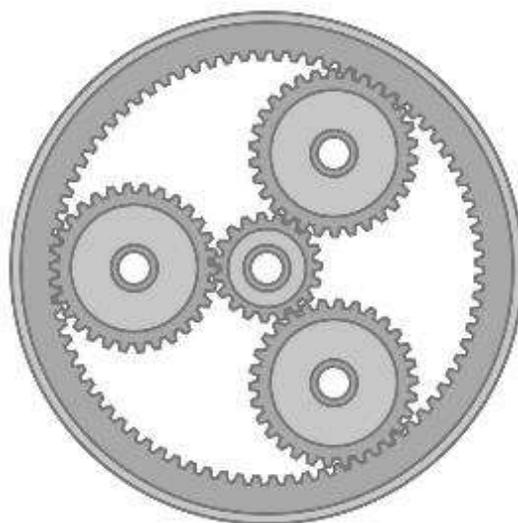


Nota. Fuente: El autor - Transmisión planetaria mando final dúmper Volvo modelo A25C

La figura 2-6 muestra la configuración básica de una transmisión planetaria.

Figura 2-6

Transmisión planetaria básica



Nota. Fuente [29]

2.2.6. Ejes como elementos de transmisión de potencia

En ingeniería mecánica se conoce como eje de transmisión a todo objeto axisimétrico especialmente diseñado para transmitir potencia. Estos elementos de máquinas constituyen una parte fundamental de las transmisiones mecánicas y son ampliamente utilizados en una gran diversidad de máquinas debido a su relativa simplicidad. Un eje o árbol de transmisión es un elemento que transmite un movimiento rotatorio y potencia, está sometido a esfuerzos de torsión debido a la transmisión de un par de fuerzas y puede estar sometido a otros tipos de esfuerzos mecánicos al mismo tiempo. [30] La figura 2-7 ilustra un eje de transmisión.

Figura 2-7

Eje de transmisión



Nota. Fuente [31]

2.2.7. Características de los engranajes rectos

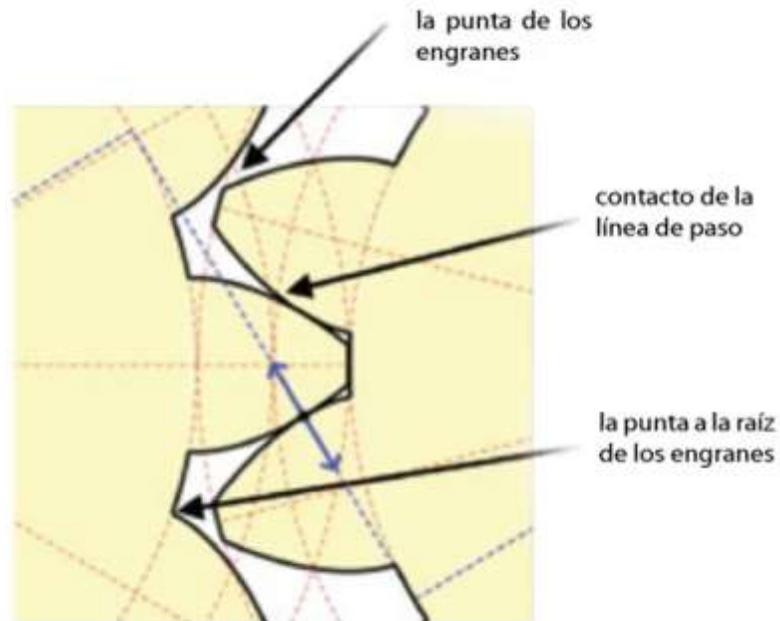
Un engrane recto es uno de los principales elementos de transmisión de potencia, entre sus características principales se tiene que sus dientes son rectos y paralelos a la línea de centro del eje que soporta el mismo engrane, tiene perfil de involuta y la fuerza transmitida es tangencial a los círculos de paso de los dos engranes, en los engranes helicoidales los dientes están inclinados formando un ángulo con respecto al eje, éste ángulo se denomina ángulo de hélice, la ventaja principal de los engranes helicoidales con respecto a los rectos es su acoplamiento y transmisión de fuerza de manera gradual y que varios dientes estén en contacto al mismo tiempo lo que permite transmitir cargas más altas, como desventaja se cuenta el empuje axial sobre el eje que ocasiona el ángulo de hélice el cual será mayor entre mayor sea el ángulo de hélice, esta carga o empuje axial debe ser soportada por los rodamientos. [32]

2.2.8. Perfil de involuta

Son básicamente las curvas del diente sobre las cuales acoplan y deslizan los dientes en los engranes rectos, el libro Diseño de elementos de máquinas lo define de la siguiente manera “la involuta es uno de los tipos de curvas geométricas llamadas *curvas conjugadas* o envolvente. Cuando dos dientes con esos perfiles engranan y giran, existe una relación constante de velocidad angular entre ellos, desde el momento del contacto inicial hasta el desengrane, la velocidad del engrane motriz está en una proporción constante respecto a la del engrane conducido” [33] el diente recto es usado con frecuencia para la transmisión de altísimas cargas, en la figura 2-5 se aprecian engranajes rectos en una aplicación real donde se transmiten cargas muy altas.

Figura 2-8

Engranajes rectos, se aprecia el perfil de involuta



Nota. Fuente [34]

2.2.9. *Angulo de hélice*

Los engranes helicoidales y rectos se diferencian por la orientación de sus dientes. En los engranes rectos los dientes son rectos y paralelos a la línea central del eje del engrane, en los helicoidales los dientes están inclinados y forman un ángulo con el eje y a ese ángulo se le llama ángulo de hélice [35] adicionalmente al ángulo de hélice, en los engranes helicoidales se deben tener en cuenta dos ángulos más, el ángulo de presión que son el ángulo de presión normal y el ángulo de presión transversal.

2.3. Descripción del vehículo eléctrico C1 de Lit Motors

El vehículo eléctrico escogido como referencia para el desarrollo del trabajo es una moto eléctrica que cuenta con techo, puerta de acceso, asiento con espaldar, cinturón de seguridad, airbags y un innovador sistema de estabilización el cual le permite permanecer en equilibrio sobre sus dos ruedas incluso estando en reposo, esto gracias a dos giroscopios que integra en la parte baja del chasis.

Tabla 2-1

Ficha técnica del vehículo C1 de Lit Motors

Ítem	Parámetro	Unidad	Valor/Aplicación
1	Estabilización	N/A	Sistema de giroscopios
2	Masa	Kilogramos	362
3	Vel. Máxima	mph	100
4	Batería	kWh	13
5	Tiempo de carga	minutos	240 aprox.
6	Potencia	kW	2 motores de 20
7	Autonomía	Kilómetros	240
8	KERS	N/A	Si

2.3.1. Conceptos básicos de electrónica de potencia

La electrónica de potencia es la parte de la electrónica que se encarga de crear y estudiar dispositivos usados para el control y transformación de la energía eléctrica en voltajes de media y alta tensión, su aplicación es muy diversa, por medio de estos dispositivos se consigue la conversión de energía eléctrica de AC a DC y viceversa, cambios de frecuencia o cambios de tensión, control de máquinas eléctricas y estabilización de voltajes. Algunos de los componentes más usados en la electrónica de potencia son los diodos, transistores de varios tipos y capacitores.

2.3.1.1. Inversor

Es un dispositivo utilizado en la electrónica de potencia para convertir un voltaje DC a AC, el inversor en si es un desarrollo de la electrónica de potencia, en su interior usa IGBT (insulated-gate bipolar transistor / transistor bipolar de puerta aislada) y MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor / Transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor) para cambiar de dirección y modular el pulso a fin crear la onda senoidal de la corriente AC. Los IGBT y MOSFET son a su vez controlados por un computador que se encarga de activarlos y desactivarlos a la velocidad necesaria para generar la frecuencia requerida.

2.3.1.2. Rectificador

Es un componente electrónico que convierte la corriente AC en DC, lo consigue mediante el uso de diodos y capacitores, los diodos se encargan de permitir o cerrar el paso de la corriente dependiendo de su dirección y los capacitores se convierten en filtros o “compensadores” que atenúan la caída de voltaje que ocasiona la honda senoidal de la corriente AC a tal punto de convertirla en una señal de corriente AC. Son aparatos de la electrónica de potencia extensamente usados en electrodomésticos y cargadores de dispositivos de telefonía celular y computadoras portátiles.

2.3.2. Freno regenerativo (Sistema KERS)

Es un tipo de frenado que permite aprovechar la energía cinética proveniente de las ruedas del vehículo, se consigue usando el mismo motor eléctrico que inicialmente impulsó el vehículo y con el cual se venció la inercia estática, se convierte en un freno dinámico al transformarse instantáneamente en un generador de energía eléctrica, las mismas conexiones de alimentación del motor eléctrico pasan a ser las líneas que conducen una carga eléctrica que puede recargar una

batería lo cual es la esencia del frenado regenerativo o simplemente disiparse en calor para el caso del freno reostático caso en el que la carga eléctrica es consumida por un banco de resistencias o capacitores, en cualquiera de los dos casos, es el consumo de energía lo que produce el frenado en el motor eléctrico. El freno regenerativo fue desarrollado en 1967. Existen modelos de EV que usan esta tecnología como el Honda Insight, BMW Vision Efficient Dynamics y el Toyota Prius [36]

2.4. Ecuaciones requeridas para el diseño de engranajes rectos

A continuación, se relacionan las ecuaciones que se requieren para el diseño de engranajes rectos las cuales serán usadas para los cálculos en este trabajo. Se listan primero las ecuaciones relativas a la cinemática de los engranes y posteriormente las que se usarán para el cálculo de los engranajes.

2.4.1. Relación de reducción de velocidad

La relación de reducción de velocidad es el número de veces que se reduce la velocidad (rpm) del eje de entrada con respecto al eje de salida, es el cociente del número de dientes del piñón entre el número de dientes del engrane, es equivalente al cociente del número de RPM del engrane entre el número de RPM del piñón.

$$\frac{n_p}{n_G} = \frac{N_G}{N_p} \quad (1)$$

Paso circular, p . Es la distancia desde un punto sobre un diente al punto correspondiente del siguiente diente medido sobre la línea de paso:

$$p = \pi D/N \quad (2)$$

Paso diametral, Pd. Es el sistema de paso que se usa en USA, es el número de dientes por pulgada de diámetro de paso:

$$Pd = \frac{Ng}{Dg} = \frac{Np}{Dp} \quad (3)$$

2.4.2. Relación entre paso circular y paso diametral

$$Pd * p = \pi \quad (4)$$

2.4.3. Propiedades del diente de engranaje recto

A continuación, se describen las propiedades de los engranes rectos.

Figura 2-9

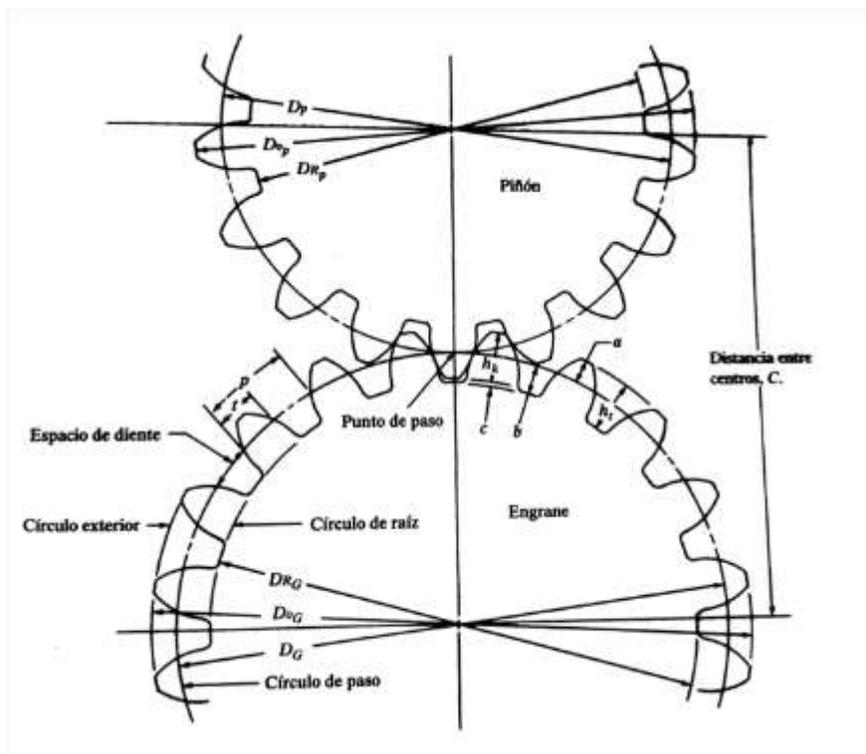
Fórmulas propiedades dientes de engranes rectos con ángulo de presión de 20°

Propiedad	Símbolo	Paso grueso < 20	Paso fino ≥ 20	Sistema de módulo métrico
Addendum	a	1/Pd	1/Pd	1.00*m
Dedendum	b	1.25/Pd	1.200/Pd+0.002	1.25*m
Holgura	c	0.25/Pd	0.200/Pd+0.002	0,25*m

Nota. Tomado de Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 314

Figura 2-10

Propiedades de pares de engranes



Nota. Fuente: Tomado de Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 313

- Altura de la cabeza o Adendum, (a) distancia radial desde el círculo de paso al borde exterior del diente.
- Altura del pie o Dedendum, (b) distancia radial desde el círculo de paso hasta la base del diente.
- Holgura (c) espacio libre entre el borde exterior del diente y la base entre dientes con que engrana.

$$c = b - a \quad (5)$$

- Diámetro exterior, D_o , diámetro entre bordes de dientes.

$$D_o = D + 2a \quad (6)$$

- Diámetro de raíz, D_R , es el diámetro en la base de los dientes.

$$D_R = D - 2b \quad (7)$$

- Altura total, h_t , es la distancia radial tomada del borde del diente a la base, pero aplicada en el hueco o espacio entre dientes.

$$h_t = a + b \quad (8)$$

- Profundidad de trabajo, h_k , es la distancia radial desde borde del diente hasta la base sin tener en cuenta el espacio de la holgura.

$$h_k = 2a \quad (9)$$

- Espesor del diente, t , es el ancho del diente medida en longitud de arco sobre el círculo de paso.

$$t = p/2 = \pi/(2Pd) \quad (10)$$

- Espacio entre dientes, es la longitud de arco medida del lado derecho de un diente al lado izquierdo del siguiente, en teoría debería ser igual al espesor, pero se debe tener en cuenta el juego entre dientes que engranan.

- Juego, es la diferencia entre el espesor t y el espacio entre dientes, en términos prácticos es la tolerancia que facilita el engrane de los dientes, provee el espacio para la película de lubricación y facilitar la fabricación ya que el juego reduce la necesidad de precisión en la fabricación de los engranes.
- Ancho de cara, (F), es el ancho del diente sobre el borde que es paralelo al eje.
- Chaflán, es el radio de curvatura que une el perfil de involuta del diente con su base.
- Cara, es la distancia del addendum pero por el costado o superficie donde hace contacto con el diente con que engrana.
- Flanco, es la distancia del dedendum pero por el costado o superficie donde hace contacto con el diente con que engrana, la cara y el flanco componen la superficie de contacto del diente.

Figura 2-11

Características de los dientes de engranes rectos



Nota. Fuente: Tomado de Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 309.

- Distancia entre centros, C , es la distancia entre los centros de los engranes engranados, del piñón a engrane. Es la suma de los radios de paso de los dos engranes.

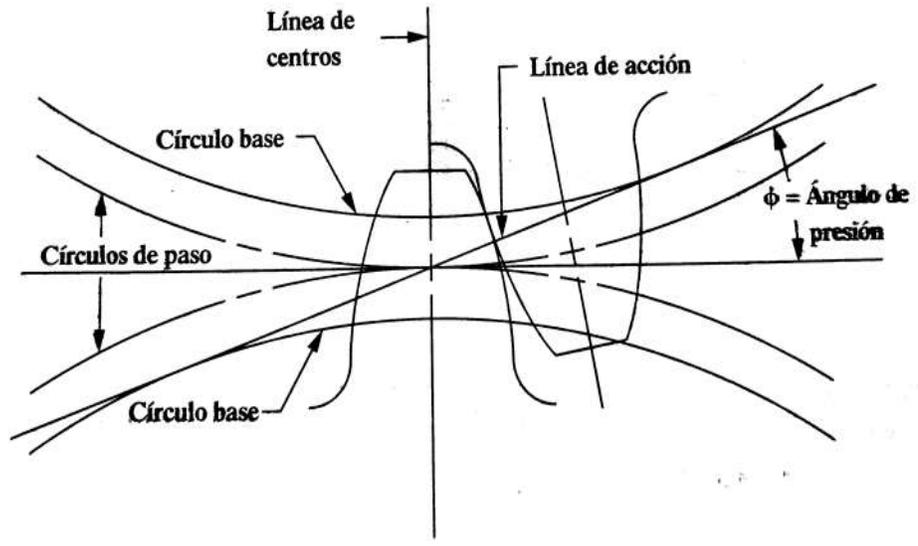
$$(D_p + D_G)/2 \tag{11}$$

- Angulo de presión, es el ángulo que forma la tangente de los círculos de paso y la línea normal trazada sobre la superficie del diente, es decir, sobre el addendum y dedendum.
- Diámetro del círculo base, D_b , es el círculo en el cual se engrana el perfil de involuta del diente, se encuentra entre el diámetro de raíz y el círculo de paso.

$$D_b = D \cos \phi \tag{12}$$

Figura 2-12

Ángulo de presión



Nota. Fuente: Tomado de Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 316.

