

CARACTERIZACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS PARA TRACCIÓN
DELANTERA DEL VEHÍCULO CHEVROLET CORSA 2003



YESENIA VILLOTA RIVERA

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIGO DE CALI
2017

CARACTERIZACIÓN DE LOS MOTORES ELÉCTRICOS PARA TRACCIÓN
DELANTERA DEL VEHÍCULO CHEVROLET CORSA 2003

YESENIA VILLOTA RIVERA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Electricista

Director:

Profesor, Ingeniero Jairo A. Palacios Ph.D

Codirector:

Profesor, Ingeniero Oscar A. Tudela Msc.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
INGENIERÍA ELÉCTRICA
SANTIGO DE CALI
2017

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo de grado a quien en vida fue mi Madre, y ahora es mi Ángel, Lucia Raquel, gracias por enseñarme que con disciplina, perseverancia y dedicación se pueden cumplir todos los sueños, gracias por inculcar en mí todos aquellos valores que nos hacen mejores personas, gracias por creer en mí y por darme ánimos para continuar, sé que estarías muy orgullosa.

Te extraño,

Yesenia Villota

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a Dios por darme la vida, la salud y la fortaleza para culminar con mis estudios y con este trabajo de grado a pesar de las adversidades que se presentaron en el camino.

Agradezco a mi padre Luis Armando, a mi Abuelo Arturo, a mis tíos, tías, y demás familiares y amigos que me apoyaron tanto económicamente como emocionalmente para culminar mis estudios de manera satisfactoria

A mi compañero de vida Paulo Alexander quien estuvo conmigo durante todo este proceso y quien con su apoyo, paciencia, amor y ejemplo me motivo a seguir adelante y nunca darme por vencida.

A mi profesor Oscar Tudela por su paciencia, dedicación y comprensión durante los últimos semestres de la carrera y quien junto al profesor Jairo Palacios me ayudaron a sacar este proyecto adelante, gracias por sus sabios consejos por las enseñanzas brindadas, y por el apoyo incondicional hasta el final.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
JUSTIFICACIÓN	3
OBJETIVOS	4
OBJETIVO GENERAL	4
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1. MARCO REFERENCIAL	5
1.1 RENACER DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.....	5
1.2 FABRICANTES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.....	7
1.3. TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.....	8
1.4 BATERÍAS	9
1.4.1 Tipos de recargas	10
1.5 MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.	11
1.5.1 Motores síncronos	11
1.5.2 Motores asíncronos o de inducción.....	14
1.6. CLASIFICACIÓN NEMA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN.....	16
1.6.1 Diseño NEMA A.....	16
1.6.2 Diseño NEMA B.....	17
1.6.3 Diseño NEMA C.....	17
1.6.4 Diseño NEMA D.....	17
2. DINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS.....	18
2.1 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA FUERZA EN RUEDA	19
2.1.1 Fuerza de arrastre.....	19

2.1.2	Resistencia debido a la pendiente	20
2.1.3	Resistencia a la rodadura.....	20
2.1.4	Resistencia debido a la inercia:	21
2.2	PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE FUERZA EN LA RUEDA.....	22
2.2.1	Parámetros del vehículo.....	22
2.2.2	Parámetros ambientales.....	25
2.2.3	Parámetros de operación del vehículo	26
2.3	CÁLCULO DE MÁXIMA TRACCIÓN EN LAS RUEDAS	26
2.4	ANÁLISIS DE CONDICIONES DE OPERACIÓN.....	27
2.4.1	Velocidad máxima	28
2.4.2	Pendiente máxima:.....	29
2.4.3	Aceleración máxima	30
2.5	GIRO DEL VEHICULO.....	32
3.	SELECCIÓN DEL MOTOR.....	38
3.1	RÉGIMEN DE SERVICIO.....	38
3.2	POTENCIA NOMINAL	40
3.3	VELOCIDAD DE ROTACIÓN	40
3.4	GRADO DE PROTECCIÓN.	41
3.4.1	Código IP	41
3.4.2	Código IK	41
3.5	EFICIENCIA.....	42
3.6	TIPO DE VENTILACIÓN.....	43
3.7	CLASES DE AISLAMIENTO	45
3.8	FORMA CONSTRUCTIVA.....	46
4.	SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.	47
4.1	PERFIL DE CONDUCCIÓN	47

4.2	PERFIL DE DINÁMICA VEHICULAR	50
4.3	PERFIL DE PAR, VELOCIDAD Y POTENCIA.....	52
5.	MOTORES COMERCIALES	54
5.1	MOTORES EN RUEDA ELAPHE	55
5.1.1	Motor en rueda COSIVU	55
5.1.2	Motor en rueda L-TYPE	56
5.1.3	Motor en rueda M1100	57
5.1.4	Motor en rueda M700.....	58
5.2	MATRIZ COMPARATIVA MOTORES EN RUEDA.....	59
5.3	DATASHEET MOTOR EN RUEDA ELAPHE M700.....	60
5.4	ESTIMACIÓN DE COSTOS	62
6	TRABAJOS FUTUROS	64
7	CONCLUSIONES	65
8	BIBLIOGRAFÍA	67
	ANEXOS.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 2.1: Parámetros para el cálculo en la rueda.....	22
Tabla 2.2. Coeficiente de resistencia a la rodadura del neumático en diferentes superficies.....	24
Tabla 2.3. Parámetros del vehículo bajo estudio.	24
Tabla 2.4. Parámetros del vehículo original.	27
Tabla 2.5. Parámetros y fuerzas resultantes a velocidad máxima.	28
Tabla 2.6. Parámetros y fuerzas resultantes a pendiente máxima.	29
Tabla 2.7. Parámetros y fuerzas resultantes a aceleración máxima.	30
Tabla 2.8. Parámetros y fuerzas resultantes a aceleración cero.	31
Tabla 2.9. Parámetros de los motores	37
Tabla 3.1. Potencia máxima en las diferentes condiciones de operación.	40
Tabla 3.2. Velocidad máxima en las diferentes condiciones de operación.	40
Tabla 3.3. Rango de frecuencias.	40
Tabla 3.4. Código de enfriamiento IEC	44
Tabla 3.5. Formas constructivas de los motores.....	46
Tabla 4.1. Parámetros del motor.....	53
Tabla 5.1. Matriz comparativa de motores comerciales.....	59
Tabla 5.2. Características básicas del motor M700.	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Motor AC síncrono.....	11
Figura 1.2. Curvas comparativas entre motor de imanes permanentes y motor asíncrono de potencia nomina 36 kW.....	13
Figura 1.3. Forma Motor de rotor bobinado.	14
Figura 1.4. Forma Motor jaula de ardilla.	15
Figura 1.5. Forma Motor de doble jaula.	15
Figura 1.6. Curvas características motores NEMA.	16
Figura 1.7. Laminación de lo rotores según la clasificación NEMA.....	17
Figura 2.1. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas involucradas en el desplazamiento del vehículo.....	18
Figura 2.2. Coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.	23
Figura 2.3. Coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.	33
Figura 2.4. Coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.	35
Figura 2.5. Coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.	36
Figura 3.1. Servicio con variaciones no periódicas de carga y velocidad S9.....	39
Figura 3.2. Clases de eficiencia IEC para motor.....	43
Figura 3.3. Métodos de enfriamiento.	44
Figura 4.1. Bloque de perfil de conducción.	47
Figura 4.2. Ciclo de conducción NEDC completo.	48
Figura 4.3. Resultados del bloque de perfil de conducción.....	49
Figura 4.4. Bloque de dinámica vehicular.	50
Figura 4.5. Resultados del bloque de dinámica vehicular.	51
Figura 4.6. Bloque de par, velocidad y potencia.	52
Figura 4.7. Resultados del bloque de par, velocidad y potencia.	53
Figura 5.1. Especificaciones in-wheel motor COSIVU	55
Figura 5.2. Especificaciones in-wheel motor L-Type.....	56
Figura 5.3. Especificaciones in-wheel motor M1100.....	57
Figura 5.4. Especificaciones in-wheel motor M700.....	58
Figura 5.5. Instalación de in-wheel motor M700	60
Figura 5.6. Primera respuesta del equipo Elaphe.....	62
Figura 5.7. Segunda respuesta del equipo Elaphe.	62

RESUMEN

En este trabajo de grado se caracterizaron los dos motores eléctricos en rueda para la conversión de un vehículo convencional a uno eléctrico, tomando como caso el Chevrolet Corsa 2003.

Inicialmente, se presentó un marco teórico en el cual se habló de la importancia de evitar el uso de combustibles fósiles para lograr transportarnos y empezar a utilizar alternativas como lo son los vehículos eléctricos, se cuenta la historia de los mismos, tipos, productores, entre otros, también se describe brevemente los tipos de motores eléctricos.

Luego se calcularon las fuerzas que se oponen al movimiento del motor, para de esta manera conocer la fuerza que los motores deben hacer para vencer la inercia y entrar en funcionamiento, para ello se especifican los parámetros vehiculares, ambientales y de operación. Con los resultados de la fuerza, se calculan el torque, la velocidad y la potencia en las diferentes condiciones de operación a las que el vehículo se enfrenta como son: velocidad máxima, pendiente máxima, aceleración y giro, con ello se selecciona los valores picos que el motor debe ser capaz de soportar.

En seguida se describieron las características funcionales que deben tener los motores seleccionado, como lo son el régimen de servicio, la potencia nominal, la velocidad de rotación, el grado de protección IP, la eficiencia, el tipo de ventilación, la clase de aislamiento, y la forma constructiva siguiendo las normas IEC y NEMA,

A continuación se validó mediante simulación en el software Matlab el ciclo de conducción NEDC completo para el vehículo bajo estudio, esta simulación nos permite conocer los parámetros del motor como velocidad, torque y potencia durante su funcionamiento normal.

Finalmente con los cálculos realizados en las condiciones de operación y la validación mediante simulación, se caracterizaron los motores eléctricos en rueda, que van a impulsar el vehículo, se realiza una detallada búsqueda de proveedores de motores In-Wheel, se clasifican las posibles opciones, se escoge la más adecuada y se estima su costo comercial.

Palabras claves: vehículos eléctricos, motores en rueda, motores síncronos, motores asíncronos, dinámica vehicular, fuerza de arrastre, resistencia debido a la pendiente, resistencia a la rodadura, resistencia debido a la inercia, condiciones de operación, régimen de servicio, grado de protección, tipo de ventilación, clases de aislamiento, forma constructiva, ciclo de conducción.

ABSTRACT

In this degree word, was characterized electric motors for the conversion a conventional vehicle to an electric one, taking how case example the Chevrolet Corsa 2003.

Initially, a theoretical framework is presented in which it talks about the importance of avoiding the fossil fuels' use to transport ourselves and we start using different alternatives such as electric vehicles, this chapter tells the story of electric vehicles, types, manufacturers, and others, it also describes the types of electric motors briefly.

In the next part are calculated the forces that are opposed to engine's movement, to know the force that the motors must have to overcome the inertia and start working, for this are specified the parameters vehicular, environmental and operation. With the force's results are calculated the torque, speed, and power in different operating conditions to which the vehicle is exposed, such as maximum speed, maximum slope, acceleration, and rotation thus selecting the limit values that the engine must support.

The following describes the functional characteristics that must have the selected motors, such as the service regime, the rated power, the rotation speed, the degree of IP protection, the efficiency, the ventilation type, the isolation class, and the constructive way following the norms IEC and NEMA.

Then, the complete NEDC driving cycle of the vehicle under study is validated by simulation in the Matlab software. This simulation allows us to know the engine parameters such as speed, torque, and power during normal operation.

Finally, with the calculations made in the operating conditions and the validation by simulation, the in-wheel electric motors are characterized, which will boost the vehicle, for it was made a detailed search of suppliers of In-wheel motors, the

possible options were classified, the most appropriate was chosen and its commercial cost is estimated.

Keywords: electric vehicles, motors In- wheel, synchronous motors, asynchronous motors, vehicular dynamics, drag force, resistance due to the slope, resistance to rolling, resistance due to inertia, operating conditions, service regime, the degree of protection, type of ventilation, isolation classes, constructive form, driving cycle.

INTRODUCCIÓN

A lo largo de los últimos años, el transporte ha ido cobrando cada vez mayor importancia para el desarrollo de los países, ya que juega un rol crucial en la economía porque es un factor clave en la determinación de costos para los diferentes bienes y servicios que se comercializan en un mercado cada vez más exigente y cambiante, por ejemplo Colombia va a incrementar su parque automotor en 3,5 millones de vehículos entre 2010 y 2020 [1], ya que una de las principales funciones del transporte es el traslado de insumos, materias primas y productos terminados para diversas industrias y clientes en territorios nacionales e internacionales, desde el punto de vista social, el transporte es una actividad benéfica para el normal desarrollo de las relaciones humanas y desplazamiento cotidiano.

A pesar de las ventajas, el transporte es la fuente de mayor contaminación atmosférica mundial, siendo el responsable del 80% de la contaminación, por la alta emisión de gases debido a la quema de combustibles basados en hidrocarburos.

Hoy en día existen grandes avances tecnológicos que buscan reducir la polución, un ejemplo es la implementación de vehículos eléctricos los cuales se inventaron Entre 1832 y 1839 por Robert Anderson pero debido a limitaciones tecnológicas y al auge de los combustibles fósiles la industria automóvil eléctrica desapareció casi por completo a mediados de los 60's [2].

Sin embargo, el creciente precio de la gasolina y las preocupaciones por el cambio climático ayudaron al renacer del vehículo eléctrico el cual tuvo un claro protagonista “el Toyota Prius” fue el primer vehículo híbrido producido en masa. Lanzado en todo el mundo en el año 2000 [3]. En la actualidad grandes empresas automotrices como BMW, Mercedes Benz, Renault, entre otras, compiten por desarrollar el auto eléctrico del futuro, el cual será capaz de sustituir con éxito a los autos de combustión interna y eliminar por completos la contaminación debido a emisión de gases, ruido, entre otras.

Próximamente, la mayor parte de vehículos serán eléctricos, por ello se está buscando una metodología que permita realizar la conversión de vehículos convencionales a eléctricos. Uno de los principales componentes que permite esta transformación es el motor eléctrico, el cual en comparación con los motores de combustión interna, presenta mayor rendimiento, eficiencia y su funcionamiento es relativamente simple, porque puede auto iniciarse, además son extremadamente resistentes lo cual asegura durabilidad y un bajo costo de mantenimiento.

En este trabajo de grado se implementó la teoría necesaria para conocer el funcionamiento de los vehículos eléctricos, luego se aplicó la dinámica vehicular y análisis de las diferentes condiciones de operación, para conocer los parámetros máximos que deben soportar los motores.

También se validó mediante simulación en Matlab el ciclo de operación NEDC de vehículos para no sobredimensionar los motores escogidos, seguidamente se buscó proveedores de motores en rueda y se seleccionó el que mejor se ajusta a nuestras necesidades.

El trabajo de grado se divide en cinco (5) capítulos que consisten en:

Capítulo 1: se mencionó todo el marco teórico que nos permite la comprensión del funcionamiento de los vehículos eléctricos, y los diferentes motores eléctricos.

Capítulo 2: se calculó la dinámica vehicular del vehículo, es decir las fuerzas que se oponen al movimiento del carro, y los parámetros que influyen en ello.

Capítulo 3: se describen las características que permiten la selección del motor, algunas de ellas están normalizadas según la IEC o NEMA.

Capítulo 4: se realiza la simulación del ciclo NEDC completo para el vehículo bajo estudio, con el fin de seleccionar el par, velocidad y potencia a las que deben funcionar los motores seleccionados.

Capítulo 5: se busca en el mercado motores eléctricos en rueda, se selecciona posibles opciones, finalmente se selecciona uno de ellos y se estima su costo comercial.

JUSTIFICACIÓN

Mediante este trabajo de grado se busca promover la conversión de vehículos convencionales a eléctricos, para ellos existen diferentes alternativas en su diseño, una de ellas es la tracción delantera la cual presenta grandes ventajas en cuanto a la sencillez en la transmisión de potencia, ofrece mayor control en la conducción, menos peso, espacio y por lo tanto reducción de costos.

La investigación que se realizará en este trabajo de grado busca caracterizar cada uno de los dos motores eléctricos los cuales impulsaran el vehículo Chevrolet corsa 2003.

También se busca complementar la información obtenida adicionando las características de los motores bajo estudio ante condiciones de operación pre-establecidas, para realizar la escogencia adecuada de ellos entre las posibilidades que ofrece el mercado actual y de esta manera tratar de reducir los costos que permita la conversión del vehículo eléctrico la cual se planea como trabajo futuro.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar los motores eléctricos para tracción delantera del Vehículo Chevrolet Corsa modelo 2003 DE 1.300 cc.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar las características mecánicas y eléctricas de los motores, considerando las condiciones de operación preestablecidas del vehículo (pendiente máxima, velocidad máxima, aceleración máxima y giro).
- Validar mediante simulación en Matlab las diferentes condiciones de operación del vehículo a partir de modelos existentes.
- Seleccionar un motor de las alternativas existentes en el mercado y estimar los costos aproximados.

1. MARCO REFERENCIAL

La quema de combustibles fósiles, es el principal responsable por el cambio climático y gran parte de ello se debe al enorme parque automotor, solo en Colombia, para el año 2016, el número de vehículos registrados fue 12'623.300 (Registro Único Nacional de Transito - RUNT)

Mundialmente, el número de vehículos en 2010 era de 75'000.000, una cifra que crece desbordadamente cada año y se espera que para 2050, el valor supere los 2'500.000.000. Si todos esos vehículos son convencionales (motor de combustión), no habrá reservas suficientes de combustibles fósiles y el planeta tierra será inhabitable debido al efecto invernadero [4].

Según el inventario nacional de gases de efecto invernadero, para 2012, Colombia emitió un promedio de 178,2 millones de toneladas de dióxido de carbono, de las cuales el 44% pertenece a la quema de combustibles fósiles por ejemplo el transporte [5] ya que los motores de gasolina emiten 2,3 kg de CO₂ por cada litro de gasolina, y los motores diésel 2,6 kg de CO₂ por cada litro de gasóleo.

En los últimos años, el mundo está sufriendo las causas de la contaminación lo cual nos ha llevado a tomar conciencia y tratar de contrarrestar dichos efectos, y es en este escenario donde los vehículos eléctricos asumen un papel esencial.

1.1 RENACER DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Entre 1832 y 1839, Robet Anderson diseñó el primer vehículo eléctrico (VE se llamará de aquí en adelante) con batería recargable el cual se destacó por superar los 100 km/h. Para los años 1900, la circulación de VE era mayor que los de gasolina, lo cual llevo a la fabricación del primer híbrido eléctrico a cargo de Woods Motor Vehicle Company. Otro aspecto importante es el frenado regenerativo, el cual se implementa desde 1915.

Aparte de la importancia que fue tomando el sector de hidrocarburos y el precio económico de los vehículos convencionales, otro aspecto que llevó a desaparecer los VE fue la invención del arranque eléctrico en los vehículos de explosión, el cual evitaba los grandes esfuerzos físicos que debían hacerse con la manivela. En 1920 el motor de combustión interna derrotó al VE [6].

El VE renació en la época en la que la movilidad eléctrica es la solución a los problemas de contaminación y escasez energética. Cuando enfermedades como el asma, cáncer y demás afecciones pulmonares alertaron a las autoridades, se hicieron estudios que demostraron que ello se debe a la polución que en gran parte es producida por el transporte.

En 1996 empezó a circular el primer VE producido en serie por General Motors 'el EV1' capaz de recorrer hasta 190 km con una recarga. Desde ese entonces los fabricantes de carros se han dedicado a la construcción de VE, otros decidieron transformar los vehículos convencionales a eléctricos.

El avance de los VE se enfrentó a obstáculos como la oposición de construcción de estaciones de puntos de recarga argumentando el abuso del uso de los servicios públicos y demás obstrucciones a cargo de la industria petrolera los cuales lograron disminuir la demanda de los VE y para abril de 2003, California acabó con la ley Cero Emisiones y toda la inversión en infraestructura y desarrollo quedó destruida.

