



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA
GUTIÉRREZ.



INGENIERÍA ELÉCTRICA

RESIDENCIA PROFESIONAL

“DISEÑO DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO”

EMPRESA

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL
I.P.N.

RESIDENTE

ESCOBEDO MAZARIEGOS ALDRIN OVIDIO

ASESOR INTERNO

DR. RAFAEL MOTA GRAJALES

ASESOR EXTERNO

DR. JUAN MANUEL RAMÍREZ ARREDONDO

TUXTLA GUTIÉRREZ, CHIAPAS, DICIEMBRE DE 2014.

Contenido

1. Introducción.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.2 Estado del Arte.....	4
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivo	5
1.5 Metodología; Diagrama a Bloques Hardware y Software	5
2. Fundamento Teórico	8
2.1 Vehículo Eléctrico con Accionamiento Trifásico	8
2.2 Configuraciones del Sistema de Propulsión de un Vehículo Eléctrico.....	11
2.3 Propulsión Eléctrica en Vehículos Eléctricos	16
2.4 Simulación de Motor Eléctrico de CA Usando Librería Electric Drives de MATLAB.....	22
3. Desarrollo	29
3.1 Subsistema de Almacenamiento de Energía	29
3.2 Subsistema Eléctrico.....	31
3.3 Subsistema Mecánico del Vehículo	33
3.4 Simulación del Vehículo Eléctrico	34
4. Resultados y Conclusiones	37
4.1 Simulación en Superficie Plana.....	37
4.2 Simulación de Conducción Cuesta Arriba.	41
4.3 Simulación de Conducción con Arranque Suave	44
4.4 Conclusiones	47
Referencias Bibliográficas.....	48

1. Introducción

1.1 Antecedentes

La preocupación medioambiental y el cambio climático han comprometido a las naciones a ser parte de las políticas de cuidado al medio ambiente. Un factor de preocupación es la dependencia de importar combustibles derivados del petróleo crudo, lo cual ha incrementado el precio del mismo. Por lo tanto, existe un interés por parte de los investigadores en el ámbito de vehículos, a desarrollar tecnologías que minimicen las emisiones de gases contaminantes.

El sector del transporte es uno de los contribuyentes para el calentamiento global. Una estimación aproximada del 20 % de las emisiones globales de dióxido de carbono son emitidas por el transporte. Se desarrollan nuevas tecnologías en el sector del transporte para ayudar a reducir las emisiones de dióxido de carbono y usar energía limpia para disminuir el calentamiento global.

Una de las soluciones que surgió en el sector del transporte para disminuir las emisiones, es lo que se conoce como vehículo eléctrico híbrido, el cual es una combinación entre motor de combustión interna y motor eléctrico. Debido a la variedad de tipo de vehículo y su uso, han existido diferentes tipos de sistemas híbridos de propulsión. Diferentes investigadores han desarrollado sistemas de control sofisticados para optimizar la distribución de energía en un sistema híbrido de propulsión.

El interés por cambiar el sistema de propulsión de los vehículos ha recibido una atención considerable. Así también se desarrollan tecnologías para hacer más eficientes los dispositivos de almacenamiento de energía, tales como las baterías, súper condensadores y las celdas de combustibles. En un sistema de propulsión tradicional, la máquina de combustión interna transmite la fuerza de propulsión hacia las ruedas mediante un diferencial mecánico.

Un vehículo eléctrico está basado en la propulsión de un motor eléctrico. El sistema de propulsión eléctrica es el corazón de la nueva generación de vehículos eléctricos. Consta del accionamiento por motor eléctrico, dispositivos de transmisión y las ruedas. El accionamiento por motor eléctrico lo conforma el convertidor de potencia y controlador electrónico, el cual es el sistema principal de funcionamiento del vehículo eléctrico.

En la mayoría de las aplicaciones de propulsión de vehículos eléctricos, un motor eléctrico de corriente alterna es conectado a las llantas por medio de un engranaje reductor de velocidad y un diferencial mecánico. La configuración se presenta para motores de alta velocidad y bajo torque. En algunos vehículos presentan configuraciones diferentes, motores de baja velocidad y alto par, son conectados directamente a las ruedas del vehículo.

1.2 Estado del Arte

Diferentes tipos de motores eléctricos han sido usados en la industria para múltiples propósitos; grúas, haciendo girar máquinas, transporte público, entre otros (Vindel David, 2011). Motores de AC en aplicaciones de vehículos eléctricos han ganado atención debido a la contaminación del medio ambiente y los precios del combustible. Las aplicaciones han sido objeto de estudio para diversos investigadores (Nerg, etal, 2012).

Se han realizado estudios comparativos entre los distintos motores eléctricos, con la finalidad de tener una perspectiva clara en la selección de los mismos para fines de tracción en vehículos eléctricos. Entre los diferentes tipos de accionamientos eléctricos, hay cuatro que son viables para los vehículos eléctricos; motores de CC, inducción, imanes permanentes y reluctancia conmutada (Chau, etal, 2008).

Una revisión del estado del arte y una comparación del desempeño de cuatro sistemas de propulsión eléctrica se han llevado a cabo; motor de CD, motor de inducción, motor de imanes permanentes y motor de reluctancia conmutada. El resultado del estudio comparativo, muestra que el motor de inducción cumple con los requisitos para la propulsión de un vehículo eléctrico (Zeraoulia, etal, 2006). De igual forma se han realizado estudios entre motores de imanes permanentes y motores de inducción con rotor de cobre (Goss, etal, 2013).

(Richard Folkson, 2014), presenta un capítulo de “Vehículos eléctricos puros” en el libro “Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance” en el cual discute tecnologías cruciales de vehículos eléctricos puros. En el libro discute sus configuraciones al adoptar diversos sistemas de almacenamiento de energía, sistemas eléctricos de propulsión y los sistemas de transmisión de la rueda.

Existen comercialmente vehículos eléctricos híbridos y vehículos eléctricos puros. Ejemplo de ello son el Toyota prius, Honda Insight, Chevrolet Volt, Nissan Leaf y varios vehículos de fabricantes como Renault, BMW, Mercedes Benz clase A E-cell (Boldea, etal, 2013). Todos los vehículos utilizan motores eléctricos de imanes permanentes debido a su alta densidad de torque.

Los modelos de vehículos eléctricos más comerciales utilizan a la máquina síncrona de imanes permanentes como fuente de tracción. Los modelos consultados son: Focus (Ford), Prius (Toyota), Leaf (Nissan) y Volt (Chevrolet) (Kar, etal, 2013). El sistema híbrido de propulsión del Toyota Prius ha sido base de estudio para diferentes investigadores. Con el uso de Simulink, SimPowerSystems y SimDriveline se ha simulado y demostrado la eficiencia del Toyota Prius (Sefik, Hiyama, 2011).

El primer vehículo eléctrico híbrido fue introducido al mercado por Toyota con su modelo prius. El vehículo ofrece al usuario la ventaja de conducir de su casa hacia la oficina de su trabajo, utilizando únicamente electricidad. Además, recargar las baterías del coche en la oficina mientras el usuario trabaja. De tal forma se tiene suficiente energía almacenada para conducir de regreso a su hogar (Hori, Yoichi, 2012). El sistema híbrido empleado en el Toyota prius consta de dos motores síncronos de imanes permanentes y un motor de

combustión interna, conectados por un conjunto de engranajes planetarios (James, etal, 2013).

Lo que aquí se propone como proyecto es el diseño y la simulación del sistema de accionamiento de un vehículo eléctrico, basado en un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes. El sistema de accionamiento del vehículo eléctrico se simulará con la ayuda del software Matlab-Simulink.

1.3 Justificación

El cambio climático global causado por el incremento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera es resultado de las actividades humanas. Las emisiones de CO₂ durante la combustión de combustibles fósiles son un contribuyente importante para los efectos negativos del clima. Los esfuerzos para estabilizar los niveles de CO₂ en la atmósfera deben ser considerados como prioridad en el sector del transporte.

La reducción de la dependencia de los combustibles fósiles y bajas emisiones de CO₂, son características conocidas y atractivas de los vehículos eléctricos, lo cual han permitido su penetración en el mercado. Diversos países del mundo han sido llamados a tomar conciencia y firmar tratados donde se comprometen a reducir las emisiones de efecto invernadero y buscar alternativas de combustibles.

La legislación de las emisiones de CO₂ a la atmósfera y los precios crecientes de combustibles fósiles, han obligado a los principales fabricantes de vehículos a investigar y confeccionar más tecnologías eficientes para la propulsión del vehículo. La fabricación de vehículos eléctricos puros y vehículos híbridos son considerados como solución para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

1.4 Objetivo

Diseñar y simular el sistema de accionamiento del vehículo eléctrico basado en un motor síncrono de imanes permanentes, utilizando Matlab/Simulink.

1.5 Metodología; Diagrama a Bloques Hardware y Software

a) Diagrama a Bloques del Hardware

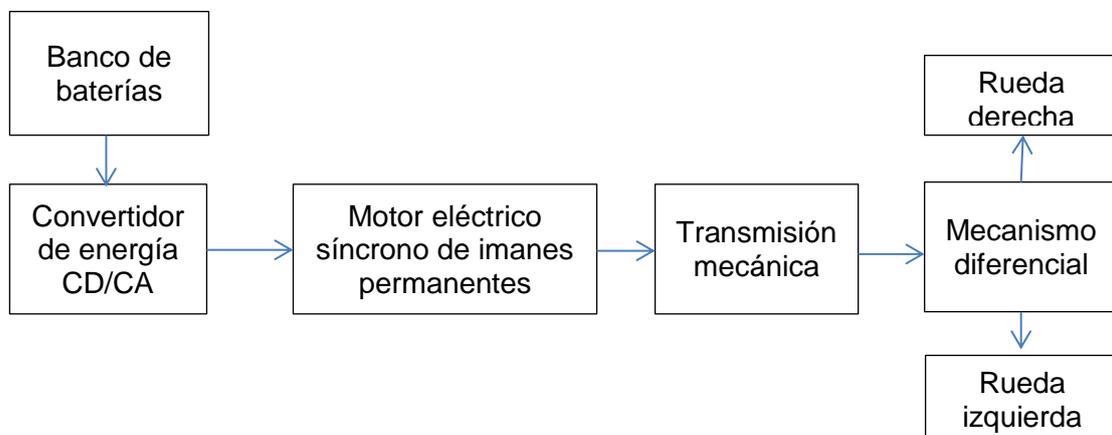


Fig. 1.1 Diagrama a bloques del hardware.

El sistema de accionamiento del vehículo eléctrico está compuesto por cinco bloques principales. El primer bloque es un banco de baterías Ion-Litio, la función de las baterías es almacenar la energía que le entrega el cargador de energía de la red pública en forma de corriente continua. Las baterías son el medio principal por el que se alimenta todo el vehículo eléctrico.

La segunda etapa está compuesta por un convertidor de energía de CD a CA. El objetivo del convertidor es invertir el voltaje de entrada de corriente continua que entrega el banco de baterías, a un voltaje trifásico de salida de corriente alterna con la magnitud y frecuencia apropiada para hacer funcionar al motor eléctrico.

La tercera etapa es un motor síncrono de imanes permanentes. De acuerdo a la dirección del flujo magnético de los imanes permanentes y a los conductores de corriente, los motores de imanes permanentes se clasifican como flujo radial, axial y lineal. Como unidad de propulsión se propone una máquina axial trifásica con una potencia nominal de 50 kW a 500 V de corriente alterna.

La cuarta etapa es un sistema de engranaje que está conectado mecánicamente con el motor eléctrico, esta etapa se utiliza para reducir la velocidad en rpm del motor y aumentar el par. El bloque de engranajes representa una caja de cambios sencilla que limita la velocidad del eje de salida con respecto al eje de entrada. La intención de reducir la velocidad del eje del motor es para conectarlo al diferencial mecánico y transmitir una velocidad acorde a la deseada en el vehículo.

La quinta etapa está compuesta por un mecanismo diferencial. En ese mecanismo se lleva a cabo el cambio de dirección de giro del eje de la caja de engranaje. Asimismo, el eje diferencial está mecánicamente unido a las ruedas traseras del vehículo, transfiriéndole de esa manera la energía de movimiento para hacer girar las ruedas e impulsar el vehículo.

El diferencial es el elemento mecánico que permite que la rueda derecha e izquierda del vehículo giren a velocidades diferentes, según se encuentre tomando una curva hacia un lado o hacia el otro. Cuando el vehículo toma una curva, por ejemplo hacia la derecha, la rueda derecha recorre un camino más corto que la rueda izquierda ya que la última se encuentra en la parte exterior de la curva.

b) Diagrama a bloques del software

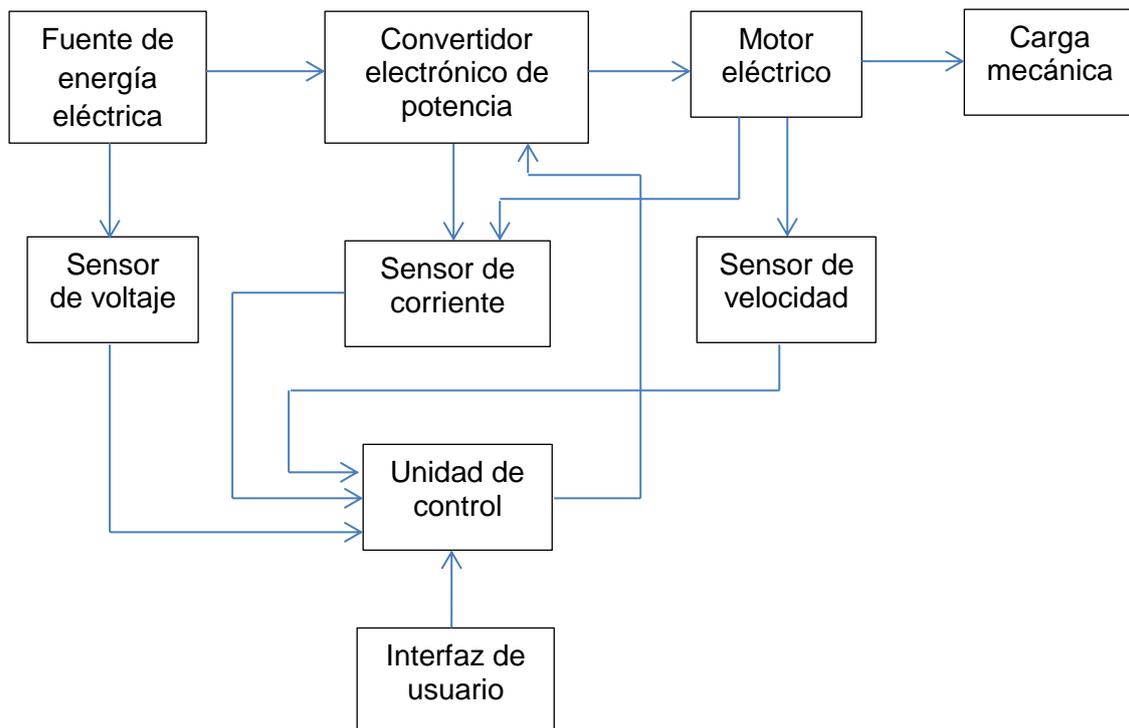


Fig. 1.2 Diagrama a bloques del software.

El motor eléctrico es alimentado por un voltaje y frecuencia de corriente alterna producida por el inversor. El inversor utilizado en este tipo de motor es un convertidor de fuente de tensión. El inversor es alimentado por una tensión de corriente directa (CD), esa tensión de CD es proporcionada por la fuente de energía eléctrica formada por un banco de baterías.

El inversor electrónico de potencia utilizado se basa en dos tipos de modulación, la modulación de histéresis y el espacio vectorial de modulación de ancho de pulso (PWM). El método de control utilizado es un método de realimentación de corriente, donde la corriente del motor sigue la corriente de referencia dentro de una banda de histéresis.