- Relación de contacto, m_f , cuando dos engranes se acoplan, es importante que antes que el diente termine de desacoplar, ya haya otro diente iniciado el acoplamiento, la relación de contacto es el número promedio de dientes en contacto durante la transmisión de potencia.

$$m_f = \frac{\sqrt{R_0 p^2 - R_b p^2} + \sqrt{R_0 b^2 - R_b^2} - C \text{ Sen} \phi}{p \text{ Cos} \phi} \quad (13)$$

Φ = Ángulo de presión, R_{op} = Radio exterior del piñón $D_{op}/2$, R_{bp} = Radio círculo base del piñón $D_{bp}/2$, R_{og} = Radio exterior del engrane $D_{og}/2$, R_{bg} = Radio círculo base del engrane mayor $D_{bg}/2$, C = Distancia entre centros $(N_p + N_g)/(2Pd)$, p = Paso circular π/Pd

2.4.4. Relación de reducción de velocidad

$$\frac{N_p}{N_g} = \frac{n_p}{n_g} \quad (14)$$

2.4.5. Velocidad de la línea de paso

$$V_t = ((\Pi * D * n))/ 12 \text{ (pies/min)} \quad (15)$$

2.4.6. Potencia

$$P = W_t \times V_t \text{ (hp)} \quad (16)$$

2.4.7. Fuerza tangencial

$$Wt = 33000 x \frac{P}{vt} (lb) \quad (17)$$

2.4.8. Par torsional

$$T = 63000 x \left(\frac{P}{n}\right) \left(\frac{lb}{pulg}\right) \quad (18)$$

2.4.9. Fuerza radial

$$Wr = Wt x Tan \phi \quad (19)$$

2.4.10. Fuerza normal

$$Wn = Wt / Cos \phi \quad (20)$$

(ϕ es el ángulo de presión del perfil del diente)

2.4.11. Número de esfuerzo flexionante St

$$St = \frac{Wt.Pd}{FJ} Ko Ks Km Kb Kv \quad (21)$$

Ko, factor de sobre carga, **Ks**, factor de tamaño, **Km**, factor de distribución de carga, **Kb**, factor de borde, **Kv**, factor dinámico.

3. Revisión de literatura vehículos eléctricos de dos ruedas

3.1 Definición y tipos de vehículos de dos ruedas

Los vehículos de dos ruedas son medios de transporte que se apoyan en dos ruedas para mantener su equilibrio y movimiento. Estos vehículos son ampliamente utilizados en todo el mundo debido a su eficiencia, agilidad y versatilidad en diversas situaciones de tráfico. Hay varios tipos de vehículos de dos ruedas, entre los que se incluyen:

Motocicletas: Son vehículos motorizados de dos ruedas diseñados para transportar uno o más pasajeros. Pueden clasificarse en varios subtipos según su uso, como motocicletas de turismo, deportivas, crucero y todoterreno.

Ciclomotores: Son vehículos motorizados más pequeños que las motocicletas y tienen una cilindrada menor. Están diseñados para trayectos cortos y suelen tener velocidades máximas limitadas por la ley. [37]

Scooters: Son vehículos de dos ruedas con una plataforma plana para los pies y transmisión automática. Son populares en zonas urbanas debido a su fácil manejo y consumo eficiente de combustible.

Bicicletas: Aunque no son motorizadas, las bicicletas son otro tipo importante de vehículo de dos ruedas. Se impulsan mediante pedales y son una opción ecológica y saludable para el transporte personal.

3.1.1. *Historia y evolución de los vehículos de dos ruedas*

La historia de los vehículos de dos ruedas se remonta al siglo XIX, cuando los primeros prototipos de bicicletas fueron creados. La invención de la motocicleta se atribuye a Gottlieb Daimler y

Wilhelm Maybach en la década de 1880, quienes diseñaron una motocicleta propulsada por un motor de combustión interna.

Con el tiempo, las motocicletas evolucionaron, incorporando mejoras en diseño, potencia, seguridad y comodidad. La popularidad de los vehículos de dos ruedas ha crecido significativamente en todo el mundo, convirtiéndolos en una opción de transporte común y apreciada. [38]

3.1.2. Ventajas de los vehículos de dos ruedas

Eficiencia y agilidad, una de las principales ventajas de los vehículos de dos ruedas es su eficiencia en términos de consumo de combustible y espacio. Consumen menos combustible en comparación con los vehículos de cuatro ruedas, lo que los convierte en una opción más económica para los desplazamientos diarios. Además, su diseño compacto y su capacidad para maniobrar fácilmente en el tráfico congestionado les permiten llegar rápidamente a su destino, evitando atascos y reduciendo los tiempos de viaje.

3.1.3. Impacto ambiental

Los vehículos de dos ruedas generan menos emisiones de gases contaminantes en comparación con los vehículos de mayor tamaño. Al utilizar menos combustible, contribuyen a la reducción de la huella de carbono y al cuidado del medio ambiente.

Facilidad para el estacionamiento, debido a su tamaño compacto, los vehículos de dos ruedas requieren menos espacio para estacionarse. Esto facilita encontrar estacionamiento en áreas urbanas densamente pobladas y reduce los problemas relacionados con la disponibilidad de espacio para estacionar. [39]

3.1.4. Seguridad y consideraciones importantes

Seguridad en vehículos de dos ruedas

Aunque los vehículos de dos ruedas ofrecen muchas ventajas, también presentan desafíos en términos de seguridad. Los motociclistas están más expuestos a los riesgos por lesiones en comparación con los conductores de vehículos de cuatro ruedas, ya que carecen de la protección estructural de un automóvil [40]. Es fundamental usar equipo de protección, como cascos, guantes, chaquetas y pantalones con protecciones, para reducir el riesgo de lesiones en caso de un accidente.

3.1.5. Mantenimiento y cuidados

El mantenimiento adecuado es crucial para garantizar la seguridad y la durabilidad de los vehículos de dos ruedas. Esto incluye verificar regularmente los frenos, neumáticos, luces y sistemas eléctricos como es necesario en cualquier otro vehículo, además, seguir los periodos de mantenimiento recomendados por el fabricante es esencial para prevenir averías y garantizar un funcionamiento óptimo.

3.2. Popularidad y tendencias actuales

En la era moderna, los vehículos de dos ruedas siguen siendo muy populares en todo el mundo. Su uso se ha extendido más allá de la mera funcionalidad de transporte, convirtiéndose en una forma de vida para muchos entusiastas de las motocicletas y ciclomotores [41]. Las tecnologías emergentes y la industria de los vehículos de dos ruedas han visto avances significativos en la aplicación de la tecnología en los últimos años. Se han introducido sistemas de asistencia a la conducción, frenos antibloqueo (ABS), control de tracción y sistemas de comunicación avanzados en muchos modelos, además, la electrificación está ganando terreno en el sector, con un

crecimiento notable en la producción de motocicletas y ciclomotores eléctricos. Estos vehículos son una opción sostenible y están atrayendo a un segmento de consumidores preocupados por el medio ambiente.

3.3. Electrificación de los vehículos de dos ruedas

La electrificación de los vehículos de dos ruedas representa una revolución en la industria del transporte, marcando un cambio significativo hacia la sostenibilidad y la eficiencia energética. Este avance tecnológico está transformando la forma en que percibimos y utilizamos los vehículos de dos ruedas, como motocicletas y scooters.

En primer lugar, la electrificación de estos vehículos conlleva beneficios ambientales sustanciales. Al utilizar motores eléctricos en lugar de motores de combustión interna, se reducen las emisiones de gases contaminantes y se contribuye a la lucha contra el cambio climático. Los vehículos eléctricos de dos ruedas son una alternativa ecológica que reduce la huella de carbono y promueve la calidad del aire en entornos urbanos.

Además de ser amigables con el medio ambiente, los vehículos eléctricos de dos ruedas también ofrecen una experiencia de conducción más silenciosa y suave. Los motores eléctricos producen menos ruido que los motores de combustión, lo que contribuye a la disminución de la contaminación acústica en las ciudades y mejora la calidad de vida de los residentes.[42]

Otro punto destacado es la eficiencia energética que brindan los vehículos eléctricos de dos ruedas. Los motores eléctricos son altamente eficientes en la conversión de energía eléctrica en movimiento, lo que se traduce en un menor consumo de energía y, por ende, en menores costos de

operación para los usuarios. Esto también significa una reducción de la dependencia de los combustibles fósiles.[43]

La electrificación de los vehículos de dos ruedas también está impulsando la innovación en diseño y tecnología. Los fabricantes están desarrollando baterías más potentes y ligeras, lo que aumenta la autonomía de estos vehículos y reduce el tiempo de carga. Además, la integración de sistemas de gestión inteligente de energía mejora la eficiencia y prolonga la vida útil de las baterías.[44]

En términos de accesibilidad y democratización del transporte, los vehículos eléctricos de dos ruedas están brindando opciones a un amplio espectro de usuarios. La menor inversión en combustible y mantenimiento, junto con incentivos gubernamentales, está haciendo que estos vehículos sean más asequibles y accesibles para la población en general.

Los vehículos eléctricos de dos ruedas están contribuyendo al descongestionamiento del tráfico y a la optimización del espacio urbano. Su tamaño compacto y agilidad permiten una movilidad más eficiente y flexible, especialmente en áreas urbanas densamente pobladas, donde el estacionamiento y la circulación pueden ser desafiantes.

Otro aspecto relevante es la digitalización y conectividad que se está integrando en estos vehículos eléctricos. La mayoría de ellos cuentan con sistemas inteligentes que ofrecen información en tiempo real sobre el estado de la batería, la ubicación y la planificación de rutas, mejorando así la experiencia del usuario y facilitando la gestión del vehículo.

La electrificación de los vehículos de dos ruedas está siendo fomentada por políticas gubernamentales y regulaciones que promueven la adopción de tecnologías limpias y la reducción de emisiones contaminantes. Muchos países están estableciendo metas ambiciosas para la

electrificación del transporte, incentivando la compra de vehículos eléctricos a través de subsidios y exenciones fiscales. [45]

Asimismo, la electrificación de los vehículos de dos ruedas está impulsando la creación de empleo en la industria de la tecnología y la movilidad eléctrica. La demanda en constante aumento está generando oportunidades laborales en áreas como la fabricación de baterías, la ingeniería de sistemas eléctricos y el desarrollo de software.

En el ámbito de la seguridad vial, los vehículos eléctricos de dos ruedas están experimentando avances que mejoran la protección de los usuarios. Se están implementando sistemas de asistencia electrónica, como ABS y control de tracción, para garantizar una conducción más segura y reducir los accidentes de tráfico.

La electrificación de los vehículos de dos ruedas también está abriendo nuevas posibilidades en el ámbito del transporte público y compartido. Se están desarrollando sistemas de alquiler y compartición de scooters eléctricos, brindando opciones de movilidad eficientes y económicas para los usuarios en áreas urbanas.

En el sector del turismo, los vehículos eléctricos de dos ruedas están ganando popularidad como una forma sostenible de explorar destinos turísticos. Los turistas pueden optar por recorrer ciudades y paisajes en motocicletas eléctricas, contribuyendo así a la preservación del entorno natural y al turismo responsable.

Otro beneficio clave es la reducción de la dependencia de fuentes de energía no renovables. La electrificación de los vehículos de dos ruedas promueve el uso de electricidad proveniente de

fuentes limpias y renovables, disminuyendo la dependencia de combustibles fósiles y contribuyendo a un futuro energético más sostenible.

En términos de mantenimiento, los vehículos eléctricos de dos ruedas presentan costos inferiores a los vehículos de combustión interna. Los motores eléctricos tienen menos piezas móviles y, por lo tanto, requieren menos mantenimiento y reparaciones, lo que ahorra tiempo y dinero a los propietarios. [46]

Además, la electrificación de los vehículos de dos ruedas está promoviendo la autonomía energética en ciertos casos. Los propietarios de vehículos eléctricos pueden instalar sistemas de carga en sus hogares o lugares de trabajo, aprovechando la energía solar para cargar sus vehículos, lo que reduce aún más su huella de carbono.

La electrificación de los vehículos de dos ruedas también está generando un ecosistema de tecnologías complementarias, como estaciones de carga públicas y privadas, aplicaciones móviles para la gestión y monitoreo de la carga, y servicios de asistencia en carretera específicos para vehículos eléctricos. [47]

En conclusión, la electrificación de los vehículos de dos ruedas representa una evolución fundamental en la industria del transporte, con impactos positivos que abarcan desde la sostenibilidad ambiental hasta la eficiencia energética, la innovación tecnológica y la mejora en la calidad de vida de las personas. Este cambio hacia la movilidad eléctrica promete un futuro más limpio. La electrificación también ha llevado a importantes avances en la tecnología de baterías. Las baterías de iones de litio utilizadas en los vehículos de dos ruedas eléctricos han mejorado en

cuanto a capacidad y durabilidad, lo que ha aumentado la autonomía y la vida útil de estos vehículos.

3.4. Transmisión de potencia en vehículos eléctricos de dos ruedas

La transmisión de potencia en vehículos eléctricos de dos ruedas es un elemento fundamental en el diseño y funcionamiento de estos modernos medios de transporte. A medida que la movilidad eléctrica se ha consolidado como una alternativa sostenible y eficiente en el panorama automovilístico, la optimización de la transmisión de potencia ha adquirido una importancia creciente. En este contexto, es crucial entender cómo se logra la transferencia de energía desde la batería hasta las ruedas de un vehículo eléctrico de dos ruedas.

En esencia, la transmisión de potencia en estos vehículos se basa en un proceso simplificado en comparación con los vehículos de combustión interna. En lugar de contar con una caja de cambios compleja que requiere de múltiples engranajes para ajustar la relación entre la potencia del motor y la velocidad, los vehículos eléctricos de dos ruedas generalmente utilizan un sistema de transmisión directa. Esto significa que la energía generada por el motor eléctrico se transfiere directamente a la rueda motriz sin la necesidad de cambiar de marcha.

La simplicidad de esta transmisión directa es una de las principales ventajas de los vehículos eléctricos de dos ruedas. Elimina la necesidad de cambios manuales o automáticos, lo que se traduce en una experiencia de conducción más suave y menos propensa a errores por parte del conductor. Además, la ausencia de engranajes también reduce el mantenimiento y prolonga la vida útil de la transmisión, ya que se minimiza el desgaste mecánico.

La potencia se transmite desde la batería al motor eléctrico mediante un sistema de control electrónico que regula la cantidad de energía suministrada en función de la velocidad y la demanda del conductor. Esta gestión precisa permite una aceleración suave y controlada, así como una eficiencia energética óptima, ya que se puede ajustar la entrega de potencia en tiempo real. [48]

Otro aspecto relevante de la transmisión de potencia en vehículos eléctricos de dos ruedas es la recuperación de energía durante el frenado. A menudo, estos vehículos están equipados con sistemas de frenado regenerativo que convierten la energía cinética en electricidad que se almacena en la batería, lo que aumenta aún más la eficiencia y la autonomía.[49]

En resumen, la transmisión de potencia en vehículos eléctricos de dos ruedas se caracteriza por su simplicidad, eficiencia y capacidad de adaptarse a las necesidades del conductor. Este enfoque directo en la transferencia de energía contribuye al rendimiento superior y la sostenibilidad de estos vehículos, lo que los convierte en una elección cada vez más popular en la movilidad urbana del siglo XXI. Con la continua evolución de la tecnología eléctrica, es probable que veamos avances adicionales en la transmisión de potencia que seguirán mejorando la experiencia de conducción y la eficiencia de estos vehículos.

4. Requerimientos de Diseño

4.1. Masa del EV

Por su altísima estabilidad y debido a la masa total del diseño, el EV escogido como referencia para el diseño de la transmisión de potencia es el C1 de Lit Motors, para ver más información, consultar referencia [50].

Con un peso de 362 kilogramos, para efectos de los cálculos en el proyecto se usó esta masa para el vehículo completo de 362 kilogramos. También se tendrá en cuenta la masa de los ocupantes del EV la cual será de 144 kilogramos y una masa adicional por equipaje de mano de 10 kilogramos, en total, una masa de 516 kilogramos como requerimiento de diseño.

4.2. Velocidad del EV

El requerimiento de diseño establece una velocidad final de 60 km/h (16.66 m/s) la cual es bastante generosa para un vehículo de uso en ciudad y brinda agilidad en recorridos urbanos.