En la segunda década del siglo XXI, la polución por tráfico se convierte en un problema mundial, conceptos como cambio climático, eficiencia energética, sostenibilidad y ciudades inteligentes empiezan a introducirse en las personas, en varios países incluye la movilidad eléctrica, la cual tenía debilidades en estrategias adecuadas de implementación, escaso portafolio de productos, desconocimiento del usuario final en cuanto a ventajas y oportunidades, en fin, debilidades que poco a poco se han ido corrigiendo y fortaleciendo.

Al día de hoy existe un amplio y variado portafolio de vehículos eléctricos de todo tipo y para todos los usuarios. El VE es hoy en día una tecnología cero emisiones capaz de satisfacer las necesidades de movilidad de la población, tiene muchas barreras por superar como: la autonomía de las baterías, el desarrollo de una red de recarga pública, entre otros [6].

1.2 FABRICANTES DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Las ayudas, facilidades e incentivos para los propietarios de vehículos eléctricos han ido mejorando, lo cual motiva a las personas a adquirir un VE. En 2014, Europa contaba con 68400 unidades, Estados Unidos con 64500 unidades, China con 17.300 y Japón con 16.500 [6].

La lista de fabricantes de vehículos eléctricos es amplia. A continuación, se mencionarán algunos de los más importantes.

RENAULT: el Renault Zoe es el primer vehículo 100% eléctrico fabricado en serie y con un precio accesible al público, suma más de 60 nuevas patentes y cuenta con una autonomía de 210 km.

El Renault Kangoo Z.E. es la primera furgoneta cero emisiones 100% eléctrica, tiene transmisión automática y alcanza una velocidad máxima de 130 km/h, el tiempo de carga de las baterías está entre 6 y 8 horas, además tiene una autonomía de 170 km. El Renault Twizy es un vehículo para 2 personas, con 4 ruedas y 2 asientos, se puede recargar en cualquier toma de 220 V en menos de 4 horas [6].

NISSAN: apuesta por una movilidad urbana 100% eléctrica, altamente eficiente y totalmente libre de emisiones contaminantes, introdujo al mercado dos modelos exitosos: El Nissan Leaf fue lanzado en 2010 y la furgoneta e-NV200 se lanzó en 2014.

BMW: este grupo empezó a trabajar en su proyecto hace más de 40 años, apostando a la movilidad eléctrica, BMW i se presentó al público mundial con dos modelos: el BMW i3 cuenta con los atributos típicos de la marca como el placer de conducir, el uso de materiales ligeros y la eficiencia en cada trayecto, por otro lado, el BMW i8, un carro híbrido deportivo de carácter progresivo, inteligente e innovador, conjuga las cualidades de un motor de combustión y un motor eléctrico [6].

PSA PEUGEOT: lanzó sus productos en diciembre de 2010, los modelos Peugeot iOn y Citroën C- Zero, son 100% eléctricos, tiene un motor con potencia máxima de 47 kW, par de 180 Nm, autonomía de 150 km y baterías de ión-litio que pueden recargarse en cualquier toma de 220 V [6].

1.3. TIPOS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

El objetivo principal de los VE es reducir parcial o totalmente el uso de motores de combustión y todas las emisiones de gases que estos generan. Como reemplazo están los vehículos eléctricos o híbridos, compuestos por una fuente que almacena energía, un motor eléctrico, un generador, una transmisión mecánica y un sistema de control. Estos vehículos se pueden clasificar en [7] :

Microhíbridos: en este caso cuando el vehículo se detiene, el motor deja de funcionar y provee energía cuando se acelera. Reducen el consumo de gasolina entre 10% y 20%.

Híbridos: Usan únicamente como fuente energética el combustible, no permite la carga de baterías mediante una fuente exterior de electricidad, su batería no tiene como misión almacenar grandes cantidades de energía, sino que está interviniendo en ciclos de carga y descarga, reduce el consumo de gasolina entre 25% y 40%.

Plug-in Híbridos: Combinan un motor de combustión interna, una batería y un motor eléctrico los cuales impulsan al vehículo en configuración paralela o en serie. Reduce el consumo de gasolina entre 40% y 65%.

Eléctricos de batería: la propulsión se realiza 100% con motores eléctricos, la fuente de energía proviene de la electricidad almacenada en las baterías que se cargan a través de la red eléctrica.

Eléctricos de autonomía extendida: funcionan igual que los vehículos eléctricos de batería, pero adicionalmente tienen un motor de combustión interna (MCI) que funciona como generador, carga la batería del sistema en un proceso lineal.

1.4 BATERÍAS

Las baterías almacenan energía eléctrica y la van proporcionando al motor a medida que este la necesita, mediante un proceso reversible llamado reducción – oxidación en el cual hay transferencia de electrones entre los reactivos [7].

Los principales parámetros electroquímicos que caracterizan una batería son la fuerza electromotriz, la capacidad específica, la profundidad de descarga, energía específica y ciclo de vida [7].

Las baterías utilizadas para vehículos eléctricos son de tres tipos:

a. Plomo -ácido: son las más utilizadas para los VE, desde 1960 han presentado variables mejoras en aspectos como el método de preparación, la composición y geometría de los colectores, la disposición de los electrodos, entre otras [7].

Presenta grandes ventajas como elevado voltaje, son capaces de suministrar una elevada corriente y por lo tanto alta potencia, tecnología fácil de implementar, bajo costo, tecnología madura y componente fácilmente reciclables, pero también presenta limitaciones como baja energía específica, entre 400 y 800 ciclos de recarga, desprendimiento de gases durante su funcionamiento y un fuerte impacto ambiental debido a sus componentes [7].

b. Níquel – hidruros metálicos: fueron diseñadas para mantener una potencia elevada con cargas y descargas rápidas y vida útil prolongada, ideal para aplicaciones inalámbricas, vehículos híbridos y eléctricos, entre otras. Presenta ventajas como mayor energía específica, admiten recargas rápidas (entre 1 y 3 horas), menor impacto ambiental, no requieren mantenimiento y desventajas como elevado costo, entre 300 y 600 ciclos de recarga, menores prestaciones electroquímicas a alta corriente [7].

c. Litio – ión: formadas por pilas que utilizan compuestos de intercalación de litio como materiales positivos y negativos, son la tecnología más avanzada en baterías y presenta ventajas como alto voltaje (entre 3 V y 4 V), elevada energía específica, elevado número de ciclos de vida (más de 1.000 ciclos), pero también presenta limitaciones como elevado costo, mal funcionamiento a elevadas temperaturas, baja tolerancia al abuso, entre otras [7].

1.4.1 Tipos de recargas

Uno de los componentes más fundamentales en los VEs son las baterías, ya que de estas depende la autonomía, velocidad máxima, tiempo de recarga del vehículo, también es importante conocer como los tipos de recarga influyen en la vida útil de las baterías. Existen diferentes tipos de recargas los cuales se clasifican como [6]:

- a. Carga lenta: permite recargas completas de baterías en vehículos (6 a 8 horas), motos y cuadriciclos (2 ó 3 horas) se realiza a baja potencia (2,3 kW máximo) con instalación de corriente alterna monofásica en lugares como garajes privados.
- b. Carga normal: permite recarga de las baterías cuando el auto está en jornada de descanso, por ejemplo, en la noche, con una instalación de corriente alterna monofásica.
- c. Carga semi-rápida: es un tipo de carga adecuada para servicio público donde el vehículo puede permanecer por varias horas (3 a 4 horas) como por ejemplo un parqueadero, se realiza a potencia media con una instalación de corriente alterna trifásica.
- d. Carga rápida: es un tipo de carga para servicio público en establecimientos de alta rotación como ejemplo las estaciones de servicio, el tiempo de recarga puede variar entre 20 y 30 minutos, se hace a potencia elevada.

1.5 MOTORES DE CORRIENTE ALTERNA.

La mayoría de industrias, incorporan en sus activos motores eléctricos, ya que son máquinas que permiten llevar a cabo muchas actividades y se acoplan fácilmente a todos los sistemas, en particular, los motores de corriente alterna, se clasifican en : motores síncronos y motores asíncronos [8].

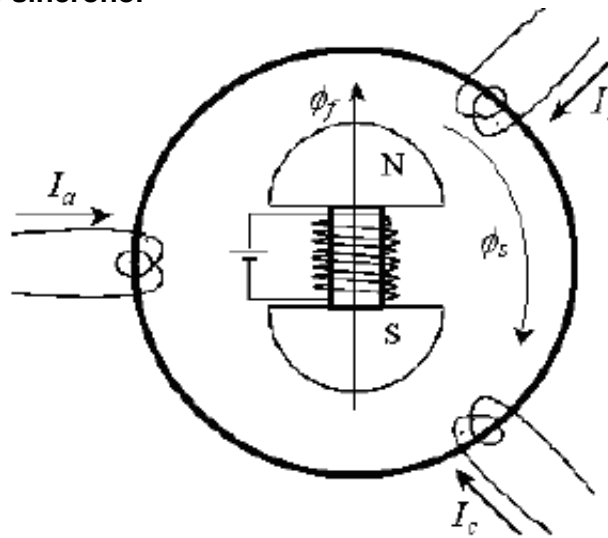
1.5.1 Motores síncronos

Son ideales para aplicaciones en las que se requiera velocidad constante, ya que su característica principal es que su velocidad de giro depende de la frecuencia de la red que lo alimenta y de su número de polos, por ejemplo, en el caso de una máquina de 4 polos, (2 pares de polos), conectada a una red de 60 Hz, la velocidad es:

$$n = \frac{60 * f}{P} = \frac{60 * 60}{2} = 1800 \text{ r.p.m} \quad \text{Ec. 1.1}$$

La velocidad de giro de un motor síncrono es directamente proporcional a la frecuencia de la red de corriente alterna que lo alimenta, utiliza el mismo concepto de un campo magnético giratorio producido por el estator, el rotor consta de electroimanes o imanes permanentes que giran sincrónicamente con el campo del estator [9].

Figura 1.1. Motor AC síncrono.



Fuente: [9]

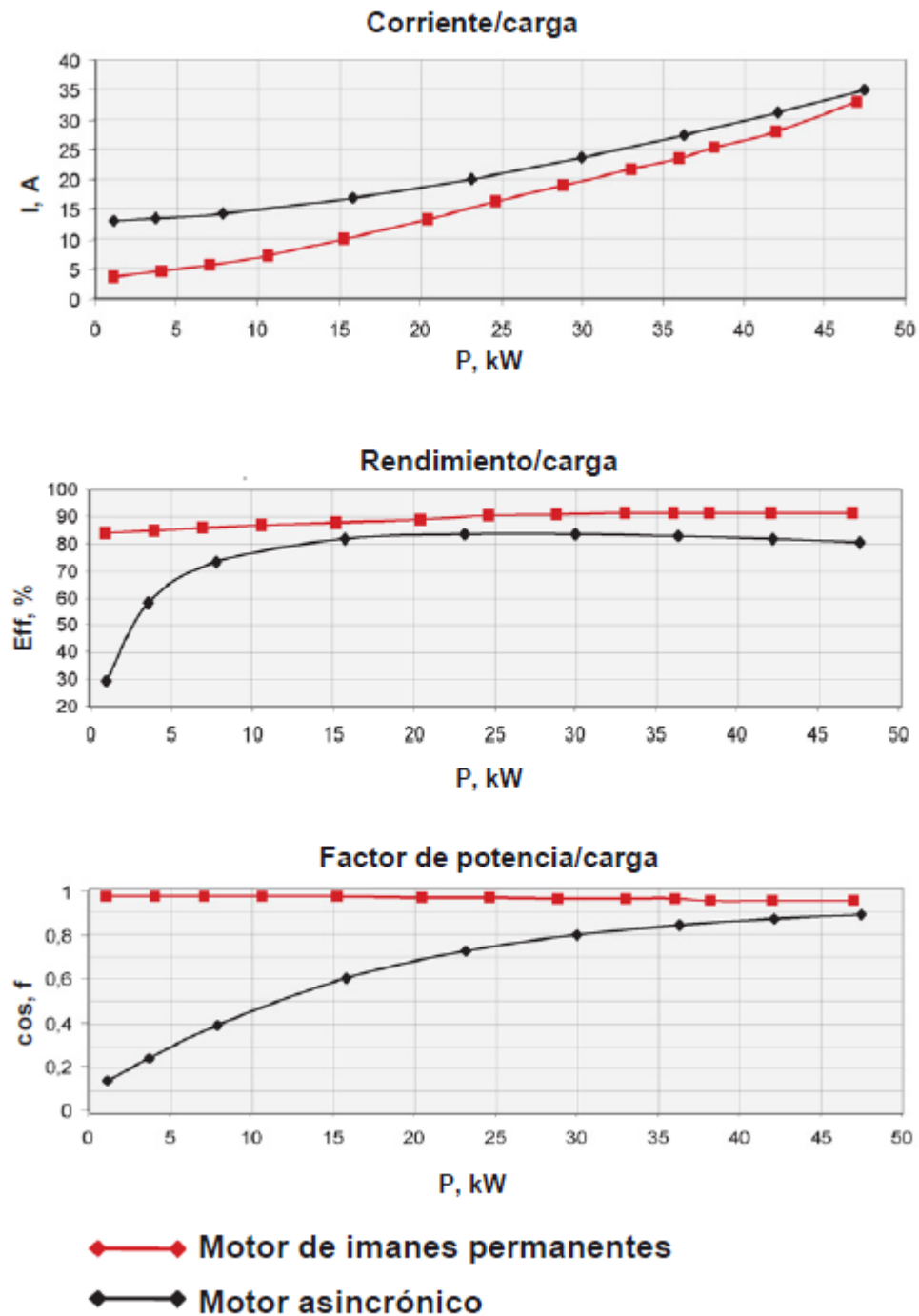
El principio de funcionamiento de un motor sincrónico inicia cuando la excitatriz alimenta al rotor, el rotor crea un campo magnético constante, el rotor gira a N rpm correspondiente a la velocidad de sincronismo, el campo magnético del rotor gira a la misma velocidad que el campo magnético del estator, el estator produce un campo magnético giratorio, los polos reales del rotor y los polos ficticios del estator interactúan produciéndose fuerzas tangenciales, y por lo tanto un par de fuerzas en el sentido de rotación [9].

a. Motor síncrono de imanes permanentes: Se refiere a los motores que utilizan imanes para producir el campo magnético en el entrehierro, combina la alta precisión de los motores síncronos con el diseño simple y robusto de un motor de inducción, es capaz de entregar altos torques, eliminando la necesidad de cajas de reducción [10].

Los imanes permanentes se utilizan para crear un flujo constante en el entrehierro, eliminando la necesidad del rotor bobinado y escobillas utilizadas para la excitación. El motor síncrono tiene bastantes ventajas respecto a los asíncronos [11]:

- Factor de potencia cercano a 1: con esto se elimina la necesidad de instalar bancos de condensadores para corregir el coseno de ϕ .
- Aumento de la potencia total: la potencia reactiva es menor al 15%, debido a la ausencia de energía reactiva.
- Aumento del par: el par es mayor comparado con los motores asíncronos.

Figura 1.2. Curvas comparativas entre motor de imanes permanentes y motor asíncrono de potencia nomina 36 kW.



Fuente: [10]

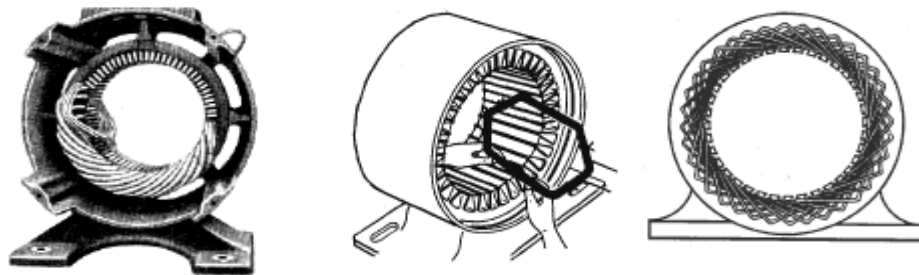
1.5.2 Motores asíncronos o de inducción

No dependen de un campo magnético alimentado con corriente continua, el estator es alimentado con corriente alterna, y el rotor gira gracias a la corriente que se induce en él, dependiendo de su construcción se pueden clasificar en motor de rotor bobinado y tipo jaula de ardilla.

b. Motor asíncrono de rotor bobinado: este nombre se debe debido a su forma, ya que su bobinado está devanado en las ranuras del rotor. Está conformado por dos piezas principales, el estator en el cual se genera el campo magnético giratorio de motor y el rotor que se puede conectar al exterior por medio de escobillas y anillos rozantes.

Su configuración permite conectar resistencias exteriores las cuales ayudan a reducir la corriente de arranque, la saturación en el hierro y aumentar el par de arranque [12].

Figura 1.3. Forma Motor de rotor bobinado.

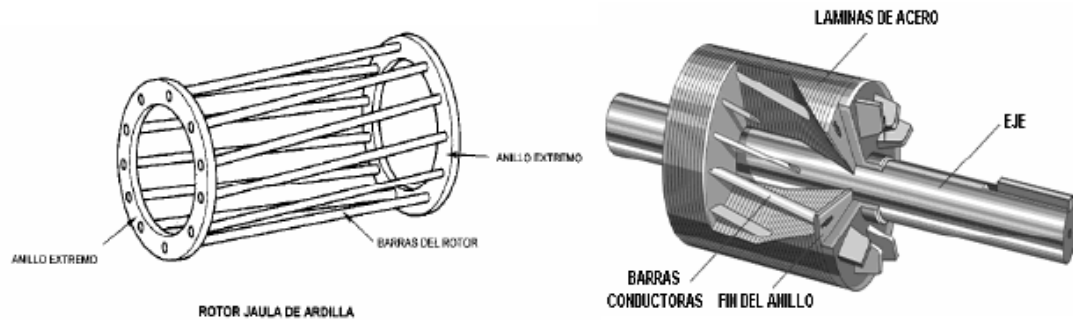


Fuente: [12]

c. Motor asíncrono tipo jaula de ardilla: conocido así por su forma, al igual que todas las máquinas, cuenta con un rotor que está constituido por barras conductoras ligeramente inclinadas respecto al eje, cortocircuitadas en los extremos por medio de unos anillos, la inclinación de estas ayuda a disminuir el efecto de ruido y variaciones de campo magnético, las ranuras oblicuas reducen las variaciones de par y armónicos durante el arranque. Los motores jaula de ardilla son muy sencillos, confiables, baratos por ello son tan populares en la actualidad [12].

Cuando al motor se conecta una fuente, el estator induce corriente en las barras del rotor, el campo generado entre el rotor y el estator origina el par lo cual hace que el rotor gire.

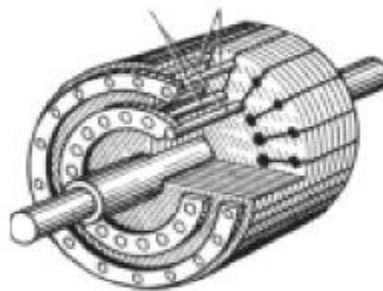
Figura 1.4. Forma Motor jaula de ardilla.



Fuente: [12]

d. Motor asíncrono de rotor de doble jaula: tiene la misma configuración del tipo jaula de ardilla pero con dos secciones o jaulas, la exterior está hecha de un material de resistencia eléctrica más elevada que la interior. Mientras el motor arranca, la frecuencia de deslizamiento es alta y la corriente tiende a circular por la carga exterior, la resistencia y el par son altos, cuando la velocidad aumenta, la frecuencia de deslizamiento decrece y la corriente circula por la jaula de menor resistencia eléctrica, por tanto las pérdidas energéticas son mucho menores [12].

Figura 1.5. Forma Motor de doble jaula.