El usuario introduce a la unidad de control una velocidad de referencia deseada, la cual es equivalente a una corriente con magnitud y frecuencia. La corriente de referencia es comparada con la corriente de línea medida del motor. Si la corriente medida excede el límite superior de la banda de histéresis de la corriente de referencia, la corriente entregada por el inversor comienza a decaer y eso implica una desaceleración del motor.

Si la corriente medida cruza el límite inferior de la banda de histéresis de la corriente de referencia, la corriente entregada por el inversor se coloca de nuevo dentro de la banda de histéresis de referencia. Por lo tanto, la corriente real se ve obligada a realizar un seguimiento de la corriente de referencia dentro de la banda de histéresis, implicando un aumento en la velocidad del motor.

2. Fundamento Teórico

2.1 Vehículo Eléctrico con Accionamiento Trifásico

Un vehículo eléctrico (VE) es aquel que utiliza únicamente energía eléctrica para su propulsión. La energía eléctrica de la red pública es almacenada en baterías. Los accionamientos eléctricos convierten la energía eléctrica en movimiento mecánico.

Las baterías donde se almacena la energía tienen baja densidad de energía comparadas con los combustibles convencionales como gasolina o diesel. Un vehículo eléctrico autopropulsado tiene un esquema de funcionamiento como el que se observa en la figura 2.1. Las flechas representan la dirección en la que se transfiere la energía, pero puede variar dependiendo de la tecnología que se aplique.

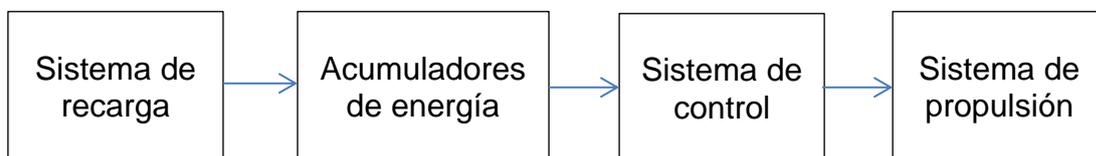


Fig. 2.1 Esquema general de tracción de un vehículo eléctrico.

2.1.1 Sistema de Acumuladores de Energía Eléctrica

El sistema de acumuladores permite almacenar la energía eléctrica que posteriormente será entregada al sistema de tracción, control y de servicios auxiliares. Existen varias tecnologías con las que se puede acumular energía para accionar un auto eléctrico, la tecnología más usada para aplicaciones móviles corresponden a los bancos de baterías. También se han hecho desarrollos con ultra-condensadores, volantes de inercia y celdas de hidrógeno.

Las baterías corresponden a dos o más celdas eléctricas conectadas, las cuales convierten energía química a energía eléctrica. Las celdas están construidas por la sustancia activa del polo negativo, el electrolito y las sustancias activas del polo positivo, figura 2.2. Las reacciones químicas entre los electrodos y el electrolito generan electricidad en corriente continua.

En el caso de acumuladores reversibles es posible revertir la reacción química al invertir el sentido de la corriente de la batería, por lo que es posible volver a cargar las baterías. De tal manera se puede tener una batería que se descarga al accionar el motor eléctrico del vehículo y volver a cargarla cuando se agote y tener nuevamente una batería recargada de energía.

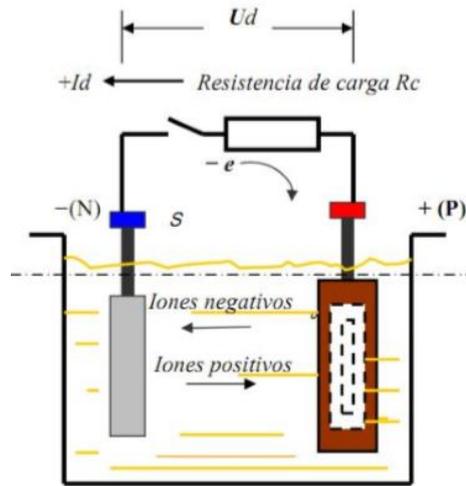


Fig. 2.2 Esquema simplificado de un acumulador reversible.

2.1.1.1 Baterías de Plomo Ácido

Las baterías de plomo ácido son usadas en automóviles eléctricos, montacargas, carros de golf, entre otros. También son usadas en los automóviles de combustión interna. Sin embargo para aplicaciones de tracción se necesitan baterías que soporten descargas profundas y para aumentar la robustez pueden usar un gel en vez de un electrolito líquido. Los parámetros más importantes de las baterías de plomo ácido se observan en la tabla 2.1.

Energía Específica	20-35 Wh/kg
Densidad Energética	54-95 Wh/L
Potencia Específica	~250 W/kg antes de que la eficiencia caiga
Tensión Nominal de Celda	2 V
Eficiencia de Carga	~80 % varía con el rango de descarga y temp.
Resistencia Interna	Muy baja, ~0.022 Ω para celda de 1Ah
Temperatura de Operación	Temperatura Ambiente, bajo desempeño en temperaturas extremadamente bajas
Número de Ciclos de Vida	Cerca de 800 al 80 % de la capacidad

Tabla 2.1 Parámetros de las baterías de plomo ácido.

Es importante mencionar que las baterías de plomo ácido corresponden a las más baratas por kWh, están establecidas comercialmente y tienen un buen respaldo. Sin embargo, tienen una baja energía especificada, lo que las hace malélicas para vehículos de alta autonomía.

2.1.1.2 Baterías de Níquel-Cadmio

Su desarrollo comenzó a finales del siglo XIX. Fue considerada como el competidor principal de las baterías de plomo ácido debido a que tiene una energía específica cercana al doble, pero su costo es aproximadamente el triple. Han sido usadas de forma exitosa en las versiones eléctricas de los

modelos Peugeot 106, Citroen AX, Renault Clío, Ford Think y Ranger. Las características de las baterías de Níquel-Cadmio se observan en la tabla 2.2.

Energía Específica	40-55 Wh/kg
Densidad Energética	70-90 Wh/L
Potencia Específica	~125 W/kg antes de que sea muy ineficiente
Tensión Nominal de Celda	1.2 V
Eficiencia de Carga	Buena
Resistencia Interna	Muy baja, ~0.06 Ω para celda de 1Ah
Temperatura de Operación	-40°C a +80°C
Número de Ciclos de Vida	Cerca de 1200 al 80 % de la capacidad

Tabla 2.2 *Parámetros de las baterías de Níquel-Cadmio.*

2.1.1.3 Baterías de Litio-Ion

Las celdas de litio recargables están disponibles en el mercado desde finales de los años 1980. Tienen una alta densidad energética, junto con un alto costo. Son usadas de forma masiva en aplicaciones portátiles como teléfonos celulares, notebooks, etc. Sus características son ideales para la alimentación energética de autos eléctricos, por lo que se consideran una solución para ellos. Sus parámetros se observan en la tabla 2.3.

Energía Específica	90 Wh/kg
Densidad Energética	153 Wh/L
Potencia Específica	300 W/kg antes de que la eficiencia caiga
Tensión Nominal de Celda	3.5 V
Eficiencia de Carga	Muy Buena
Resistencia Interna	Muy baja
Temperatura de Operación	Temperatura Ambiente
Número de Ciclos de Vida	Más de 1000

Tabla 2.3 *Parámetros de las baterías de Litio-Ion.*

2.1.2 Clasificación de Sistemas de Carga Para Autos Eléctricos.

Los sistemas de recarga para autos eléctricos son clasificados según la cantidad de kilo-Watts (kW) que se provee a las baterías. Los tiempos de carga varían dependiendo del estado de carga de la batería, de su energía especificada y del tipo de batería. El tiempo de carga puede ser de 30 minutos a 20 horas o más, dependiendo del tipo de carga usada.

Existen dos asociaciones que han realizado una clasificación formal de los tipos de carga: la SAE (Society of Automobile Engineers) con una importante influencia de Estados Unidos y Japón, y la IEC (International Electrotechnical Commission). Su clasificación es muy similar y se diferencia básicamente en los niveles de tensión que utiliza y la incorporación de cargadores trifásicos por parte de la IEC. A continuación se presentan los tipos de carga que clasifica la SAE.

Cargadores de Nivel 1: Los equipamientos de nivel 1 cargan a través de la toma de corriente alterna monofásica de 120 V (hasta 15 A y 1.8 kW) y requiere un circuito dedicado. El tipo de cargador nivel 1 es portable y no requiere la instalación de un equipo de carga. En un extremo del cable existe una toma de corriente estándar doméstica y en el otro extremo un conector que al vehículo.

El cargador de nivel 1 funciona bien para la carga en casa, trabajo o donde exista una toma de 120 V. dependiendo del tipo de batería la carga puede durar de ocho a 20 horas para alcanzar la carga completa, añadiendo de 7 a 9 kilómetros de autonomía por hora de carga dependiendo del vehículo.

Cargadores de Nivel 2: Se realiza la carga a 240 V en corriente alterna y requiere la instalación de equipamientos para cargadores en casa o instalaciones públicas. La opción de nivel 2 puede operar hasta 80 A y 19.2 kW. Aun así en redes domiciliarias opera a una potencia menor. En la mayoría de esos casos se opera a 30 A.

La mayoría de los hogares en Norteamérica tienen un sistema disponible de 240 V y debido a que el sistema puede cargar un banco de baterías en la noche, será una instalación común en los hogares. El equipamiento ocupa el mismo conector que el nivel 1. Dependiendo del tipo de batería y la capacidad del circuito, un auto eléctrico puede ser cargado entre 3 y 8 horas, añadiendo cerca de 30 km de autonomía por hora de carga dependiendo del vehículo.

Cargadores de Nivel 3: Aún no ha sido implementado y corresponde a una opción de carga en corriente alterna más rápida. Operará a una tensión y corriente mayor que el nivel 2 y será instalado en lugares públicos. El tipo de carga se realizara en menos de 30 minutos obteniendo una carga rápida comparada con los niveles anteriores.

Carga rápida DC: Los equipamientos de carga rápida en corriente continua (480 V) provee hasta 62.5 kW a las baterías. La opción permite la carga en estaciones de servicio público, el tiempo de carga es menor a los 30 minutos para cargar la batería hasta el 80% de la carga

Conectores: Los equipamientos de carga y los vehículos no tienen un conector y un enchufe estándar. La mayoría de los fabricantes actuales siguen el estándar SAE J1772 para carga lenta (nivel 1 y 2). El conector para carga rápida DC aún no ha sido estandarizado. La mayoría de los vehículos eléctricos usan el conector y empalme de la Tokyo Electric Power Company (TEPCO) que corresponde al estándar para la industria japonesa. En el corto plazo, debido a la definición de la ACEA (European Automobile Manufacturers Association) de usar un distinto estándar (conector Mennekes para carga lenta y conector combo para carga rápida) se espera la presencia de distintos conectores de carga para los vehículos eléctricos provenientes de Europa.

2.2 Configuraciones del Sistema de Propulsión de un Vehículo Eléctrico

La configuración de un vehículo eléctrico consiste en tres subsistemas principales: almacenamiento de energía, propulsión eléctrica y auxiliar. La propulsión eléctrica comprende el controlador electrónico, convertidor electrónico, motor eléctrico, transmisión mecánica y las ruedas. El

almacenamiento de energía implica el dispositivo de almacenamiento de energía, unidades de medida de energía y unidad de cargador.

El auxiliar consiste en la unidad de control de temperatura y alimentador de potencia auxiliar. El enlace eléctrico es representado por flechas gruesas y el enlace de control por flechas delgadas. Basado en las entradas de control de los pedales de freno y acelerador, el controlador electrónico provee señales de control apropiadas para conmutar encendido o apagado del mecanismo de potencia del convertidor electrónico. La función del convertidor es regular el flujo de potencia entre el motor eléctrico y el almacenamiento de energía.

La unidad de administración de energía coopera con el controlador electrónico para controlar el frenado regenerativo y la recuperación de la energía. También trabaja con la unidad de carga para controlar la carga y monitorear el dispositivo de almacenamiento de energía. El suministro auxiliar de energía provee el poder necesario para diferentes niveles de voltaje de todos los auxiliares del vehículo eléctrico, especialmente las unidades de control de temperatura. La figura 2.3 ilustra una configuración general de un vehículo eléctrico.

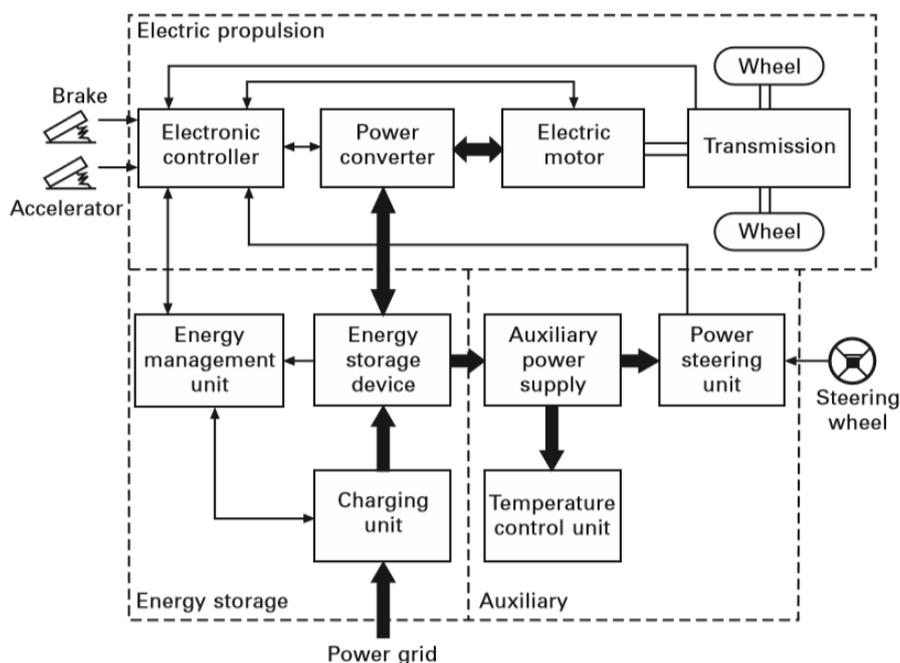


Fig. 2.3 Configuración general de un sistema de vehículo eléctrico.

2.2.1 Configuraciones en el Almacenamiento de la Energía

La figura 2.4 muestra diversas configuraciones del sistema de un vehículo eléctrico debido a los acomodamientos de almacenamiento de energía, donde B es la batería, C el ultra-capacitor, F el volante de inercia y P el convertidor de potencia. Entre ellos, la fuente de señal accionada por la batería mostrada en la configuración de la figura 2.4(a) es adoptado por vehículos eléctricos existentes.

La batería puede ser distribuida alrededor del vehículo, junto en un paquete, en la parte trasera del vehículo o bajo el chasis del vehículo. Las baterías deben ofrecer energía específica razonable y también deben poder aceptar energía regenerativa durante el frenado. En lugar de usar un solo diseño de batería, dos baterías diferentes (una es optimizada para la alta energía, mientras otra para la alta potencia) pueden ser usadas simultáneamente en un vehículo eléctrico.

Como se muestra en la figura 2.4 (b), esa configuración no sólo desacopla los requerimientos en la energía y potencia. También permite una oportunidad para usar las baterías recargables que no pueden aceptar energía regenerativa durante el frenado o en una pendiente cuesta abajo.