4.3. Pendiente

Para estimar la potencia de la unidad, se establece una pendiente máxima de del 50% equivalente a 26.5°

4.4. Número de ruedas

Se escogió el EV modelo C1 del fabricante Lit Motors como referencia para el desarrollo del proyecto, se trata de una motocicleta típica de dos ruedas, sin embargo, con la característica de ser cabinada la cual tiene la capacidad de transportar a dos personas.[50]

4.5. Tren de transmisión

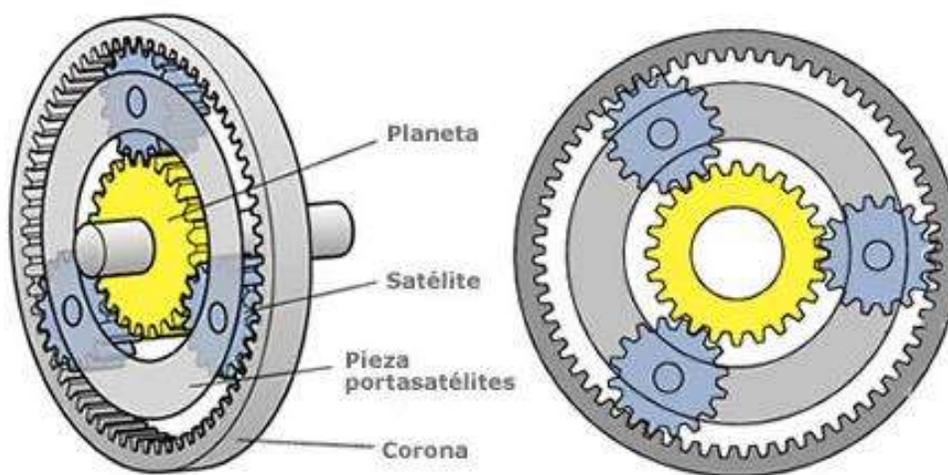
El objetivo principal de este trabajo es el diseño de una unidad de transmisión de potencia que integre motor eléctrico y mecanismo de transmisión de potencia.

El sistema de transmisión seleccionado es la transmisión tipo planetario por la eficiencia tanto en el uso del espacio como de la misma transmisión de potencia, por otro lado, al invertir el sentido de flujo de potencia, es decir, que, al dejar de acelerar, o bajar por una pendiente, la llanta sea la que impulse el eje del motor eléctrico, conviene mucho por las altas revoluciones que se obtienen en el eje del motor eléctrico teniendo en cuenta que se tendrá un freno regenerativo.

El tráfico denso en ciudades grandes como Bogotá exigen la optimización del uso de los recursos en todos los sentidos, uno de ellos, el espacio y el uso eficiente de la energía, es por ello que se plantea el diseño de una transmisión mecánica tipo planetario. La característica principal de este tipo de transmisión es su diseño compacto y la eficiente transmisión de potencia lo cual es muy deseable debido al objetivo principal del proyecto el cual es integrar la unidad de potencia y transmisión en una misma caja o carcasa.

Figura 4-1

Partes básicas de una transmisión tipo planetario



Nota. Fuente [51]

La figura 4-1 ilustra las 4 partes básicas de una transmisión tipo planetario, engranaje o eje sol (Sun gear) que es por donde habitualmente entra la potencia, los engranajes planetarios (planet gear) que se convierten en elementos de transferencia, el portaplanetarios (Carrier) que en muchos casos se convierte en el elemento que entrega la potencia de salida y la corona (Ring gear) la cual es el anillo sobre el cual se trasladan los engranes planetarios a la vez que van girando sobre su propio eje y alrededor del engranaje sol. Es importante tener en cuenta que una de las ventajas del sistema de transmisión tipo planetario es que el movimiento de entrada o salida se puede dar por cualquiera de los 3 elementos móviles, engranaje sol, portaplanetarios o corona dependiendo de por cual elemento entre la potencia y cuál de los elementos se frene. Para este trabajo se toma como entrada el engranaje sol el cual está directamente acoplado al motor eléctrico que suministra la potencia.

El trabajo se realiza por el interés de desarrollar un diseño muy viable y aplicable en la realidad. El objetivo principal del trabajo es el diseño de una transmisión mecánica de potencia tipo planetario, la cual integra la unidad de potencia en la misma caja para aplicación en un vehículo eléctrico biplaza para el transporte de personas en ciudades.

4.6. Fuente de energía eléctrica, batería recargable y electrónica de potencia

El EV tendrá como fuente principal de energía un arreglo de baterías recargables principalmente de un enchufe a pared y como fuente secundaria de carga, el freno regenerativo, el cual deberá contar con un desarrollo de electrónica de potencia para controlar y convertir la energía eléctrica que fluye desde las baterías hacia el motor y al momento de regenerar, convierta la energía generada por el motor eléctrico, debido a que las baterías entregan corriente continua DC y el

motor usa corriente alterna AC, se hace necesario, que en el camino de la corriente de la batería hacia el motor, deba existir un inversor el cual convierte la corriente de DC a AC.

Al momento en que el motor eléctrico pase de consumidor a generador de energía eléctrica, también se requiere un componente en este sentido de la corriente del motor hacia las baterías, se trata de un rectificador, que se encarga de convertir la corriente AC en DC para poder cargar la batería.

La electrónica de potencia también debe proveer el regulador de voltaje que controle los picos de voltaje al momento de la generación de energía eléctrica.

4.7. Sistemas de frenos, suspensión y dirección

Los sistemas de frenos, suspensión y dirección no serán abordados ni se ahondará en este trabajo ya que no son sistemas en los que se centre el proyecto, sin embargo, se mencionan como un complemento lógico del EV, por otro lado, se debe tener en cuenta que se tomó un modelo de EV ya desarrollado y comercializado el cual cuenta con estos sistemas totalmente desarrollados.

5. Diseño del tren de transmisión

A continuación, en el siguiente capítulo se realizará el desarrollo del diseño de la transmisión tipo planetario.

5.1. Requerimientos mecánicos del tren de transmisión

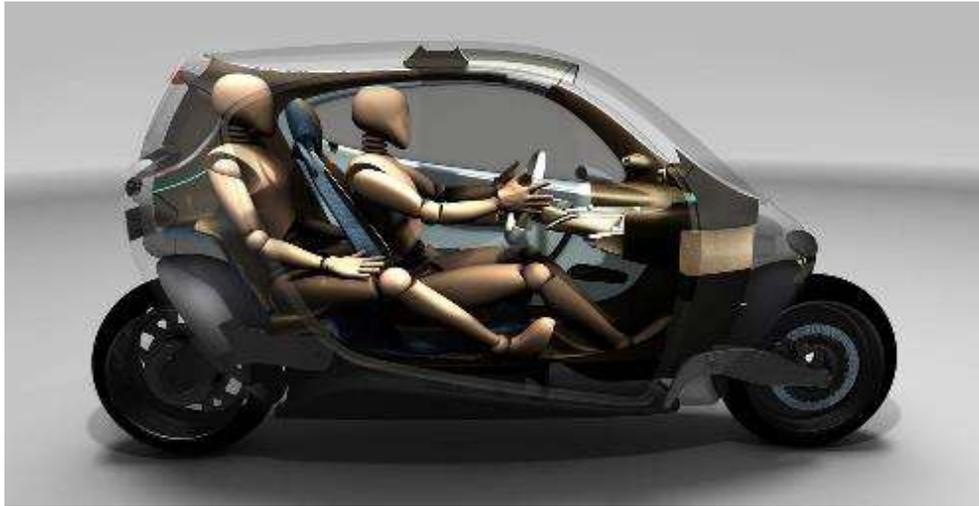
A continuación, se establecen los requerimientos mecánicos para el diseño del tren de transmisión

- Vehículo de dos ruedas con tracción y frenado regenerativo trasero.
- Masa total del vehículo incluidos los pasajeros 516kg.
- Diámetro externo de la rueda motriz 0.5m.
- Ancho de la rueda motriz 0.175m.
- Velocidad máxima de desplazamiento 60km/h (16.66 m/s)
- Pendiente máxima de inclinación 50% equivalente a 26.5°

La figura 5-1 muestra el EV tal y como se vería transportando los dos ocupantes.

Figura 5-1

Imagen de referencia vehículo eléctrico de 2 ruedas



Nota. Fuente [52]

5.2 Estimaciones para calcular la potencia total requerida

Se estableció la potencia requerida para impulsar el EV en la condición de funcionamiento más exigente estimada, de acuerdo a los requerimientos de diseño con la carga total de 516 kilogramos, subiendo una pendiente con 26.5° de inclinación y desarrollando los 60km/h.

5.2.1. Cálculo de la fuerza sobre el plano inclinado X

$$F_x = (m \cdot g) * \text{Sen } \beta \quad (22)$$

$$F_x = (m \cdot g) * \text{Sen } \beta = \left(516 \text{ kilogramos} \times 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right) \times \text{Sen}(26.5^\circ) = 2258.63 \text{ N}$$

La figura 5-2 muestra las fuerzas en el diagrama de cuerpo libre que actúan sobre el EV en una de las condiciones de funcionamiento más exigentes que se pueda llegar a presentar, subir una

pendiente con ángulo de 26.5° con la carga máxima estimada, 516 kilogramos y llevando el EV a su máxima velocidad de diseño.

Figura 5-2

Fuerzas que actúan sobre el EV en una pendiente

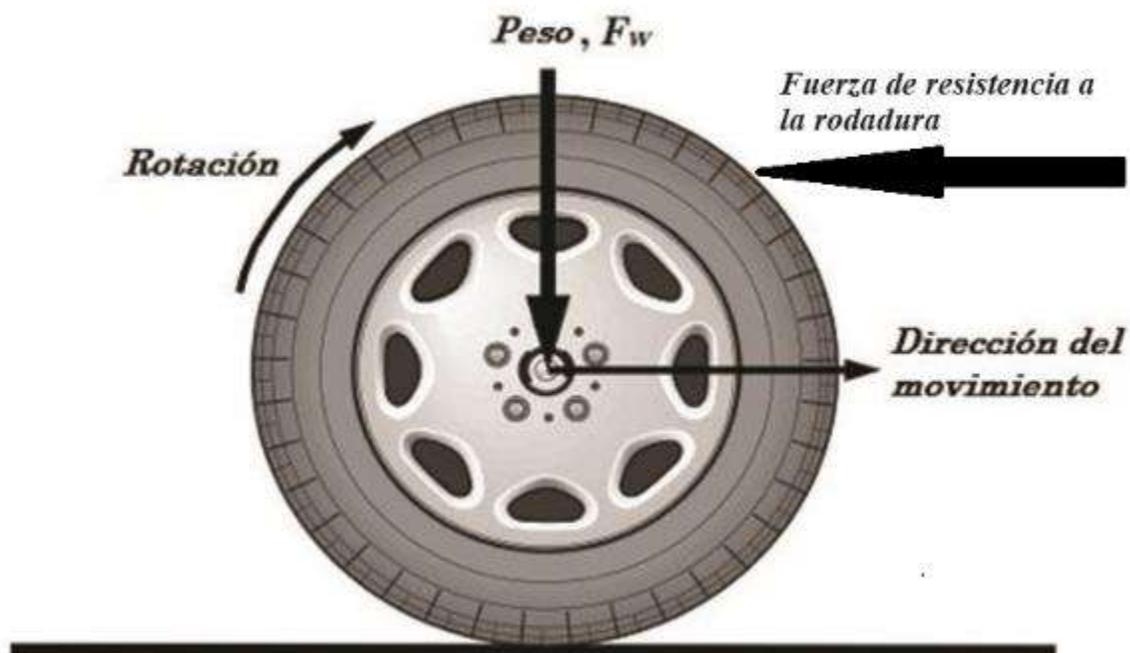


Nota. Fuente [53]

5.3. Factores que afectan el cálculo de la fuerza requerida para obtener la velocidad final

- Resistencia a la rodadura: es la fuerza que se opone al movimiento del vehículo, se hace mayor dependiendo de las condiciones del suelo, la presión de inflado de las llantas y la carga que soportan las llantas.

La figura 5-3 ilustra las fuerzas que se oponen al giro de una llanta cuando es impulsada por el vehículo, estas son principalmente el peso y la fuerza de fricción.

Figura 5-3*Fuerza de resistencia a la rodadura**Nota:* Fuente [54]**Tabla 5-1***Coefficiente de resistencia a la rodadura*

Cr	Tipo de aplicación
0.002	Ruedas de varillas de carril sobre rieles de acero
0.001	Neumático de bicicleta en pistas de madera
0.002 0.005	Neumático sin cámara de baja resistencia
0.002	Neumático de bicicleta sobre hormigón
0.004	Neumático de bicicleta en carretera asfaltada
0.005	Rieles de tranvía sucios
0.006 0.01	Neumático de camión sobre asfaltos

Cr	Tipo de aplicación
0.008	Neumático de bicicleta en carretera pavimentada en brusco, de automóviles ordinarios sobre concreto, asfalto nuevo,
0.01 0.015	Adoquines pequeños nuevos
0.02	Neumático de coche sobre alquitrán o asfalto
0.02	Neumático de coche sobre grava laminado nuevo
0.03	neumático de coche en adoquines grande desgastado, de coche sobre arena sólida, Grava suelta, desgastado, suelo
0.04 0.08	Medio duro
0.2- 0.4	Neumático de coche sobre arena suelta

Fuente: [55]

5.3.1. Cálculo de la fuerza de rodadura o fuerza de fricción

Es el producto de las variables masa y coeficiente de rodadura por la constante de la gravedad.

Por tratarse del cálculo de la fuerza de fricción, no se tuvo en cuenta la pendiente y se despreció la fuerza de fricción de la llanta delantera.

$$Fr = m * g * Cr \quad (23)$$

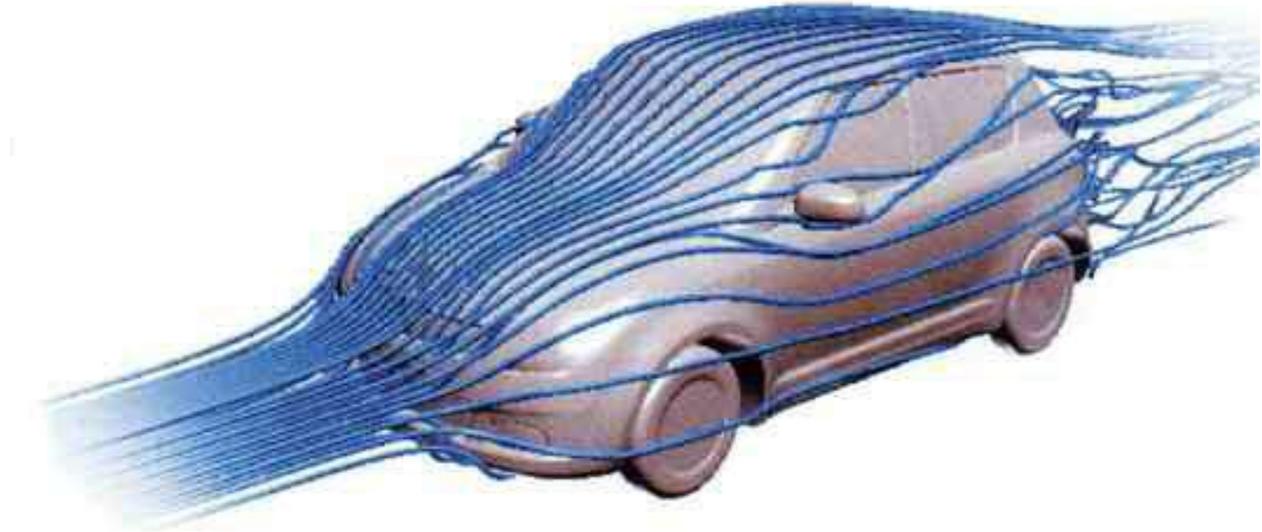
$$Fr = m * g * Cr = 516Kg * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.02 = 101.24 N$$

- Resistencia del aire o resistencia aerodinámica, es la fuerza de resistencia al movimiento que ofrece el aire circundante al vehículo en dirección opuesta a su dirección de desplazamiento, la afectan la velocidad del vehículo, la dirección y densidad del aire y la forma frontal del vehículo.

En la figura 5-4 se aprecia cómo el aire circundante al vehículo ofrece resistencia al avance del mismo convirtiéndose en una fuerza opuesta a la de avance.

Figura 5-4

Resistencia aerodinámica del vehículo



Nota. Fuente [56]

La Figura 5-5 muestra los coeficientes de arrastre que ofrece el aire de acuerdo a la forma frontal del vehículo, es lógico que entre más área frontal tenga el vehículo, mayor será la resistencia aerodinámica que deba vencer al avanzar, la velocidad y dirección del aire, y la velocidad del vehículo, también inciden en el aumento de la resistencia aerodinámica.