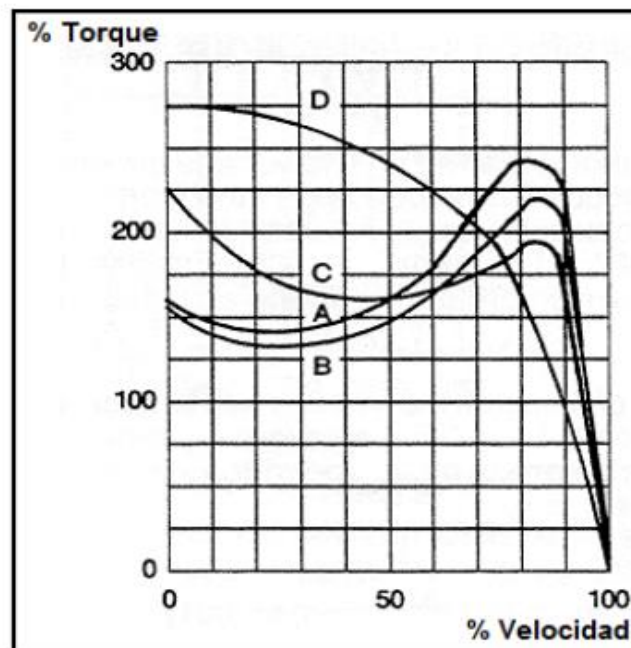


Fuente: [12]

1.6. CLASIFICACIÓN NEMA DE LOS MOTORES DE INDUCCIÓN

Todos los motores de potencias mayores a 1 Hp son clasificados según el sistema proporcionado por la Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos NEMA de acuerdo a su curva característica Par VS. Velocidad. Se definen 4 tipos: A, B, C Y D los cuales tienen diferentes características que se describen a continuación [12].

Figura 1.6. Curvas características motores NEMA.



Fuente: [13]

1.6.1 Diseño NEMA A

Estos motores presentan un torque y corriente de arranque altos y deslizamiento nominal bajo. En particular, los motores jaula de ardilla clase A son fabricados para uso a velocidad constante, tienen grandes áreas de ranuras en el rotor, lo cual genera una buena disipación de calor. Durante el arranque presenta una corriente alta cerca de la superficie del rotor, a medida que se estabiliza, la densidad de corriente se distribuye uniformemente.

1.6.2 Diseño NEMA B

Estos motores presentan torque, corriente y deslizamiento nominal, también son llamados motores de propósito general, las ranuras son un poco más profundas que los motores de clase A, lo cual ayuda a aumentar la reactancia de arranque y la marcha del rotor, por ello se reduce el par y la corriente de arranque.

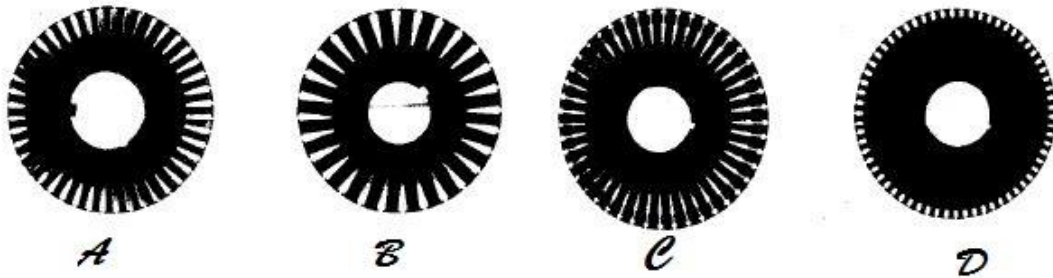
1.6.3 Diseño NEMA C

Estos motores presentan torque alto, corriente y deslizamiento nominal, son motores que tienen rotor de doble jaula, el cual desarrolla un alto par de arranque y una menor corriente de arranque, gracias a su alto par de arranque, aceleran rápidamente, sin embargo, cuando tienen cargas grandes presenta problemas de calentamiento.

1.6.4 Diseño NEMA D

Estos motores presentan torque alto, corriente de arranque baja y deslizamiento nominal. Las barras de los motores comerciales de inducción jaula de ardilla clase D son de alta resistencia y van en ranuras cercanas a la superficie de pequeño diámetro. Tienen la mayor relación de resistencia a reactancia durante el arranque.

Figura 1.7. Laminación de lo rotores según la clasificación NEMA.



Fuente: [12]

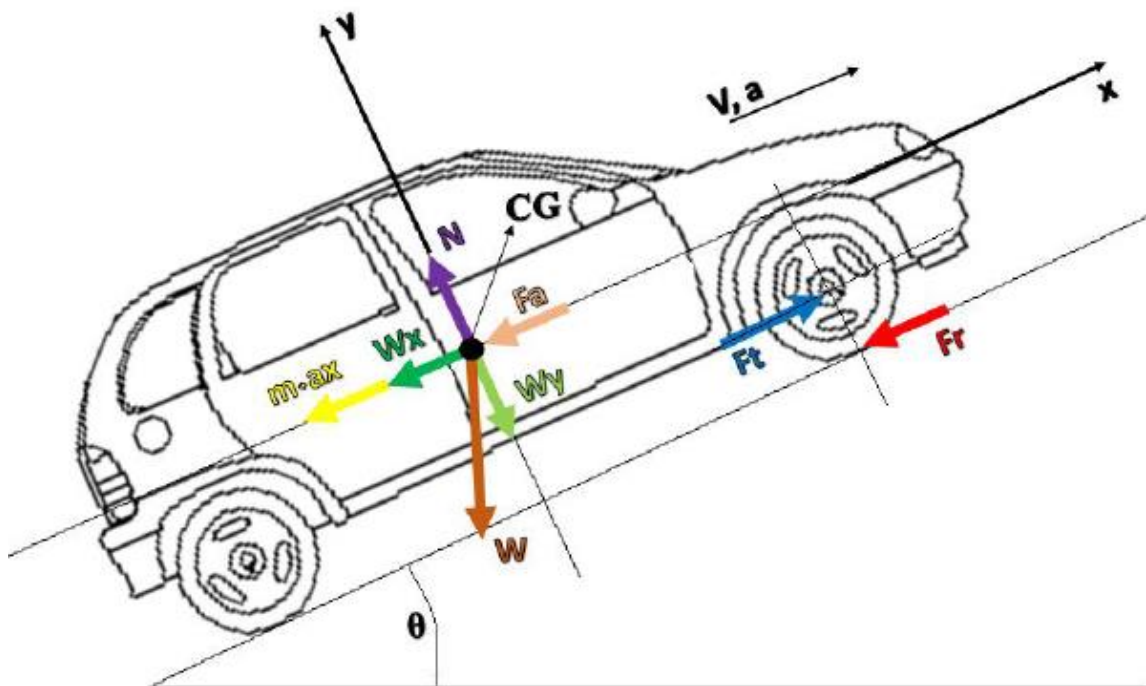
2. DINÁMICA DE LOS VEHÍCULOS

Es importante conocer las fuerzas a las que deben enfrentarse los vehículos para entrar en movimiento, a continuación, se plantea un análisis longitudinal del Chevrolet corsa modelo 2003 bajo las condiciones de operación: pendiente máxima, velocidad máxima y aceleración.

Asumiendo que el viento solo actúa en dirección opuesta al desplazamiento del vehículo, se realizará el análisis en dos dimensiones.

Las ecuaciones que se muestran a continuación, presentan los diferentes parámetros, necesarios para calcular la fuerza en rueda.

Figura 2.1. Diagrama de cuerpo libre de las fuerzas involucradas en el desplazamiento del vehículo



Fuente: ilustración 5 [14]

2.1 ECUACIONES PARA EL CÁLCULO DE LA FUERZA EN RUEDA

Las resistencias que se oponen al movimiento de los vehículos eléctricos son cuatro: fuerza de arrastre F_d , resistencia debida a la pendiente R_g , resistencia a la rodadura R_x , resistencia debido a la inercia R_i , las cuales pueden o no coexistir al mismo tiempo, la sumatoria de ellas da como resultado la fuerza en las ruedas F_r [15].

$$F_r = F_d + R_g + R_x + R_i \quad \text{Ec. 2.1}$$

Cada tipo de resistencia depende del tipo de auto, condiciones ambientales, condiciones atmosféricas, tipo de carretera, entre otras.

2.1.1 Fuerza de arrastre

También conocida como resistencia aerodinámica, hace referencia a la fuerza opuesta al movimiento del vehículo cuando se desplaza a través del aire [16], se representa por la siguiente expresión:

$$F_d = \frac{1}{2} C_d * \rho_a * A_f * V^2 \quad \text{Ec. 2.2}$$

Donde

Siglas	Nombre	Unidad
F_d	Fuerza de arrastre	[N]
C_d	Coeficiente de arrastre del vehículo	[Adimensional]
ρ_a	Densidad del aire	$\left[\frac{Kg}{m^3}\right]$
A_f	Área frontal del vehículo	$[m^2]$
V	Velocidad lineal del vehículo	$\left[\frac{m}{s}\right]$

Como se observa en la ecuación 2.2, el factor más influyente en la fuerza de arrastre es la velocidad, por ello se puede apreciar que, a grandes velocidades, mayor es la masa de aire que se debe romper, esta fuerza es la que determina el diseño que el vehículo debe tener.

2.1.2 Resistencia debido a la pendiente

Depende de la masa del vehículo y el perfil de la carretera que va a enfrentar, ante esta resistencia, los neumáticos juegan un papel importante, ya que son los que deben soportar el peso debido a la gravedad, se representa por la siguiente expresión:

$$R_g = m * g * \sin \theta \quad \text{Ec. 2.3}$$

Donde

Siglas	Nombre	Unidad
R_g	Resistencia debido a la pendiente	[N]
m	Masa del vehículo	[Kg]
g	Gravedad	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
θ	Pendiente	[rad]

2.1.3 Resistencia a la rodadura

Proviene de la deformación que sufre el neumático al entrar en contacto con la carretera, el neumático se aplana, formando un plano paralelo al suelo, en ese momento, se aplica una fuerza en la parte delantera de la rueda que es responsable de la oposición al movimiento. Cuando dicha superficie se separa de la carretera, vuelve a su forma original y ocurre otra fuerza que impulsa el movimiento del vehículo, la suma de estas dos fuerzas no es cero debido a la histéresis que posee el neumático.

La energía de deformación que hay que aplicar a un punto del neumático para que se aplaste contra el asfalto es mayor que la energía que el neumático devuelve al recuperar su forma original, la diferencia entre ambas cantidades de energía se transforma en calentamiento del neumático y el par de giro “neto” resulta ser en contra del avance del vehículo [17].

La fuerza neta se representa por la siguiente expresión:

$$R_x = f_r * m * g * \cos \theta \quad \text{Ec. 2.4}$$

Donde

Siglas	Nombre	Unidad
R_x	Resistencia a la rodadura	[N]
f_r	Coefficiente de resistencia a la rodadura	[adimensional]
m	Masa del vehículo	[Kg]
g	gravedad	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$
θ	pendiente	[rad]

2.1.4 Resistencia debido a la inercia:

Es la fuerza resistente que se opone al movimiento, ocurre cuando se quiere cambiar la magnitud y/o dirección del vehículo, ya que esta fuerza se opone al cambio de velocidad, se presenta en gran medida cuando se frena repentinamente o se cambia de dirección, lo cual se ve reflejado como calor expulsado al medio ambiente. Se representa por la siguiente ecuación:

$$R_i = m * a \quad \text{Ec. 2.5}$$

Donde

Siglas	Nombre	Unidad
R_i	Resistencia debido a la inercia	[N]
m	Masa del vehículo	[Kg]
a	Aceleración	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$

Al reemplazar los términos anteriores en la Ec. 2.1, se llega a la siguiente expresión:

$$F_r = \left(\frac{1}{2} C_d * \rho_a * A_f * V^2\right) + (m * g * \sin \theta) + (f_r * m * g * \cos \theta) + (m * a)$$

2.2 PARÁMETROS PARA EL CÁLCULO DE FUERZA EN LA RUEDA

Los parámetros que se deben conocer para el cálculo de la fuerza en la rueda, se dividen en tres clases: parámetros del vehículo, parámetros ambientales y parámetros de operación.

Tabla 2.1: Parámetros para el cálculo en la rueda

Categoría	Parámetro
Vehículo	• Coeficiente de arrastre • Área frontal del vehículo • Coeficiente de resistencia a la rodadura • Masa del vehículo
Ambientales	• Densidad del aire • Gravedad
Operación de vehículo	• Velocidad • Pendiente • Aceleración

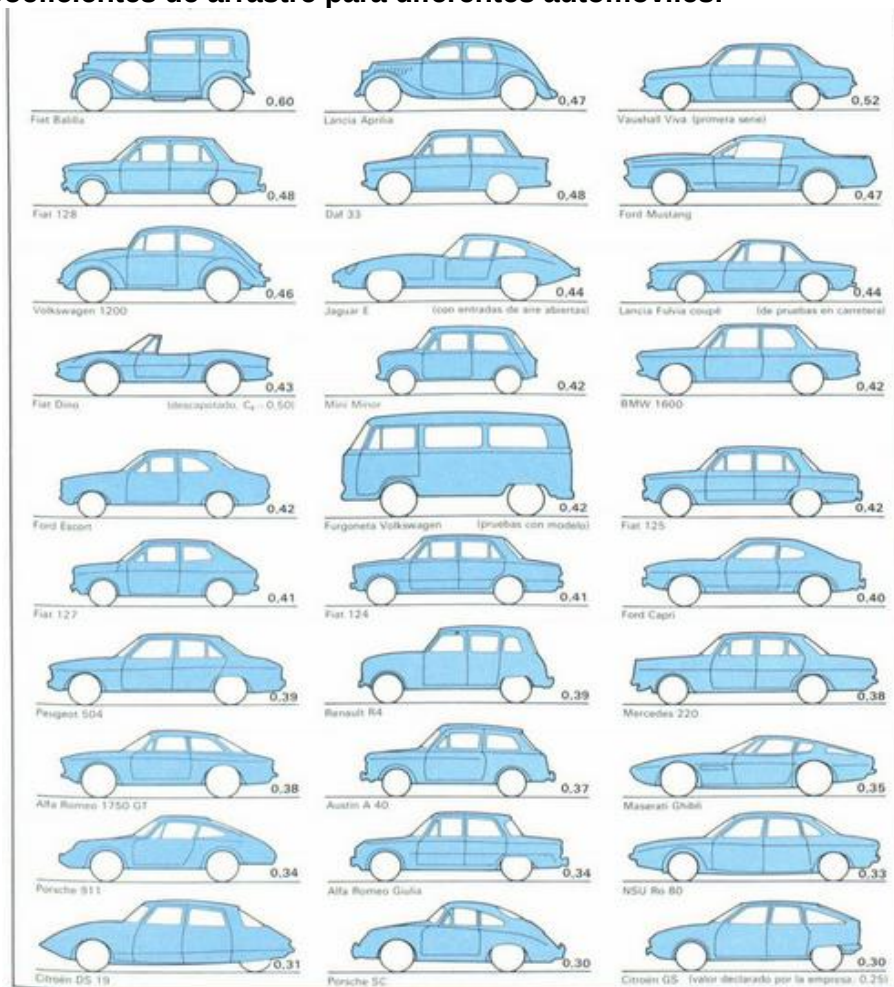
Fuente: Tabla 2-1 [15]

2.2.1 Parámetros del vehículo

a. Coeficiente de arrastre: se refiere a la resistencia que ofrece el vehículo al moverse dentro de un fluido (aire), por razón de su forma, es independiente del tamaño y de la velocidad del fluido, sin embargo pueden existir variaciones por cualquiera de las dos causas [18].

En la siguiente figura se observan diferentes coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.

Figura 2.2. Coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.



Fuente: [18]

Según la Figura 2.2, se puede visualizar que el coeficiente de arrastre del Chevrolet corsa es aproximadamente $C_d = 0,37$.

b. Área frontal del vehículo: depende en gran medida del diseño del vehículo, para encontrar un valor aproximado, se utiliza la siguiente ecuación [15]:

$$A_f = 1,6 + 0,00056 * (m - 765) \quad \text{Ec. 2.6}$$

Reemplazando m por el valor de la masa del vehículo $m = 975$ kg, se tiene $A_f = 1,72 \text{ m}^2$

c. Coeficiente de resistencia a la rodadura: representa el porcentaje del peso soportado que se transforma en resistencia al avance [17].

Tabla 2.2. Coeficiente de resistencia a la rodadura del neumático en diferentes superficies.

SUPERFICIE	p	SUPERFICIE	p
Hormigón defectuoso	0,01	Macadam sinuoso	0,037
Hormigón plano	0,015	Nieve - 5 cm	0,025
Hormigón sinuoso	0,02	Nieve - 10 cm	0,037
Asfalto defectuoso	0,012	Superficie lisa	0,025
Asfalto plano	0,017	Superficie arenosa	0,04
Asfalto sinuoso	0,022	Barro	0,037 + 0,150
Macadam defectuoso (*)	0,015	Arena	0,060 + 0,150
Macadam plano	0,022	Arena suelta	0,160 + 0,300

Fuente: Tabla 1 [17]

Para este estudio se tomará el coeficiente correspondiente a asfalto plano, ya que es el intermedio en los diferentes tipos de asfalto de las carreteras $f_r = 0,017$.

d. Masa del vehículo: tomando como base, las características del vehículo convertido, determinadas en el trabajo de grado de Jefferson Caicedo [14], la masa del vehículo en vacío, más la masa de un pasajero promedio, menos la masa de la caja de cambios, es 1120 kg.

Recopilando los datos obtenidos anteriormente, se llega a la siguiente tabla:

Tabla 2.3. Parámetros del vehículo bajo estudio.

Magnitud	Siglas	Valor	Unidad
Coeficiente de arrastre	C_d	0,37	Adimensional
Área frontal del vehículo	A_f	1,72	m^2
Coeficiente de resistencia a la rodadura	f_r	0,017	adimensional
Masa del vehículo + pasajero	M	1120	kg

Fuente: Propia.

2.2.2 Parámetros ambientales

a. Densidad del aire: hace referencia a la cantidad de masa de aire por unidad de volumen, para calcular la densidad del aire, se utiliza la siguiente ecuación [15]:

$$\rho_a = \frac{P}{RT} \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \quad \text{Ec. 2.7}$$

Dónde:

P	Presión atmosférica
R	Constante de gases ideales
T	Temperatura del aire

Para el desarrollo del estudio, se tendrán en cuenta las condiciones ambientales de Cali, de esta forma:

P	90,247 [19]	kPa
R	0,287 [15]	$\frac{kPa * m^3}{kg * K}$
T	298,15 [19]	K

$$\rho_a = \frac{90,247}{0,287 * 298,15} = 1,055 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$$

b. Gravedad: a pesar de ser una constante universal, presenta pequeñas variaciones con respecto a la latitud en donde se está posicionando, se determina según la siguiente ecuación [15]:

$$g = \frac{G * M}{(r + h)^2} \left[\frac{m}{s^2} \right] \quad \text{Ec. 2.8}$$

Donde

G	Constante gravitacional	6,673E-11	$\frac{N * m^2}{kg^2}$
M	Masa de la tierra	5,972E+24	Kg
r	Radio de la tierra	6,371E+06	M
h	Altitud (En Cali) [20]	1,018E+03	M

Reemplazando los anteriores valores en la ecuación Ec. 2.8, se tiene:

$$g = \frac{6,673E - 11 * 5,972E + 24}{(6,371E + 06 + 1,018E + 03)^2} = 9,815 \left[\frac{m}{s^2} \right]$$

2.2.3 Parámetros de operación del vehículo

Se presentan a lo largo del ciclo de conducción del vehículo y varían según las condiciones de operación, principalmente son:

- a. Velocidad de operación
- b. Pendiente de la carretera
- c. Aceleración de operación

2.3 CÁLCULO DE MÁXIMA TRACCIÓN EN LAS RUEDAS

Antes de realizar el análisis de las diferentes condiciones de operación, es importante conocer el torque que es capaz de tolerar la rueda, teniendo en cuenta el peso sobre ella y el material que la constituye [21].

Cuando los torques que se presentan en la operación del vehículo sobrepasan el torque máximo de tracción, las ruedas derraparán sobre el terreno.

La adherencia de una llanta depende del material que la constituye (μ) y la fuerza que actúa sobre ella ($M \cdot g$).