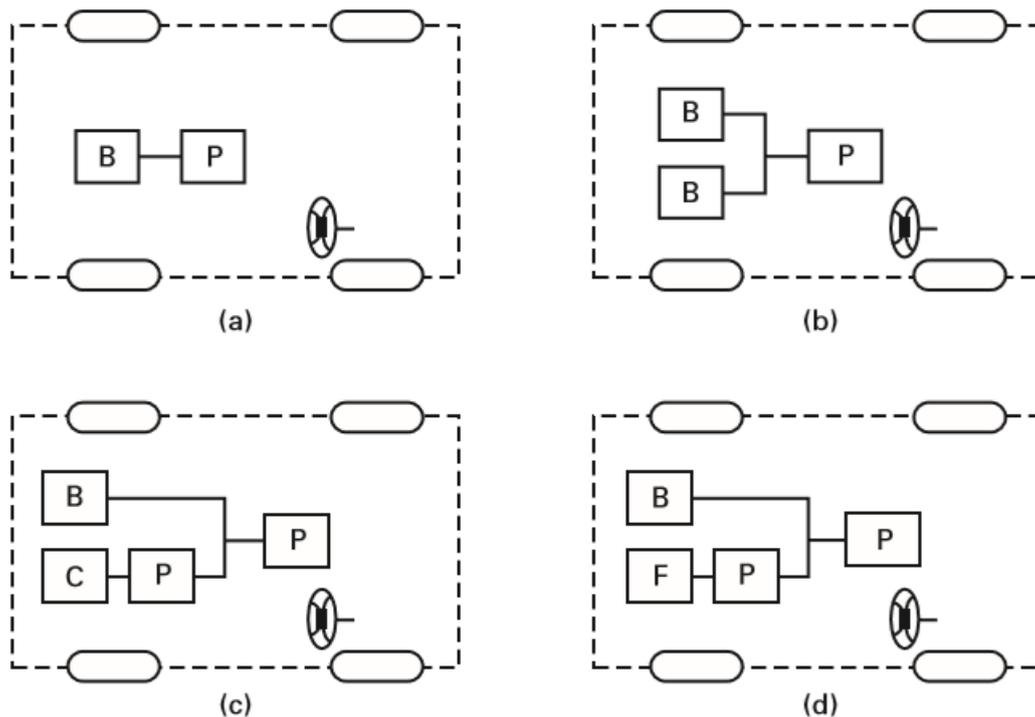


Fig. 2.4 Configuraciones de vehículos eléctricos debido a variaciones en almacenamiento de energía (a) únicamente batería, (b) dos baterías diferentes, (c) batería y ultra-capacitor y (d) batería y volante de inercia.

Por la característica de energía específica muy baja, el ultra-capacitor tiene que operar conjuntamente con la batería para el vehículo eléctrico. Como se muestra en la figura 2.4 (c), la batería es propuesta para tener energía específica alta mientras el ultra-capacitor le ofrece alta potencia específica. Desde que el nivel de voltaje del ultra-capacitor es relativamente bajo, un adicional convertidor de potencia DC-DC es necesario para interactuar entre la batería y las terminales del ultra-capacitor.

El volante de inercia de alta velocidad es un dispositivo emergente de almacenamiento de energía que ofrece alto poder específico y alta receptividad de energía. La correspondiente configuración se presenta en la figura 2.4 (d), en la cual la batería se selecciona para ofrecer alta energía específica. Desde

que el volante está acoplado con una máquina de corriente alterna para la conversión electromecánica de energía, un convertidor adicional AC-DC es necesario para interactuar entre la batería y la terminal del volante de inercia.

2.2.2 Configuraciones en la Propulsión Eléctrica

La figura 2.5 ilustra dos configuraciones de sistemas de vehículos eléctricos debido a los diferentes arreglos de propulsión eléctrica, donde D es el engrane diferencial, G el engrane fijo y M el motor eléctrico. La configuración de motor individual mostrado en la figura 2.5 (a) es tomado en cuenta en los vehículos existentes, reemplazando la caja de cambios variable con engranajes fijos y por lo tanto quitando el embrague.

El vehículo eléctrico no necesita utilizar el engranaje variable, por lo tanto reduce significativamente la complejidad total, tamaño, peso y costo de la caja de cambios. La configuración transversal mostrada en el motor individual de la figura 2.5 (b) toma las ventajas de tener forma más compacta y mayor eficiencias que su contraparte longitudinal.

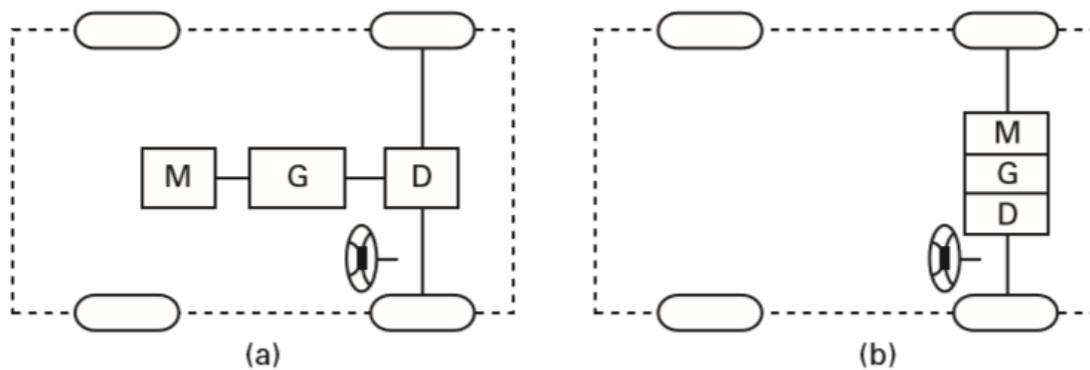


Fig. 2.5 Configuraciones de vehículos eléctricos debido a los diferentes arreglos de la propulsión eléctrica (a) arreglo longitudinal y (b) arreglo transversal.

El diferencial es un componente normalizado para vehículos convencionales y puede ser llevada a cabo en vehículos eléctricos. Cuando un vehículo toma una carretera curvada, la rueda exterior necesita viajar en un radio mayor que la rueda interior. Así, el diferencial ajusta las velocidades relativas de las ruedas; de otra manera las ruedas se resbalarían.

La figura 2.6 muestra el principio del diferencial mecánico conducido por un motor eléctrico (M), en el cual el engrane diferencial (D) puede permitir el cambio de dirección del engranaje a diferentes velocidades de giro. El diferencial no es únicamente voluminoso y pesado, sino que también complicado. Para vehículos eléctricos es posible despreciar el diferencial mecánico.

Otra configuración es acoplar dos motores eléctrico para la conducción de las ruedas, la velocidad de cada rueda puede ser controlada independientemente

de tal manera que la acción diferencial sea electrónicamente lograda. La figura 2.6 (b) muestra el principio de un diferencial electrónico en el cual dos motores eléctricos son empleados. El acomodo de los motores elimina el diferencial mecánico, por lo tanto reduce el tamaño y peso.

El uso de un motor individual con un diferencial mecánico o dos motores con diferencial electrónico es todavía controversial. Positivamente la eliminación de un diferencial mecánico puede reducir el tamaño total y peso, mientras el diferencial electrónico puede controlar la velocidad de la rueda con exactitud, así como conseguir mejor desempeño. Negativamente el uso de un motor adicional y un convertidor de potencia incrementan el costo inicial.

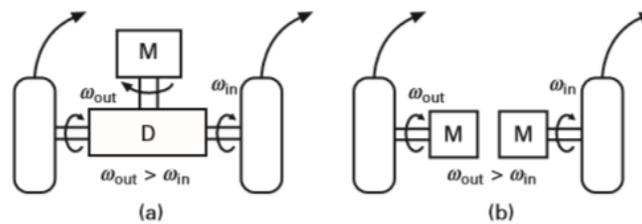


Fig. 2.6 Configuración de vehículo eléctrico debido a la variación en propulsión eléctrica diferencial (a) diferencial mecánico y (b) diferencial electrónico.

2.2.3 Configuraciones de Transmisión en la Rueda

Para fomentar el camino corto de la transmisión mecánica del motor eléctrico hacia las ruedas, el motor eléctrico puede estar posado dentro de la rueda. La configuración es llamada motor en la rueda. La figura 2.7 (a) muestra los dos motores engranados en la rueda, en el cual es empleado un engranaje para reducir la velocidad del motor y obtener velocidad deseada en la rueda.

Para abandonar completamente el engranaje mecánico, la configuración puede ser realizada por la instalación de un motor eléctrico con rotor exterior de baja velocidad dentro de la rueda. La figura 2.7 (b) presenta dos motores acoplados en la rueda, configuración en la cual el rotor es directamente montado en la llanta. Así, el control de velocidad del motor eléctrico es equivalente al control de velocidad de la rueda y, por lo tanto, la del vehículo.

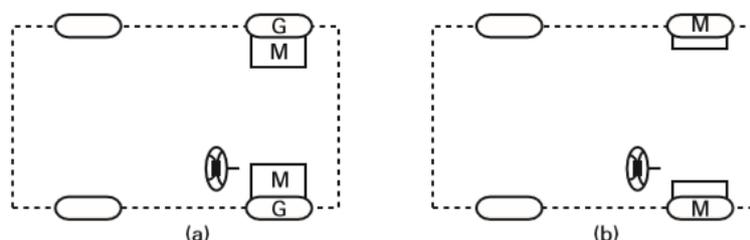


Fig. 2.7 Configuraciones de vehículo eléctrico debido a variaciones de transmisión en la rueda (a) transmisión de dos motores con engranaje y (b) transmisión de dos motores sin engranaje.

Para la configuración de engranado en la rueda, el motor de rotor interior de alta velocidad es directamente acoplado con el engranaje planetario reductor

de alta velocidad. El engranaje es montado entre el eje del motor y la rueda, como se muestra en la figura 2.8 (a). Típicamente el motor es diseñado para operar sobre los 10 000 rpm a fin de dar una densidad alta de poder. Así, la correspondiente relación del engranaje planetario es de 10:1 para proveer la velocidad de la rueda extendiéndose de cero hasta 1000 rpm.

Inevitablemente el uso de un engranaje mecánico para reducir la velocidad involucra pérdidas en transmisión, problemas de desgaste y lubricación regular. La figura 2.8 (b) bosqueja el motor de rotor exterior de baja velocidad para la configuración de engranaje en la rueda. El motor tiene la ventaja definitiva de simplicidad, por lo tanto ofrece alta eficiencia de transmisión y libre de mantenimiento. Por el requisito de rotación de baja velocidad de la rueda, menos de 1000 rpm, el motor eléctrico debe adoptarse al diseño.

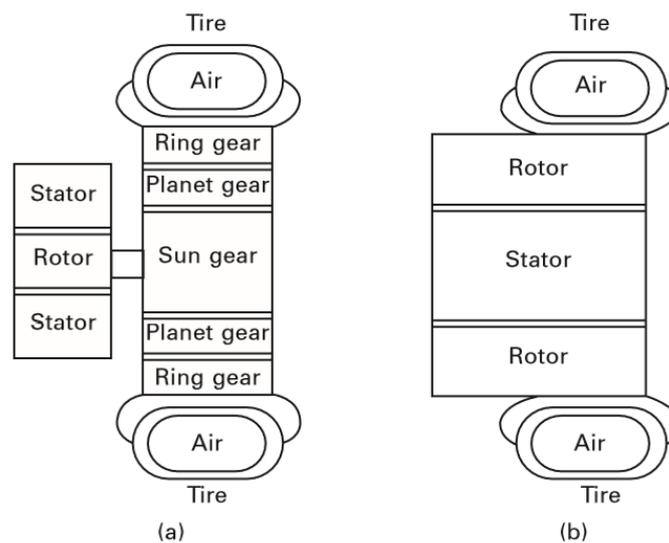


Fig. 2.8 Topologías de motor en la rueda (a) topología de rotor interior de alta velocidad y (b) topología de rotor exterior de baja velocidad.

2.3 Propulsión Eléctrica en Vehículos Eléctricos

Los accionamientos eléctricos que han sido desarrollados para aplicaciones industriales son diferentes para la propulsión en vehículos eléctrica. En efecto, los motores de vehículos eléctricos necesitan ofrecer alto torque y densidad de potencia, alta eficiencia de torque y de velocidad, buena controlabilidad, alta fiabilidad y libre de mantenimiento.

2.3.1 Motores de Vehículos Eléctricos Existentes

Entre varias topologías de máquinas eléctricas, cuatro de ellas han sido adoptadas para aplicaciones en vehículos eléctricos: motor eléctrico de corriente directa DC, motor de inducción, motor de reluctancia conmutada (SR) y motor de imanes permanentes sin escobillas.

2.3.1.1 Motores de Corriente Directa

Motores de corriente directa son aceptados para usar en vehículos eléctricos. Están determinados por la interconexión mutua entre el devanado de campo y el devanado de armadura o el uso de excitación con imanes permanentes. Los tipos de excitación separada pertenecen a la familia de CD en derivación, CD en serie y CD con imanes permanentes. La topología de un motor de corriente directa se ilustra en la figura 2.9.

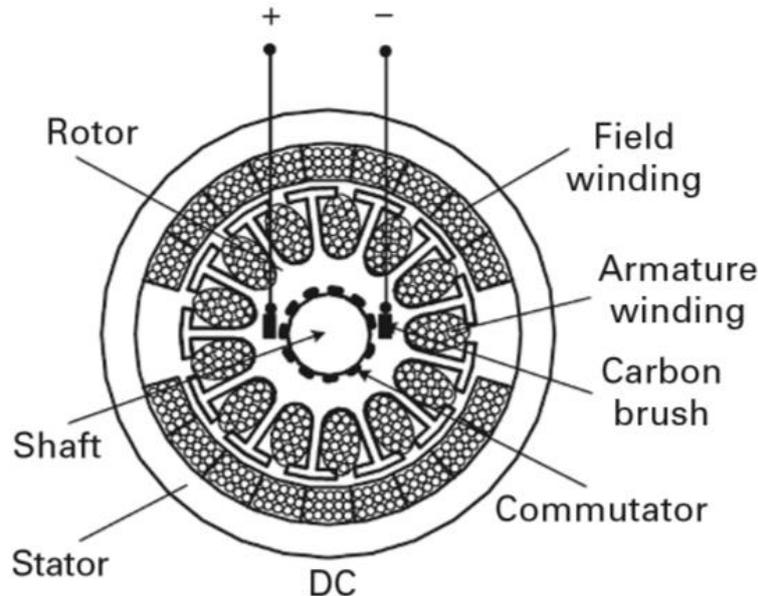


Fig. 2.9 Motor de corriente directa.

Las unidades de CD sufren de un problema debido al uso de conmutadores y escobillas. Los conmutadores causan ondas de fuerza de torsión y limitan la velocidad del motor, mientras las escobillas son las responsables de la fricción e interferencia de radiofrecuencia. Además, debido al deterioro, el mantenimiento periódico de conmutadores y escobillas es requerido todo el tiempo en que se encuentre operando la máquina.

2.3.1.2 Motor de inducción

En la actualidad, motores de inducción son la tecnología madura ente varios motores libres de mantenimiento. Hay dos tipos de motores de inducción, el rotor bobinado y el rotor de jaula. Debido al alto costo, necesidad de mantenimiento y la falta de robustez, el motor de inducción de rotor bobinado es menos atractivo que la contraparte rotor de jaula. El motor de inducción con rotor de jaula posee la ventaja definitiva de tener bajo costo y buena robustez.

El control de velocidad del motor de inducción es más complicado que el motor de corriente directa, a causa de la no linealidad del modelo dinámico con acoplamiento entre el eje directo y cuadratura. Se han desarrollado para la propulsión eléctrica dos operaciones de control representativas, es decir el control de voltaje variable y frecuencia variable y el control de orientación de campo, son llamados también control vectorial o control de desacoplamiento. La figura 2.10 muestra la topología de un motor de inducción.