Figura 5-5

Coeficiente de arrastre

Forma		Coeficiente de arrastre frontal C_x
Esfera		0.47
Semiesfera		0.42
Cono		0.50
Cubo		1.05
Cubo inclinado		0.80
Cilindro largo		0.82
Cilindro corto		1.15
Cuerpo ahusado $L/D=2.5$		0.04
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ en el suelo		0.09
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo		0.13
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo frontal redondeado		0.09
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo frontal redondeado y ruedas		0.15

Valores del coeficiente de arrastre

Nota. Fuente [57]

5.3.2. Cálculo de la fuerza que ejerce la resistencia aerodinámica

$$F_{AR} = CA * \frac{1}{2} D * v^2 \quad (24)$$

Donde,

F_{AR} = Fuerza de arrastre

CA = Coeficiente de arrastre por forma

D = diámetro de la rueda

v = Velocidad final en m/s

Se seleccionó el valor del coeficiente de arrastre de la forma de cubo inclinado para garantizar un cálculo confiable, la ecuación también considera un medio del diámetro de la rueda trasera y la velocidad final en m/s.

$$F_{AR} = CA * \frac{1}{2} D * v^2 = 0.80 * 0.23905 * (16.1616)^2 = 49.95 N$$

5.3.3. Sumatoria de fuerzas que se oponen al avance del vehículo

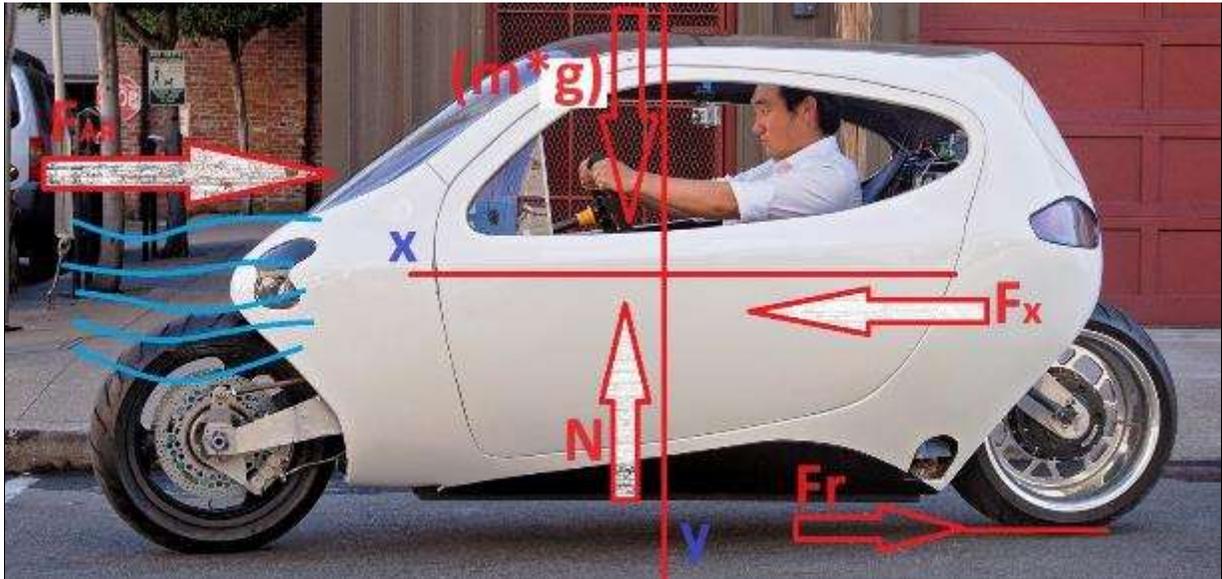
Teniendo en cuenta todas las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo tenemos:

$$\Sigma F = F_x + F_R + F_{AR} \quad (25)$$

$$\Sigma F = F_x + F_R + F_{AR} = 2258.63 N + 101.24 N + 49.95 = 2409.82 N$$

Figura 5-6

Diagrama de fuerzas que actúan sobre el vehículo



Nota: Fuente [53] presenta modificaciones realizadas por el autor

5.3.4. Cálculo de la potencia total requerida

Se halla la potencia, para lo cual se hace la conversión de velocidad de km/h a m/s:

$$vf = \left(1 \frac{\text{km}}{\text{hora}}\right) \times \left(\frac{1000\text{m}}{1\text{km}}\right) \times \left(\frac{1\text{hora}}{3600\text{s}}\right) = \frac{\text{m}}{\text{s}} \quad (26)$$

$$vf = \left(60 \frac{\text{km}}{\text{h}}\right) \times \left(\frac{1000\text{m}}{1\text{km}}\right) \times \left(\frac{1\text{hora}}{3600\text{s}}\right) = 16.66 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$P = F \times v \quad (27)$$

$$P = F \times v = (2409.82 \text{ N}) \times (16.6666 \text{ m/s}) = 38946.54 \text{ W}$$

Teniendo en cuenta la equivalencia de 1HP en Watios tenemos:

$$38946.54 \text{ W} \times \frac{1 \text{ hp}}{746 \text{ W}} = 52.20 \text{ HP}$$

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta las pérdidas mecánicas por deslizamiento en los engranes, debido a que se tienen 6 puntos de contacto, los cuales son, los 3 puntos del engrane sol a los 3 engranajes planetarios y los 3 puntos de los engranes planetarios a la corona, estas suman al menos un 6%, entonces tenemos:

$52.20 \text{ HP} * 6\% = 55.332 \text{ HP}$
--

5.4. Determinación de rin y llantas

Para alojar los componentes de la transmisión de potencia tipo planetario, lógicamente se requiere una caja, esta caja (housing) la proporcionará el mismo rin de la llanta, lo cual hace parte de la idea inicial del diseño.

Se ha escogido un rin de 14" (pulgadas) el cual montará una llanta **175/35/R14**, basándonos en esta selección, haremos las siguientes consideraciones iniciales para determinar el espacio disponible para la transmisión planetaria:

Se estima un espesor de pared mínimo en el rin de 1 ½" (38.1mm) que se multiplica por 2 para considerar las dos paredes del rin al diámetro, este valor es importante ya que permitirá la fijación de la corona al rin, la instalación de una tapa hermética y ofrecerá una buena resistencia mecánica a la deformación debido a los choques que recibe la llanta:

$$14 \text{ pulg} - (1.5 \text{ pulg} \times 2) = 11 \text{ pulg} \quad (28)$$

Las figuras 5-7 y 5-8 ilustran las características mencionadas de rin y llanta

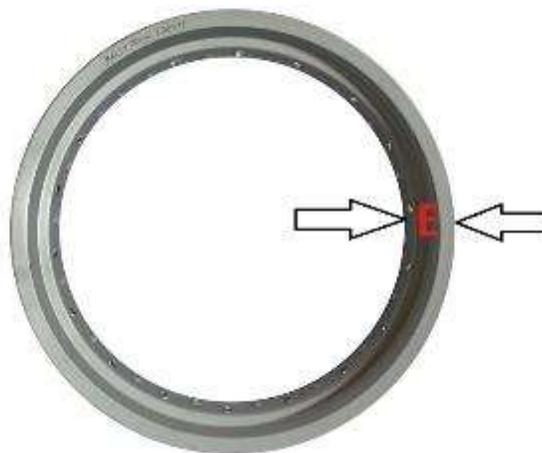
Figura 5-7

Ilustración diámetro y ancho de la rueda



Figura 5-8

Espesor del rin o espesor de pared



Se cuenta con 11” (279.4mm) de espacio disponible dentro del rin para diseñar los componentes del tren planetario.

Nota. los valores de espesor de pared serán ajustados al realizar y finalizar los cálculos.

5.5. Cálculo de engranajes del tren planetario

5.5.1. Engrane sol o piñón de entrada

Teniendo establecido el espacio disponible para los componentes de la transmisión planetaria, dividimos ese valor en 5 partes, esto debido a que se estima que los engranajes planetarios serán del doble de diámetro que el engranaje sol, es una forma sencilla y práctica de distribuir los espacios para iniciar los cálculos del diseño, de las 5 partes, se tomará 1 sólo como un valor de referencia para el diámetro del engranaje sol:

$$(11 \text{ pulg})/5 = 2.2 \text{ pulg} \quad (29)$$

A continuación, se escoge en los pasos diametrales (**Pd**) normalizados, el paso para el piñón sol, se selecciona uno que al relacionarlo con un número de dientes del engrane conducido, permita un amplio rango de combinaciones entre números de dientes.

La tabla número 2 muestra los pasos diametrales normalizados en dientes por pulgada.

Tabla 5-2

Pasos diametrales normalizados (Dientes / Pulgada)

Paso grueso (Pd < 20)				Paso fino (Pd ≥ 20)	
1	2	5	12	20	72
1,25	2,5	6	14	24	80
1,5	3	8	16	32	96
1,75	4	10	18	48	120

Paso grueso ($Pd < 20$)	Paso fino ($Pd \geq 20$)
	64

Nota. Tomado de Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 310.

Debido a que se escogió diseñar la transmisión planetaria con engranajes de dientes rectos, se hace necesario escoger el perfil de involuta que se usará, la tabla número 3 muestra del lado izquierdo, los números de dientes para un piñón con perfil de involuta de 20° y al lado derecho, el número de dientes del engranaje con que puede engranar el piñón.

Tabla 5-3

Número de dientes del piñón para asegurar que no haya interferencia

Para un piñón de 20° de profundidad total, engranado con un engrane	
número de dientes del piñón	número máximo de dientes del engrane
17	1309
16	101
15	45
14	26
13	16

Nota. Tomado de Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 320

Se ha escogido perfil de involuta de 20° a profundidad total, paso diametral (**Pd**) **8** para un engrane sol (piñón) de **17** dientes que es el número de dientes con mayor número de combinaciones entre dientes de engranes según la tabla número 5-3.

La figura 5-9 ilustra el engrane sol el cual, para efectos mecánicos, se convierte en el piñón de entrada de potencia al mecanismo de transmisión.

Figura 5-9

Engrane sol - piñón de entrada



Nota: Fuente, el autor.

Teniendo el **Pd** y el número de dientes **N** usando la ecuación 3 podemos determinar el diámetro de paso **Dp**:

$$Pd = \frac{Ng}{Dg} = \frac{Np}{Dp} \quad (\text{Ecuación 3})$$

De la ecuación 3 despejamos **Dp** obteniendo:

$$Dp = \frac{Np}{Pd} = \frac{17}{8} = 2.125 \text{ Pulg}$$

2.125" (pulgadas) es el diámetro de paso del piñón de entrada, para este caso será el diámetro de paso del engranaje sol.

Ahora, se tuvieron en cuenta dos condiciones fundamentales en el diseño de engranes, la primera es que el paso diametral (**Pd**) y el paso circular (**p**) tienen que ser iguales en todos los engranajes que engranan en la transmisión planetaria, esto para evitar la interferencia y otras consecuencias no deseables como ruido y desgastes prematuros, y la segunda, es **NO** escoger números de dientes **Np** y **Ng** que nos den como relación de transmisión un número entero, como por ejemplo 2, porque cada dos vueltas del engrane conductor los dientes de este coincidirán siempre con los mismos dientes del engrane conducido, lo cual afecta el asentamiento de los dientes, teniendo en cuenta esto, y la decisión de diseño de dejar los engranes planetarios con el doble del diámetro del engranaje sol, se determinan **35** dientes para los engranes planetarios y de la ecuación 2 obtenemos los diámetros **p**, **Pd** y el número **N** para los engranes planetarios y la corona:

Ecuación 2:

$$p = \pi \frac{D}{N}$$

$$\text{Despejamos } D \text{ y } N \quad D = N * p / \pi \quad N = \pi * D / p$$

$$p = \pi * 2.125 \text{ pulg} / 17 = 0.392699081 \text{ pulg (paso circular)}$$

La tabla 5-4 sintetiza las dimensiones características del engrane sol

Tabla 5-4*Dimensiones características engrane sol*

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
Pd	Paso diametral		8
p	Paso circular	Pulgadas	0,392699
Dp	Diámetro de paso	Pulgadas	2,125
N	Número de dientes		17

Nota: Fuente, el autor.

5.5.2. Engranés planetarios

Luego de haber establecido los parámetros básicos de la geometría de los engranes, se calculan los engranes planetarios.

$$D_{ext. planeta} = ((35 * 0.392699081 \text{ pulg})) / \pi = 4.375 \text{ pulg (Dp planetarios)}$$

La figura 5-9 ilustra los 3 engranes planetarios, en la tabla 5-5 se sintetizan los datos.

Figura 5-10*Engranés planetarios**Nota:* Fuente, el autor.

Tabla 5-5*Dimensiones características engranes planetarios*

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
Pd	Paso diametral		8
p	Paso circular	Pulgadas	0,392699
Dp	Diámetro de paso	Pulgadas	4,375
N	Número de dientes		35

Nota: Fuente, el autor.

5.6. Corona de la transmisión planetaria

5.6.1. Cálculo de la corona

Luego de hallar los diámetros de paso de los engranes sol y planetarios, y teniendo en cuenta la decisión de diseño que estableció que el diámetro de paso de los engranes planetarios es el doble que el diámetro de paso del engrane sol, se determinó el diámetro de la corona:

$$D_{sol} + (2D_{ep}) = D_{corona} \quad (30)$$

$$= 2.125 \text{ pulg} + (2 * 4.375 \text{ pulg}) = 10.875 \text{ pulg}$$

Conociendo el diámetro de paso de la corona podemos hallar el número de dientes:

De la ecuación 2 despejamos **N**:

$$N = \pi * D / p$$

$$N_{corona} = \pi * D / p = ((\pi * 10.875 \text{ pulg})) / 0.392699081 \text{ pulg} = 87$$

Figura 5-11*Corona de la transmisión planetaria**Nota:* Fuente, el autor.

La figura 5-10 ilustra la corona de la transmisión planetaria y la tabla 5-6 sintetiza las dimensiones geométricas.

Tabla 5-6*Dimensiones características corona*

Símbolo	Parámetro	Unidad	Valor
Pd	Paso diametral		8
p	Paso circular	Pulgadas	0,392699
Dp	Diámetro de paso	Pulgadas	10,875
N	Número de dientes		87

Nota: Fuente, el autor.

Luego de haber definido el diámetro de paso de la corona del sistema planetario, se obtuvo con precisión el espesor de pared que se tendrá para el rin escogido:

$$\mathbf{Espesor\ de\ pared = (Diámetro\ del\ rin - D_{paso\ corona})} \quad (31)$$

$$\mathbf{14\ pulg - 10.875\ pulg / 2 = 1.562\ pulg \sim 39.68mm}$$

Tomando la velocidad final requerida y el diámetro de la llanta, se halló el número de revoluciones en la llanta:

$$\mathbf{RPM_{Llanta} = \frac{\left(\frac{m}{s} * 60s\right)}{Pw\ m}} \quad (32)$$

$$\mathbf{RPM_{Llanta} = \frac{\left(16.16\frac{m}{s} * 60s\right)}{1.50199\ m} = 645.60\ rpm}$$

Relación de transmisión R_T del sistema planetario:

$$\frac{n_p}{n_G} = \frac{N_G}{N_p} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$\mathbf{N_g / N_p = 87 / 17 = 5.1176}$$

Usando la relación de transmisión y las RPM requeridas en la llanta, se determinan las revoluciones necesarias en el motor eléctrico el cual será la unidad de potencia, éstas serán las revoluciones requeridas en el eje de entrada o eje sol del sistema de transmisión planetario:

$$\mathbf{RPM_{entrada} = RPM_{Llanta} * R_T} \quad (33)$$

$$\mathbf{= 645.6 * 5.1176 = 3304\ rpm}$$

5.7. Selección del material para la fabricación de los engranes y la corona

En la selección del material para la fabricación de los engranajes y la corona de la transmisión planetaria se tuvieron en cuenta como parte del procedimiento de diseño, la potencia y fuerzas a transmitir, a continuación, se desarrollan los cálculos para la selección del material.

Para determinar las cargas en los dientes de los engranes se hallaron la velocidad de la línea de paso V_t , las fuerzas tangencial, W_t , radial, W_r y normal W_n con las RPM requeridas en el eje de entrada:

$$V_t = \frac{(\pi * D * n)}{12} \left(\frac{\text{pies}}{\text{min}} \right) \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$V_t = (\pi * 2.125 \text{ pulg} * 3304 \text{ rev/min}) / 12 = 1838 \text{ pies/min}$$

$$W_t = 33000 x \frac{P}{V_t} (\text{lb}) \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$W_t = 33000 x 55.3 \text{ hp} / 1838 \text{ pies/min} = 992.8 \text{ lb}$$

$$W_r = W_t x \text{Tan } \phi \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$W_r = (992.8 \text{ lb}) . \text{Tan } \phi = 361.3 \text{ lb}$$

$$W_n = W_t / \text{Cos } \phi \quad (\text{Ecuación 20})$$

$$W_n = (992.8 \text{ lb}) / \text{Cos } \phi = 384.48 \text{ lb}$$

Se halla el número de esfuerzo flexionante, St :

$$Stp = \frac{Wt.Pd}{FJ} Ko.Ks.Km.Kb.Kv \quad (34)$$

$$Stp = \frac{(992.8 \text{ lb} * 8)}{(2.2 \text{ pulg} * 0.295)} \cdot (1.75)(1)(1.548)(1.5)(1.175) = 58431.25 \text{ psi}$$

Con el número de esfuerzo flexionante en el piñón, se establece el esfuerzo flexionante en el engrane conducido:

$$Stg = Stp \cdot (Jp/Jg) \quad (35)$$

$$Stg = 58431.25 \text{ psi} \times \left(\frac{0.295}{0.48}\right) = 35910.8 \text{ psi} \quad (\text{Ecuación 35})$$

5.7.1. Relación de contacto

Debido a que el sistema de transmisión planetaria tiene dos puntos de paso, uno del engrane sol a los planetarios y otro de los engranes planetarios a la corona, se calculó la relación de contacto de ambos puntos:

Relación de contacto del engrane sol a los engranes planetarios:

$$\frac{m_f = \sqrt{R_0 p^2 - R_b p^2} + \sqrt{R_0 c_3^2 - R_b c_G^2 - C \text{ sen } \phi}}{p \cos \phi} \quad (\text{Ecuación 13})$$

$$m_f = \frac{\sqrt{1.1875^2 - 0.90625^2} + \sqrt{2.3125^2 - 2.03125^2} - 3.25 \operatorname{Sen}\phi}{(0.392699)\operatorname{co s}\phi} = 2.06$$

mf = 2.06 relación de contacto del engrane sol a los planetarios.