Por ser el Chevrolet corsa un vehículo de tracción delantera, el peso máximo en el eje delantero es:

$$W_d = M_d * g = 770 \text{ kg} * 9,815 \left[\frac{m}{s^2} \right] = 7557,55 \text{ N} \quad \text{Ec. 2.9}$$

Dónde:

M_d corresponde al peso permisible en el eje delantero (Anexo 1)
 g corresponde a la gravedad en Cali

De esta forma, la máxima tracción de adherencia se calcula así:

$$M_{td} = W_d * \mu * \frac{r_d}{2} = 7557,55 \text{ N} * 0,75 * \frac{0,3018}{2} \text{ m} = 855,3 \text{ Nm} \quad \text{Ec. 2.10}$$

Dónde:

μ corresponde al coeficiente de adherencia de asfalto y concreto (0,75)

r_d corresponde al radio dinámico de la rueda (0,3018) [21]

De acuerdo con lo anterior, los torques resultantes en las diferentes condiciones de operación, no deben superar los **855,3 Nm**.

2.4 ANÁLISIS DE CONDICIONES DE OPERACIÓN

Con la conversión del vehículo convencional a vehículo eléctrico, se pretende mejorar o mantener las prestaciones que ofrece. Para determinar las características de los motores necesarios para la conversión, se considerarán tres condiciones de operación: aceleración máxima, velocidad máxima y pendiente máxima [21], las cuales se evaluarán individualmente.

Los parámetros necesarios para dichos cálculos se toman de la ficha técnica, manuales del fabricante (Anexo 1) y los trabajos de grado realizado anteriormente por los Ingenieros José Luis Rodríguez Mera [21] y Jefferson Caicedo [14] .

Tabla 2.4. Parámetros del vehículo original.

Parámetros del vehículo original		
Masa vehículo convertido en vacío	1045	Kg
Masa pasajero promedio	75	Kg
Velocidad máxima	173	Km/h
Velocidad máxima	48,05	m/s
Tiempo de aceleración 0 - 100 Km/h	12,5	s

Fuente: Propia

2.4.1 Velocidad máxima

Inicialmente se determinan las fuerzas que se oponen al movimiento del vehículo, en este escenario influyen la fuerza de arrastre, resistencia debido a la inercia y la resistencia a la rodadura, no se considera la resistencia debido a la pendiente ya que el ángulo de inclinación es cero, además se ha seleccionado la velocidad máxima que el fabricante especifica en las fichas técnicas y manuales (173 km/h) [21].

Tabla 2.5. Parámetros y fuerzas resultantes a velocidad máxima.

Categoría	Parámetro			
Vehículo	Coeficiente de arrastre	C_d	0,37	Adimensional
	Área frontal del vehículo	A_f	1,72	m^2
	Coeficiente de resistencia a la rodadura	f_r	0,017	Adimensional
	Radio de la llanta	R_d	0,28	m
	Masa del vehículo	M	1120	kg
Ambientales	Densidad del aire	ρ_a	1,055	Kg/m^3
	Gravedad	g	9,815	m/s^2
Operación de vehículo	Velocidad	V	48,056	m/s
	Pendiente	ϕ	0	rad
	Aceleración	a	0	m/s^2
Fuerza de arrastre	$F_d = \frac{1}{2} C_d * \rho_a * A_f * V^2$	775,247		N
Resistencia a la rodadura	$R_x = f_r * m * g * \cos \theta$	186,878		N
Resistencia debido a la pendiente	$R_g = m * g * \sin \theta$	0		N
Resistencia debido a la inercia	$R_i = m * a$	0		N
Fuerza en las ruedas	$F_r = F_d + R_g + R_x + R_i$	962,124		N

Fuente: Propia

Se determinan: el torque en las ruedas, que es igual al radio de la rueda multiplicado por la fuerza resultante y la potencia necesaria para vencer dichas fuerzas.

Torque
$$T_w = F_r * R_d = 269,39 Nm$$

Torque en la rueda
$$T_r = \frac{T_w}{2} = 134,70 Nm$$

Potencia total
$$P_w = F_r * V = 46,24 kW$$

Potencia del motor
$$P_w = P_w/2 = 23,12 kW$$

Velocidad angular

$$\frac{1000 * V}{60 * 2\pi * R_d} = 1638,92 \text{ RPM}$$

El valor de torque y potencia debe ser distribuido para los dos motores que irán acoplados en las ruedas delanteras, ya que se supone que la carga se reparte uniformemente en condiciones de operación normales.

Por lo anterior, el torque total es 265,98 Nm, este valor es menor que el límite de tracción por adherencia 855,3 Nm, por ello, en este escenario se garantiza que el vehículo no derrapará.

2.4.2 Pendiente máxima:

En este caso, el vehículo intenta subir una pendiente del 30% de inclinación a una velocidad constante de 35 Km/h, el torque que experimenta el motor es máximo y el esfuerzo predominante a vencer es debido al porcentaje de inclinación, por tal motivo se evaluará con la máxima carga permisible (kg), especificada por el fabricante [21].

Tabla 2.6. Parámetros y fuerzas resultantes a pendiente máxima.

Categoría	Parámetro			
Vehículo	Coeficiente de arrastre	C_d	0,37	Adimensional
	Área frontal del vehículo	A_f	1,72	m^2
	Coeficiente de resistencia a la rodadura	f_r	0,017	Adimensional
	Radio de la llanta	R_d	0,28	m
	Carga máxima permisible (massa)	M	1450	kg
Ambientales	Densidad del aire	ρ_a	1,055	Kg/m^3
	Gravedad	g	9,815	m/s^2
Operación de vehículo	Velocidad	V	9,72	m/s
	Pendiente (30%)	$\emptyset$	0,2914	rad
		$\emptyset$	16,69	$^\circ$
	Aceleración	a	0	m/s^2
Fuerza de arrastre	$F_d = \frac{1}{2} C_d * \rho_a * A_f * V^2$	31,716		N
Resistencia a la rodadura	$R_x = f_r * m * g * \cos \theta$	231,740		N
Resistencia debido a la pendiente	$R_g = m * g * \sin \theta$	4088,689		N
Resistencia debido a la inercia	$R_i = m * a$	0		N
Fuerza en las ruedas	$F_r = F_d + R_g + R_x + R_i$	4352,146		N

Fuente: Propia

Se determinan: el torque en las ruedas, que es igual al radio de la rueda multiplicado por la fuerza resultante y la potencia necesaria para vencer dichas fuerzas.

Torque $T_w = F_r * R_d = 1218,60 \text{ Nm}$

Torque en la rueda $T_r = \frac{T_w}{2} = 609,30 \text{ Nm}$

Potencia total $P_w = F_r * V = 42,30 \text{ kW}$

Potencia del motor $P_m = \frac{P_w}{2} = 21,15 \text{ kW}$

Velocidad angular $\frac{1000 * V}{60 * 2\pi * R_d} = 331,57 \text{ RPM}$

El valor de torque y potencia debe ser distribuido para los dos motores que irán acoplados en las ruedas delanteras, ya que se supone que la carga se reparte uniformemente en condiciones normales de operación.

2.4.3 Aceleración máxima

En este escenario se presenta un cambio de velocidades en cierto tiempo, esa característica se define como el tiempo que tarda el vehículo en acelerar de 0 Km/h a 100 Km/h [21].

Tabla 2.7. Parámetros y fuerzas resultantes a aceleración máxima.

Categoría	Parámetro			
Vehículo	Coeficiente de arrastre	C_d	0,37	Adimensional
	Área frontal del vehículo	A_f	1,72	m^2
	Coeficiente de resistencia a la rodadura	f_r	0,017	Adimensional
	Radio de la llanta	R_d	0,28	m
	Masa del vehículo	M	1120	kg
Ambientales	Densidad del aire	ρ_a	1,055	Kg/m^3
	Gravedad	g	9,815	m/s^2
Operación de vehículo	Velocidad	V	27,7	m/s
	Pendiente	ϕ	0	rad
	Aceleración	a	2,216	m/s^2
Fuerza de arrastre	$F_d = \frac{1}{2} C_d * \rho_a * A_f * V^2$	257,580		N
Resistencia a la rodadura	$R_x = f_r * m * g * \cos \theta$	186,878		N
Resistencia debido a la pendiente	$R_g = m * g * \sin \theta$	0		N
Resistencia debido a la inercia	$R_i = m * a$	2481,92		N
Fuerza en las ruedas	$F_r = F_d + R_g + R_x + R_i$	2926,378		N

Fuente: Propia

Con la fuerza resultante en las ruedas, se procede a calcular la velocidad angular, potencia y el torque en la rueda cuando el vehículo opera a aceleración máxima.

Torque $T_w = F_r * R_d = 819,39 \text{ Nm}$

Torque en la rueda $T_r = \frac{T_w}{2} = 409,69 \text{ Nm}$

Potencia total $P_w = F_r * V = 81,06 \text{ kW}$

Potencia del motor $P_w = P_w / 2 = 40,53 \text{ kW}$

Velocidad angular $\frac{1000 * V}{60 * 2\pi * R_d} = 947,35 \text{ RPM}$

El valor de torque y potencia debe ser distribuido para los dos motores que irán acoplados en las ruedas delanteras, ya que se supone que la carga se reparte uniformemente en condiciones de operación normales.

Por lo anterior, el torque total es 819,39 Nm, este valor es menor que el límite de tracción por adherencia 855,3 Nm, por ello, en este escenario se garantiza que el vehículo no derrapará

Tabla 2.8. Parámetros y fuerzas resultantes a aceleración cero.

Categoría	Parámetro			
Vehículo	Coficiente de arrastre	C_d	0,37	Adimensional
	Área frontal del vehículo	A_f	1,72	m^2
	Coficiente de resistencia a la rodadura	f_r	0,017	Adimensional
	Radio de la llanta	R_d	0,28	m
	Masa del vehículo	M	1120	kg
Ambientales	Densidad del aire	ρ_a	1,055	Kg/m^3
	Gravedad	g	9,815	m/s^2
Operación de vehículo	Velocidad	V	0	m/s
	Pendiente	ϕ	0	rad
	Aceleración	a	0	m/s^2
Fuerza de arrastre	$F_d = \frac{1}{2} C_d * \rho_a * A_f * V^2$	0,000		N
Resistencia a la rodadura	$R_x = f_r * m * g * \cos \theta$	186,878		N
Resistencia debido a la pendiente	$R_g = m * g * \sin \theta$	0		N
Resistencia debido a la inercia	$R_i = m * a$	0		N
Fuerza en las ruedas	$F_r = F_d + R_g + R_x + R_i$	186,878		N

Fuente: Propia

Con la fuerza resultante en las ruedas, se procede a calcular la velocidad angular, potencia y el torque en la rueda cuando el vehículo está quieto.

Torque $T_w = F_r * R_d = 0 \text{ Nm}$

Torque en la rueda $T_r = \frac{T_w}{2} = 0 \text{ Nm}$

Potencia del motor $P_w = F_r * V = 0,00 \text{ kW}$

Velocidad angular $\frac{1000 * V}{60 * 2\pi * R_d} = 0,00 \text{ RPM}$

2.5 GIRO DEL VEHICULO

En los vehículos convencionales, la potencia del motor es transmitida hacia las ruedas mediante una serie de elementos, embrague, diferencial, caja de cambios, etc.

La misión del diferencial será dividir la potencia a las ruedas motrices para impedir que una gire más que la otra y así evitar arrastres prematuros en alguna de ellas cuando el vehículo tome curvas.

En este caso, los motores van acoplados a las ruedas, por lo tanto el embrague, caja de cambios, planetario y demás componentes mecánicas, serán reemplazados por un controlador electrónico, el cual será el encargado de realizar las funciones que dichos elementos realizaban, en pocas palabras será el encargado de distribuir a cada motor, la potencia, el torque y la velocidad necesarias a lo largo de los diferentes recorridos.

Es necesario un control vectorial de par, el cual se encarga de generar el momento angular necesario, repartiendo el par de manera independiente para cada motor.

También es ideal en estos casos un controlador MPC Model Predictive Control, el cual usa un modelo simplificado de procesos para estimar las futuras salidas del sistema y decidir cómo actuar, este tipo de controlador se utiliza para casos multivariable, con retraso o no lineales, como lo es el vehículo eléctrico.

El controlador calcula el momento angular necesario para corregir la dinámica del vehículo se basa en variables muy importantes: la velocidad angular, el ángulo de deriva lateral y el ángulo de giro de las ruedas delanteras [22].

Es importante para el controlador que se seleccione conocer parámetros como el ángulo de dirección de Ackerman, el cual describe la relación del ángulo de dirección de la siguiente manera [23]:

$$\delta = \frac{L}{R} + K \frac{V^2}{gR}$$

Ec. 2.11

Dónde:

V: velocidad del vehículo

R: radio de curvatura

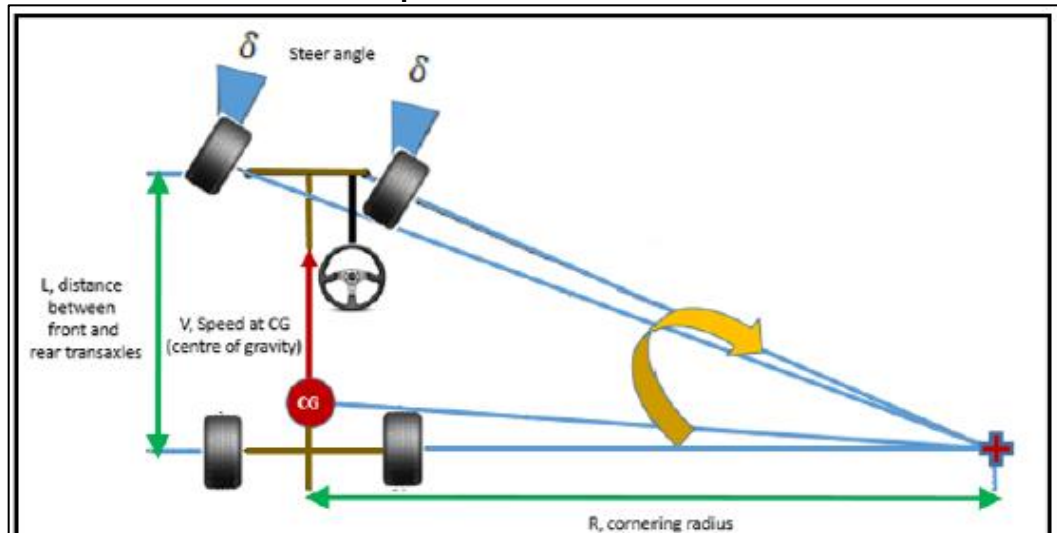
δ : ángulo de dirección

g: gravedad

K: gradiente

L: distancia entre el eje trasero y delantero

Figura 2.3. Coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.



Fuente:[23]

K: es la constante que expresa el efecto de la distribución del peso y la rigidez de los neumáticos del vehículo en curva.

$$K = \frac{wf}{caf} - \frac{wr}{car}$$

Dónde

w_f : Carga del vehículo en el eje delantero

w_r : Carga del vehículo en el eje trasero

$c_{\alpha f}$: Rigidez de las ruedas delanteras

$c_{\alpha r}$: Rigidez de las ruedas traseras

K puede tomar tres valores diferentes [23]:

a. Condición normal: en este caso $K = 0$, ocurre cuando la carga del vehículo se reparte por igual entre los ejes delantero y trasero, la rigidez de los neumáticos es la misma

$$\frac{w_f}{c_{\alpha f}} = \frac{w_r}{c_{\alpha r}}$$

Es ideal para las curvas, ya que la velocidad del vehículo no contribuye al cálculo general del ángulo de dirección, en curvas a baja velocidad, las fuerzas laterales son insignificantes.

b. Condición de subdirección: en este caso $K > 0$, ocurre cuando el eje delantero experimenta una mayor distribución de la carga en comparación con el eje trasero, después de considerar los efectos de la rigidez de los neumáticos

$$\frac{w_f}{c_{\alpha f}} > \frac{w_r}{c_{\alpha r}}$$

En esta condición se compensa el desgaste de las llantas, el conductor necesita ejercer fuerza sobre el volante para asegurar de que el vehículo no se aleje de la pista.

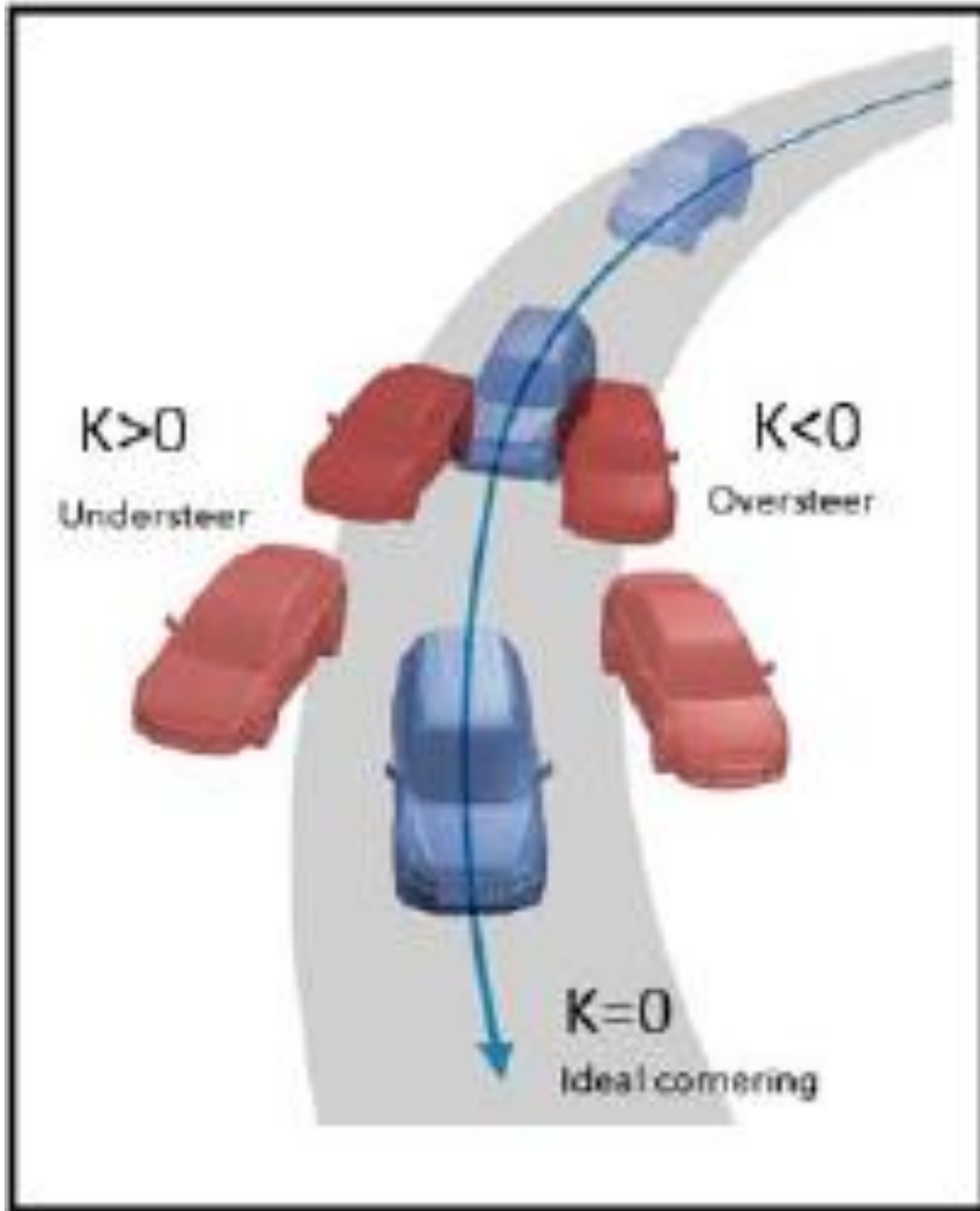
c. Condición de sobredirección: en este caso $K < 0$, ocurre cuando la carga en el eje trasero es mayor que la carga en el eje delantero, después de considerar las propiedades de rigidez de los neumáticos en curva

$$\frac{w_f}{c_{\alpha f}} < \frac{w_r}{c_{\alpha r}}$$

Se presenta con baja frecuencia, ya que el vehículo tiende naturalmente a dirigirse hacia la pista en curva, a menos que el conductor intervenga.

El gradiente K permitirá la optimización de la distribución del peso, afectará la respuesta del vehículo en curva, dependiendo del radio de la curva y la velocidad del vehículo.

Figura 2.4. Coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.