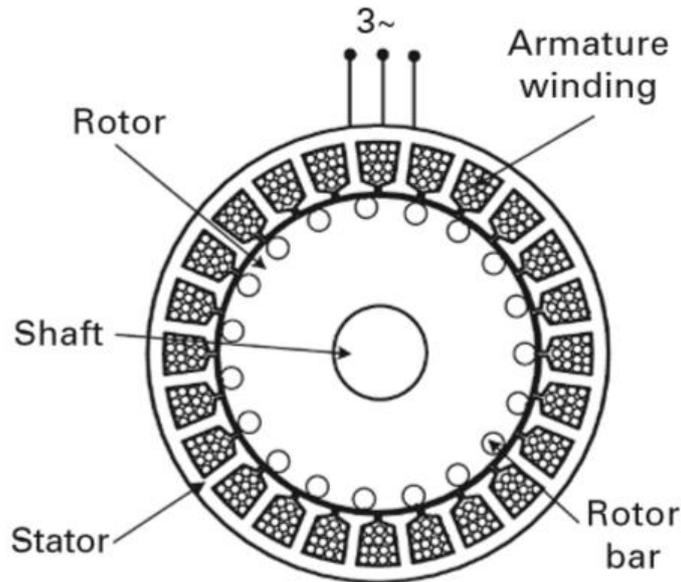


Fig. 2.10 Motor de inducción.

La estrategia de control de voltaje variable y frecuencia variable está basada en el control de las constantes voltaje/frecuencia para frecuencias por debajo de la nominal. Por otro lado el control de frecuencia variable con la tensión nominal constante es para las frecuencias por encima de la nominal. Debido a la desventaja derivada por el flujo del entrehierro y una respuesta lenta, el control de voltaje y frecuencia variable no es adecuado para la operación de vehículos eléctricos de alto rendimiento.

El control orientado de campo permite al motor de inducción ser controlado de igual manera que el de corriente directa con excitación por separado. Mediante el uso de la transformación de coordenadas, el torque puede ser efectivamente controlado para ofrecer la respuesta transitoria rápida deseada. Con la llegada de potentes micro-controladores de bajo costo, el motor de inducción basado en orientación de campo ha sido adoptado para los vehículos eléctricos modernos.

2.3.1.3 Motor de Reluctancia Conmutada

Motores de reluctancia conmutada han sido reconocidos por tener un potencial considerable para los vehículos eléctricos. Ofrecen las ventajas claras de construcción sencilla, bajo costo de fabricación, sobresaliendo las características de velocidad y torque.

La correspondiente dirección de fuerza es independiente de la polaridad de la corriente de fase. Sin embargo, la fuerza de torsión puede ser producida únicamente en la mitad del paso polar del rotor, creando ondas grandes de fuerza de torsión. Debido a la saturación del tipo de polo y el efecto que le pone un fleco en las ranuras del polo, usualmente exhiben problemas de ruido acústico. La figura 2.11 ilustra la topología de un motor de reluctancia conmutada.

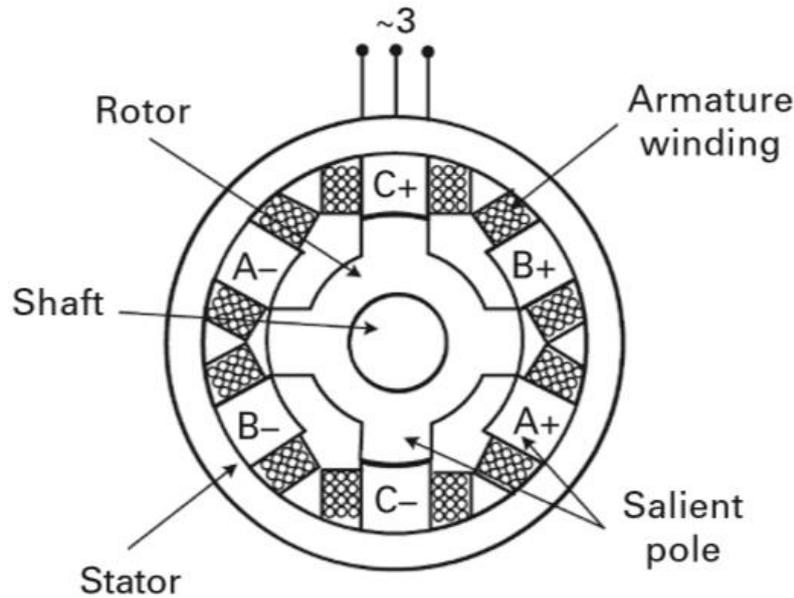


Fig. 2.11 Motor de reluctancia conmutada.

El motor de reluctancia conmutada tiene básicamente dos modos de operación. Cuando la velocidad de rotación está por debajo de la velocidad de base, la corriente está limitada por un cortador (llamado así, control de corte de corriente (CCC)). En el modo CCC, el torque es controlado cambiando los límites de la corriente.

Durante la operación de alta velocidad el pico de corriente está limitado por la fuerza electromotriz del devanado de fase. La característica correspondiente de potencia es esencialmente controlada poniendo en fase de conmutación los instantes relativos a la posición del rotor (llamado control de posición angular (APC)). En el modo APC se logra conseguir la característica de potencia constante.

2.3.1.4 Motor de Imanes Permanentes sin Escobillas

Motores de imanes permanentes sin escobillas son cada vez más atractivos para vehículos eléctricos. Desde que el campo magnético es excitado por imanes permanentes de alta energía, el volumen y el peso total son reducidos significativamente, dando lugar a altas densidades de par y potencia. Debido a la ausencia de pérdidas en el cobre del rotor, La eficiencia del motor es alta, la curva característica de torque-velocidad se muestran en la figura 2.12.

Dado que las pérdidas por calor surgen principalmente en el estator, puede ser disipado más fácilmente a los alrededores. Sin embargo, los motores de imanes permanentes sin escobillas adolecen de los inconvenientes del alto costo relativo del material de los imanes permanentes y presentan un flujo de campo magnético permanente incontrolable. Una topología de motor de imanes permanentes sin escobillas se ilustra en la figura 2.13.

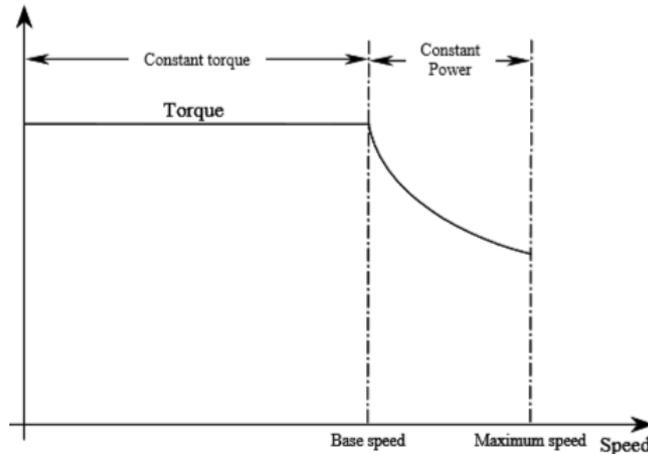


Fig. 2.12 Características de torque-velocidad de un motor de imanes permanentes.

Basado en las formas de onda de alimentación en los bornes del motor, los motores de imanes permanentes sin escobillas son divididos en dos tipos principales, los motores de imanes permanentes sin escobillas de corriente alterna (BLAC) y motores de imanes permanentes sin escobillas de corriente continua (BLDC). Los motores de imanes permanentes BLAC son alimentados por corriente alterna sinusoidal, mientras que los motores de imanes permanentes BLDC son alimentados por corriente alterna rectangular.

El motor BLAC es usualmente llamado motor síncrono de imanes permanentes. Dado que la interacción entre el campo trapezoidal y la corriente rectangular, produce un producto más alto de la fuerza de torsión que la producida por el campo sinusoidal y la corriente sinusoidal, el motor BLDC posee densidad de par y potencia más elevada que el motor síncrono de imanes permanentes. El motor BLDC tiene un significativo par de pulsación, mientras que el motor síncrono de imanes permanentes produce un par instantáneo esencialmente constante, llamado fuerza de torsión suave.

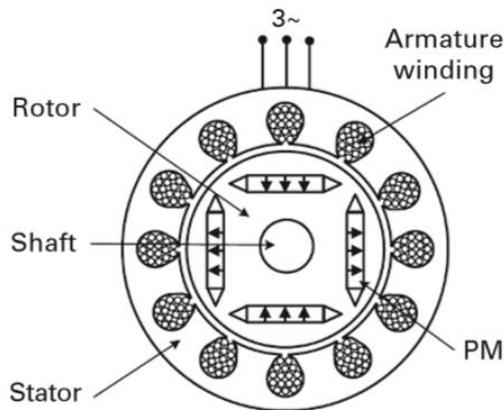


Fig. 2.13 Motor de imanes permanentes sin escobillas.

Para el motor síncrono de imanes permanentes que opera con corriente sinusoidal y flujo sinusoidal en el entrehierro, la operación de control correspondiente es similar a la del motor de inducción. Para el motor BLDC las formas de onda de operación ya no son sinusoidales, de modo que la

transformación eje dq es poco adecuado. En la ausencia de transformación de eje dq, la operación se basa en el control de ángulo de conducción.

2.3.2 Comparación de los Motores Existentes en Vehículos Eléctricos

A fin de evaluar los motores eléctricos para aplicaciones en vehículo eléctricos, son comparados en términos de sus requisitos de densidad de potencia, eficiencia, controlabilidad, fiabilidad, madurez, nivel de costo, nivel de ruido y el mantenimiento. Un sistema de puntos de calificación (1 a 5 puntos) es usado en el cual 1 es el peor y 5 es el mejor.

En la tabla 2.4 se indica que el problema de la unidad de corriente directa es la necesidad de un mantenimiento regular, mientras que el inconveniente fundamental del motor de reluctancia conmutada es el alto ruido acústico. Por otro lado, el mérito clave del motor de inducción es el bajo costo, mientras que las ventajas principales del motor de imanes permanentes sin escobillas son la alta densidad de potencia y alta eficiencia.

	DC	Induction	SR	PM Syn	PM BLDC
Power density	2	3	3.5	4.5	5
Efficiency	2	3	3.5	4.5	5
Controllability	5	4	3	4	4
Reliability	3	5	5	4	4
Maturity	5	5	4	5	4
Cost level	4	5	4	3	3
Noise level	3	5	2	5	5
Maintenance	1	5	5	5	5
Total	25	35	30	35	35

Note: A point grading system (1 to 5 points) is used in which 1 is the worst and 5 is the best.

Tabla 2.4 Evaluación de motores existentes en vehículos eléctrico.

Las evaluaciones indican que el motor de corriente directa es poco atractivo, mientras que el motor de inducción y motor sin escobillas de imanes permanentes son los más atractivos. Entre los dos tipos de motores de imanes permanentes sin escobillas, el motor de imanes permanentes de corriente directa BLDC ofrece un mejor rendimiento que el motor síncrono de imanes permanentes.

En la tabla 2.5 se resumen las aplicaciones de los motores eléctricos existentes para vehículos eléctricos. Para el motor de corriente directa, la aplicación es obsoleta o se limita a la simplicidad frente a la versión de los demás aspirantes. Para el motor de reluctancia conmutada las aplicaciones son raras. En la actualidad, las aplicaciones de motores de inducción y motores síncronos de imanes permanentes en vehículos eléctricos comparten por igual el mercado.

Drive types	Car models
DC SR	Fiat Panda Elettra, Citroën Berlingo Electrique, Reva G-Wiz DC Chloride Lucas
Induction PM Syn	GM EV1, BMW Mini E, Tesla Roadster, Reva G-Wiz i Nissan Leaf, Mitsubishi i-MiEV, Ford Focus Electric, Citroën C-Zero, Peugeot iOn, BYD e6
PM BLDC	Smart Fortwo ED

Tabla 2.5 Aplicaciones de motores existentes en vehículos eléctricos.

Cada vez es mayor la preocupación por la protección del medio ambiente y por lo tanto la demanda de alta eficiencia energética. Se prevé que el motor de inducción se ira retirando paulatinamente, mientras que el motor de imanes permanentes sin escobillas de corriente directa BLDC se ira introduciendo paulatinamente. En la actualidad los motores usados en vehículos eléctricos tienen un rango correspondiente de potencia de salida pico de 13 kW a 225 kW, dependiendo del peso y rendimiento del vehículo.

2.4 Simulación de Motor Eléctrico de CA Usando Librería Electric Drives de MATLAB.

Se aprenderá a usar los motores de CA de la librería *Electric Drives* de Matlab. Primero se especifican los tipos de motores, convertidores y controladores usados en los seis modelos de motores de CA de la librería designados AC1 a AC6. Los modelos AC1, AC2, AC3 y AC4 son basados en el motor de inducción trifásico. Dicho motor tiene un devanado trifásico en el estator y un rotor devanado o un rotor jaula de ardilla.

El modelo AC5 es basado en un motor síncrono con rotor devanado y el modelo de motor AC6 usa imanes permanentes. El modelo de los tres tipos de motores están disponibles en la librería "Machines". Los motores AC son alimentados por un voltaje de corriente alterna y frecuencia producida por un inversor. El inversor usado en los seis tipos de motores es un inversor de fuente de voltaje (VSI) que es alimentado por una constante de voltaje de CD.

2.4.1 Frenado dinámico

Cuando el bus de CD es proveniente de un diodo rectificador, el inversor no tiene la capacidad de un flujo de potencia bidireccional y por eso no puede usarse en frenado regenerativo. En los modelos AC1, AC2, AC3, AC4 y AC6, un reóstato en serie con un chopper asegura el frenado de la carga del sistema del motor. El esquema de frenado es llamado freno dinámico y es colocado en paralelo con un bus de CD para prevenir los voltajes crecientes cuando el motor desacelera. Con el frenado dinámico, la energía cinética del sistema de carga del motor es convertida en calor, que se disipa en la resistencia del frenado.

2.4.2 Técnicas de modulación

El inversor de fuente de voltaje usado en los modelos de motor de CA de la librería es basado en dos tipos de modulación, modulación de histéresis y modulación de ancho de pulso (PWM). La modulación de histéresis es un método de control de retroalimentación de la corriente. Donde la corriente del motor toma de referencia a la corriente dentro de la banda de histéresis. La figura 2.14 muestra la operación principal de la modulación de histéresis.

El controlador genera la corriente de referencia deseada sinusoidal de magnitud y frecuencia que es comparada con la corriente de línea actual del motor. Si la corriente excede el límite superior de la banda de histéresis, el interruptor superior del inversor es apagado y el interruptor inferior es encendido. Como resultado, la corriente de entrada decrece.

Si la corriente cruza el límite inferior de la banda de histéresis, el interruptor inferior del negador del inversor es apagado y el interruptor superior es encendido. Como resultado de la conmutación, la corriente se regresa a la histéresis de banda, por lo tanto la corriente real se ve forzada a rastrear la corriente de referencia dentro de la banda de histéresis

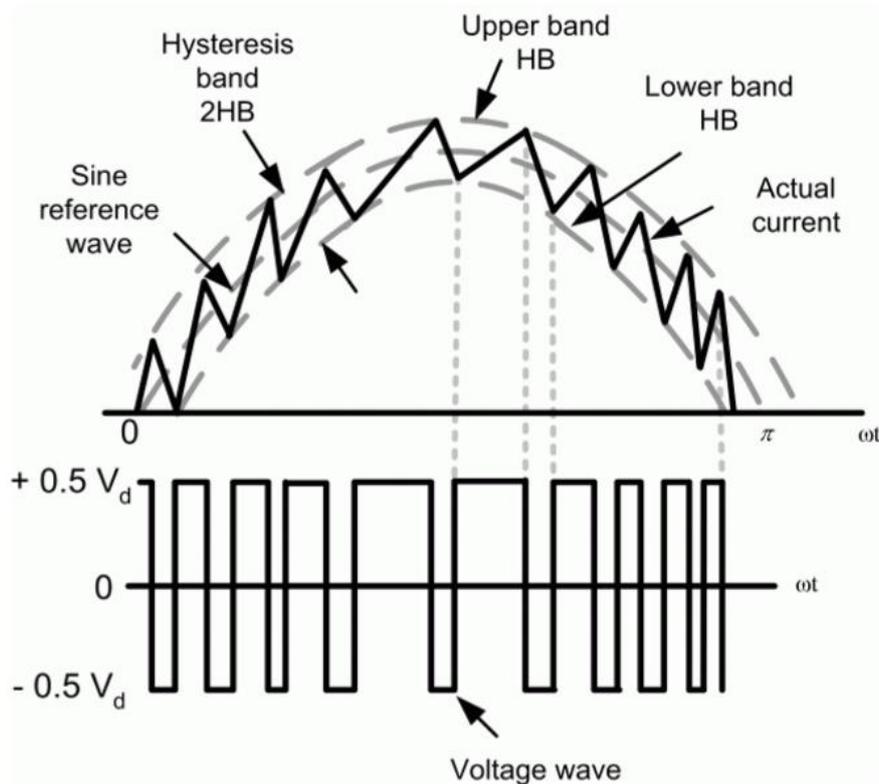


Fig. 2.14 Principio de operación de modulación por histéresis.