Al tratarse de una transmisión planetaria de 3 engranes planetarios, obtenemos una relación total de 6.18, es decir más de 6 dientes engranados al mismo tiempo.

Relación de contacto de los planetarios a la corona:

$$m_f = \frac{\sqrt{2.3125^2 - 2.03125^2} + \sqrt{5.9375^2 - 5.175^2} - 7.625 \operatorname{Sen}\phi}{(0.392699)\operatorname{co s}\phi} = 3.816$$

mf = 3.816 relación de contacto de los engranes planetarios a la corona.

A pesar de que el paso diametral (Pd) es igual en todos los engranes de la transmisión, la relación de contacto entre los planetarios y la corona es mayor porque allí se da una relación entre engranes internos, la corona tiende a envolver el engrane planetario lo cual aumenta la relación de contacto.

Tenemos 3 engranes planetarios, entonces obtenemos una relación total de 11.44, es decir más de 11 dientes engranados al mismo tiempo.

Se calculó el número de ciclos de carga con el engrane planetario ya que este engrane recibe el mayor número de esfuerzos de carga por ser conducido y conductor, se usó el valor del esfuerzo flexionante ya calculado y se tuvo en cuenta algunos factores como el factor por ciclos de esfuerzo Y_N , factor de confiabilidad K_R y factor de seguridad SF .

5.7.2. Cálculo del número de ciclos de carga

$$Nc = (60) * (L) * (n) * (q) \quad (36)$$

Donde Nc = número de ciclos de carga esperado, L , vida de diseño en horas, n , velocidad de giro del engrane en rpm, q , número de aplicaciones de carga por revolución.

Debido a que este es el diseño de una transmisión planetaria, se tomó como referencia para este cálculo el engrane planetario ya que éste recibirá doble ciclo de carga uno al ser conducido y otro al conducir a la corona, bajo este criterio tenemos:

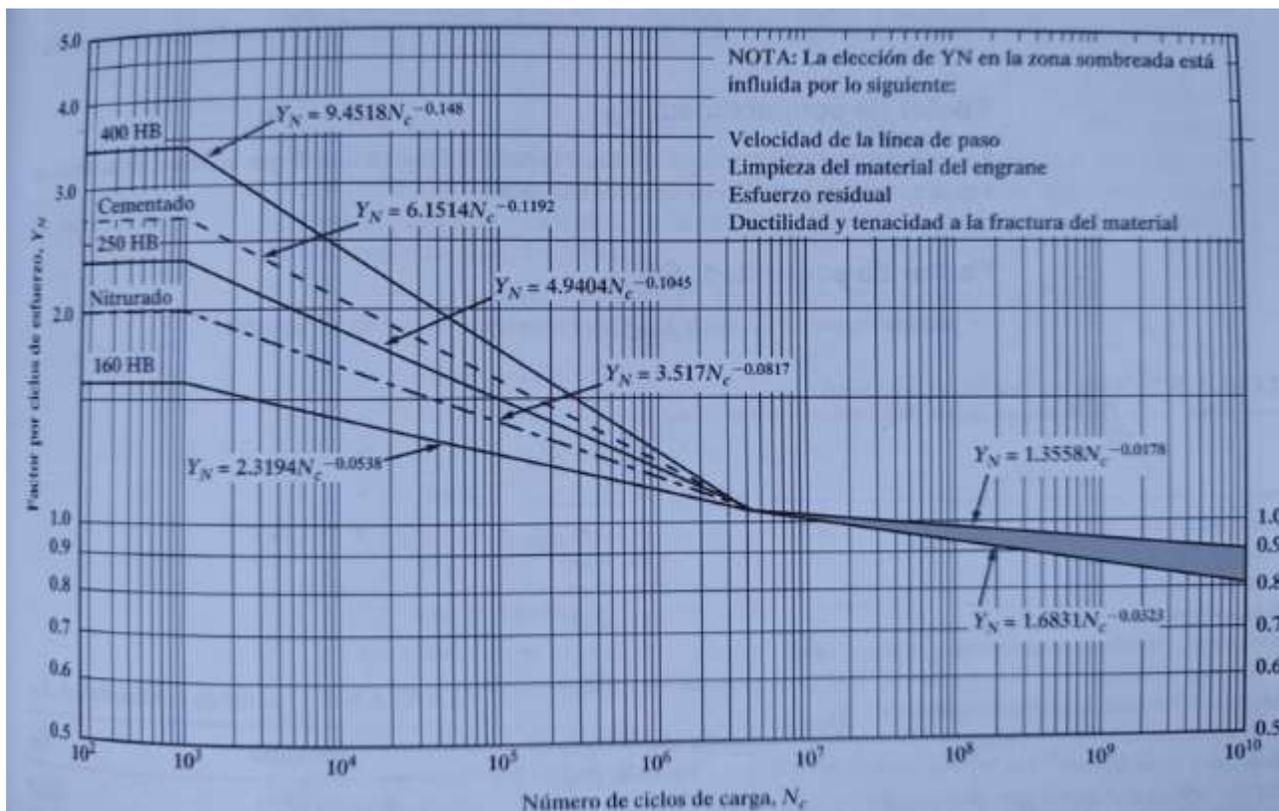
$$Ncpl = (60) * (25000) * (3304) * (2) = 9.912 \times 10^9 \quad (\text{Ecuación 36})$$

Nota. El factor n se tomó del resultado obtenido en la relación de transmisión y el número de RPM requerido para conseguir la velocidad final de diseño.

De acuerdo al resultado, se determina el valor del factor Y_N en la figura número 5-12

Figura 5-12

Factor de resistencia flexionante por ciclos de esfuerzo Y_N



Nota: Tomado de Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 395.

Se seleccionó un factor de confiabilidad $K_R = 1.5$ menos de una falla en 10.000 de acuerdo a la tabla 5-7 que establece factor de confiabilidad.

Tabla 5-7

Factor de confiabilidad KR

Confiabilidad	KR
0.90. una falla en 10	0.85
0.99. una falla en 100	1.00
0.999. una falla en 1000	1.25
0.9999. una falla en 10 000	1.50

Nota. Fuente Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 396.

5.7.3. Cálculo de resistencia a la picadura

Número de esfuerzo de contacto S_c :

$$S_c = C_p \sqrt{\frac{Wt K_o K_m K_s K_v}{FDpl}} \quad (37)$$

$$S_c = 2300 \sqrt{\frac{(992.8 \text{ lb})(1.75) (1.548) (1) (1.175)}{(2.2 \text{ pulg}) (2.125 \text{ pulg}) (0.107)}} \quad (\text{Ecuación 37})$$

$$= 258473.9 \text{ psi}$$

Vemos cómo el número de esfuerzo de contacto S_c para determinar la resistencia a la picadura es mucho más exigente que el esfuerzo flexionante Sat .

Para la selección del material se usó la ecuación 37 del número esfuerzo de contacto S_c y la ecuación 38 del número esfuerzo flexionante admisible ajustado:

$$\frac{KR * (SF)}{Y_N} St < Sat \quad (38)$$

$$\frac{(1.5)*(1.5)}{0.87} * (58431.25 \text{ psi}) = 151115.3 \text{ psi} \quad (\text{Ecuación 38})$$

De acuerdo al resultado del esfuerzo flexionante ajustado, y en busca de mejorar la confiabilidad de los elementos de la transmisión, se escogerá como material para todos los engranes y la corona de la transmisión planetaria, el acero AISI 4140 OQT400 con resistencia a la tensión de 290ksi, porcentaje de elongación de 11 y dureza superficial de 578 HB, [58] las propiedades del material exceden por mucho el requerimiento de diseño para el número de esfuerzo flexionante ajustado *Sat*, sin embargo, fue confirmado con el cálculo de la resistencia a la picadura.

5.8.Diseño del porta-planetarios

El porta-planetario es una pieza fundamental dentro del conjunto de la transmisión planetaria, es el elemento en el cual se fijan los engranajes planetarios y dependiendo de la configuración de la transmisión planetaria, puede servir como entrada o salida de potencia al sistema de transmisión, para este diseño, estará fijo.

La figura 5-13 muestra un porta-planetarios fabricado en fundición que cuenta con un orificio dentado para fijarlo a un eje, soporte o para transmitir potencia, en este caso, se usará para darle fijación al porta-planetarios para que quede fijo. A continuación, se desarrolla el diseño del porta-planetarios.

Figura 5-13

Portaplanetarios con agujero estriado para fijación a un eje



Nota. Fuente [59]

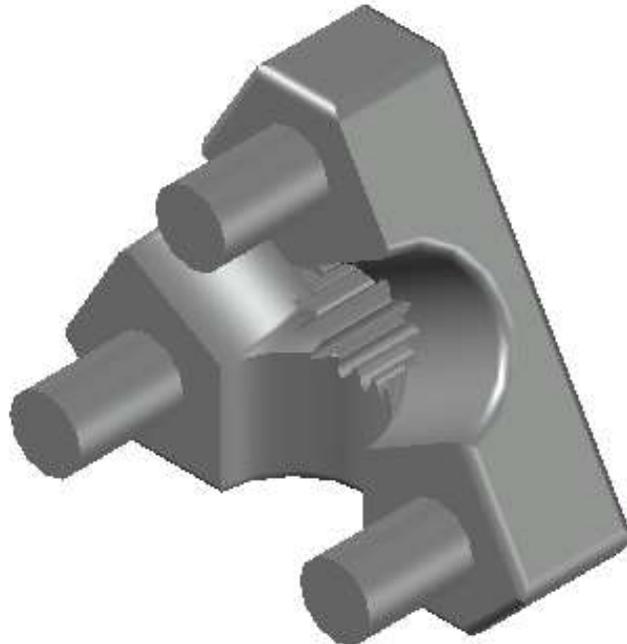
5.8.1. *Características y condiciones de trabajo del portaplanetarios*

El elemento porta-planetario se compone de un cuerpo principal que cuenta con un agujero estriado por medio del cual se fija al eje estático proveniente del chasis, y del mismo cuerpo o elemento salen los soportes para los engranajes planetarios, estos a su vez están montados sobre rodamientos.

Los soportes de los engranajes planetarios, experimentan una fuerza de empuje debido a la fuerza tangencial en el punto de paso de los engranajes, los engranajes planetarios se apalancan sobre el soporte para transmitir la potencia, esta fuerza de empuje, somete al soporte del engranaje a un esfuerzo de flexión. La figura 5-14 ayuda a entender la dinámica de las fuerzas.

Figura 5-14

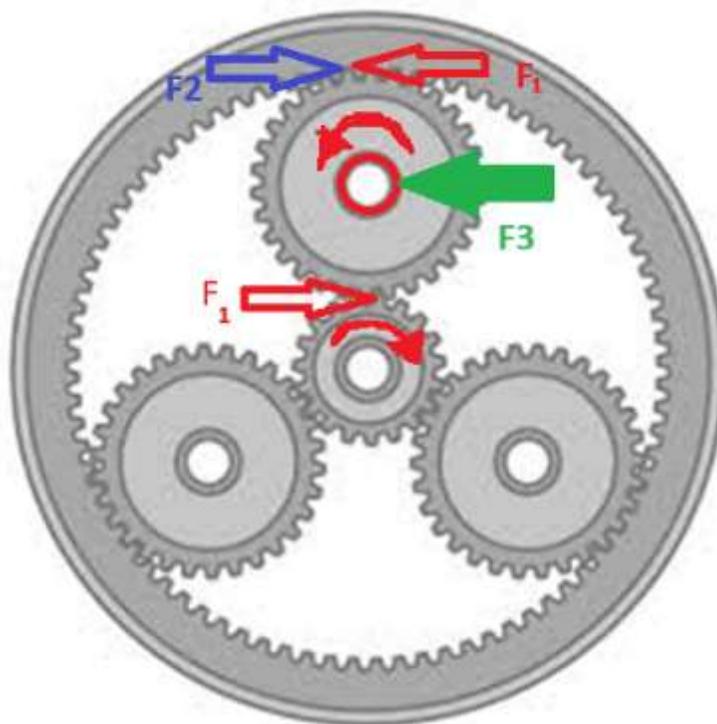
Portaplanetarios del diseño



Nota: Fuente, el autor.

Figura 5-15

Fuerzas sobre el soporte del engranaje planetario



Nota. Fuente [29] presenta modificaciones hechas por el autor.

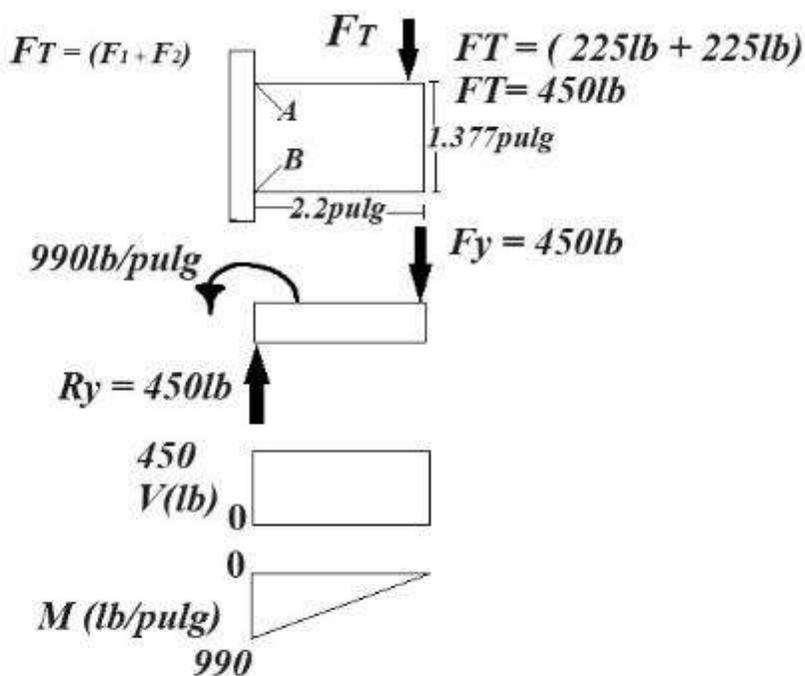
La fuerza 1 (**F1**) es la transmitida por el motor eléctrico, la fuerza 2 (**F2**) es la reacción que se opone al giro del engrane planetario ofrecida por el dentado de la corona y la fuerza 3 (**F3**) es la reacción en el soporte del engranaje planetario. La fuerza 1 y la fuerza opuesta 2, generan una fuerza de empuje (**F3**) en el soporte que es contraria a las fuerzas **F1** y **F2**, esta fuerza se invierte, es decir cambia de lado en el momento en que el motor pasa a ser impulsado por el mecanismo de transmisión, esto ocurre cuando el motor pasa a generar energía eléctrica.

5.8.2. Fuerzas sobre el soporte del engranaje

En el soporte de cada engranaje planetario, tenemos una reacción igual a la suma de las dos fuerzas 1 y 2, la fuerza conductora (W_t) entregada por el motor y la fuerza de reacción opuesta en el dentado de la corona que se da a 180° de la fuerza conductora.