Fuente:[23]

El cumplimiento de la condición de Ackerman, implica que los ángulos pequeños de las ruedas durante el giro, están dados por:

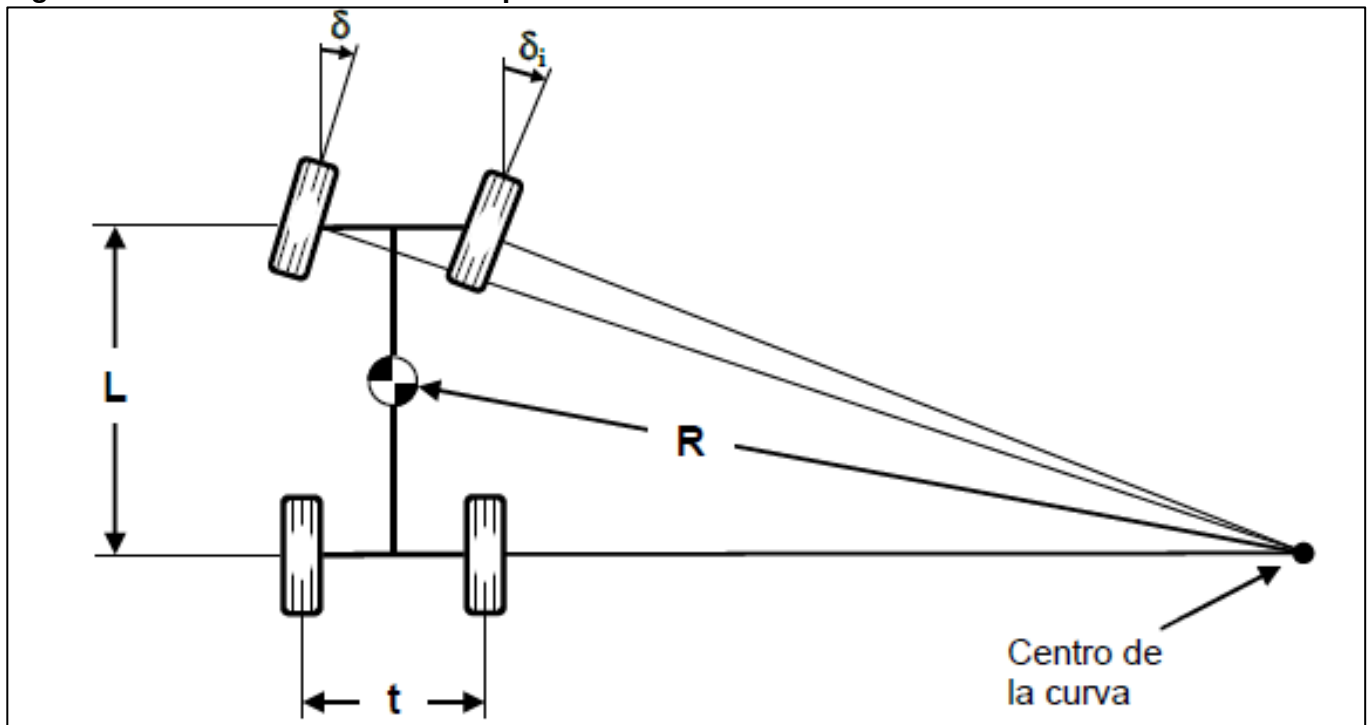
$$\delta_0 \cong \frac{L}{(R + \frac{t}{2})}$$

$$\delta_0 \cong \frac{L}{(R - \frac{t}{2})}$$

El ángulo medio de las ruedas delanteras, se define como ángulo de Ackerman:

$$\delta = \frac{L}{R}$$

Figura 2.5. Coeficientes de arrastre para diferentes automóviles.



Fuente:[23]

Cuando el vehículo gira, la asimetría en la geometría, causa que la rueda interior gire a un ángulo mayor que la exterior, el grado de consecución de la geometría de Ackerman en un vehículo, tiene una pequeña influencia en el comportamiento direccional a alta velocidad, con un buen diseño el par de resistencia al giro tiende a aumentar con el ángulo de giro, proporcionando al conductor una sensación neutral de realimentación a través del sistema de dirección.

En la práctica, no siempre es posible conseguir un ideal a causa de problemas de disposición de los órganos mecánicos, movimientos de suspensión no lineales y como consecuencia de los cambios de geometría cuando las ruedas giran.

Después de analizar las condiciones de operación a las que el vehículo se enfrenta, se escogen los valores máximos a los que los motores en rueda deben enfrentarse y no afectar su funcionamiento normal.

Tabla 2.9. Parámetros de los motores

	Velocidad máxima	Pendiente máxima	Aceleración máxima
Torque [N.m]	134,70	609,30	409,69
Velocidad [rpm]	1638,92	331,57	947,35
Potencia [kW]	23,12	21,15	40,53

Fuente: Propia

Es importante resaltar que los motores en rueda no siempre estarán en sus condiciones máximas de operación, esto depende del uso y de las condiciones a las que se enfrenta.

- ❖ Torque máximo 609, 30 Nm
- ❖ Velocidad máxima 1638 RPM
- ❖ Potencia máxima 40,53 kW

3. SELECCIÓN DEL MOTOR

Existen dos normas bajo las cuales se fabrican los motores: IEC Comisión Electrotécnica Internacional, NEMA Asociación nacional de fabricantes de equipos eléctricos. Para la selección del motor se deben tener en cuenta los parámetros especificados en ellas.

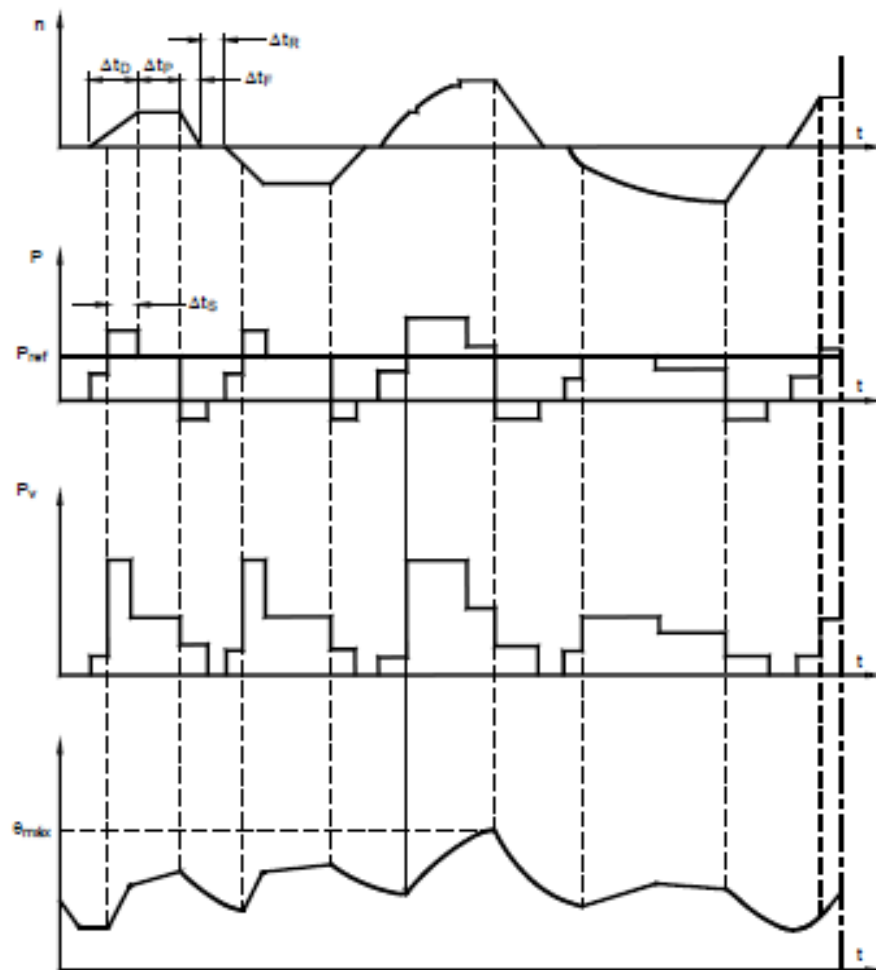
3.1 RÉGIMEN DE SERVICIO.

Es el grado de regularidad de la carga a la que el motor es sometido, es importante seleccionarlo de la forma más exacta posible ya que de ello depende el correcto funcionamiento.

El tipo de servicio que deberá tener el motor seleccionado es el S9, Servicio con variaciones no periódicas de carga y de velocidad.

Con este tipo de servicio, los motores pueden alcanzar el equilibrio térmico, en el tiempo suficiente cuando se presente variación de cargas, además de cambiar la velocidad de giro de los motores ante las diferentes condiciones de operación [24].

Figura 3.1. Servicio con variaciones no periódicas de carga y velocidad S9.



Convenciones

P	= carga	t	= tiempo
P_{ref}	= carga de referencia	Δt_D	= tiempo de arranque/aceleración
P_v	= pérdidas eléctricas	Δt_P	= tiempo de funcionamiento bajo carga constante
θ	= temperatura	Δt_F	= tiempo de frenado eléctrico
$\theta_{máx}$	= temperatura máxima alcanzada	Δt_R	= tiempo en reposo y desenergización
n	= velocidad	Δt_s	= tiempo de funcionamiento bajo sobrecarga

Fuente: Figura 9 [24]

3.2 POTENCIA NOMINAL

La potencia, es la fuerza que genera el motor para mover la carga, esta fuerza se mide en Watt (W) o en Horse power (Hp). Dicha potencia está íntimamente relacionada a la elevación de temperatura del devanado, si se le exige al motor una potencia muy por encima de la nominal, el calentamiento normal será sobrepasado y la vida útil del motor será disminuida, pudiéndose incluso hasta fallar [25].

La potencia que se especifica en la placa de identificación, indica la potencia mecánica disponible en el eje de salida, la potencia eléctrica consumida por el motor, depende de su eficiencia [26]. A continuación, se presentan los valores de potencia obtenidos en las diferentes condiciones de operación.

Tabla 3.1. Potencia máxima en las diferentes condiciones de operación.

Condición de operación	Potencia [kW]
Velocidad máxima	23,12
Pendiente máxima	21,15
Aceleración	40,53

Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 3.1, en el escenario de aceleración, se presenta la mayor potencia, por lo tanto, la potencia nominal de cada motor en rueda debe oscilar entre 20 kW y 40 kW.

3.3 VELOCIDAD DE ROTACIÓN

Se expresa normalmente en revoluciones por minuto (RPM) [26]. A continuación, se presentan los valores de velocidad obtenidos en las diferentes condiciones de operación.

Tabla 3.2. Velocidad máxima en las diferentes condiciones de operación.

Condición de operación	Velocidad [rpm]
Velocidad máxima	1638,92
Pendiente máxima	331,57
Aceleración	947,35

Fuente: Propia

Tabla 3.3. Rango de frecuencias.

Condición de operación	Velocidad [rpm]	Frecuencia [Hz]
Velocidad máxima	1638,92	27,32
Pendiente máxima	331,57	5,53
Aceleración	947,35	15, 8

Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 3.2 y Tabla 3.3, en el escenario de velocidad máxima del vehículo, se presenta la mayor velocidad del motor, por lo tanto, los dos motores en rueda deberán operar de 0 – 1638,92 rpm y 0 – 30 Hz aproximadamente.

3.4 GRADO DE PROTECCIÓN.

Es la protección que debe tener el motor contra la entrada de cuerpos extraños como polvo, contaminantes químicos, agua, fibras, entre otras.

3.4.1 Código IP

Internal protection por sus siglas en inglés IP, determina el grado de protección o de encerramiento del motor ante diferentes elementos que intenten penetrarlo.

El código IP es un sistema de codificación para indicar los grados de protección proporcionados por la envolvente contra la penetración de cuerpos extraños y para suministrar una información adicional referida a la protección.

El código IP está formado por dos números de una cifra cada uno, independientes entre sí y situados después de las letras IP, La primera cifra esta graduada desde 0 hasta 6 y a medida que incrementa, indica que su protección es más fuerte [27].

La segunda cifra indica la protección de la envolvente contra los efectos perjudiciales debidos a la penetración de agua, va desde 0 hasta 8, a medida que va aumentando, indica que la cantidad de agua que intenta penetrar en el interior de la envolvente es mayor y también se proyecta en más direcciones [27].

Según lo anterior los dos motores seleccionados deberán tener protección IP 65, lo cual indica que estarán protegidos de entrada de polvo y proyecciones de agua en todas las direcciones.

3.4.2 Código IK

Este sistema de codificación indica el grado de protección ante impactos mecánicos. El código IK se designa con un número de 0 – 10, a medida que el número aumenta, la energía del impacto mecánico es mayor [27].

A cada grado de protección IK, se asocia una energía de impacto medida en Joules (J), una masa del objeto de golpeo en Kg y una altura de caída del objeto de golpeo en mm. [27].

Durante el recorrido del automóvil, los motores están expuestos a diferentes impactos los cuales no tienen masa ni altura definida, por ello se deben asegurar con el mayor grado de protección, IK10 indica que la energía de impacto llega hasta 20 J, la masa y altura de la pieza de golpeo son 5 Kg y 400 mm respectivamente [27].

3.5 EFICIENCIA

Según las estadísticas, el 65% de la energía eléctrica de la industria es utilizada en motores eléctricos y el precio de compra del motor corresponde a 8 – 10 semanas del propio consumo eléctrico.

En Colombia, el programa de eficiencia ha tenido una evolución lenta desde el 2001, se espera que, con la instalación de motores industriales eficientes, los ahorros acumulados entre 2008 y 2025 sumaran cerca de 39.400 GWh [28].

Debido a que la eficiencia representa un ahorro potencial, la eficiencia en las máquinas cada día cobra más importancia, por lo anterior, en todo proceso de transformación y manipulación de energía, existe un porcentaje que se convierte en pérdidas, el cual se puede reducir. Así, la eficiencia es la razón entre la potencia útil y la potencia invertida [28].

$$Eficiencia = \eta [\%] = \frac{Potencia\ de\ salida}{Potencia\ de\ entrada} \times 100\% \quad \text{Ec. 3.1}$$

En los motores eléctricos, las pérdidas son debidas a diferentes causas propias de su funcionamiento. Durante el diseño de la máquina se pueden optimizar y de esta forma reducir el consumo energético.

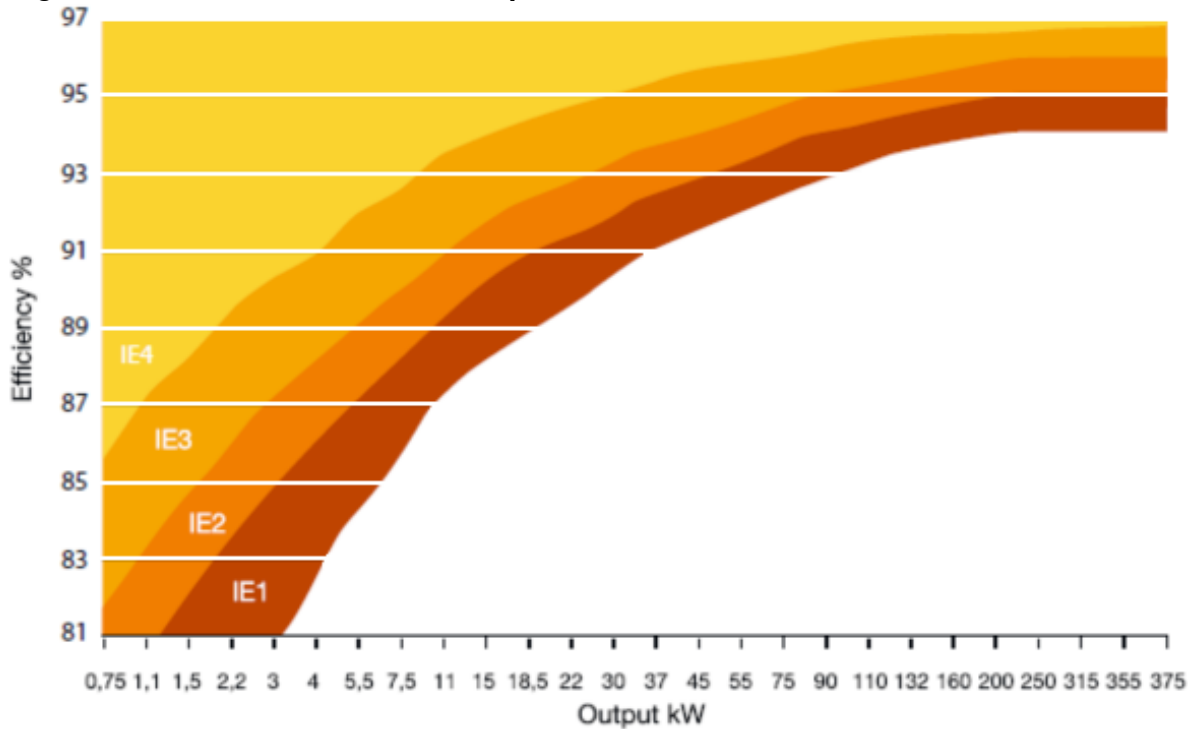
Mediante la norma IEC 60034-30 del 2008, se estableció la clasificación de los motores de acuerdo a su eficiencia mediante el código IE (International Energy – efficiency Class) seguidas por el número que representa su categorización [28].

- a. IE4 – Súper Premium
- b. IE3 – Premium
- c. IE2 – High
- d. IE1 – Standard

La clasificación de eficiencia se hace con el valor hallado de potencia, tensión y frecuencia nominal. Para que un motor sea clasificado, su eficiencia nominal debe ser igual o exceder los valores mínimos establecidos por la norma.

Para la aplicación de vehículos eléctricos, se recomienda motores con eficiencia superior a la IE2, de acuerdo a la potencia de funcionamiento.

Figura 3.2. Clases de eficiencia IEC para motor.



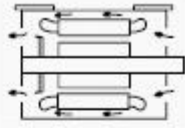
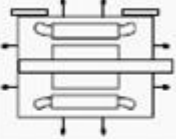
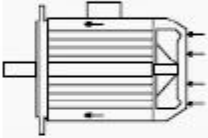
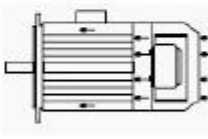
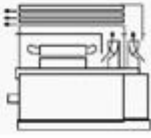
Fuente: [29]

3.6 TIPO DE VENTILACIÓN

Todos los motores eléctricos generan calor como resultado de las pérdidas eléctricas y mecánicas que ocurren al interior de la máquina. Dicho calor debe ser disipado hacia fuera del motor para evitar que la elevación de temperatura sea excesiva y cause daños a la vida útil del motor.

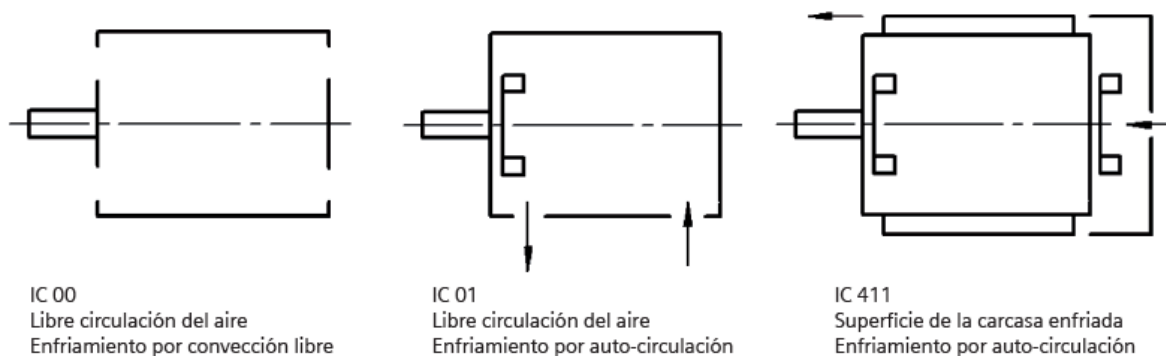
Los diferentes métodos de enfriamiento de máquinas se clasifican en la norma IEC 34 por medio del código de enfriamiento.