La figura 2.15 muestra un esquema de control de corriente por histéresis, consistente en tres comparadores de histéresis, uno por cada fase. El tipo de lazo cerrado PWM es usado en AC3 y AC5 de los modelos de la librería *electric drives*.

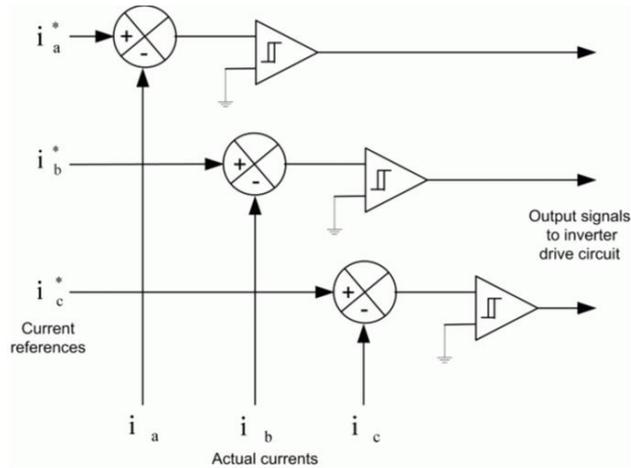


Fig. 2.15 Controlador de corriente de histéresis típico.

La técnica de modulación de espacio vectorial es diferente a la modulación de histéresis; no hay comparadores separados destinados para el uso en cada una de las tres fases. En su lugar un espacio vectorial de voltaje de referencia V_s es producido como un todo, probado a una frecuencia fija. Un diagrama simplificado de un inversor de fuente de voltaje es mostrado en la figura 2.16, la conducción de estado de las tres etapas del inversor es representado por tres variables lógicas SA, SB y SC.

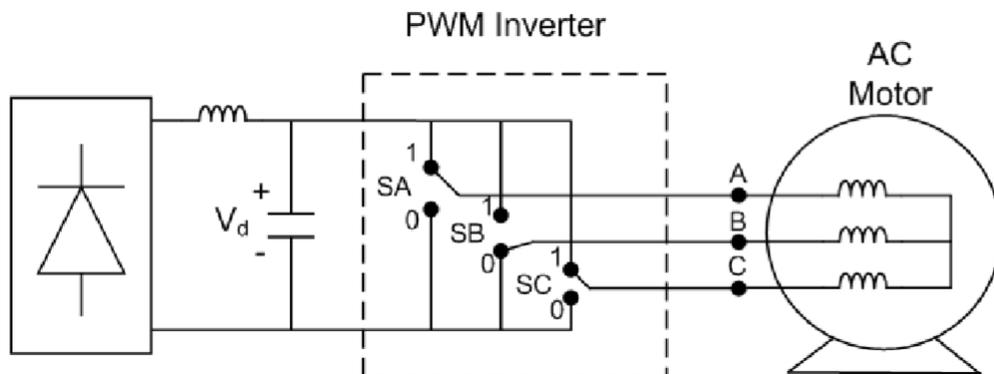


Fig. 2.16 Diagrama simplificado de un inversor de fuente de voltaje.

La conmutación de SA, SB, SC resulta en ocho estados del inversor. La conmutación de estado y el correspondiente voltaje de fase a neutro son resumidos en el vector de espacio de voltaje de la tabla 2.6 y figura 2.17. Los seis vectores activos son a una distancia de ángulo de 60 grados y describe un punto del hexágono. Los dos vectores cero son del origen.

State	SA	SB	SC	Inverter Operation	Space Voltage Vector
0	1	1	1	Freewheeling	V_0
1	1	0	0	Active	V_1
2	1	1	0	Active	V_2
3	0	1	0	Active	V_3
4	0	1	1	Active	V_4
5	0	0	1	Active	V_5
6	1	0	1	Active	V_6
7	0	0	0	Freewheeling	V_7

Tabla 2.6 Espacio de vectores de voltaje del inversor.

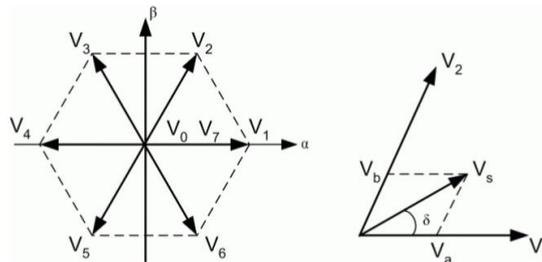


Fig. 2.17 Espacio de vectores de voltaje del inversor.

2.4.3 Control de voltaje/frecuencia en Lazo Abierto

El flujo del estator de la máquina de corriente alterna es igual al voltaje del estator por el tamaño de la proporción de la frecuencia.

$$\varphi(t) = \int v(t)dt$$

Dónde:

$$v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t)$$

Por consiguiente:

$$\varphi(t) = \frac{\sqrt{2}V}{\omega} \cos(\omega t)$$

Dado que el motor es alimentado con una fuente variable de CA de voltaje y frecuencia, es importante para mantener el voltaje/frecuencia constante en la región de torque constante. Una característica típica de voltaje/frecuencia es mostrado en la figura 2.18. Es notable que la línea recta adquiera un pequeño voltaje de impulso con el fin de compensar la caída de voltaje en la resistencia a baja frecuencia.

El control de voltaje/frecuencia en lazo abierto es usado con aplicaciones de baja dinámica, así como bombas, donde una pequeña variación de la velocidad del motor con carga es tolerable. El modelo AC1 es basado en un controlador de voltaje/frecuencia de lazo abierto.

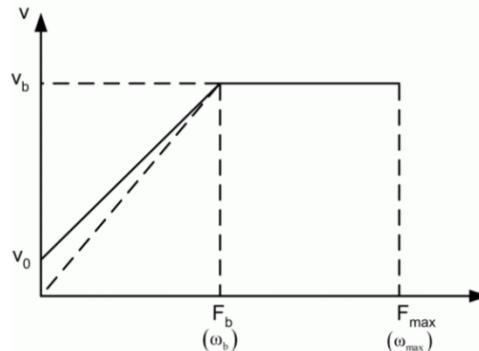


Fig. 2.18 Característica de voltaje/frecuencia con compensación a baja frecuencia.

2.4.4 Control de velocidad en lazo cerrado

En el control de lazo cerrado, un comando de velocidad deslizante es agregado a la medición de la velocidad de rotor para producir la frecuencia deseada del inversor. El regulador de velocidad basado en PI produce el comando deslizante. La frecuencia deseada del inversor genera la orden a través de un voltaje/frecuencia característico como el que se mostró en la fig.2.18. El modelo AC2 es basado en un control de velocidad en lazo cerrado que usa voltaje/frecuencia.

2.4.5 Control Orientado de Flujo

La construcción de una máquina de CD es de manera que el flujo de campo sea perpendicular al flujo de armadura. Siendo ortogonal, los dos flujos no producen una interacción neta uno al otro. Ajustando la corriente de campo se controla el flujo de la máquina de CD y el torque es controlado de forma independiente mediante el ajuste de la corriente de armadura.

El control de una máquina de CA no es simple debido la interacción entre los campos del estator y el rotor, cuya orientación no es a 90 grados debido a que varía con las condiciones de operación. Se obtiene buen rendimiento en máquinas de CD teniendo una orientación fija y ortogonal entre la armadura de campo. Considerando el modelo d-q de la máquina de inducción en el marco de referencia que gira a la velocidad síncrona ω_e se tiene:

$$V_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \phi_{qs} + \omega_e \phi_{ds}$$

$$V_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - \omega_e \phi_{qs}$$

$$0 = R_s i_{qr} + \frac{d}{dt} \phi_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \phi_{dr}$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \varphi_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \varphi_{qr}$$

$$T_e = 1.5P \frac{L_m}{L_r} (\varphi_{dr} i_{qs} - \varphi_{qr} i_{ds})$$

Dónde:

$$\varphi_{qs} = L_s i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\varphi_{ds} = L_s i_{ds} + L_m i_{dr}$$

$$\varphi_{qr} = L_r i_{qr} + L_m i_{qs}$$

$$\varphi_{dr} = L_r i_{dr} + L_m i_{ds}$$

El control orientado de campo asume que el componente i_{ds} de las corrientes del estator será alineado con el campo del rotor y el componente i_{qs} será perpendicular a i_{ds} . Lo anterior se realiza por la elección de ω_e que es la velocidad del flujo del rotor, resultando en:

$$\varphi_{qr} = 0 \rightarrow \frac{d}{dt} \varphi_{qr} = 0 \quad \text{Y} \quad \varphi_{dr} = \varphi_r$$

Implica que:

$$\omega_{sl} = (\omega_e - \omega_r) = \left(\frac{L_m R_r}{\varphi_r L_r} \right) i_{qs} \quad \text{Y que} \quad T_e = 1.5P \frac{L_m}{L_r} (\varphi_r i_{qs})$$

También que:

$$\frac{d}{dt} \varphi_r = - \left(\frac{R_r}{L_r} \right) \varphi_r + \left(\frac{L_m R_r}{L_r} \right) i_{ds}$$

El torque eléctrico es proporcional a la componente i_{qs} , pero la relación entre el flujo y la componente i_{qs} es dado por una función de transferencia de primer orden con un tiempo constante $\frac{L_r}{R_r}$. Es complicado medir directamente la orientación del flujo del rotor en una máquina de inducción jaula de ardilla.

La orientación del flujo del rotor solo puede ser estimado a partir de mediciones en terminales. Una vía alternativa es el uso de la relación de deslizamiento derivativo que estima la posición del flujo relativo al rotor, como se muestra en la figura 2.19. El control es llamado indirectamente control orientado de campo y es usado en el modelo AC3.

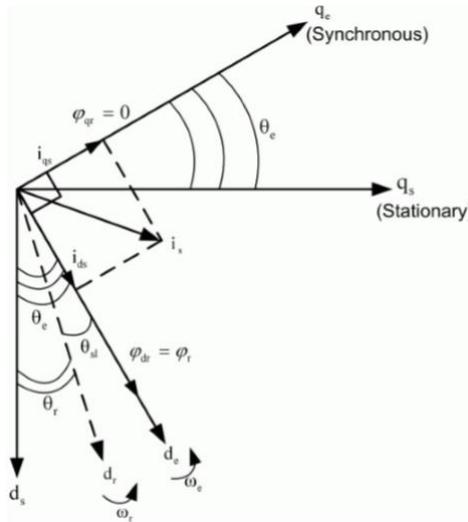


Fig. 2.19 Posición del flujo del rotor obtenido del deslizamiento y la posición del rotor.

2.4.6 Control Directo de Torque

El control orientado de campo es un método de control alternativo pero se basa en el conocimiento preciso de los parámetros del motor. La constante de tiempo del rotor es particularmente difícil de medir con precisión y otro factor es la temperatura. Un método de control más robusto consiste primero en estimar el flujo del estator de la máquina y torque eléctrico en el marco de referencia de la terminal de medición. Para ello, las siguientes relaciones son usadas.

$$\varphi_{ds} = \int (V_{ds} - R_s i_{ds}) dt$$

$$\varphi_{qs} = \int (V_{qs} - R_s i_{qs}) dt$$

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{ds}^2 + \varphi_{qs}^2} \angle \text{atan}\left(\frac{\varphi_{qs}}{\varphi_{ds}}\right)$$

$$T_e = 1.5P(\varphi_{ds} i_{qs} - \varphi_{qs} i_{ds})$$

La estimación de flujo del estator y el torque eléctrico son controlados directamente mediante la comparación con sus respectivos valores de demanda usando comparadores de histéresis. La salida de los dos comparadores es luego usada como entradas en una tabla de conmutación óptima. La tabla 2.7 muestra la combinación ideal para la conmutación del inversor.

H_{ψ}	H_{Te}	S(1)	S(2)	S(3)	S(4)	S(5)	S(6)
	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
1	0	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
-1	0	V_7	V_0	V_7	V_0	V_7	V_0
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

Tabla 2.7 Tabla de conmutación del espacio vectorial del inversor.

3. Desarrollo

3.1 Subsistema de Almacenamiento de Energía

Para simular el subsistema de almacenamiento de energía se tomó en cuenta el bloque “Battery” de la librería SimPowerSystems. El bloque de batería implementa un modelo dinámico genérico parametrizado para representar el tipo más popular de batería recargable. El tipo de batería utilizada en el sistema es de Lithium-Ion con una capacidad de voltaje nominal de 500 V. La figura 3.1 representa un circuito equivalente de la batería utilizada.

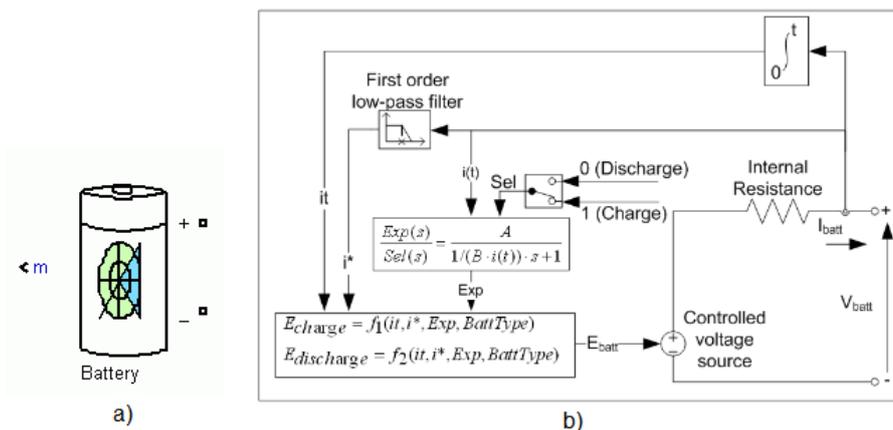


Fig. 3.1 a) Bloque de la librería y b) circuito equivalente.

Modelo de la batería Lithium-Ion

- Modelo de descarga ($i^* > 0$)

$$f1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

- Modelo de carga ($i^* < 0$)

$$f2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

Donde:

E_0 = Constante de voltaje (V)

$Exp(s)$ = Zona dinámica exponencial (V)

K = constante de polarización (Ah^{-1}) o resistencia de polarización (Ohms)

i^* = Dinámica de corriente de baja frecuencia (A)

i = Corriente de la batería (A)

it = Capacidad extraída (Ah)

Q = Capacidad máxima de la batería (Ah)

A = Voltaje exponencial (V)

B = Capacidad exponencial (Ah)⁻¹

Los parámetros del circuito equivalente pueden ser modificados para representar un tipo de batería en particular, basado en las características de descarga. Para la simulación del sistema se ha configurado la batería con un SOC inicial del 80 %. La curva típica de descarga de la batería está compuesta por tres secciones, tal como se muestra en la figura 3.2.