Figura 5-16

Diagrama de cuerpo libre, cortante y momento flector



Nota: Fuente, el autor.

$$\Sigma f_x = 0 \quad \text{No existen fuerzas actuando sobre el eje } x$$

$$\Sigma f_y = 0$$

$$R_y - 450 \text{ lb} = 0$$

$$R_y = 450 \text{ lb}$$

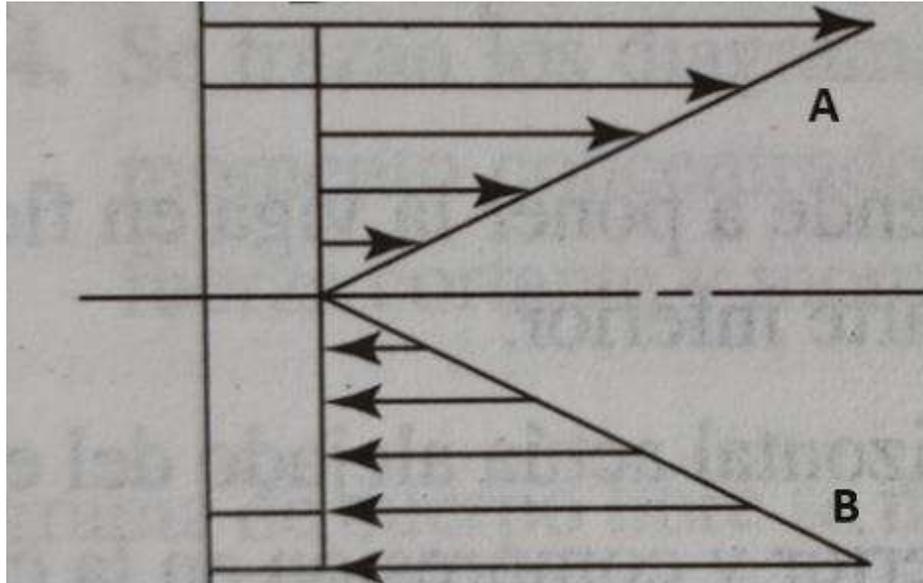
$$\Sigma M = 0$$

$$M - (450 \text{ lb} * 2.2 \text{ pulg}) = 0$$

$$M = 990 \text{ lb/pulg}$$

Figura 5-17

Fuerzas de tensión y compresión en el soporte del engranaje, esfuerzo cortante torsional



$$\sigma_A = \frac{Mc}{J} \quad (37)$$

$$\sigma_A = \frac{\left(990 \frac{\text{lb}}{\text{pie}}\right) (0.6889 \text{ pulg})}{\frac{\pi}{32} D^4} = 1927.17 \text{ lb (Fuerza de tensión en el punto A)}$$

$$\sigma_B = \frac{-Mc}{J} \text{ (la fuerza de compresión es negativa)}$$

$$\sigma_B = \frac{\left(-990 \frac{\text{lb}}{\text{pie}}\right) (0.6889 \text{ pulg})}{\frac{\pi}{32} D^4} = -1927.17 \text{ lb (Fuerza de compresión en el punto B)}$$

5.8.3. *Selección del material para el porta-planetario*

Debido a las posibles cargas de choque y la facilidad de moldeo y maquinabilidad que ofrece el hierro colado, se escogió el hierro dúctil ASTM A536-84 grado 60-40-18, el cual ofrece una resistencia a la tensión de 60.000psi (60ksi), resistencia de fluencia de 40.000psi (40ksi) y porcentaje de elongación (ductilidad) del 18%.

5.8.4. *Selección del rodamiento para los engranajes planetarios*

El diámetro externo del soporte para el engranaje define el diámetro interno del rodamiento sobre el cual estará montado el engranaje planetario, con base en esta condición y en las características de la aplicación como disponibilidad de espacio y precisión, se seleccionó el rodamiento a usar:

Corona de una hilera de agujas referencia K 35X40X25

5.8.5. *Características generales del rodamiento de agujas*

Las coronas de agujas son rodamientos independientes, listos para montar, sin aros interiores ni exteriores. Son útiles en aplicaciones donde el eje y el agujero del soporte pueden servir como pistas de rodadura, los rodamientos de agujas son ideales para usarse en aplicaciones de rodamientos que requieren un espacio radial mínimo. Los rodamientos de agujas son ampliamente usados en transmisiones automotrices por su alta capacidad de carga axial y a su vez su reducido tamaño del diámetro del rodillo o aguja. A continuación, se listan las características principales de los rodamientos de agujas:

- Alta capacidad de carga radial, lo cual es ventajoso en la aplicación para soportar la fuerza de empuje perpendicular al eje que ocasiona el engranaje de diente recto.

- Alta rigidez, es conveniente para evitar deformaciones de los rodillos y evitar que se pierdan las tolerancias de diseño.
- Alta precisión, es una característica importante debido a la precisión que exige el diseño de la transmisión.
- La menor altura de la sección transversal entre los rodamientos ofrece la solución a los espacios reducidos que se tienen en el diseño.
- Admiten desplazamiento axial en ambos sentidos lo cual es conveniente ya que absorbe posibles choques en el funcionamiento y complementa la naturaleza dinámica del diseño.

Tabla 5-8*Dimensiones del rodamiento*

Diámetro del agujero del complemento de agujas	35 mm
Diámetro exterior	40 mm
Diámetro exterior del complemento de agujas	40 mm
Ancho	25 mm

Nota. Fuente [60]

Tabla 5-9*Rendimiento del rodamiento*

Capacidad de carga dinámica básica	28.1 kN
Capacidad de carga estática básica	60 kN
Velocidad de referencia	12 000 r/min
Velocidad límite	13 000 r/min

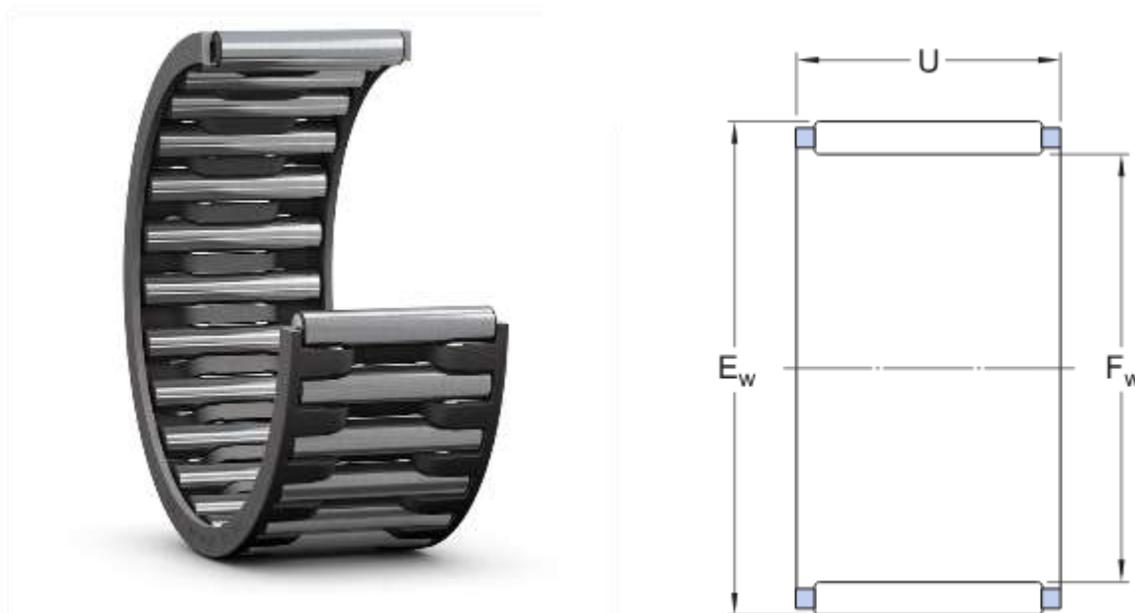
Nota. Fuente [60]**Figura 5-18***Rodamiento K35/40/25**Nota.* Fuente [60]

Tabla 5-10

Dimensiones del rodamiento complemento figura 5-16

F _w	35 mm	Diámetro debajo de los rodillos
E _w	40 mm	Diámetro exterior del conjunto de rodillos
U	25 mm	Ancho de la corona de agujas

Nota. Fuente [60]

5.9 Relación de transmisión

Después de haber determinado los diámetros de paso **D_p** y el número de dientes **N** de la transmisión planetaria (engranajes y corona) se obtuvo la relación de transmisión de la transmisión planetaria.

A pesar de ser un sistema de transmisión planetaria, la relación de reducción de velocidad se calculó directo ya que el porta-planetarios estará fijo, es decir, sólo tendrá giro, pero no tendrá traslación con respecto al engrane sol lo cual lo convierte en un engrane loco que no afecta la relación de reducción de velocidad (relación de transmisión) entre el engrane sol y la corona. [61]

De la ecuación de la Relación de reducción de velocidad:

$$\frac{n_p}{n_G} = \frac{N_G}{N_p} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$N_g / N_p = 87 / 17 = 5.1176$$

5.10. Selección de la unidad de potencia (Motor eléctrico)

A continuación, se hallará el número de revoluciones requeridas en el motor eléctrico:

Se escogió una llanta 175/35/R14, la cual tiene las siguientes medidas en milímetros:

175mm de ancho, el perfil de la llanta es el 35% del ancho, lo cual se multiplica por 2 más el diámetro del rin:

$$((175\text{mm} \times 0.35) \times 2) + 355.6\text{mm} = 478.1\text{mm equivalente a } 0.4781 \text{ metros}$$

El perímetro de la llanta es:

$$P = \Pi \times D \tag{38}$$

$$P = \Pi \times D = \Pi \times 0.4781 \text{ m} = 1.502 \text{ m (1.502 m / revolución)}$$

El requerimiento de diseño para la velocidad final es de 60 km/h equivalente a 16.66m/s entonces tenemos:

$$R_w = \frac{(Vf * 60)}{P_{perim}} = \frac{\left(16.6666 \frac{\text{m}}{\text{seg}} * 60\right)}{1.50199 \frac{\text{m}}{\text{rev}}} = 645.6 \frac{\text{rev}}{\text{min}}$$

La reducción total obtenida en la transmisión planetaria es de 5.1176, valor que se tomará para obtener las RPM del motor eléctrico, es decir, las RPM del eje de entrada.

$$\begin{aligned} \text{RPM eje de entrada} &= \text{RPM llanta} \times \text{reducción de velocidad} \\ &= 645.6 \text{ rpm} \times 5.1176 = 3304 \text{ RPM} \end{aligned}$$

Después de hallar la fuerza total requerida para impulsar el EV y la relación de transmisión, se estableció la potencia eléctrica del motor que impulsa el engrane sol, es decir, la potencia del motor eléctrico por medio del torque y rpm de entrada. [62]

$$Tt = \frac{Rw}{Kg * \eta T} Ft \quad (39)$$

Donde Tt es el torque total de entrada, Rw es el radio de la llanta, Kg es la relación de transmisión, ηT es la eficiencia de la transmisión y Ft es la fuerza total requerida para impulsar el EV, entonces tenemos de la ecuación 33:

$$Tt = \frac{(0.239 \text{ m})}{(5.1176 * 0.94)} * 2409N = 119.6 \text{ Nm}$$

El valor de Ft se tomó del cálculo de potencia, capítulo 5, página 75 del documento.

Se halla la potencia eléctrica:

$$P_m = T_m * \omega_m \quad (40)$$

Con la ecuación 42 tenemos:

$$P_m = (119.6 \text{ Nm}) * (3304 \text{ rpm}) * \left(\frac{\pi}{30}\right) = 41380.89 \text{ W}$$

Por razones de espacio, teniendo en cuenta que el motor eléctrico se alojará dentro de la misma carcasa de la transmisión planetaria, se escogió un motor eléctrico de flujo axial, la tabla 5-11 muestra las especificaciones de los motores Magnax.

Tabla 5-11*Especificaciones motores Magnax*

	High-speed machines			
www.magnax.com	AXF185	AXF225	AXF275	AXF350
max. rpm	12000	10000	8000	4000
Motor diameter (mm)	185	225	275	350
Motor length (mm)	75	86	86	86
Dry mass (kg)	8	14	26,5	42
Cooling	water	water	water	water
Peak power (kW)	100	170	300	480
Nominal power @ max rpm(kW)	50	85	150	240
Peak torque* (Nm)	100	250	500	1000
Nominal Torque* (Nm)	50	133	267	500
Efficiency at nominal (%)	95	95	94,8	94,5
max. efficiency (%)	98	98	98	98
Peak Power Density (kW/kg)	12,5	12,1	11,3	11,4
Nominal power density (kW/kg)	6,3	6,1	5,7	5,7
Peak Torque density (Nm/kg)	12,5	17,9	18,9	23,8
Nominal Torque density (Nm/kg)	6,3	9,5	10,1	11,9
Battery Voltage (V)	400 or 750	750	750	750

Nota. Fuente [63]

Debido al requerimiento de potencia, rpm y por el espacio disponible, se escogió el motor

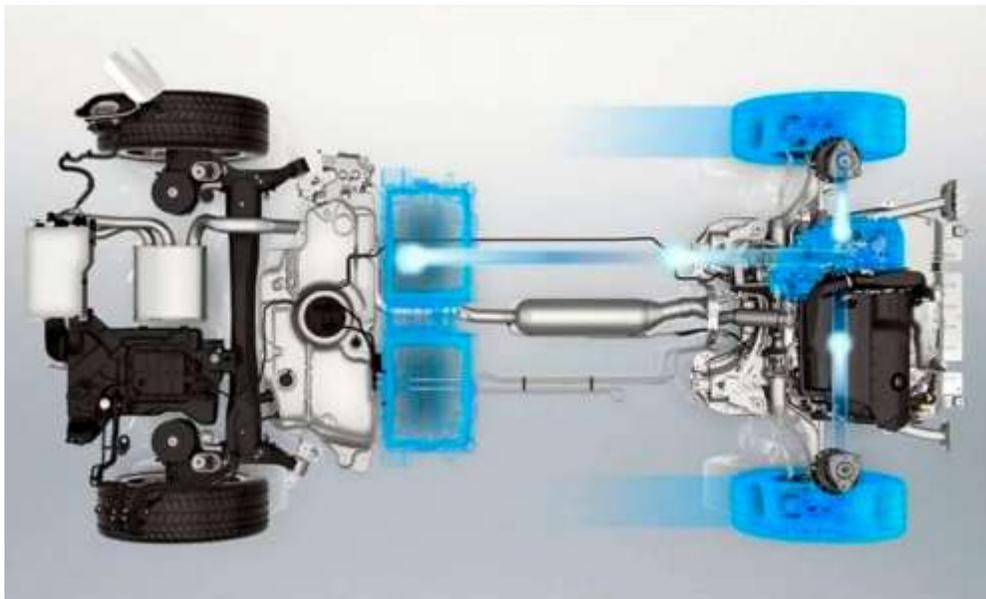
MAGNAX AXF275.

6. Selección del freno regenerativo

El freno regenerativo es una tecnología de frenado aplicada en los EV, que valiéndose de la electrónica de potencia al momento de frenar, convierte el motor eléctrico que impulsa el vehículo en un generador de energía eléctrica que carga las baterías, esto aprovechando el acoplamiento directo del motor eléctrico a los mecanismos de transmisión de potencia, de esta manera, al frenar el EV, dejar de acelerar o ir bajando una pendiente, se aprovecha la inercia del vehículo para convertir la energía cinética en energía eléctrica.

Figura 6-1

Representación gráfica del flujo de energía al frenar en un híbrido



Nota. Fuente [64]

6.1. Algunas de las ventajas del frenado regenerativo

- Mayor autonomía de las baterías gracias a la recarga que realiza el frenado regenerativo, el grado de recarga de las baterías depende del KERS que lleve instalado cada EV, oscila entre el 40% y hasta el 70%. [65]
- Reduce emisiones contaminantes y el uso de recursos ya que, al realizar las paradas, se reduce la fricción, es decir menor consumo de discos y pastillas de freno, por otro lado, al detener el EV, no hay emisiones contaminantes porque sencillamente el motor eléctrico se detiene, incluso en funcionamiento, el motor eléctrico no emite contaminación al ambiente.

6.2. Algunas de las desventajas del frenado regenerativo

- Su eficacia no es tan alta por lo que la frenada toma más tiempo, sin embargo, el desarrollo tecnológico ha venido mejorando la eficiencia del frenado regenerativo hasta el punto de tener que instalar discos de freno en material antioxidante debido al bajo uso del freno convencional por fricción en el Chevrolet Bolt [66]
- Su rendimiento depende de la velocidad: es decir, a mayor velocidad mayor será la frenada y mayor el aporte de energía a la batería.

La selección del freno regenerativo se hizo con base en los frenos regenerativos que actualmente se usan y están disponibles en el mercado, a continuación, se hace una breve presentación de algunos y se realiza la selección del freno regenerativo.

- Sistema “Regend on Demand” se usa con un solo pedal combinado con un control del sistema instalado en el volante. El uso combinado con los dos modos de conducción, Drive

o Low, y el uso del acelerador dan lugar, según General Motors, a cuatro niveles de frenado regenerativo, y de manera gradual, cada uno de ellos ofrece mayor eficiencia en el frenado, estos modos son seleccionables por el conductor. [66]

- El fabricante Japonés Nissan, ha instalado la tecnología e-Pedal en la segunda generación del Leaf, que posibilita al conductor arrancar, acelerar, desacelerar y frenar totalmente empleando sólo el pedal del acelerador. Al retirar el pie del pedal, se conecta el sistema de frenado regenerativo y el EV reduce la velocidad. En los trayectos urbanos, el e-Pedal disminuye la necesidad de mover el pie derecho continuamente de un pedal al otro lo que ofrece una conducción más cómoda. Según Nissan, este único pedal abarca el 90% de los requerimientos de frenado durante la conducción, sin que se haga necesario el uso de los frenos convencionales. Según el fabricante, la desaceleración alcanza un tope de 0.2G, equiparable a la que resulta al usar el pedal del freno hidráulico. En las pendientes, la electrónica de potencia reduce la aceleración suavemente y al parar por completo el EV el sistema de frenos hidráulicos se activa de forma automática. Como complemento de la seguridad, las luces de freno se encienden sólo con desacelerar. [66]
- Control de freno integrado de ZF, este sistema incluye en su diseño un controlador llamado IBC que reemplaza el sistema ESC y el uso de vacío tomado de la admisión, en lugar de esto, instala un actuador muy preciso que es impulsado por un motor eléctrico extremadamente rápido con accionamiento de frenos en menos de 150 milisegundos mejorando la eficacia del freno. [66]

- Freno electrónico iMEB de Hyundai Mobis, es muy similar en su concepción y diseño al visto anteriormente de ZF, usa un actuador impulsado por un motor eléctrico que a su vez es gestionado por un controlador, presenta mejoras en la respuesta del frenado y reducción de peso del sistema. [66]
- Sistema de Frenado Redundante Bosch, el fabricante de origen alemán presenta la combinación de dos sistemas de freno que actúan de forma independiente, uno de ellos de tipo electromecánico y el otro basado en la electrónica de potencia, entre ambos sistemas brindan un sistema de frenado regenerativo eficiente y seguro, en caso de fallo en alguno de los sistemas de freno, el otro puede detener el EV sin bloquear las ruedas modulando la presión del freno. [66]

6.3. Selección freno regenerativo para la aplicación en la unidad

De los sistemas de freno regenerativo presentados, se escogió para el proyecto el del tipo E-Pedal presentado por Nissan por su sencillez y practicidad en la conducción.