Tabla 3.4. Código de enfriamiento IEC

Código	Descripción	Diagrama
IC 01	Máquinas Abiertas, con el Abanico montado en el eje. Llamado Abierto Resistente al Goteo (ODP).	
IC 40 (Ahora IC 410)	Máquinas Cerradas, se enfría por convección natural y radiación de la superficie. No tiene abanicos.	
IC 41 (Ahora IC 411)	Máquinas Cerradas. Abanico Externo montado en el eje. Llamado TEFC.	
IC 43 A (Ahora IC 415A)	Máquinas Cerradas. Abanico ventilador motorizado externo montado Axialmente. Llamado con Ventilación Forzada.	
IC 43 R (Ahora IC 415R)	Máquinas Cerradas. Abanico ventilador motorizado externo montado Radialmente. Llamado con Ventilación Forzada.	
IC 61 (Ahora IC 610)	Máquinas Cerradas. Con intercambiadores de calor. Tiene 2 circuitos de aires separados, incluye abanicos ventiladores montados en el eje.	

Fuente: [30]

Figura 3.3. Métodos de enfriamiento.



Fuente:[28]

Debido a que los dos motores van a ir acoplados en las ruedas delanteras del vehículo, deberán ir cerrados y con enfriamiento natural o artificial, es decir IC 410.

3.7 CLASES DE AISLAMIENTO

La vida útil del motor, depende en gran parte de la vida útil del sistema de aislamiento de los devanados, se ve afectado por muchos factores como humedad, vibraciones, ambientes corrosivos y otros. El más importante es la máxima temperatura que soportan los materiales aislantes empleados, ya que cuando el aislante se quema, los devanados se destruyen causando graves daños en todo el motor.

Las diferentes clases de aislamiento normalizadas, definen el límite de temperatura que el sistema puede soportar continuamente sin que sea afectada su vida útil [26].

Las clases de aislamiento utilizadas en máquinas eléctricas con sus respectivos límites de temperatura según la norma IEC 60034-1 son:

- a. Clase A: soporta hasta 105 °C
- b. Clase E: soporta hasta 120 °C
- c. Clase B: soporta hasta 130 °C
- d. Clase F: soporta hasta 155 °C
- e. Clase H: soporta hasta 180 °C

Según el grado de protección IP de los motores seleccionados, se sabe que estos van a estar totalmente sellados, por ello se verán sometidos a altas corrientes las cuales pueden causar fallas en su funcionamiento. Es importante que el material aislante de los devanados soporte altas temperaturas (superiores a 155°), es decir se recomienda que la clase del aislamiento sea F o H.

3.8 FORMA CONSTRUCTIVA

La forma constructiva define el tipo de montaje del motor y la forma de acoplarse con la carga.

Tabla 3.5. Formas constructivas de los motores.

Forma Constructiva	Configuración																			
	Referencia	B3R(E)		B3L(D)	B3T	B5R(E)		B5L(D)	B5T	B35R(E)		B35L(D)	B35T	B14R(E)						
Detalles	Carcasa	Con patas		Con patas		Sin patas		Sin patas		Con patas		Con patas		Sin patas						
	Punta del eje	A la izquierda		A la derecha		A la izquierda		A la derecha		A la izquierda		A la derecha		A la izquierda						
	Fijación	Base o carriles		Base o carriles		Brida FF		Brida FF		Base o brida FF		Base o brida FF		Brida FC						
Forma Constructiva	Configuración																			
	Referencia	B14L(D)	B14T	B34R(E)		B34L(D)	B34T	V5	V5R(E)	V5T	V6	V6R(E)	V6T	V1		V3				
Detalles	Carcasa	Sin patas		Con patas		Con patas		Con patas		Con patas		Con patas		Sin patas		Sin patas				
	Punta del eje	A la derecha		A la izquierda		A la derecha		Abajo		Abajo		Arriba		Abajo		Arriba				
	Fijación	Brida FC		Base o brida FC		Base o brida FC		Pared		Pared		Pared		Brida FF		Brida FF				
Forma Constructiva	Configuración																			
	Referencia	V15	V15R(E)	V15T	V36	V36R(E)	V36T	V18		V19		B6	B6R(E)	B6T	B7	B7R(E)	B7T	B8	B8R(E)	B8T
Detalles	Carcasa	Con patas		Con patas		Sin patas		Sin patas		Con patas		Con patas		Con patas		Con patas		Con patas		
	Punta del eje	Abajo		Arriba		Abajo		Arriba		Para frente		Para frente		Para frente		Para frente		Techo		
	Fijación	Pared o brida FF		Pared o brida FF		Brida C		Brida C		Pared		Pared		Pared		Techo				

Fuente:[26]

Como se ha mencionado en repetidas ocasiones, los dos motores seleccionados irán acoplados a las ruedas delanteras del vehículo, por lo tanto, en cuanto a la forma constructiva, los motores serán diferentes, uno de ellos será B5R, carcasa sin patas, punta del eje a la izquierda, y el otro será B5L, carcasa sin patas, punta del eje a la derecha.

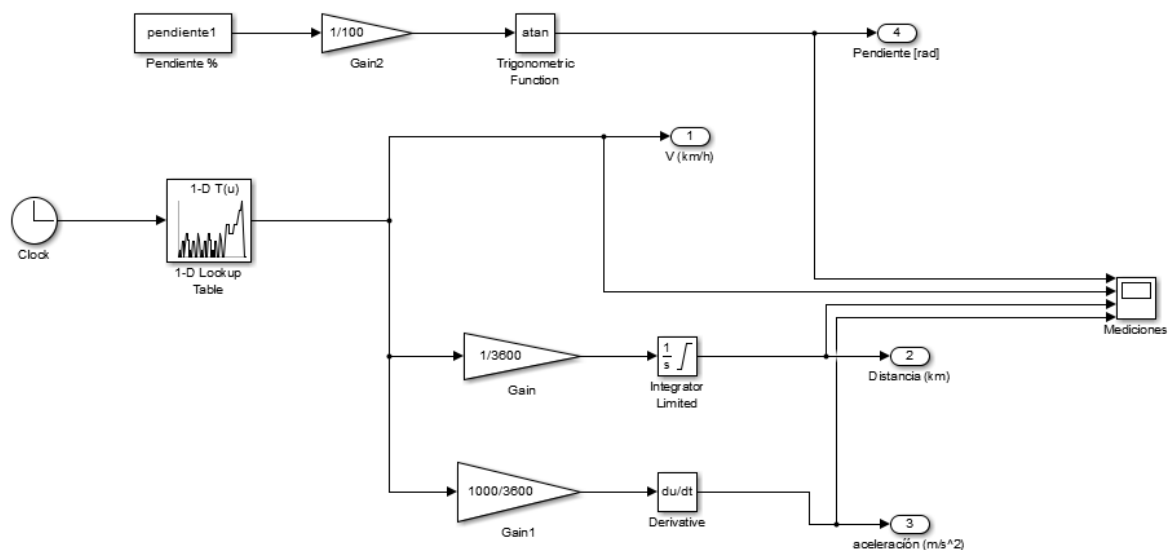
4. SIMULACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN.

Es importante validar los parámetros de selección del motor a través de ciclos de conducción de vehículos, los cuales nos ayudan a no sobredimensionar el motor seleccionado y a comprobar que los parámetros definidos son suficientes para su operación.

4.1 PERFIL DE CONDUCCIÓN

En este módulo se simula el ciclo de conducción del vehículo, y las diferentes condiciones a las que se enfrenta como: aceleraciones, frenadas, paradas. El bloque está compuesto por los elementos que se observan en la siguiente figura:

Figura 4.1. Bloque de perfil de conducción.



Fuente: Propia

Como se observa en la Figura 4.1, en esta etapa se obtiene el ángulo de inclinación de las diferentes etapas de las carreteras promedio en radianes, la velocidad del vehículo durante las condiciones del ciclo de operación en km/h, la aceleración en m/s^2 , y la distancia recorrida durante el ciclo en km.

El ciclo utilizado en la simulación es el ciclo Europeo NEDC completo, el cual es un ciclo estandarizado de homologación que supera cualquier automóvil que se fabrica en Europa. Este ciclo está compuesto por un ciclo urbano que se repite cuatro veces, recorriendo un total de 3.9 km en un tiempo de 13 minutos y un ciclo extraurbano en el cual se recorren 6.8 km en un tiempo de 6.67 minutos, en total se recorren 10.8 km en 19.7 minutos [31].

Figura 4.2. Ciclo de conducción NEDC completo.

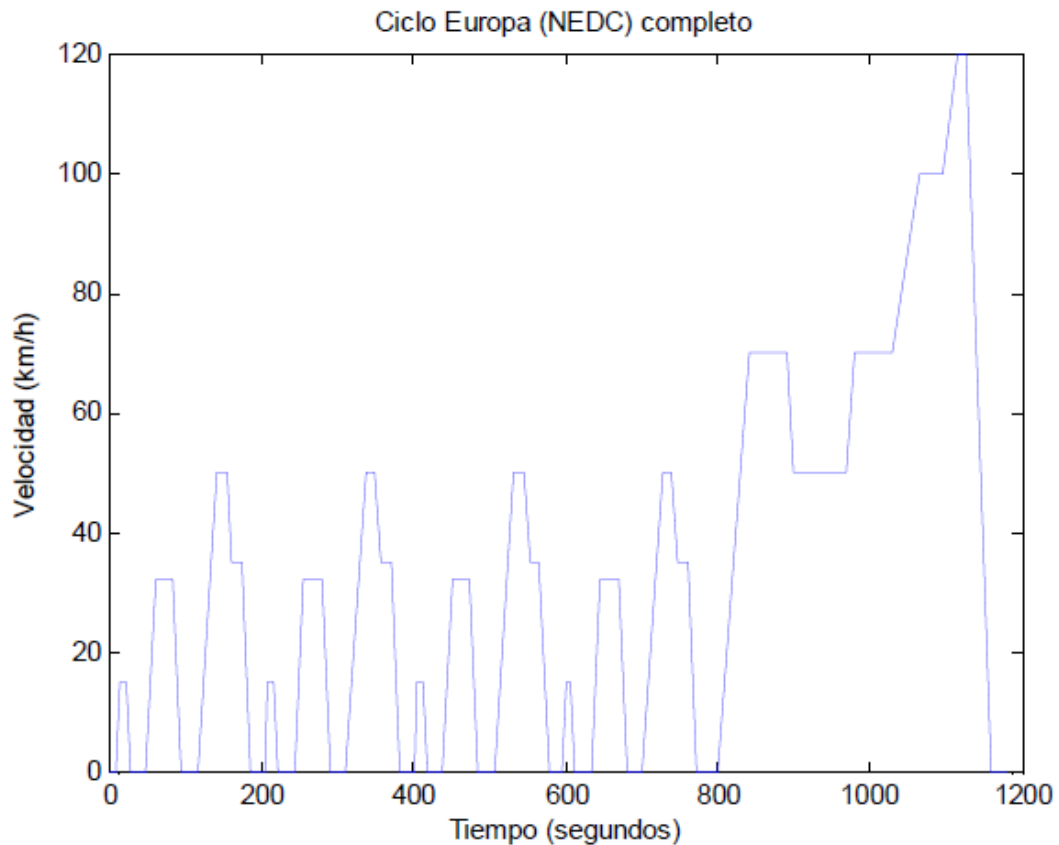
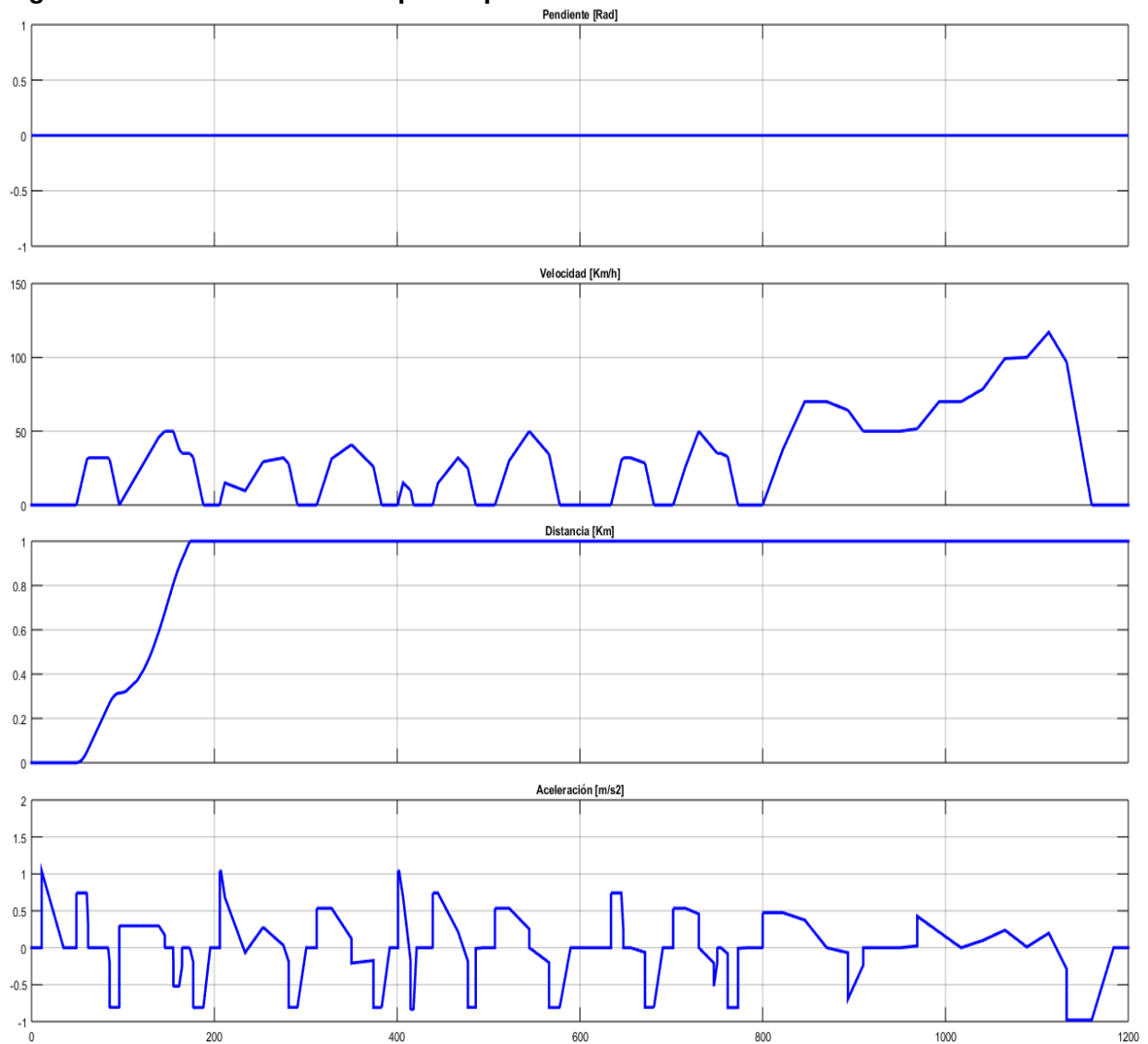


Fig.3. 6-Ciclo Europa (NEDC) completo

Fuente: Figura 3.6 [31]

En la siguiente figura, se muestran los resultados obtenidos durante la simulación del bloque de perfil de conducción.

Figura 4.3. Resultados del bloque de perfil de conducción.



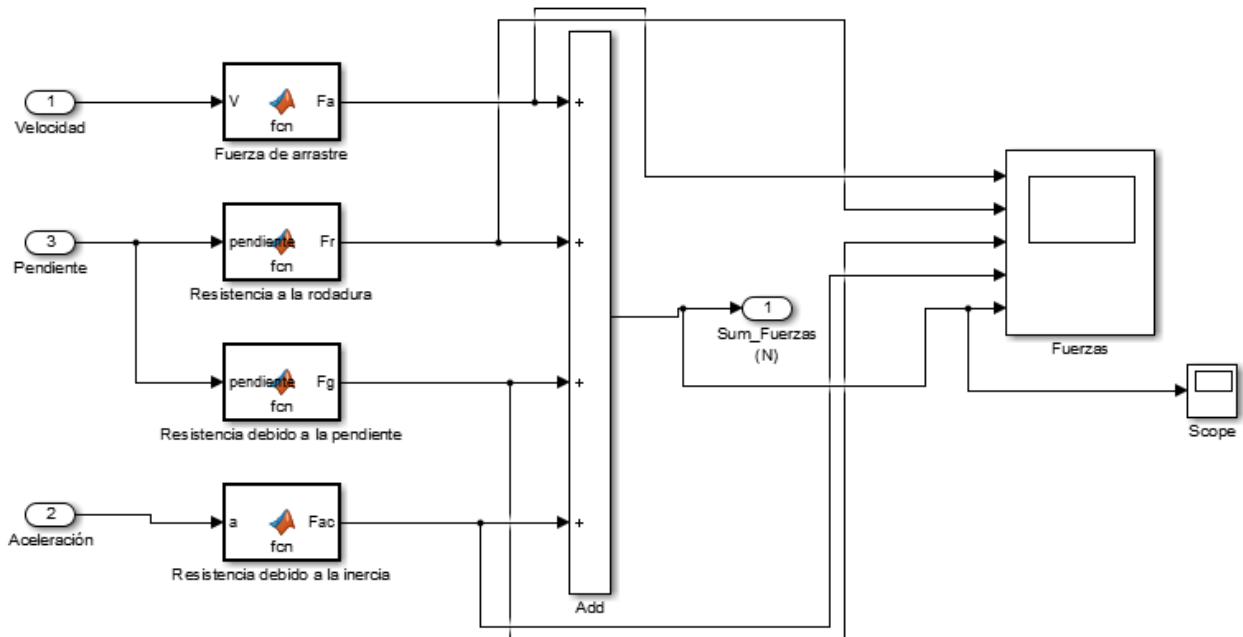
Fuente: Propia

Durante el recorrido del ciclo se obtuvo una pendiente de 0 rad, una velocidad promedio de 23 km/h, una distancia de 10 km y una aceleración promedio de 0 m/s^2 .

4.2 PERFIL DE DINÁMICA VEHICULAR

Este módulo se encarga de calcular la fuerza que debe hacer el vehículo para vencer las diferentes resistencias como: resistencia a la rodadura, resistencia debido a la pendiente, resistencia debido a la inercia y fuerza de arrastre, a las que se ve sometido durante su funcionamiento.

Figura 4.4. Bloque de dinámica vehicular.