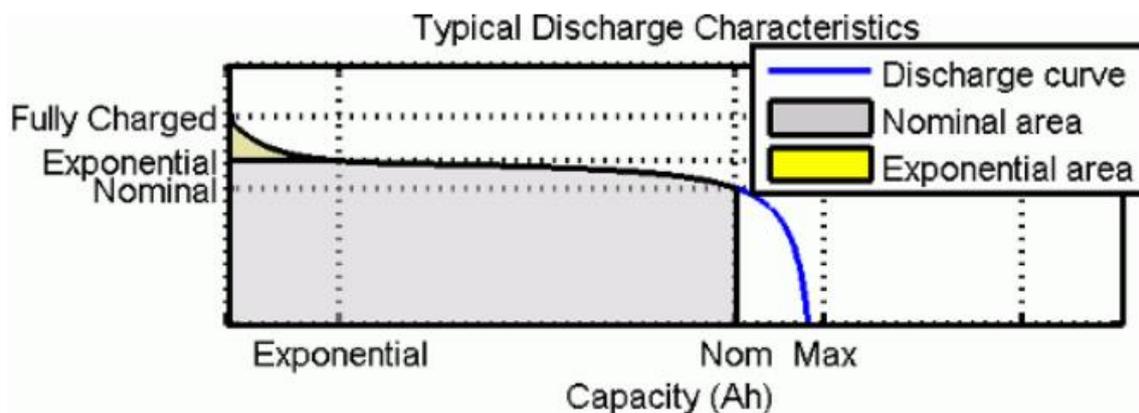


Fig. 3.2 Características de descarga de una batería.

La primera sección representa la caída de voltaje exponencial cuando la batería es cargada. Dependiendo del tipo de batería, el área es más o menos ancha. La segunda sección representa la carga que puede ser extraída de la batería hasta que la caída de voltaje este por debajo del voltaje nominal de la batería.

3.2 Subsistema Eléctrico

El subsistema de propulsión eléctrica está compuesto por el motor síncrono de imanes permanentes. Es un motor eléctrico con una potencia nominal de 50 kW a 500 V de corriente alterna. Para la simulación del motor eléctrico se usó el bloque *Permanent Magnet Synchronous Machine* de la librería SimPowerSystems. La figura 3.3 muestra el bloque utilizado para simular el motor eléctrico síncrono de imanes permanentes.

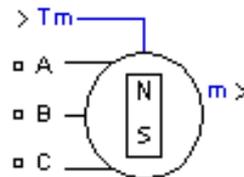


Fig. 3.3 Motor eléctrico de la librería SimPowerSystems.

El bloque de la máquina síncrona de imanes permanentes funciona tanto en modo de motor como en generador. El modo de funcionamiento es dictado por el signo del par mecánico (positivo para el modo de motor y negativo para el modo de generador). Los componentes eléctricos y mecánicos de la máquina están cada uno representados por un modelo de espacio de estado de segundo orden.

El modelo sinusoidal asume que el flujo creado por los imanes permanentes en el estator es sinusoidal, lo que implica que las fuerzas electromotrices son sinusoidales. Otro modelo existente para la máquina es el trapezoidal, el modelo supone que la distribución trapezoidal del devanado y el flujo establecido por los imanes permanentes producen tres formas de ondas de fuerzas contra-electromotriz trapezoidales.

Modelo de sistema eléctrico trifásico sinusoidal

Las ecuaciones del modelo del sistema trifásico sinusoidal se expresan en el marco de referencias del rotor (marco q-d). Las ecuaciones que representan el modelo del sistema eléctrico trifásico son:

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} V_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} P \omega_r i_q$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} V_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} P \omega_r i_d - \frac{\lambda P \omega_r}{L_q}$$

$$T_e = 1.5P[\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

donde

L_q, L_d = inductancias en eje q y d

R = resistencia en el devanado del estator

i_q, i_d = corrientes en el eje q y d

$V_q, V_d =$ voltajes en eje q y d

$\omega_r =$ velocidad angular del rotor

$\lambda =$ amplitud del flujo inducido por los imanes en las fases del estator

$P =$ número de par de polos

$T_e =$ torque electromagnético

Las inductancias L_q y L_d representan la relación entre la inductancia de fase y la posición del rotor debido a la prominencia del rotor. Por ejemplo, la inductancia medida entre la fase A y B (fase C se deja abierta) viene dada por:

$$L_{ab} = L_d + L_q + (L_q - L_d) \cos\left(2\theta_e + \frac{\pi}{3}\right)$$

donde θ_e representa el ángulo eléctrico

En la figura 3.4 se despliega la variación de inductancia de fase a fase en función del ángulo eléctrico del rotor.

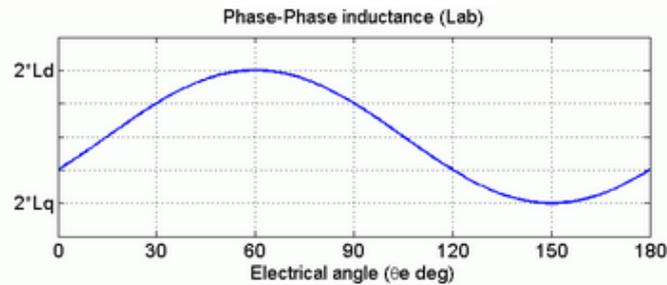


Fig. 3.4 Inductancia de fase a fase.

- Para un rotor circular, no hay variación en la inductancia de fase.

$$L_q = L_d = \frac{L_{ab}}{2}$$

- Para un rotor con saliencia, las inductancias dq están dadas por:

$$L_d = \frac{\max(L_{ab})}{2} \quad y \quad L_q = \frac{\min(L_{ab})}{2}$$

La ecuación que describe el sistema mecánico del motor síncrono de imanes permanentes es la siguiente:

$$\frac{d}{dt} \omega_r = \frac{1}{J} (T_e - T_f - F \omega_r - T_m)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_r$$

donde

$J =$ inercia combinada del rotor y carga

$F =$ fricción viscosa combinada de rotor y carga

θ = posición del ángulo del rotor

T_m = torque mecánico del eje

T_f = torque de fricción estática del eje

3.3 Subsistema Mecánico del Vehículo

El par electromecánico producido por el motor eléctrico es alimentado en el subsistema mecánico del vehículo. El modelo del vehículo usado tiene un subsistema de cuerpo central y dos subsistemas neumáticos. Se asume una superficie de carretera de asfalto seco y el coeficiente de fricción de 0.26. La cantidad de energía mecánica consumida por el subsistema del vehículo cuando se conduce, depende principalmente de tres efectos:

- Pérdidas de fricción aerodinámica
- Pérdidas de fricción de rodamiento
- Energía disipada en el frenado

La ecuación básica que describe la dinámica longitudinal de un vehículo de carretera tiene la siguiente forma:

$$m_v \frac{dv(t)}{dt} = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t))$$

donde

m_v = masa del vehículo (kg)

v = velocidad del vehículo (m/s^2)

F_a = fricción aerodinámica (N)

F_r = fricción de rodamiento (N)

F_g = fuerza de la gravedad

La fuerza de tracción F_t es la fuerza generada por el motor eléctrico que impulsa el vehículo. A la F_t se resta la fuerza que se utiliza para acelerar las partes giratorias en el interior del vehículo, menos todas las pérdidas por fricción en las partes mecánicas. La figura 3.5 indica las fuerzas que actúan sobre el vehículo en movimiento.

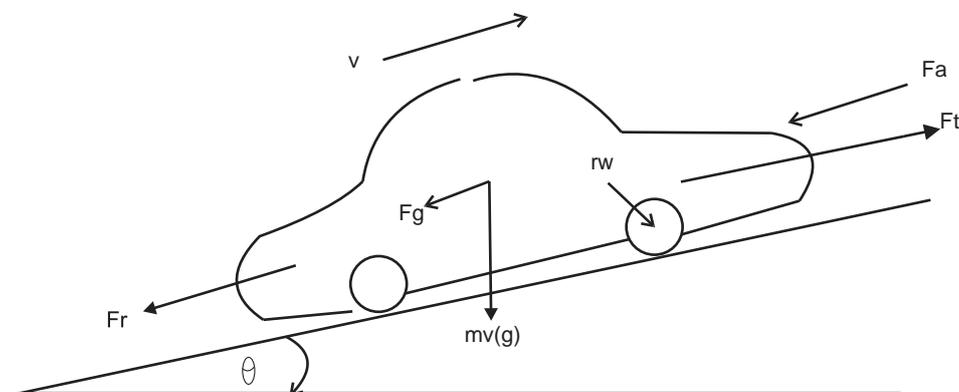


Fig. 3.5 Esquema de las fuerzas actuando sobre un vehículo en movimiento.

3.3.1 Pérdidas por fricción aerodinámicas

Las fuerzas de resistencia aerodinámica F_a se aproximan mediante la simplificación del vehículo para ser un cuerpo prismático con un área frontal A_f . La fuerza causada por la presión de estancamiento se multiplica por un coeficiente de resistencia aerodinámica C_d que modela las condiciones de flujo actual.

$$F_a(v) = \frac{1}{2} \rho_a A_f C_d v^2$$

donde

$$v = \text{velocidad del vehículo} \left[\frac{m}{s} \right]$$

$$\rho_a = \text{densidad del aire del ambiente} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

$$C_d = \text{coeficiente de arrastre}$$

3.3.2 Pérdidas por fricción de rodamiento

La fricción de rodamiento es modelada con la siguiente ecuación.

$$F_r = C_r m_v g \cos(\alpha)$$

donde:

$$m_v = \text{masa del vehículo} (kg)$$

$$g = \text{aceleración debido a la gravedad} \left(\frac{m}{s^2} \right)$$

$$C_r = \text{coeficiente de fricción de rodamiento}$$

$$\alpha = \text{ángulo de inclinación}$$

El coeficiente de fricción C_r depende de muchas variables. Las más importantes que influyen son la velocidad del vehículo v , presión en los neumáticos p y condiciones de la superficie de la carretera. Para muchas aplicaciones, particularmente cuando la velocidad del vehículo es moderada, el coeficiente de fricción de rodamiento C_r puede suponerse que es constante.

3.4 Simulación del Vehículo Eléctrico

La simulación del sistema de propulsión del vehículo eléctrico se realiza en Matlab/Simulink. Contiene un bloque llamado acelerador que supone el pedal de aceleración del conductor. El acelerador hace una petición de fuerza de torsión al motor, la cual se propaga entre varios componentes del sistema haciendo mover al vehículo.

El motor eléctrico elegido es un motor síncrono de imanes permanentes con una potencia de 50 kW, alimentado por una corriente alterna trifásica de 500 V. El voltaje que alimenta el motor proviene de un paquete de baterías Lithium-Ion con un voltaje nominal de 500 V, una capacidad de 45 Ah y un estado de carga inicial del 80 %. En la figura 3.6 se muestra un esquema simplificado de la simulación del vehículo eléctrico.

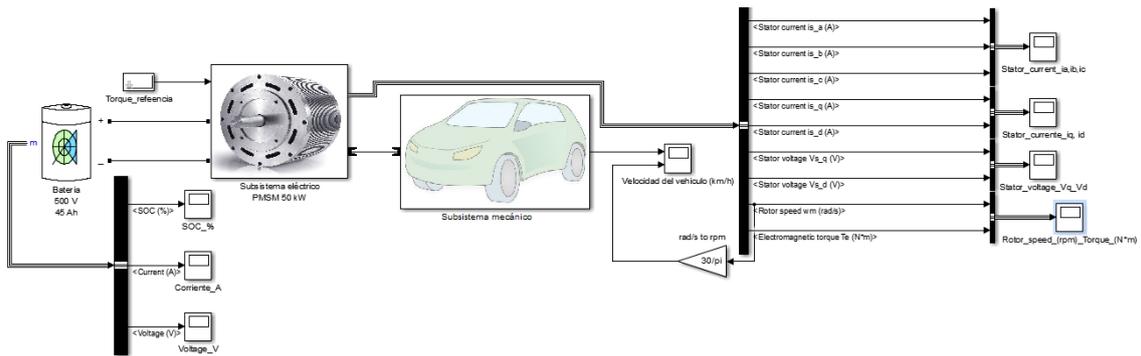


Fig. 3.6 Diagrama del vehículo eléctrico simulado en Matlab/Simulink.

Los componentes simulados en el sistema se han realizado usando datos empíricos y medidas obtenidas en fuentes literarias. Otros componentes del sistema son analizados físicamente en la naturaleza de un vehículo. El vehículo eléctrico simulado pesa aproximadamente 1325 kg incluyendo el paquete de baterías. El vehículo tiene un área frontal de 2.57 m² con un coeficiente de arrastre de 0.26.

El motor eléctrico síncrono de imanes permanentes es capaz de producir un par máximo de 400 Nm y una potencia máxima de 50 kW a 6000 rpm (esa velocidad se alcanza simulando el motor sin carga). El control del motor se realiza mediante el control de vectores. Como el motor utiliza un rotor de imanes permanentes, es posible utilizar el par de reluctancia para aumentar el par de salida total y operar a alta velocidad. La figura 3.7 esquematiza el contenido del subsistema eléctrico mostrado en la figura 3.6.

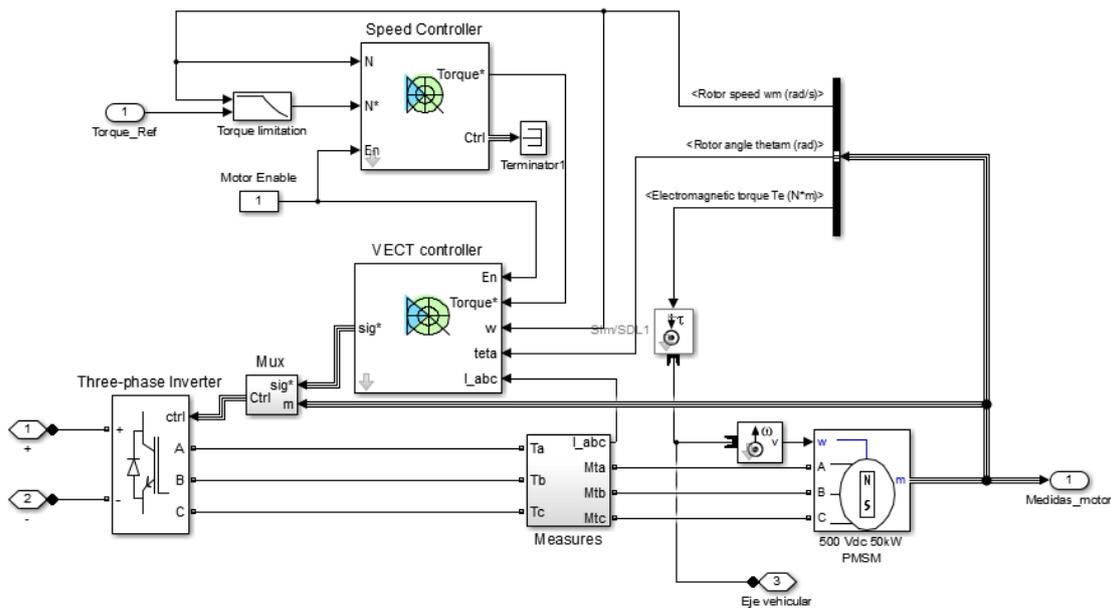


Fig. 3.7 Simulación del motor eléctrico en Matlab/Simulink.

El contenido del subsistema eléctrico incluye el inversor CD/CA, que alimenta al motor eléctrico con una corriente trifásica. El inversor está representado por un modelo de valor medio y el efecto de la conmutación de los semiconductores de potencia no se tienen en consideración. Por otra parte, el inversor permite el modelado de la corriente de saturación cuando la tensión del bus de CD no es lo suficientemente alta para alimentar el motor.

Además, se encuentran los bloques correspondientes a los controladores del motor. El bloque propio al controlador de velocidad recibe un torque de referencia proveniente del acelerador. El torque de referencia previamente pasa por un limitador de torque, el cual restringe al motor a entregar 400 Nm como máximo. En el bloque controlador de velocidad se hace una comparación entre el torque de referencia y la velocidad actual del rotor, dicha comparación da como resultado un torque de referencia deseado. El otro bloque que interfiere en al control del motor es el control de vectores, dicho bloque recibe como entrada lecturas de ángulo y velocidad del rotor y torque de referencia proveniente del control de velocidad. En base a los datos que recibe ese bloque, envía pulsos de activación hacia el inversor para activar los interruptores y proporcionarle al motor la corriente necesaria para satisfacer la demanda de torque.