Los sistemas KERS están integrados al motor eléctrico que impulsa el vehículo y su desarrollo tecnológico y control depende totalmente de la electrónica de potencia la cual ya se cuenta dentro de los sistemas complementarios del proyecto.

7. Mantenimiento de la unidad

Con el fin de brindar una larga vida útil a los componentes mecánicos de la transmisión planetaria y en general del vehículo, se complementó el diseño estableciendo el programa de mantenimiento del EV que incluye el servicio para la unidad de transmisión de potencia.

Para seleccionar el lubricante de la transmisión planetaria se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

7.1 Velocidad de paso entre los engranes

La velocidad de paso del diseño es:

$$Vt = (\pi \cdot 2.125 \text{ pulg} \cdot 3405.25 \text{ rev/min}) / 12 = 1838 \text{ pies/min (pag.64)}$$

7.2 Fuerza de contacto de acuerdo al resultado del esfuerzo de contacto:

$$S_c = 2300 \sqrt{\frac{(992.8 \text{ lb})(1.75)(1.548)(1)(1.175)}{(2.2 \text{ pulg})(2.125 \text{ pulg})(0.107)}}}$$

$$= 258473.9 \text{ psi}$$

7.3 Tolerancia entre dientes del engrane:

De acuerdo a la distancia entre centros y a la recomendación [67] de juego mínimo para engranes de paso grueso, se obtuvo lo siguiente:

Distancia entre centros

$$C = \frac{(N_G + N_p)}{2P_d} \quad (41)$$

$$C = ((35 + 17))/(2(8)) = 3.25 \text{ pulg} \quad (\text{Ecuación 43})$$

La tabla 7-1 muestra los juegos recomendados de acuerdo al paso diametral

Tabla 7-1

Sistema de paso diametral (juego en pulgadas)

Sistema de paso diametral - Paso en pulgadas					
Distancia entre centros C. (Pulg)					
Pd	2	4	8	16	32
18	0,005	0,006			
12	0,006	0,007	0,009		
8	0,007	0,008	0,010	0,014	
5		0,010	0,012	0,016	
3		0,014	0,016	0,020	0,028
2			0,021	0,025	0,033
1,25				0,034	0,042

Nota: Tomado de Diseño de Elementos Maquinas 4ta Edición página 395.

Teniendo en cuenta que se diseñó una transmisión de engranajes planetarios y con base en los datos obtenidos del diseño y la experiencia en otros equipos de similares condiciones de uso y desempeño como las aplicaciones automotrices, se realizó la selección del aceite para engranajes Mobilub HD LS API GL-5, a continuación, la descripción del producto:

Mobilube HD LS 80W-90 es un lubricante de extra alto rendimiento para automóviles formulado a partir de aceites base seleccionados y un avanzado sistema de aditivos específicamente diseñado para diferenciales de deslizamiento limitado. Este lubricante está diseñado para funcionar en diferenciales de deslizamiento limitado, ejes y transmisiones finales de servicio pesado en los que se esperan presiones y cargas de impacto extremas, con un nivel de desempeño API GL-5. Mobilube HD LS 80W-90 proporciona una estabilidad química y térmica excepcional a temperaturas elevadas de la masa del aceite. [68]

7.3.1. *Propiedades y beneficios*

Las aplicaciones actuales en general son cada vez más exigentes, imponen mayores demandas de desempeño a los lubricantes de los trenes de transmisión. Las velocidades más altas, los torques más altos, las cargas más pesadas y la capacidad de deslizamiento limitado requieren fórmulas mejoradas para maximizar la vida útil de las transmisiones y optimizar su desempeño. Los intervalos más largos entre cambios de aceite imponen exigencias adicionales al lubricante para engranajes. La tabla 7-2 muestra las ventajas y beneficios del aceite seleccionado.

Tabla 7-2

Propiedades y beneficios del aceite Mobilube HD LS 80W-90

Propiedades	Ventajas y posibles beneficios
Excelentes propiedades de fricción	Desempeño efectivo bajo deslizamiento limitado
Buena estabilidad térmica y resistencia a la oxidación a altas temperaturas	Prolongada vida útil de los engranajes y cojinetes debido a una mínima generación de depósitos y una mayor vida útil de los sellos
Sobresaliente protección contra el desgaste a bajas velocidades/altos torques y	Mayor capacidad de carga que reduce los costos operativos

Propiedades	Ventajas y posibles beneficios
contra el rayado a altas velocidades	
Lubricación efectiva a bajas temperaturas	Menor desgaste y facilidad de arranque del motor
Excelente protección contra la herrumbre, las manchas y la corrosión	Menor desgaste y menores costos de mantenimiento
Buena resistencia a la formación de espuma	Mantiene la resistencia de la película de manera que reduce el desgaste
Compatible con los sellos y empaques automotrices usuales	Fugas mínimas y menor contaminación

La selección del lubricante, se basó en la experiencia del uso en aplicaciones automotrices, se recomienda el cambio del aceite lubricante, cada 20.000 kilómetros o 12 meses teniendo en cuenta que el uso del vehículo es exclusivo para ciudades. [69]

7.3.2. Capacidad de aceite lubricante de la transmisión mecánica de potencia

Para calcular la capacidad de aceite para la lubricación de la transmisión planetaria, se considera el volumen total del alojamiento cilíndrico del rin y se resta el volumen de todos los

componentes de la transmisión planetaria y del motor eléctrico ya que comparten el espacio en el alojamiento, se realiza el cálculo en cm^3 :

Volumen del alojamiento $V_a =$

Se toma el radio del diámetro total disponible dentro del rin, es decir, de las 10.875 pulgadas equivalentes a 27.62cm, tenemos un radio de 13.81cm y su altura la cual es la suma de la altura de la transmisión planetaria (12cm) más la altura del motor eléctrico seleccionado (8.6cm)

$$(\pi * r^2) * h \quad (44)$$

$$(\pi * 13.81\text{cm}^2) * 20.6\text{cm} = 12342.5\text{cm}^3$$

Volumen V_m de los componentes de la transmisión tomado del AutoCAD = 4000cm^3

Volumen V_t del motor eléctrico MAGNAX AXF275=

$$(\pi * 13.75\text{cm}^2) * 8.6\text{cm} = 5108\text{cm}^3$$

Volumen total disponible para el lubricante V_T :

$$V_T = V_a - (V_t + V_m)$$

$$V_T = 12342.5\text{cm}^3 - (4000\text{cm}^3 + 5108\text{cm}^3) = 3234.5\text{cm}^3$$

Del volumen total V_T se toma el 50% ya que la lubricación se dará por salpicadura, es decir, que los mismos componentes de la transmisión se encargan de transportar y distribuir el aceite en medio del funcionamiento del dispositivo. (45)

$$V_T = 1617.25\text{cm}^3 \text{ equivalentes a } 1.7 \text{ cuartos de galón americano}$$

7.3.3. Tabla de mantenimiento

La tabla 7-3 contiene el programa de mantenimiento recomendado para el EV

Tabla 7-3*Programa de mantenimiento*

Programa de mantenimiento del EV			
Sistema	Componente	Tipo de mantenimiento	Periodo
Baterías	Carga	Verificar carga	Diario
Tren de potencia	Baterías	Inspección	Semanal
	Cables y conexiones	Inspección	Semanal
	Llanta trasera	Inspección	Semanal
	Transmisión	Cambio de aceite	Anual o 20.000km
Frenos	Pastillas	Inspección	6 meses
	Sist. General	Inspección	Anual o 20.000km
	Líquido	Cambio	Anual o 20.000km
Suspensión	Amortiguadores	Inspección	6 meses
Sistema de control	Monitor e indicadores	Verificar correcto funcionamiento	6 meses
	Timón	Verificar ajuste	6 meses
Seguridad activa	Cinturón de seguridad	Inspección	6 meses
	Plumilla limpiaparabrisas	Inspección	6 meses
	Luces	Inspección	Semanal

Nota. Fuente el autor.

Conclusiones

Se logró un diseño compacto, realista y eficiente partiendo de los requerimientos de diseño establecidos, la integración de los componentes de la transmisión, engrane sol, planetarios, portaplanetarios, corona que se integra al rin y el motor eléctrico que integra el KERS en una misma carcasa dan como resultado un sistema que integra transmisión mecánica de potencia y motor eléctrico regenerativo para la aplicación en un vehículo eléctrico biplaza para el transporte humano en ciudades.

Se obtuvieron características de montaje prácticas y sencillas, sobre el eje estriado que es fijo al chasis, se asegura el portaplanetarios por medio de una tuerca, la corona de la transmisión planetaria va fijada al rin como un solo elemento el cual se convierte en la salida de potencia hacia la llanta, el engranaje sol está montado sobre el eje del motor eléctrico y este a su vez se fija al portaplanetarios que es fijo al chasis, después del motor eléctrico se monta una tapa que cierra de forma hermética el dispositivo conteniendo el aceite lubricante.

Los diseños compactos y eficientes de los motores de flujo axial, los cuales reducen su tamaño, pero mejoran su rendimiento, fueron de gran ayuda para complementar el diseño de la unidad propuesta. Por otro lado, el avance tecnológico en las actuales baterías facilita el diseño de sistemas compactos y eficientes.

La alta potencia resultante para el motor eléctrico es producto de los cálculos que se realizaron con un parámetro de pendiente alto conservando la misma velocidad final, sin embargo, al contrastar la potencia resultante del diseño, coincide con la potencia real disponible en el vehículo tomado como referencia ya que el C1 de Lit Motors cuenta con dos motores eléctricos de 20kW cada uno.

La información recopilada en este trabajo da cuenta del avance tecnológico y tendencia mundial hacia el uso de tecnologías limpias y la optimización del uso de energías renovables, los avances en el desarrollo de las baterías y las estaciones de carga más potentes están dando solución a las limitaciones que presentaban los EV como autonomía y tiempo de recarga de la batería. Destaca encontrar que organismos como el Banco Interamericano de Desarrollo BID y la Organización Panamericana de la Salud OPS están preocupados por el cuidado del medio ambiente e interesados en la masificación del uso de tecnologías limpias para el transporte de personas principalmente en las grandes ciudades.

Al revisar los requerimientos de diseño de la transmisión, la masa de 516 kilogramos es un requerimiento de diseño exigente para el tipo de vehículo sobre el cual se realizó el trabajo, sin embargo, la innovadora tecnología de estabilización por giroscopios desarrollada por el fabricante Lit Motors permitió diseñar bajo estos requerimientos.

En resumen, el diseño de la transmisión de potencia, determinó las dimensiones de los elementos partiendo del requerimiento de diámetro de 0.5 m de la rueda motriz, así, el eje sol con un diámetro de paso de 2.125 pulgadas, los planetarios con diámetro de paso 4.375 pulgadas y la corona con 10.875 de diámetro de paso cumpliendo así con los requerimientos de diseño establecidos por espacio.

En definitiva, al revisar los cálculos y el desarrollo del procedimiento de diseño, se ratifica la selección del acero AISI 4140 OQT400 como material de fabricación de los engranajes y el hierro dúctil ASTM A536-84 grado 60-40-18 como material de fabricación para el portplanetarios, esta selección garantiza la confiabilidad de los elementos.

Finalmente, del diseño de la transmisión planetaria, se obtuvo una ganancia mecánica considerable, en primer lugar, cuando la energía eléctrica fluye de las baterías hacia el motor eléctrico para impulsar el vehículo, la reducción ofrecida por el mecanismo de transmisión da ventaja al motor eléctrico con la disminución de revoluciones y la ganancia de torque, cuando el flujo de energía se invierte, es decir que la inercia del vehículo arrastra el tren de potencia y entra en funcionamiento el frenado regenerativo, la transmisión planetaria también ofrece una ganancia por las revoluciones obtenidas en el eje del motor eléctrico, las cuales son convenientes al momento de generar energía.

Tal y como se comprobó en la revisión de la literatura, hoy día existe una fuerte tendencia y un amplio desarrollo general en los EV y en la aplicación de mecanismos de transmisión, tras el análisis, se concluye que la aplicación de transmisiones mecánicas entre la unidad de potencia y las llantas se debe a que las altas revoluciones del motor eléctrico, no pueden ser conectadas directamente a la rueda, sumado a esto, la necesidad de optimizar el uso de la energía para maximizar la autonomía de las baterías, hacen conveniente y llamativo el desarrollo y aplicación de proyectos que planteen mejoras en el consumo de energía.

Se evidencia que los materiales disponibles para la fabricación de los componentes cubren ampliamente el requerimiento de calidad necesaria tanto en aceros al carbón como en fundición, el acero AISI 4140 OQT400 cuenta con resistencia a la tensión de 290ksi, porcentaje de elongación de 11 y dureza superficial de 578 HB lo cual cubre ampliamente los requerimientos por esfuerzos de tensión y resistencia a la picadura, por otro lado, el hierro dúctil ASTM A536-84 grado 60-40-18, ofrece una resistencia a la tensión de 60.000psi (60ksi), resistencia de fluencia de 40.000psi

(40ksi) y porcentaje de elongación (ductilidad) del 18% lo cual facilita la maquinabilidad sin afectar la resistencia del elemento.

Al contrastar la potencia resultante para el motor eléctrico del diseño, coincide con la potencia real que es aplicada en el EV C1 de Lit Motors escogido como referencia, el vehículo está provisto de 2 motores de 20 kW, por otro lado, es importante aclarar que, la tecnología del motor eléctrico seleccionado para el trabajo no es nueva, existe una amplia variedad de motores eléctricos de flujo axial con altísimas prestaciones versus su volumen y masa, los desarrollos en este sentido son muy amplios y cuentan con aplicaciones como por ejemplo en Mercedes-Benz. En la actualidad, los principales desarrolladores y fabricantes de motores de flujo axial son MAGNAX y YASA.

Se incluyó en la tabla de mantenimiento, el servicio a todos los puntos del EV incluyendo la transmisión mecánica de potencia, por otro lado, la caracterización de la transmisión planetaria, evidencia la facilidad de ejecución y reducción de actividades de mantenimiento para la preservación del vehículo en general, esta es una ventaja de los vehículos eléctricos al reducir actividades y costos de mantenimiento.

Recomendaciones

Se puede recalcular el mecanismo de la transmisión mecánica para obtener una mayor relación de reducción y así bajar el torque de entrada requerido.

Al recalcular los mecanismos de la transmisión, se puede seleccionar un paso diametral menor (menor a 8) y verificar un ancho de cara del engrane mayor para bajar los resultados de los números de esfuerzo flexionante y el número de esfuerzo de contacto para obtener un requerimiento de material menos exigente.

Bajar la pendiente para la realización de los cálculos de la potencia requerida, con ello se obtendría un menor resultado de potencia requerida para el motor eléctrico y así mismo un consumo energético menor.