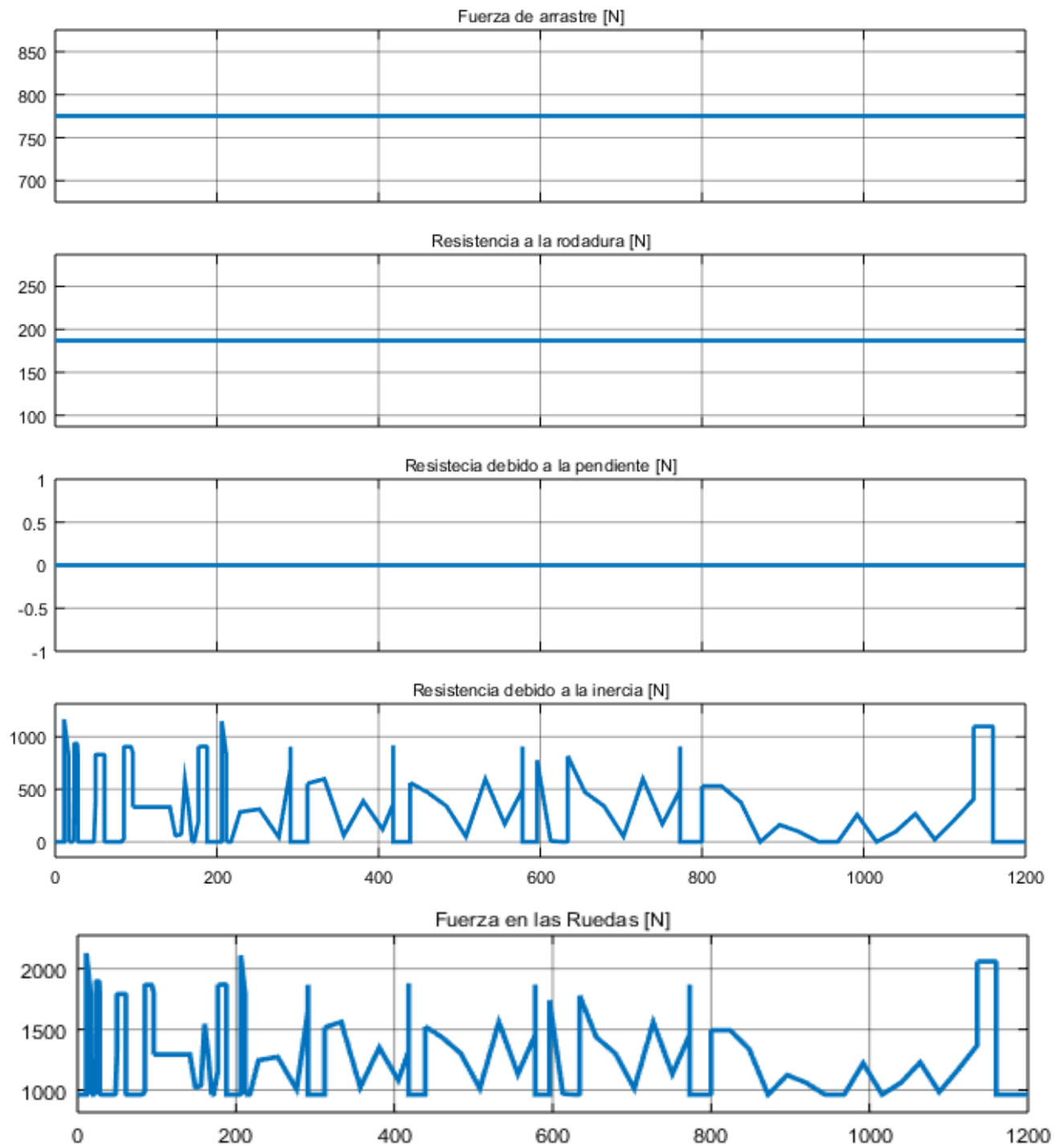


Fuente: Propia

A partir de los cálculos obtenidos en el perfil de conducción, datos de condiciones ambientales y parámetros propios del vehículo (ver Tabla 2.3. Parámetros del vehículo bajo estudio.), se calculan las diferentes resistencias, se realiza la sumatoria de estas y se obtiene la fuerza total que deben realizar los motores para vencer los obstáculos y entrar en funcionamiento.

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos en el módulo de dinámica vehicular. Cabe resaltar que para el cálculo de estas no se tomó la velocidad promedio del ciclo NEDC si no la velocidad máxima a la que el vehículo fue diseñado (173 km/h).

Figura 4.5. Resultados del bloque de dinámica vehicular.



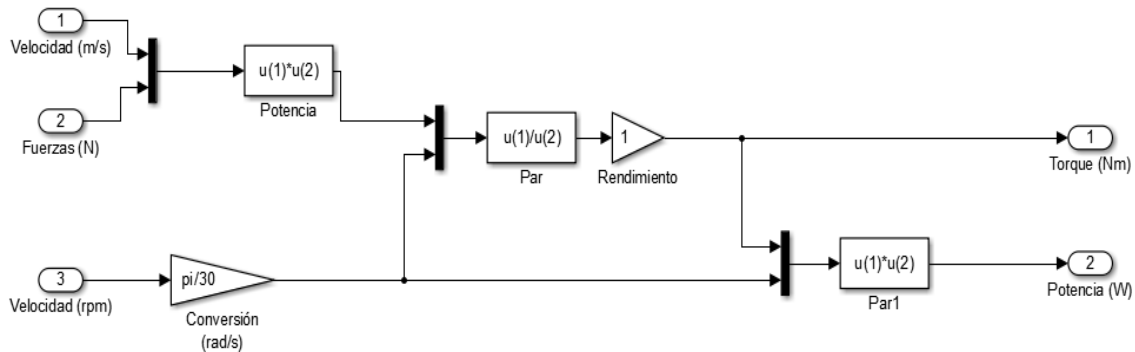
Fuente: Propia

Durante el recorrido del ciclo, la fuerza de arrastre promedio es 775,24 N, la resistencia a la rodadura es 186,88 N, la resistencia debido a la pendiente es 0 N, la fuerza debido a la inercia es aproximadamente 316,84 N, y la fuerza total en las ruedas es 1.279 N.

4.3 PERFIL DE PAR, VELOCIDAD Y POTENCIA

En este módulo se calcula: el torque, la potencia y la velocidad, a las que el motor se verá enfrentado, dichos valores son fundamentales para la selección del motor junto con los resultados obtenidos en las diferentes condiciones de operación.

Figura 4.6. Bloque de par, velocidad y potencia.

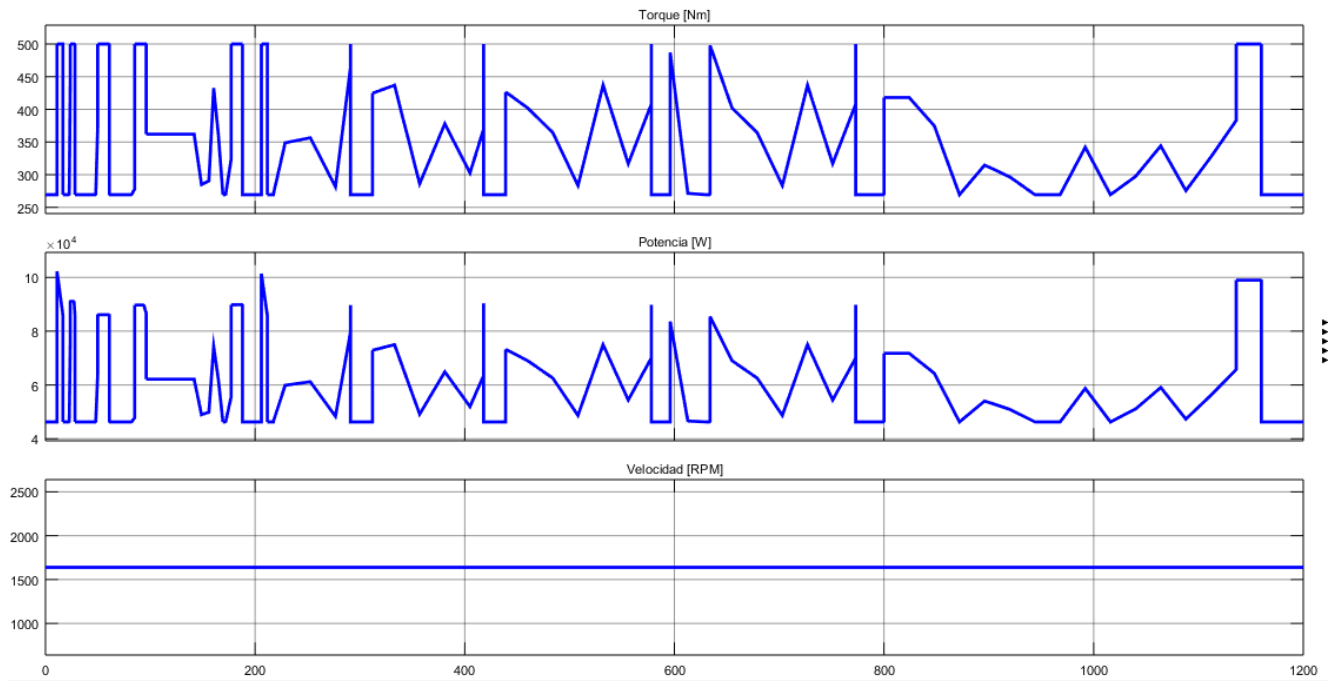


Fuente: Propia

A partir de los cálculos obtenidos en los dos perfiles anteriores, y la conversión de la velocidad en kilómetros por hora (km/h) a revoluciones por minuto (RPM) y metros por segundo (m/s), se realizan funciones matemáticas para encontrar el torque y la potencia obtenidos durante el recorrido del ciclo NEDC.

En la siguiente figura se muestran los resultados obtenidos en el módulo de cálculo de par, velocidad y potencia.

Figura 4.7. Resultados del bloque de par, velocidad y potencia.



Fuente: Propia

Durante el recorrido del ciclo, el torque que de los motores es aproximadamente 358,109 Nm, suponiendo que en condiciones normales, este torque se distribuye por partes iguales a los dos motores, cada uno debe brindar un torque promedio de 179 Nm. La potencia promedio entre los dos motores es 61,46 kW, suponiendo que se reparte en partes iguales, cada motor tendrá una potencia de 30,73 kW. La velocidad de funcionamiento máxima es 1639 RPM.

Con lo anterior se hace una comparación entre los parámetros del motor obtenidos durante análisis de condiciones de operación y durante la validación del ciclo NEDC en Matlab.

Tabla 4.1. Parámetros del motor

	Condiciones de operación máximas	Validación de ciclo NEDC mediante simulación en Matlab
Torque [Nm]	609,30	179,05
Velocidad [RPM]	1638,92	1639
Potencia [kW]	40,53	30,73

Fuente: Propia

5. MOTORES COMERCIALES

Una vez especificados las características de los motores, se consultaron varios catálogos de fabricantes como:

- ❖ Changzhou Jiqing Electrical & Mechanical Co. Ltd.: fabricante de motores eléctricos en rueda para todo tipo de aplicación, ubicado en No.156, West Yunan Rd. , Benniu, Changzhou, Jiangsu, Province – Contact Number +86-0519-83127250.
- ❖ Kelly controls: fabricante de motores eléctricos y controladores para todo tipo de aplicación, opera desde los Estados Unidos y China, la sede global está situada en Irvine y las líneas de montaje y oficinas centrales en Hefei, provincia de Anhui China : - Contact (+86)551-64397760 (+86) 13956008360 email sales@kelly-controls.com.
- ❖ HEINZMANN GmbH & Co. KG : fabricante de motores eléctricos en rueda, generadores asincronos, controladores, entre otros, ubicados en Am Haselbach 1 | D-79677 Schönaue – contacto +49 (0)7673 8208-0 | info@heinzmann.de.
- ❖ Elaphe LTD: fabricante de motores, eléctricos en rueda, inversores, baterías y demás componentes de un vehículo eléctrico, ubicados en Litostrojska Cesta 44c, 1000 Ljubljana – Slovenia - contacto customer@elaphe-ev.com

Se encontró que los motores que cumplen con las especificaciones deseadas son los fabricados por Elaphe LTD, los motores de los otros fabricantes no suministran el par deseado ya que son utilizados en aplicaciones como bicicletas, sillas de ruedas, motos, carros pequeños, entre otros.

5.1 MOTORES EN RUEDA ELAPHE

5.1.1 Motor en rueda COSIVU

Este motor está diseñado para vehículos de carga pesada, como por ejemplo: camiones, tracto mulas, entre otros, para operación 24/7, puede estar expuesto a diferentes condiciones ambientales [32].

Figura 5.1. Especificaciones in-wheel motor COSIVU

Weight	50 kg
Peak torque	1000 Nm
Top speed	1250 rpm
Peak power	75 kW
Continuous power	65 kW (liquid cooling)



Fuente:[32]

5.1.2 Motor en rueda L-TYPE

Es un motor compacto, producido con freno de disco estándar integrado, dedicado a aplicaciones de alta potencia, se adapta fácilmente a cualquier vehículo [32].

Figura 5.2. Especificaciones in-wheel motor L-Type

Peak torque	1500 Nm
Top speed	1250 rpm
Peak power	110 kW
Continuous power	77 kW (liquid cooling)



Fuente:[32]

5.1.3 Motor en rueda M1100

Motor capaz de soportar una carga estática radial máxima de hasta 2 toneladas, diseñado para llantas de acero de hasta 17.5" de radio, ideal para vehículos comerciales, vehículos ferroviarios, autobuses, y vehículos multipropósito [32].

Figura 5.3. Especificaciones in-wheel motor M1100

Weight	68 kg
Peak torque	1100 Nm
Top speed	1160 rpm
Peak power	90 kW
Continuous power	70 kW (liquid cooling)



Fuente:[32]

5.1.4 Motor en rueda M700

Un motor en rueda con una amplia posibilidad de aplicaciones, desde conversiones de autos, automóviles híbridos, vehículos eléctricos comerciales ligeros, fácil de instalar [32].

Figura 5.4. Especificaciones in-wheel motor M700

Weight	23 kg
Peak torque	700 Nm
Top speed	1500 rpm
Peak power	75 kW
Continuous power	50 kW (liquid cooling)



Fuente:[32]

5.2 MATRIZ COMPARATIVA MOTORES EN RUEDA

A continuación se muestra una matriz comparativa la cual permitió seleccionar el motor que mejor se acopla a las necesidades.

Tabla 5.1. Matriz comparativa de motores comerciales

Parámetro deseado		COSIVU		L-TYPE		M1100		M700	
Máx Torque	609,30 Nm	1000 Nm	☒	1500 Nm	☒	1100 Nm	☒	700 Nm	☒
Máx Velocidad	1639 rpm	1250 rpm	☒	1250 rpm	☒	1160 rpm	☒	1500 rpm	☒
Máx potencia	40,53 kW	75 kW	☒	77kW	☒	90 kW	☒	75 kW	☒
Masa Máxima	27 kg	50 kg	☒	-		68 kg	☒	25 kg	☒

Fuente: Propia

Como se observa en la Tabla 5.1, ninguno de los motores comerciales cumple con todos los requerimientos deseados. Sin embargo, el motor más adecuado es el M700 ya que cumple con el torque máximo y la potencia máxima, la velocidad es cercana a la deseada y presenta un peso que no afecta el centro de gravedad del vehículo bajo estudio.

El motor seleccionado está diseñado para instalarse en rines superiores o iguales a 15" (R 15), sin embargo, las llantas del vehículo Chevrolet Corsa original son referencia 165/70 R13, es decir que para que los motores puedan encajar en las ruedas, es necesario realizar ajustes mecánicos al vehículo. Dichos ajustes, deberán ser evaluados en el momento de realizar la conversión total del vehículo.

No se encontró un motor en rueda R13, que cumpla con las especificaciones eléctricas fundamentales como: torque, potencia, velocidad de rotación, y con el peso adecuado para no afectar en gran medida el centro de gravedad del vehículo bajo estudio.

5. 3 DATASHEEET MOTOR EN RUEDA ELAPHE M700

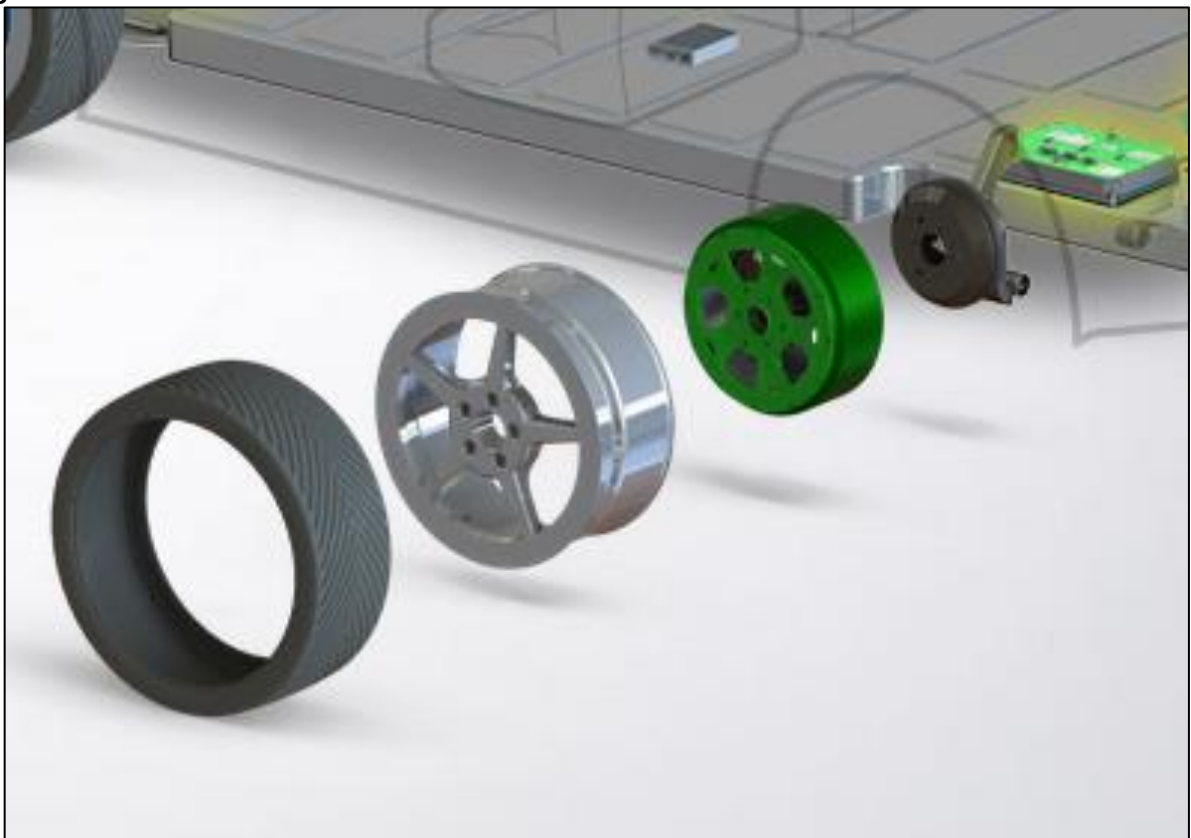
Este motor está diseñado para instalarse en vehículos con una masa total de hasta 1.5 toneladas y ruedas con rines mayores o iguales a 15 pulgadas, ideales para aplicaciones de dos o cuatro motores en cada rueda.

Son motores sincrónicos refrigerados por agua, con rotor externo y gran cantidad de polos (28 pares), son excitados por imanes permanentes y presentan grandes ventajas como alta eficiencia energética superior al 92%, diseño compacto, menor peso y compatible con partes de autos existentes [33].

El motor está diseñado para el uso normal en carretera, no tiene limitación en comparación con los vehículos IEC Estándar, las condiciones de operación son [33]:

- Rendimiento completo: temperatura ambiente -20°C a $+42^{\circ}\text{C}$
- Rendimiento limitado: temperatura ambiente -40°C a 85°C
- Protección térmica: temperatura de devanados -40°C a $+180^{\circ}\text{C}$

Figura 5.5. Instalación de in-wheel motor M700



Fuente:[32]

Tabla 5.2. Características básicas del motor M700.

Table 1: Motor basic characteristics				
Version	VD1	VD2	VD4	
DC link voltage	400	300	100	V
Pole pair number	28			
Active weight	11,6			kg
Total weight (With hub bearing)	25,2			kg
Added unsprung weight	23,1			kg
Optional brake subassembly	6,1			kg
Max. speed (no-load)@ 110 V	1000	1500	1000	rpm
Max. torque (>15 sec)	700			Nm
Continuous torque	400			Nm
Max. phase current (at max. torque)	160	320	640	A _{rms}
Max. output power	45	60	45	kW
Continuous output power	33	40	33	kW
Max. efficiency	92	92.5	92	%
Max. phase frequency (at max. speed)	470	700	470	Hz
Minimum insulation resistance	1			GOhm
Insulation temperature rating	180 (H-class)			°C
Maximum long term motor temperature	150			°C
Maximum short term(<5s) motor temperature	180			°C

Fuente: Tabla 1 [33]

Como se observa en la Tabla 5.2, el motor en cualquiera de sus versiones, ofrece un torque máximo 700 Nm, capaz de responder ante los 609,30 Nm que se necesitan en la condición de operación pendiente máxima.

En su versión VD2 presenta una velocidad máxima de 1500 RPM similar a la máxima requerida que es 1639 RPM, cabe resaltar que el motor no siempre va a estar en velocidad máxima, por lo tanto este valor es aceptable. Además tiene una potencia máxima de 60 kW, mayor a la máxima requerida (40,53 kW).

El motor cumple con el peso adecuado (25,2 kg) para no alterar el centro de gravedad del vehículo convertido, especificado por el Ingeniero Jefferson Caicedo en el proyecto de grado “Diseño del sistema mecánico para convertir un vehículo con motor de Combustión Interna a Eléctrico” [14] (Anexo 2).