Las partes mecánicas del vehículo se encuentran representadas en el bloque del subsistema mecánico mostrado en la simulación de la figura 3.6. Dicho bloque simboliza la carga mecánica que debe mover el motor eléctrico. En la figura 3.8 se ilustran los bloques contenidos dentro del subsistema mecánico.

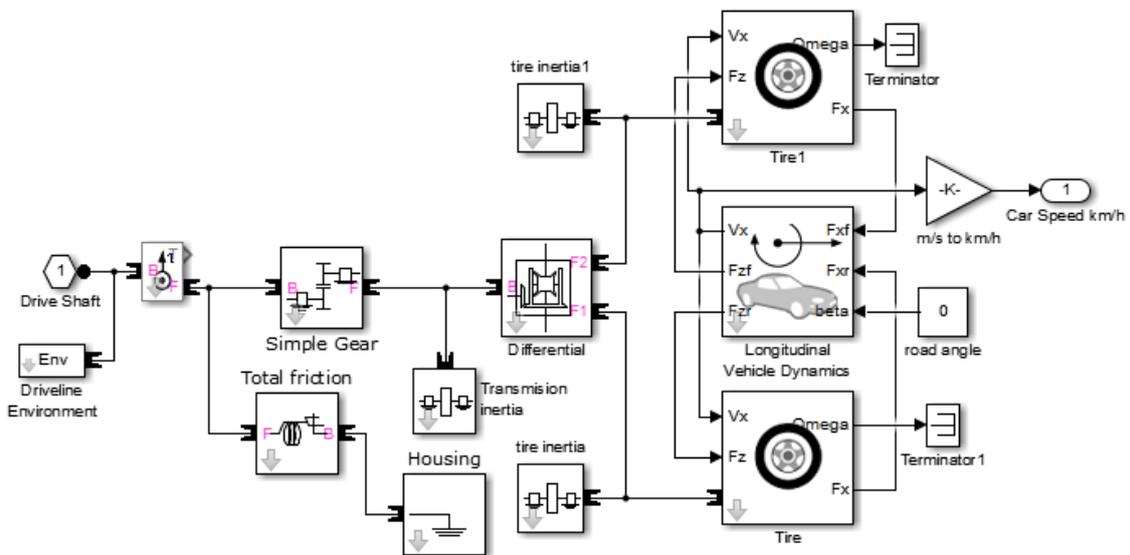


Fig. 3.8 Representación de las partes mecánicas del vehículo.

Las partes mecánicas del vehículo están representadas por un sistema de engranajes, un diferencial mecánico, las ruedas traseras y un bloque llamado dinámica del vehículo que representa un vehículo de dos ejes. El sistema de

engranajes sirve para acoplar mecánicamente el eje del motor eléctrico con el diferencial mecánico. Además, reduce la velocidad del motor para adecuarla a la velocidad deseada del vehículo.

Al bloque correspondiente dinámica del vehículo se introducen parámetros específicos. El parámetro CG especifica las posiciones del centro de gravedad del vehículo y los ejes. Los parámetros aerodinámicos incluyen el área frontal del vehículo y el coeficiente de arrastre. Las señales de entrada F_{xf} , F_{xr} y β especifican las fuerzas longitudinales delanteras y traseras de contacto (N) y el ángulo de inclinación (rad), respectivamente.

4. Resultados y Conclusiones

En el capítulo se resumen los resultados obtenidos de la simulación de los diagramas del vehículo eléctrico realizados en Matlab/Simulink. Se realizaron simulaciones con diferentes condiciones de aceleración, con la finalidad de observar el comportamiento de los parámetros medidos en el motor y la batería. Así mismo se realizaron simulaciones con diferentes ángulos de inclinación del vehículo, simulando la conducción sobre una pendiente.

4.1 Simulación en Superficie Plana.

La simulación en superficie plana se asume con una aceleración máxima, el acelerador hace una demanda del máximo torque que puede entregar el motor. Para el caso de simulación se asume una superficie con cero grados de inclinación. Los resultados correspondientes a la simulación se muestran en las figuras 4.1 - 4.8.

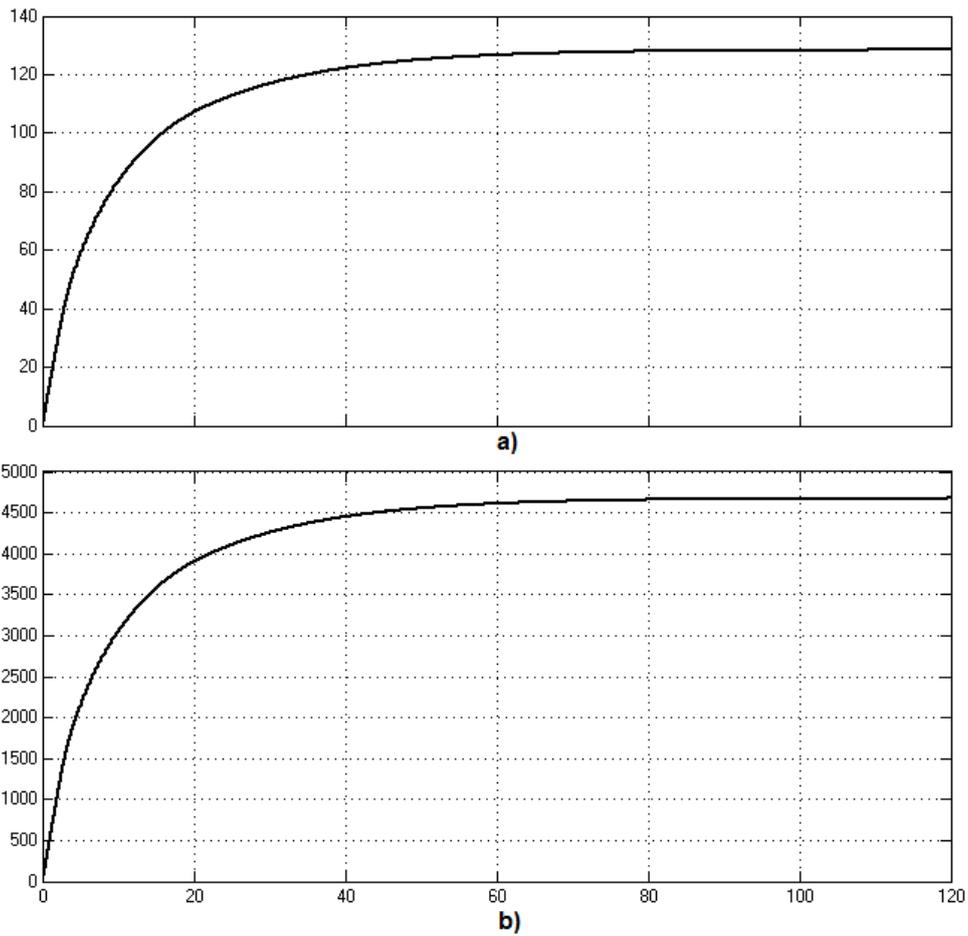


Fig. 4.1 a) *Velocidad del vehículo en km/h* y b) *velocidad del rotor en rpm.*

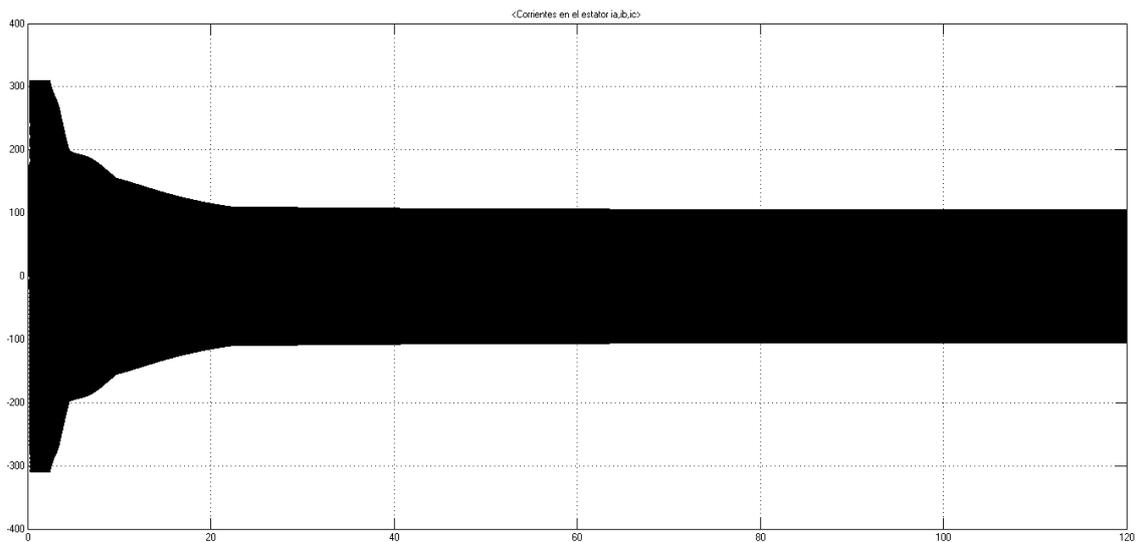


Fig. 4.2 *Corrientes en el estator en términos de abc.*

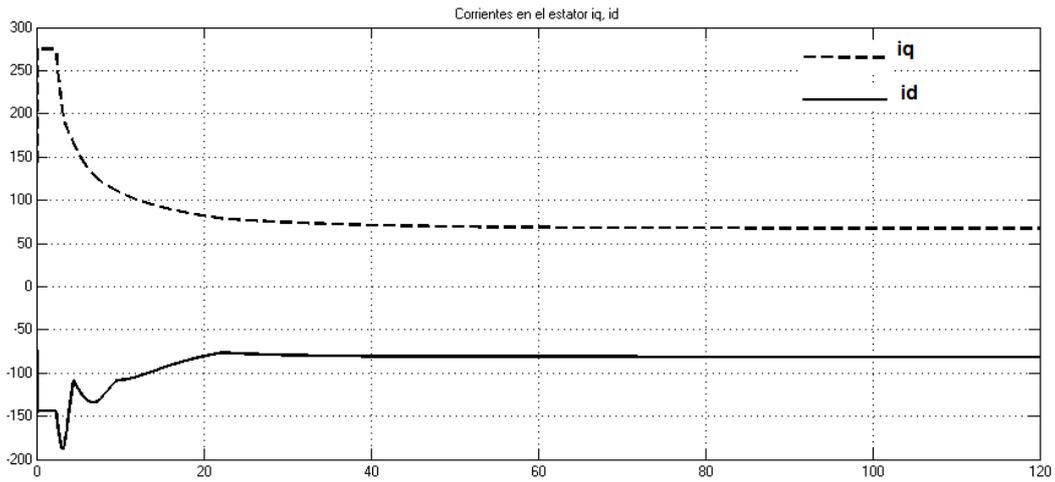


Fig. 4.3 Corrientes en el estator en términos de i_q , i_d .

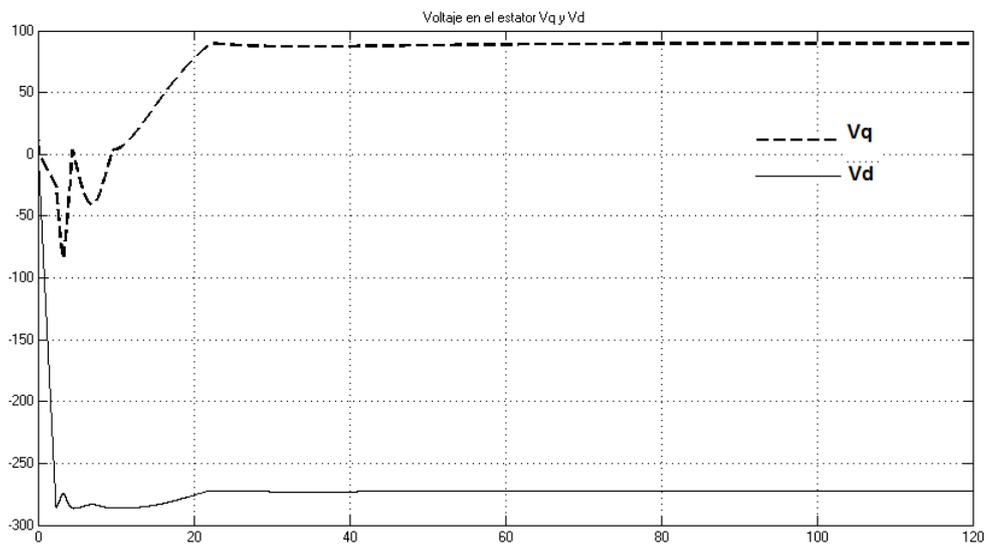


Fig. 4.4 Voltajes en el estator en términos de V_q y V_d .

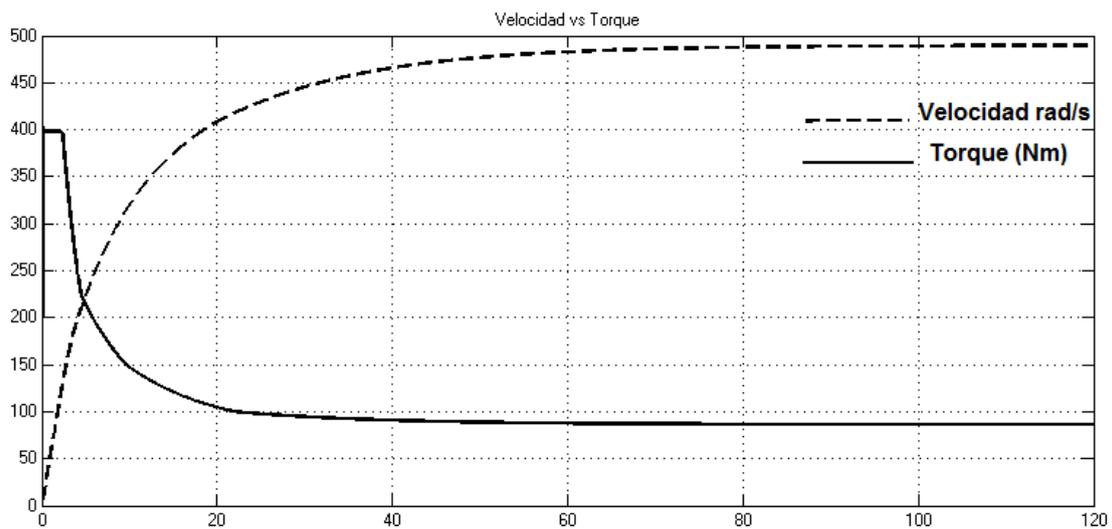


Fig. 4.5 Velocidad del rotor en rad/s y torque en Nm.

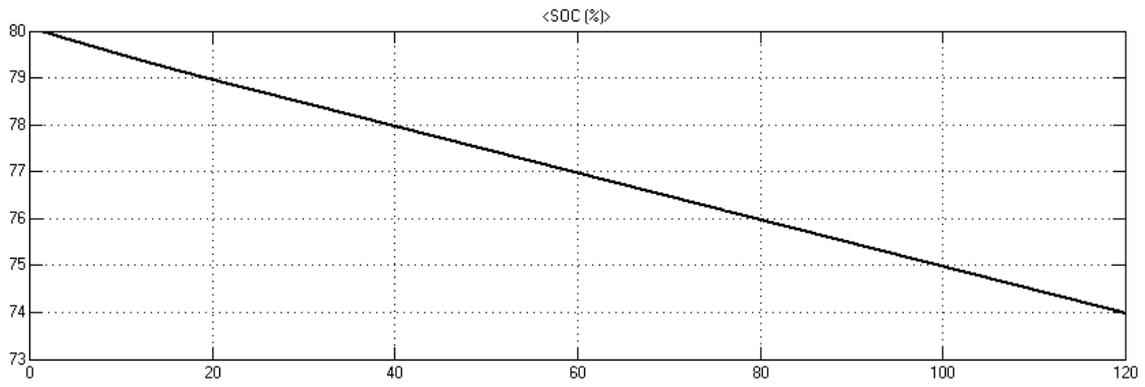


Fig. 4.6 Estado de carga de la batería en porcentaje.