Referencias Bibliográficas

- [1] R. Vázquez Casillas, El vehículo eléctrico, una solución medioambiental sostenible y eficiente, Trabajo de grado, Universidad Carlos III de Madrid, 5 de junio de 2018.
- [2] D. Clavero, Diariomotor, 13 Sep. 2021 Transmisiones en motores eléctricos: por qué serán cada vez más habituales [Online]. Disponible en:
<https://www.diariomotor.com/electricos/tecnologia/transmision-motor-electrico/>
- [3] KIA , ¿Los autos eléctricos tienen transmisiones? [Online]. Disponible en:
<https://www.kia.com/cr/discover-kia/ask/do-electric-cars-have-transmissions.html>
- [4] E. Larrodé Pellicer, Automóviles Eléctricos, Zaragoza, 1997.
- [5] Toyota, Componentes de un coche 100% eléctrico, 29 de marzo de 2023 [Online].
Disponible en:
<https://www.toyota.es/world-of-toyota/articles-news-events/componentes-de-un-coche-electrico-toyota>
- [6] CleanTechnica, 16 de Noviembre de 2020, Inmotive Ready To Supply Ingear 2-Speed Transmission To EV Manufacturers,[Online]. Disponible en:
Inmotive Ready To Supply Ingear 2-Speed Transmission To EV Manufacturers -
CleanTechnica
- [7] Consejo de Bogotá, DANE revela proyecciones de población para el 2023, [Online].
Disponible en:
<https://concejodebogota.gov.co/dane-revela-proyecciones-de-poblacion-para-el-2023/cbogota/2020-03-19/103038.php>

- [8] A. María Puentes Pulido, El Tiempo, 6 de Julio de 2018, Bogotá, una de las ciudades con más densidad de población del mundo, [Online]. Disponible en:
<https://www.eltiempo.com/bogota/bogota-es-una-de-las-ciudades-con-mas-densidad-poblacional-del-mundo-240412>
- [9] J. R. Paredes – J. A. Urteaga, BID, 7 de octubre de 2021, Ciudades solares como motor de la recuperación verde. [Online]. Disponible en:
<https://blogs.iadb.org/energia/es/ciudades-solares-como-motor-de-la-recuperacion-verde/>
- [10] L. Shaokun, Diálogo Chino, 23 de abril de 2018, La revolución del transporte urbano sostenible en China, Una revolución callejera focalizada en las personas, [Online].
Disponible en:
<https://dialogochino.net/es/infraestructura-es/11025-la-revolucion-del-transporte-urbano-sostenible-en-china/>
- [11] G. García, Híbridos y Eléctricos, 20 junio de 2021, BMW revoluciona la transmisión de las motos eléctricas: un eje en lugar de una cadena, [Online]. Disponible en:
https://www.hibridosyelectricos.com/motos/bmw-revoluciona-transmision-motos-electricas-eje-cadena_45998_102.html
- [12] G. García, Híbridos y Eléctricos, 11 octubre de 2018, Ricardo desarrolla una nueva transmisión económica y ligera para coches eléctricos, [Online]. Disponible en:
https://www.hibridosyelectricos.com/coches/ricardo-desarrolla-nueva-transmision-economica-ligera-coches-electricos_22354_102.html
- [13] Lenntech, Dióxido de Carbono, [Online]. Disponible en:
<https://www.lenntech.es/biblioteca/carbon-dioxide.htm>

- [14] Revista Motor, 21 de agosto de 2019, [Online]. Disponible en
<https://www.motor.com.co/actualidad/industria/carros-electricos-mundo/32767>
- [15] G. García, Tecnologías de frenado regenerativo para coches eléctricos, 5 de enero de 2019, [online]. Disponible en:
<https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/tecnologias-frenado-regenerativo-coches-electricos/20181231131615024252.html>
- [16] Blog MAPFRE, Qué es el freno regenerativo y por qué es más eficiente, 14 de enero de 2022, [Online]. Disponible en:
<https://www.motor.mapfre.es/coches/noticias-coches/que-es-freno-regenerativo-por-que-mas-eficiente/#:~:text=Principio%20de%20funcionamiento%20del%20freno%20regenerativo,%20Al%20pisar%20el&text=Este%20es%20el%20comportamiento%20del%20freno%20de%20cualquier%20coche%20de%20combustible.&text=Este%20mecanismo%20es%20tan%20eficaz,ha%20producido%20durante%20la%20frenada.>
- [17] Robert L. Mott, Diseño de Elementos de Maquinas, 2006 – Cuarta edición, Parte II, Diseño de una transmisión mecánica, página 261 y 301
- [18] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:
<https://liceodoballe.blogspot.com/p/ruedas-de-friccion.html>
- [19] J. García, Mecapedia, Transmisión por correa, 21 de septiembre de 2022 [Online].
Disponible en:
http://www.mecapedia.uji.es/pages/transmision_por_correa.html

- [20] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capítulo 7, Transmisiones por bandas y cadenas, páginas 265 y 268.
- [21] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capítulo 7, Transmisiones por bandas y por cadenas, página 269
- [22] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:
<https://www.ajtransmisiones.com/images/2022Noticias/ejemplo-poleas-correas-1.jpg>
- [23] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capítulo 7, Transmisiones por bandas y cadenas, página 283.
- [24] HVH, Ventajas y Desventajas de Transmisiones por Cadena, [Online] Disponible en:
<https://hvhindustrial.com/es/blog/ventajas-desventajas-transmisiones-por-cadena#:~:text=Las%20transmisiones%20por%20cadena%20se,%2C%20cortadoras%20de%20carb%C3%B3n%20etc.>
- [25] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:
<https://www.rema.com.co/wp-content/uploads/2020/01/transmision-destacada.png>
- [26] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:
<https://r85motos.cl/r85/wp-content/uploads/2019/01/Kit-de-Arranque.jpg>
- [27] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capítulo 8, Cinemática de los engranajes, página 301
- [28] Steepperonline, Planetary gearbox, [Online]. Disponible en:
Planetary Gearbox | STEPPERONLINE (omc-stepperonline.com)

[29] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:

https://static.vecteezy.com/system/resources/previews/002/276/758/non_2x/grey-planetary-gear-icon-or-illustration-vector.jpg

[30] Robert L. Mott, Diseño de Elementos de Maquinas, 2006 – Cuarta edición, Parte II, Capítulo 12, página 531

[31] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:

https://www.grindelgears.com/media/uploads/engranajes/ejes_estriados01.jpg

[32] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capítulo 8, Cinemática de los engranajes, páginas 329 y 330.

[33] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capitulo 8, Cinemática de los engranes, Geometría de los engranes rectos; Forma involuta del diente, Página 307.

[34] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:

<https://reliabilityweb.com/media-library/eyJhbGciOiJIUzI1NiIsInR5cCI6IkpXVCJ9.eyJpbWFnZSI6Imh0dHBzOi8vYXNzZXRzLnJibC5tcy8yODAxOTIyNy9vcmlnaW4uanBnIiwiaXhwaXJlc19hdCI6MTcxNDZzNTYxMn0.ThXVexbo2db5Ew-W4s5MSyPNiANivmD2AzvcmbuC3JA/image.jpg?width=712&quality=80>

[35] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capitulo 8, Cinemática de los engranes, Sección 8-7, Geometría de los engranes helicoidales, Páginas 329 y 331.

- [36] F. Giovanna, Autocosmos, Autos ecológicos, ¿qué son los frenos regenerativos? 9 de septiembre de 2009, [Online]. Disponible en:
<https://noticias.autocosmos.com.mx/2009/09/09/que-son-los-frenos-regenerativos#:~:text=El%20freno%20regenerativo%20fue%20desarrollado,incrementaba%20el%20rendimiento%20del%20autom%C3%B3vil>.
- [37] C. Uzarán, E. Velandia, La motocicleta como modo de transporte, Universidad de la Salle, Bogotá, 2018.
- [38] Moto1Pro, M. Sant Ramo, ¿Quién inventó la moto?, 27 de enero de 2023, [Online].
 Disponible en:
<https://www.moto1pro.com/opinion/quien-invento-la-moto-hace-mas-de-dos-siglos#:~:text=Muchos%20historiadores%20y%20expertos%20atribuyen,muchos%20consideran%20la%20primera%20motocicleta>.
- [39] Universidad de la Salle, D. Molina Caro, S. Montealegre, Estudio de las percepciones de los motociclistas sobre la motocicleta como modo de transporte, y las tendencias comerciales de la motocicleta en Bogotá, 2015, [Online]. Disponible en:
https://ciencia.lasalle.edu.co/cgi/viewcontent.cgi?article=1164&context=ing_civil
- [40] Organización Panamericana de la Salud, La motocicleta en el tránsito en las Américas. Situación y medidas para mejorar la seguridad de los usuarios, 2017, [Online].
 Disponible en:
https://www.paho.org/es/file/48760/download?token=gD_5VpO6#:~:text=El%20uso%20masivo%20de%20motos,de%20desarrollo%20urbano%20y%20laboral.

[41] EE, Autos, La mejor opción en dos ruedas, 24 de abril de 2015, [Online].

Disponible en:

<https://www.elespectador.com/autos/la-mejor-opcion-en-dos-ruedas-article-556957/>

[42] BID, R. Espino Moreno, Energía para el futuro, mayo 3 de 2023, [Online].

Disponible en:

<https://blogs.iadb.org/energia/es/electrificar-el-transporte-una-forma-costo-efectiva-de-modernizar-el-transporte-y-reducir-emisiones/>

[43] BID, M. Madrigal, Electromovilidad: transporte más limpio, seguro y eficiente, junio 5 de 2019, [Online]. Disponible en:

<https://blogs.iadb.org/energia/es/electromovilidad-transporte-mas-limpio-seguro-y-eficiente/>

[44] Portal Movilidad, Desarrollan baterías extraíbles “extra potentes” para vehículos eléctricos de dos ruedas eléctricos, 13 de agosto de 2021, [Online]. Disponible en:

<https://portalmovilidad.com/desarrollan-baterias-extraibles-extra-potentes-para-vehiculos-electricos-de-dos-ruedas-electricos/>

[45] Ministerio de Transporte, Movilidad ambientalmente sostenible, sin fecha, [Online].

Disponible en:

<https://especiales.mintransporte.gov.co/SemanaMovilidadCO/movilidad-ambientalmente-sostenible.php>

[46] UTP, V. Ríos Ocampo, Tesis de grado, Estado del arte de los vehículos eléctricos y su posible implementación en Colombia, Julio de 2017, [Online]. Disponible en:

<https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/563ab036-7205-4bee-8d4e-7ae1a8f38f3f/content>

[47] ONU, Estado de la movilidad eléctrica, América latina y el Caribe, 2019, [Online].

Disponible en:

<https://parlatino.org/wp-content/uploads/2017/09/movilidad-electrica-16-7-20.pdf>

[48] Universidad de Valladolid, M. Martínez, Propulsión en vehículos eléctricos, enero de 2017,

[Online]. Disponible en:

<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/25504/TFG-P-630.pdf?sequence=1>

[49] El Comercio, Ruedas y Tuercas, 19 de abril de 2019, [Online]. Disponible en:

<https://elcomercio.pe/ruedas-tuercas/automotriz/que-es-el-frenado-regenerativo-en-los-vehiculos-electricos-y-para-que-sirve-peru-mexico-espana-estados-unidos-noticia/>

[50] Lit Motors C1, la moto que no se cae, [Online] Disponible en:

https://www.youtube.com/watch?v=x6vyH_PS-SY

[51] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:

<https://img.autosblogmexico.com/2019/12/04/27PgLqGM/epicicloidal-foto-293b.jpg>

[52] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:

https://publimotos.com/wp-content/uploads/2023/09/C-1_1.jpg

[53] Google.com Imagen de referencia, [Online] Disponible en:

<https://danielacardenas251.files.wordpress.com/2015/05/plano-inclinado1.jpg>

[54] Asociación mexicana de ingeniería de vías terrestres. AC. Delegación Jalisco, [Online]

Disponible en:

AMIVTAC | Uso de las capas de rodadura para mejorar la fricción en los pavimentos
(amivtacjalisco.org)

- [55] Design And Analysis of Powertrain for Electric Vehicle, [Online] Disponible en:
<https://docplayer.net/217247152-Design-and-analysis-of-powertrain-for-electric-vehicle.html>
- [56] LinkedIn, [Online] Disponible en:
<https://es.linkedin.com/pulse/aerodin%C3%A1mica-del-veh%C3%ADculo-julian-blanco->
- [57] Wikipedia, [Online] disponible en:
https://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_de_resistencia
- [58] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Apéndice 3
Propiedades de diseño para los aceros al carbón y aleados.
- [59] Paulino tractores, [Online] Disponible en:
<https://paulinotractores.com.br/produto/porta-planetario/>
- [60] SKF, Rodamiento Corona de agujas, K35/40/25 [Online] Disponible en:
<https://www.skf.com/webpim/0901d19680809865/png/0901d19680809865.png>
- [61] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capítulo 8,
Cinemática de los engranajes, página 326.
- [62] Development of electric vehicle powertrain: Experimental implementation and performance assessment, [Online] Disponible en:
(PDF) Development of electric vehicle powertrain: Experimental implementation and performance assessment (researchgate.net)

[63] Researchgate, [Online] Disponible en:

https://www.researchgate.net/figure/MAGNAX-motor-series-specifications_fig17_326294480

[64] BYD, Motorysa, Cómo funciona el frenado regenerativo en carros eléctricos e híbridos, 9 de marzo de 2021, [Online] Disponible en:

Frenado regenerativo en carros eléctrico e híbridos y su mecanismo (bydauto.com.co)

[65] Xataka, Innovación Volvo, Así se optimiza la frenada regenerativa para aumentar la autonomía de los eléctricos, 24 de agosto de 2021, [Online] Disponible en:

Así se optimiza la frenada regenerativa para aumentar la autonomía de los eléctricos - Innovación Volvo - Xataka

[66] Híbridos y eléctricos, Tecnologías de frenado regenerativo para coches eléctricos, Gonzalo García, 5 de enero de 2019 actualizado 15 de enero de 2019 [Online] Disponible en:

https://www.hibridosyelectricos.com/coches/tecnologias-frenado-regenerativo-coches-electricos_24252_102.html

[67] Robert L. Mott, (2006) Diseño de Elementos de Maquinas – Cuarta edición, Capítulo 8, Cinemática de los engranajes, página 315

[68] Mobil, (sin fecha) Mobilube™ HD LS 80W-90 [Online]. Disponible en:

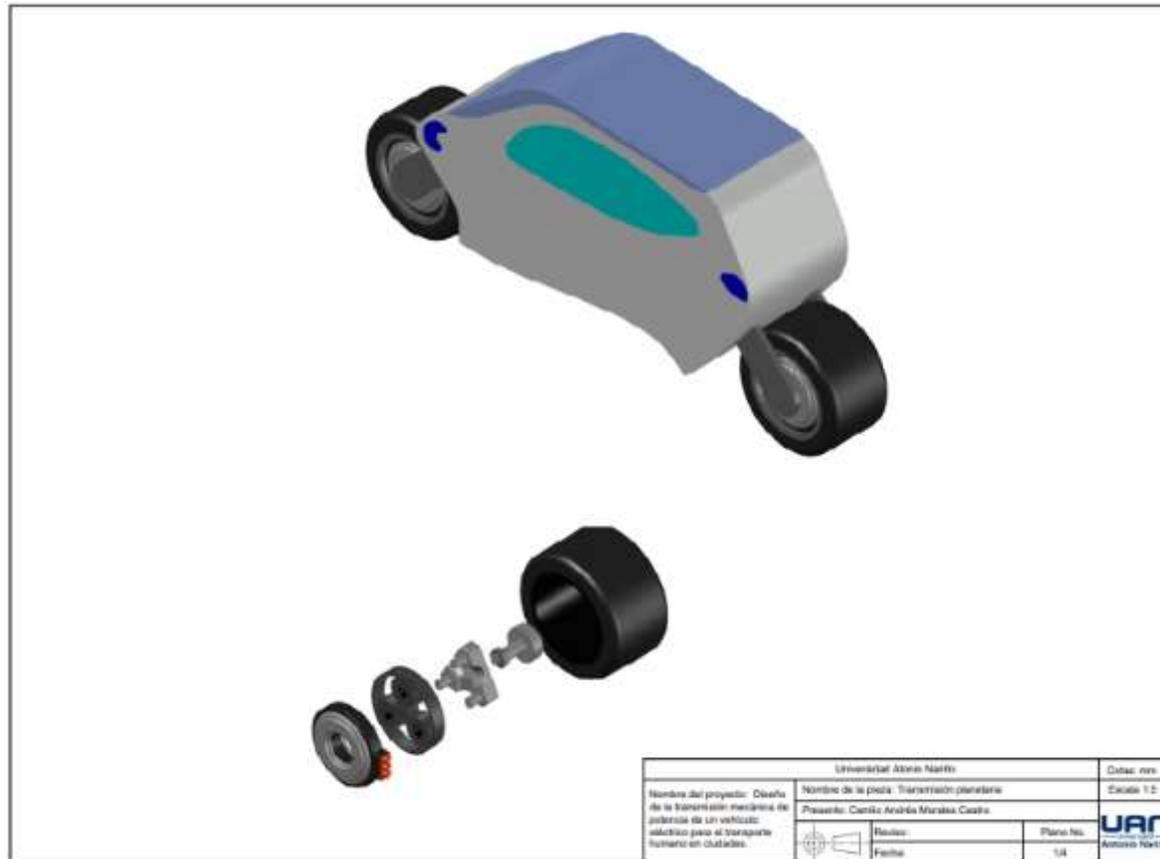
<https://www.mobil.com/es-co/commercial-vehicle-lube/pds/gl-xx-mobilube-hd-ls-80w90>

[69] Motores y Mas, Proceso de cambio de aceite en el diferencial vehicular, septiembre 21 de 2012 [Online]. Disponible en:

<https://motoresymas.com/cont-tecnico/cambio-del-aceite-del-diferencial/>

Anexos

Ubicación de la unidad de transmisión en el vehículo



Despiece, de derecha a izquierda, eje sol, planetarios y corona, portaplanetarios y eje fijo con tuerca.