5.4 ESTIMACIÓN DE COSTOS

Una vez seleccionado el motor comercial M700 de Elaphe, se envió solicitud de cotización al fabricante. Inicialmente, el asesor comercial solicitó información sobre la aplicación que se desea desarrollar y sobre la empresa que llevará a cabo el proceso.

Figura 5.6. Primera respuesta del equipo Elaphe.

De: Elaphe Customer Service <customer@elaphe-ev.com>

Enviado: jueves, 07 de diciembre de 2017 8:23 a. m.

Asunto: RE: INFORMACIÓN Y COTIZACIÓN DE PRODUCTO

Dear Yesenia,

Thank you for your message and enquiry and sorry for the late reply. We would certainly like to hear more about your project and application.

Currently we are focused on projects with the industry and that keeps us really busy. It would be really beneficial if you could please fill out the attached vehicle questionnaire, so that we can perform some basic physics simulation to determine what the best configuration for your application is and figure out your general requirements. In case you do not know some of the data, please input your best educated guess.

In case you'd like to protect some of the data or information we will be sharing, I am also attaching our standard NDA draft that I kindly ask you return signed via e-mail (scanned). From our perspective it is not necessary yet as we are not revealing any confidential info, but we might need it later, so it's best to sort it out sooner.

I am also sending you a presentation of our company and products, so you can get a better idea about us and our expertise with some of the past projects.

Looking forward to hearing from you,

All the best,

Urska - Elaphe Team

Fuente: Propia

Figura 5.7. Segunda respuesta del equipo Elaphe.

Dear Yesenia,

Thank you for your email.

Considering the weight of the vehicle (I assume the 1047 kg is a curb weight) I would say that M700 motor is appropriate. This fits to 16 inch rim or 15 inch custom rim and brings a max. Of 1500 RPM.

The problem for giving you further quotation at the moment is that we are currently not selling our motors to individuals or for vehicle conversion. Therefore I propose that you sign up for our newlsetter, follow our development and come back in some time when our production capacities will allow also expanded sales.

Thank you for understanding.

Best regards,

Urska



in-wheel winter testing
PUTTING TOUGHNESS TO THE TEST

Fuente: Propia

Dado que recibir una cotización por parte del fabricante del motor seleccionado es un proceso que toma mucho tiempo, se estimará el costo del motor a partir de precios conocidos.

Después de una amplia búsqueda de motores similares, se encontró que el precio de estos en diciembre de 2017, está alrededor de los US \$1.388 por lo tanto los dos motores en rueda requeridos para la conversión pueden costar aproximadamente US \$2.776 (sin gastos de envío) [34] .

6 TRABAJOS FUTUROS

Caracterizar el controlador, las baterías y demás componentes que permitan la conversión del vehículo Chevrolet corsa 2003 a eléctrico, utilizando los motores eléctricos en rueda seleccionados en este trabajo de grado.

Elaborar un método que permita realizar la conversión de cualquier automóvil convencional, en función de su potencia, centímetros cúbicos del motor de combustión y peso del vehículo.

Diseñar motores eléctricos en rueda que mejoren las prestaciones del vehículo y que minimice los costos de su conversión, ya que al fabricarlos en Colombia se pueden reducir los precios de exportación.

Realizar el estudio sobre la implementación de celdas de combustibles como fuentes de alimentación para vehículos eléctricos.

7 CONCLUSIONES

Se caracterizaron los motores eléctricos en rueda, necesarios para la conversión del vehículo, determinando las características mecánicas y eléctricas consideradas en las diferentes condiciones de operación.

Se validó mediante simulación en Matlab, las diferentes condiciones de operación del vehículo, a lo largo del ciclo de conducción NEDC, dicho ciclo permite no sobredimensionar los motores seleccionados ya que se hace sobre un perfil estandarizado.

Se logró conocer y modelar la dinámica vehicular en Matlab, enfocada a la especificación de potencia y dinámica del motor.

Se encontró que los motores eléctricos en rueda comerciales, para llantas de rin R13, no cumplen con la potencia, torque, velocidad y peso encontrados durante el desarrollo del trabajo de grado, por ello fue necesario seleccionar un motor R15 que se puede acoplar a las ruedas, realizando ajustes mecánicos al vehículo original.

Se evidenció que muchos países han fomentado el uso de vehículos eléctricos como medio de transporte, en un futuro todo serán de este tipo y es ahí donde la conversión juega un papel importante en el mercado, ya que será imposible chatarrizar todos los vehículos convencionales.

Se encontró que los motores eléctricos presentan grandes ventajas frente a los motores de combustión interna, en primer lugar son cero contaminantes y en segundo lugar su mantenimiento es mucho más simple y su eficiencia es mayor.

Gracias a las diferentes leyes gubernamentales como la ley 1715 de 2014, y los compromisos adquiridos en la COP21 de Paris, en Colombia se está incentivando el uso de fuentes alternas de energía, y todo aquello que ayude al mejoramiento de calidad del aire. Por lo anterior, se hace factible la exportación de motores eléctricos para la conversión de vehículos.

- [1] Revista Dinero, “Colombia tendrá 3,5 millones de vehículos a 2020,” 2013.
- [2] J. Costas, “Historia de los coches eléctricos,” *Motor pasión*, 2010.
- [3] El Heraldo, “Cuando los coches eléctricos eran más populares que los de gasolina,” 2016.
- [4] F. Martín Moreno, “Vehículos Eléctricos . Historia , Estado Actual Y Retos Futuros,” *Esuropean Sci. J.*, vol. 7881, no. May, pp. 118–131, 2016.
- [5] F. Omar, “Colombia emite 178,2 millones de toneladas de CO2 anualmente,” *Colombia emite 178,2 millones de toneladas de CO2 anualmente, según informe*, 2012. [Online]. Available: <https://www.elheraldo.co/nacional/colombia-emite-1782-millones-de-toneladas-de-co2-anualmente-segun-informe-227072>.
- [6] A. Perez and A. Seco, “Guía del Vehículo Eléctrico.,” *Fund. la Energía la Comunidad Madrid. Conserjería Econ. y Hacienda la Comunidad Madrid, Espana.*, pp. 70–95, 2015.
- [7] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, “Guía del Vehículo Eléctrico,” *Energy Manag. Agency*, no. 234, 2013.
- [8] INACAP, “Motores eléctricos.”
- [9] Universidad de Valencia, “Motor de Corriente Alterna (AC) Síncrono,” 2008.
- [10] Compania Borets, “Motor De Imanes Permanentes,” vol. 103, no. serie 406.
- [11] F. J. Cembranos Nistal, “Motores Síncronos,” *Rev. Digit. ACTA*, pp. 1–17, 2014.
- [12] A. Marino and C. Pernía, “Motores asincronos,” no. June, p. 34, 2017.
- [13] Motortico, “Diseño y Categoría en Motores Eléctricos,” 2014.
- [14] J. Caicedo, “Diseño del sistema mecánico para convertir un vehículo con motor de combustión interna a eléctrico,” Universidad del Valle, 2016.
- [15] A. . Vélez, S.;Vera, “Obtención de los parámetros necesarios para el cálculo de la fuerza en las rueda del vehículo eléctrico,” Universidad del ASAU, 2016.
- [16] D. Artés, “Enemigos de la eficiencia: La resistencia aerodinámica,” *Diariomotor Tecmovia*, 2011. [Online]. Available: <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2011/11/27/enemigos-de-la-eficiencia-la-resistencia-aerodinamica/>.
- [17] D. Artés, “Enemigos de la eficiencia: la resistencia a la rodadura,” *Diariomotor Tecmovia*, 2012. [Online]. Available: <https://www.diariomotor.com/tecmovia/2012/09/17/enemigos-de-la-eficiencia-la-resistencia-a-la-rodadura/>.
- [18] C. Rodríguez, “Technical courses,” *Estudio de la aerodinámica de un vehículo*, 2014. [Online]. Available: http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89.
- [19] “Worlmeteo,” *El tiempo en Cali, Colombia*. [Online]. Available: <https://www.worldmeteo.info/es/america-del-sur/colombia/cali/tiempo-102699/>.
- [20] “Cali,” *Datos de Cali y el Valle del Cauca*. [Online]. Available: http://www.cali.gov.co/publicaciones/227/datos_de_cali_y_el_valle_del_cauca/.
- [21] J. L. Rodríguez, “Estudio de conversión para un automóvil con motor de combustión a automóvil con motor eléctrico,” Universidad del Valle, 2014.
- [22] G. Hernández, C. Bordons, D. Marcos, and C. Montero, “CONTROL DE ESTABILIDAD BASADO EN MPC PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON MOTORES EN RUEDA,” pp. 2–4, 2015.

- [23] B. R. Munusamy and J. D. Weigl, "Design of Rear Wheel Torque Vectoring for Dual Motor Electric Drive System," 2014.
- [24] Icontec internacional, "NTC 2805," no. 571, 2011.
- [25] Grupo Weg, "Motores Eléctricos Guía de Especificación," *Transm. y Distrib.*
- [26] Grupo Weg, "Guía Práctica de Capacitación Técnico Comercial Motor Eléctrico," *Transm. y Distrib.*
- [27] M. D. E. Ciencia *et al.*, "SIGNIFICADO Y EXPLICACIÓN DE LOS CÓDIGOS IP , IK," vol. 0, pp. 1–5.
- [28] Siemens, "Motores Eléctricos Industriales," *Mot. eléctricos Ind.*
- [29] Grupo ABB, "Technical note IEC 60034-30-1 standard on efficiency classes for low voltage AC motors.," pp. 1–2, 2014.
- [30] Motortico, "Enfriamiento en motores eléctricos cerrados," vol. 41, p. 1, 2013.
- [31] P. Marín, "Aplicación software para la simulación del funcionamiento energético de vehículos eléctricos," 2013.
- [32] Elaphe Ltd, "Elaphe," 2017. [Online]. Available: <http://in-wheel.com/product-category/motors/>.
- [33] Elaphe Propulsion Technologies, "Datasheet Elaphe M700," 2016.
- [34] G. Alibaba, "Alibaba." [Online]. Available: <https://www.alibaba.com/showroom/electric-wheel-hub-motor.html>.

ANEXOS

ANEXO 1: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS CHEVROLET CORSA WIND 2002-2007.

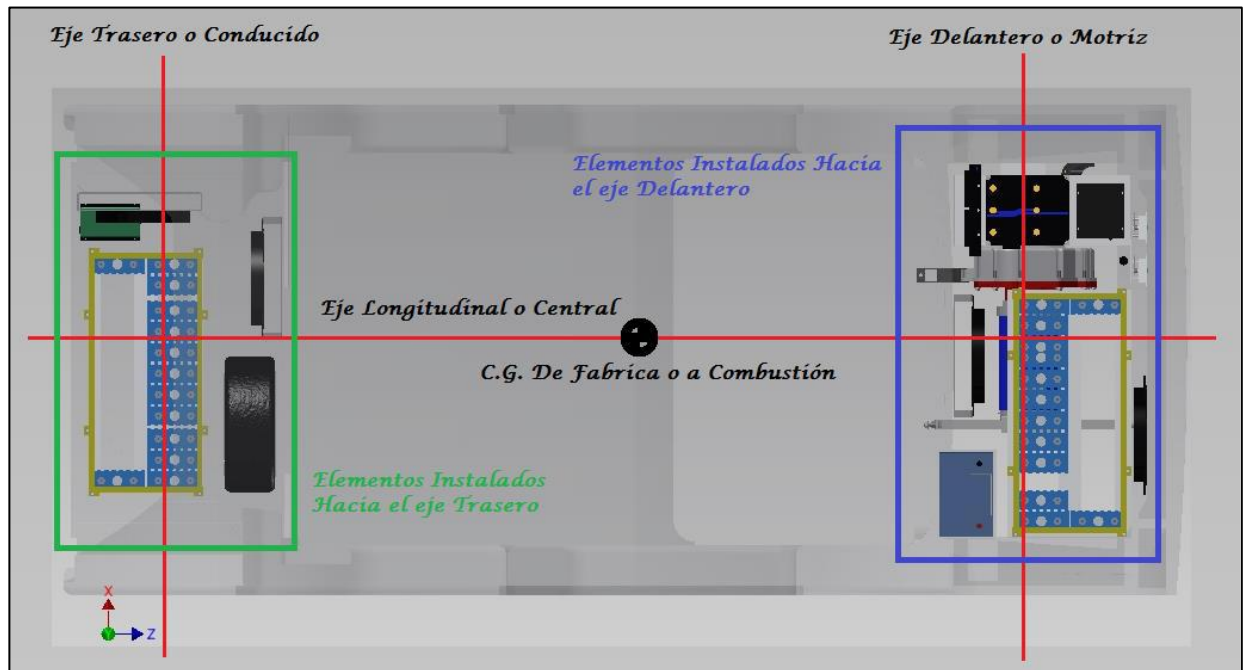
	PARAMETRO	VALOR - CARACTERISTICA
Manufactura	Modelo	Chevrolet Corsa Wind 1.4
	Fabricante	GM Colmotores
	Ensamble final	Bogotá – Colombia
Motor	Código	1.4 MPFI X14XE
	Tipo	Transversal delantero
	Cilindros	4 en línea- 2 válvulas por cilindro.
	Distribución	SOHC (un solo árbol de levas en la culata o tapa motor).
	Diámetro carrera del pistón (mm)	77.6 73.4
	Relación de compresión	9.5 a 1 (Volumen (máx.)/Volumen(min))
	Cilindrada	1388 cc.
	Revoluciones en ralentí	950 ± 50 rpm.
	Potencia Máxima Neta	83.7 Hp a 6000 rpm.
	Torque máximo Neto.	113.56 N*m a 3000 rpm.
Pesos Y cargas	Carga máxima permisible	1450 kg.
	Permisible eje delantero	770 kg.
	Permisible eje trasero	680 kg.
	Masa en vacío	972 Kg.
	Peso bruto (peso en vacío + carga útil)	1395 Kg.
	Carga útil (pasajeros y carga)	423 kg.
	Volumen baúl	0.28 m ³ .
	Volumen baúl con asiento trasero plegado	0.68 m ³ .
Dimensiones Generales	Largo total	3.759 m
	Distancia entre ejes	2.443 m
	Dist rueda - parachoques delantero	0.750 m
	Dist rueda - parachoques trasero	0.566 m
	Vano Libre (vehículo con carga total)	0.111 m
	Anchura total	1.608 m

	Distancia horizontal entre ruedas	1.388 m
	Ancho Total	1.608 m
	Ancho espejo a espejo	1.768 m
	Alto total (sin carga)	1.42 m
	Alto total (cargado)	1.388 m
Frenos	Tipo: adelante atrás.	Discos tambores.
Llantas	Referencia	165/70R13
	Altura del neumático	0,12 m
	Radio de la llanta	0,17 m
	Radio total de la rueda	0,28 m
	Presión en neumático delanteros vehículo cargado	200 Kpa
	Presión en neumático traseros vehículo cargado	250 Kpa
Suspensión	Delantera, con barras estabilizadoras en ambos ejes	Independiente, McPherson con brazo transversal y tensor longitudinal.
Caja de Cambios	Mecánica	5 velocidades
Desempeño	– 0 100 Km/h	12.5 segundos
	Velocidad Máxima	173 Km/h
	Consumo	55.6 Km/gal

Fuente: Anexo 1 [14].

ANEXO 2: DISTRIBUCIÓN DE PESOS ALREDEDOR DEL CHEVROLET CORSA EN RELACIÓN A LA UBICACIÓN ESPACIAL DE LOS ELEMENTOS A INSTALAR

A continuación se muestra un esquema de los elementos asociados a cada módulo funcional a instalar en la conversión y que tiene una considerable contribución en el peso al vehículo [14].



Fuente: ilustración 33 [14].

Al eje delantero del vehículo se instalarán los siguientes elementos: El pack de baterías delantero y su refrigeración, la batería de accesorios o auxiliar, el controlador y su sistema de refrigeración sumado al inversor dc-dc y por último, el modulo motriz, conformado por el motor eléctrico, la caja mecánica de velocidades y el acople Clutch-caja-motor eléctrico. Por otro lado, cerca al eje trasero del vehículo se instalarán: El pack de baterías trasero, la llanta de repuesto, la caja de conexiones y el cargador de baterías.

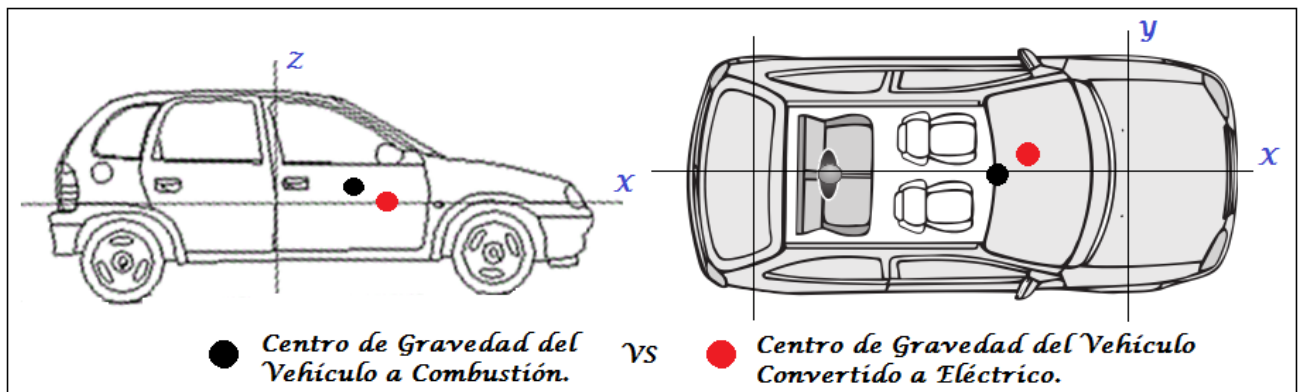
En el siguiente apartado se hace un detalle sobre las distancias entre componentes.

En la siguiente tabla se consolidan los pesos y dimensiones de cada uno de los elementos asociados a la conversión del vehículo.

ABREV.	DESCRIPCION	MEDIDAS (ANCHOxALTO xLARGO) [mm]	PESO [Kg]	DIST. A EJE C.G.I. EN X [mm]	ALTUR. RESPECT AL PISO [mm]	DIST. AL EJE CENTRAL (Y) [mm]
PBD	PACK DE BATERIAS DELANTERO	404 x 374 x 814	133	1226	407	144
BA	BATERIA AUXILIAR	170 x 190 x 278	10	1044	600	464
ME	MOTOR ELECTRICO + SOPORTES	228 x 241 x 457	55	1194	370	24
AM - CV	ACOPLE MOTRIZ + CAJA DE VELOCIDADES	404 x 400 x 410	47	1194	370	364
MC	MODULO DE CONTROL + SOPORTE	400 x 150 x 600	12	1205	500	430
PBT	PACK DE BATERIAS TRASERO	404 x 374 x 814	131	1337	450	198

Fuente: Tabla 32 [14].

Teniendo especificados los pesos de los elementos necesarios para la conversión, se hace el análisis del centro de gravedad del vehículo convertido, llegando a la conclusión, que el nuevo centro de gravedad es seguro, ya que el desplazamiento producido en los ejes longitudinal y transversal es despreciable [14].



Fuente: Ilustración 34 [14].

Es necesario evaluar, si el peso de: los motores comerciales seleccionados en este trabajo de grado, el pack de baterías seleccionado para el eje delantero, la batería de accesorios o auxiliar y el módulo de control, es soportado por la transmisión delantera, para ello se realiza el siguiente análisis.

Peso permisible en eje delantero = 770 kg

Peso aproximado en el eje delantero del Vehículo convertido

*= peso de dos motores Elaphe M700 + peso de pack de baterías
+ peso de batería auxiliar + peso de módulo de control*

Peso aproximado en el eje delantero del Vehículo convertido

*= peso de dos motores + peso de pack de baterías
+ peso de batería auxiliar + peso de módulo de control*

Peso aproximado en el eje delantero del Vehículo convertido

= 50,4 kg + 133 kg + 10 kg + 12 kg

Peso aproximado en el eje delantero del Vehículo convertido = 205 kg

Se puede concluir que el peso aproximado en el eje delantero del vehículo convertido es menor al peso máximo permisible en el eje delantero.