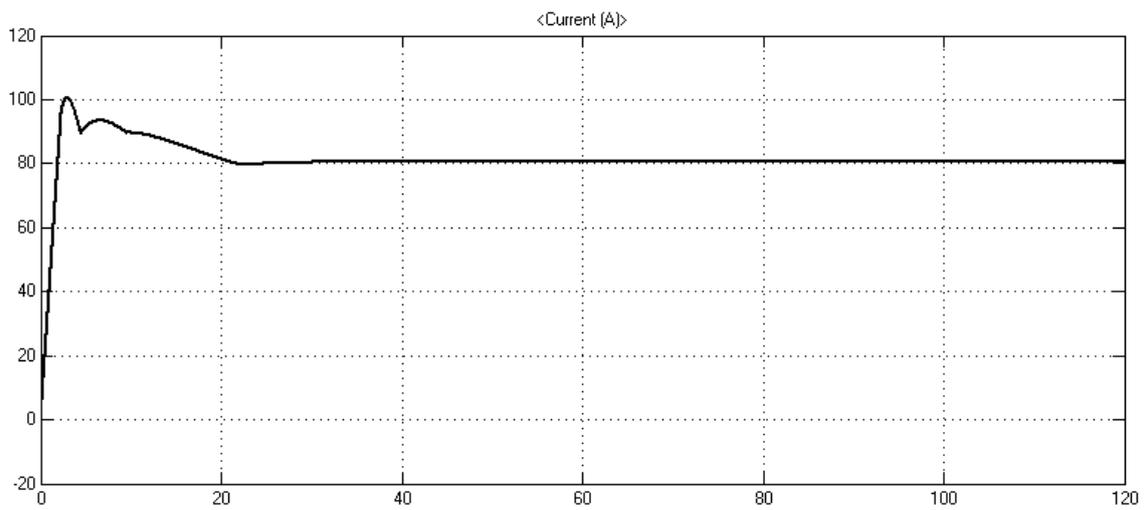


Fig. 4.7 Corriente de la batería.

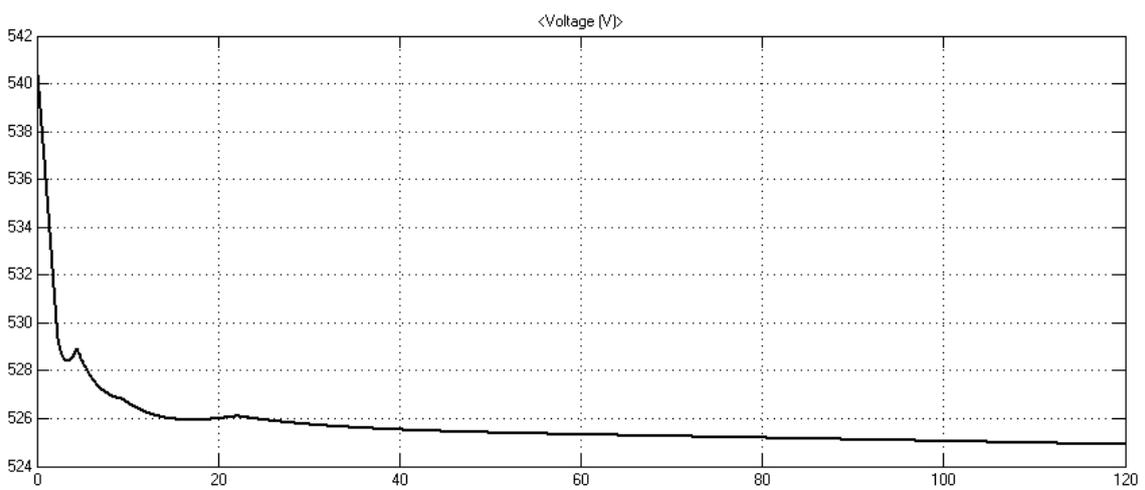


Fig. 4.8 Voltaje en la batería.

4.2 Simulación de Conducción Cuesta Arriba.

La simulación de conducción cuesta arriba se ha realizado tomando una pendiente de 25 grados de inclinación. Se asume que el conductor acelera el vehículo al máximo. Los resultados de dicha simulación se muestran en las figuras 4.9 - 4.16.

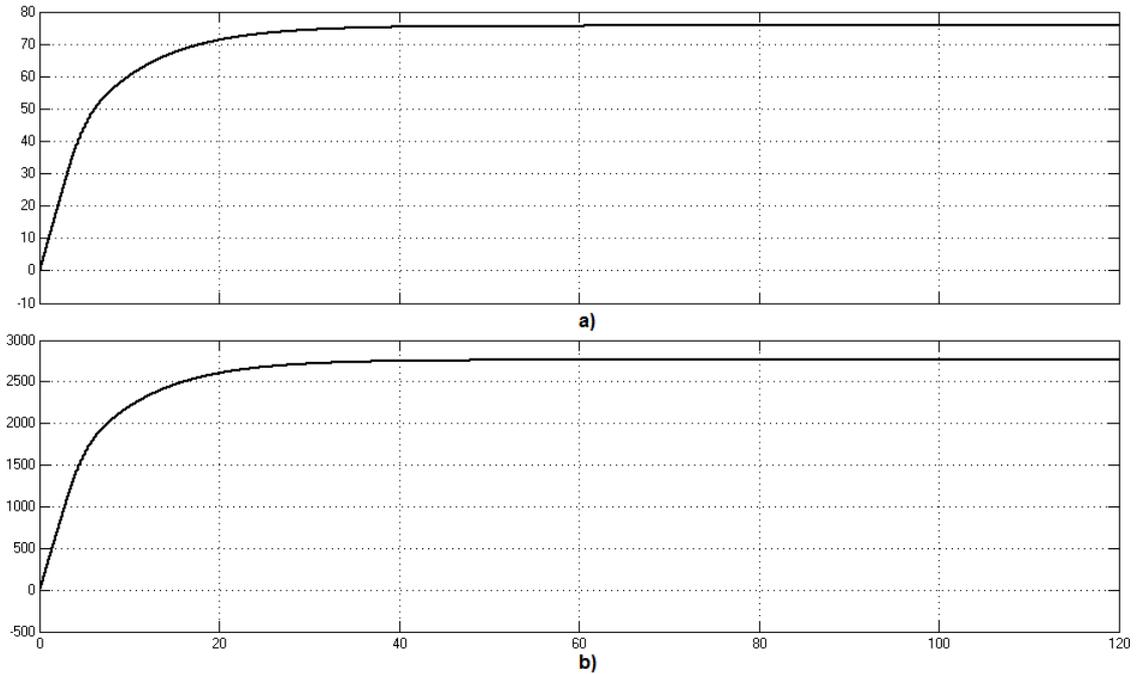


Fig. 4.9 a) Velocidad del vehículo en km/h y b) velocidad del rotor en rpm.

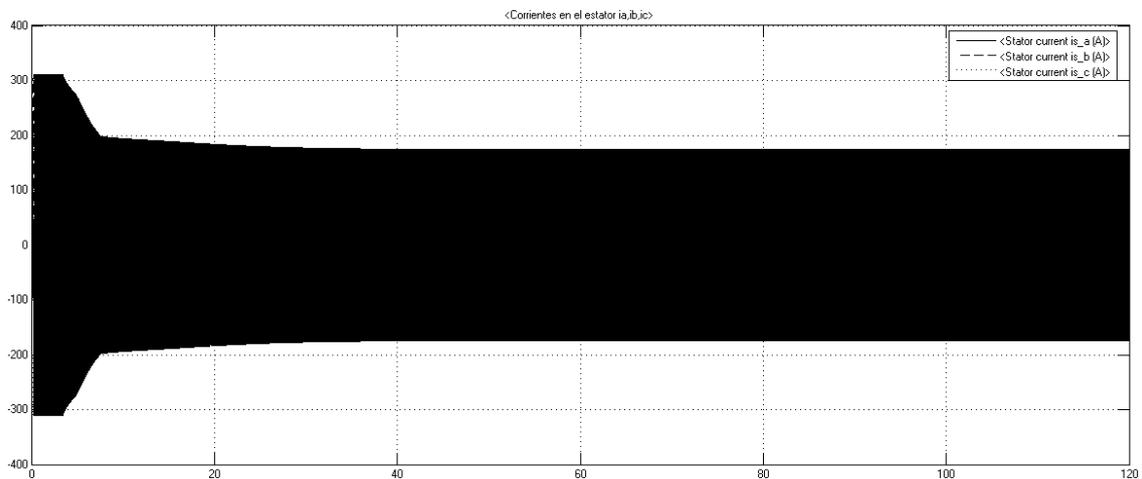


Fig. 4.10 Corrientes en el estator en términos de abc.

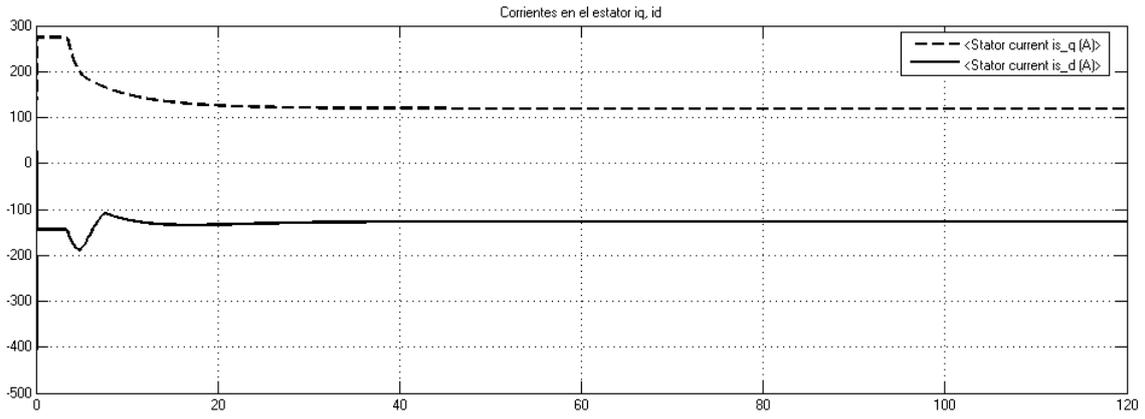


Fig. 4.11 Corrientes en el estator en términos de i_q , i_d .

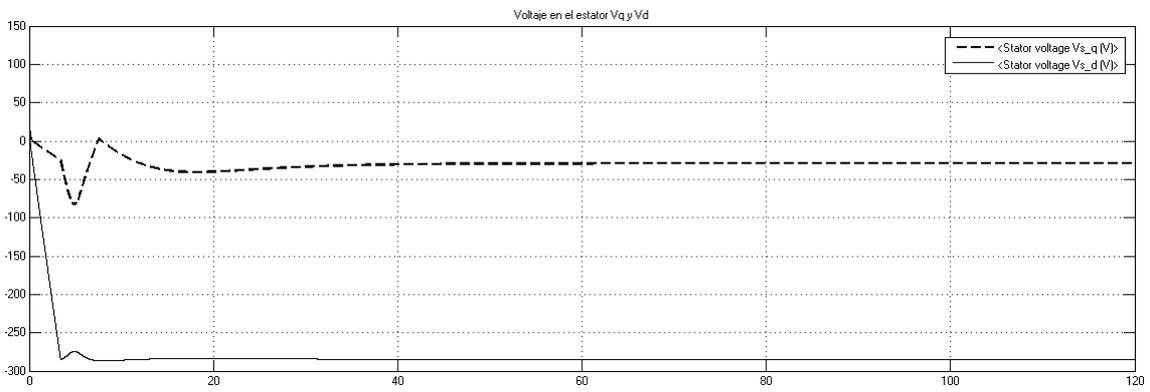


Fig. 4.12 Voltajes en el estator en términos de V_q , V_d .

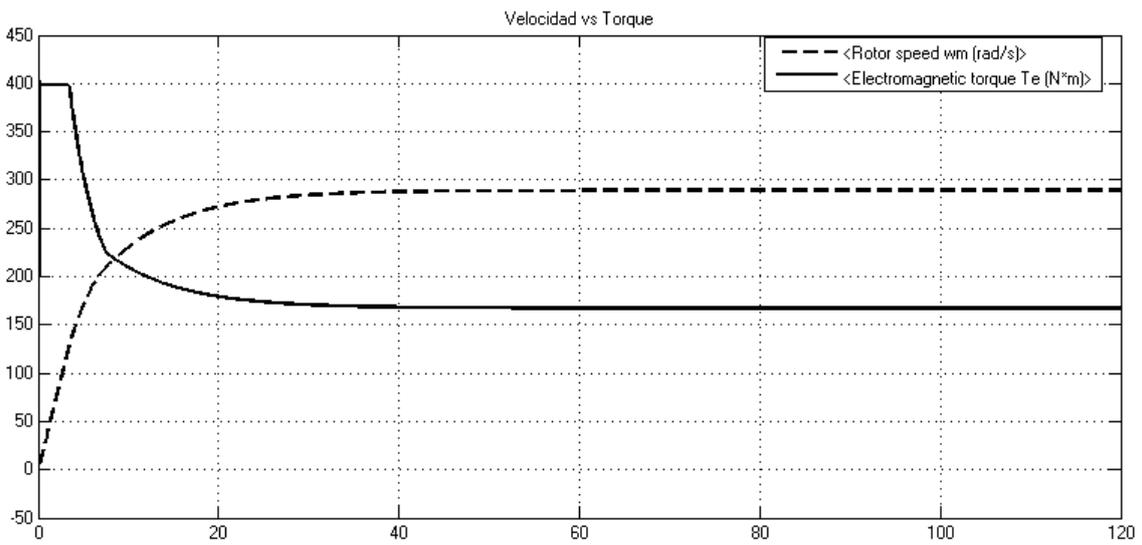


Fig. 4.13 Velocidad del rotor en rad/s y torque en Nm.

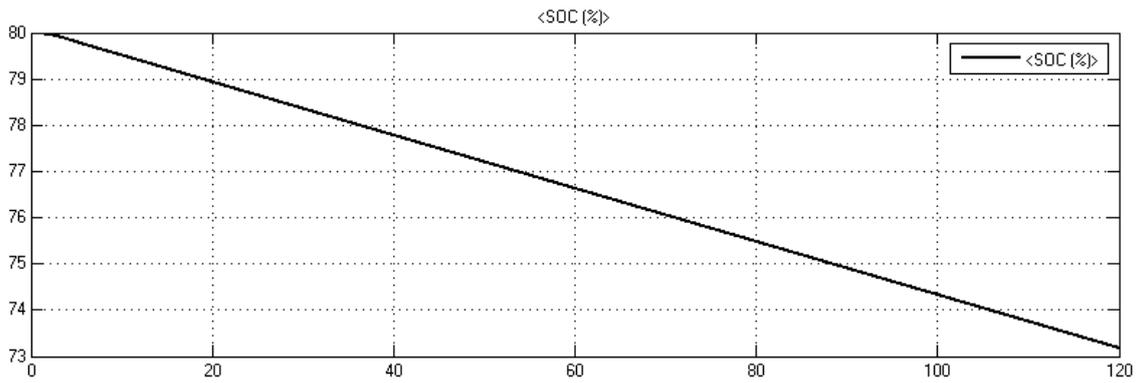


Fig. 4.14 Estado de carga de la batería en porcentaje.

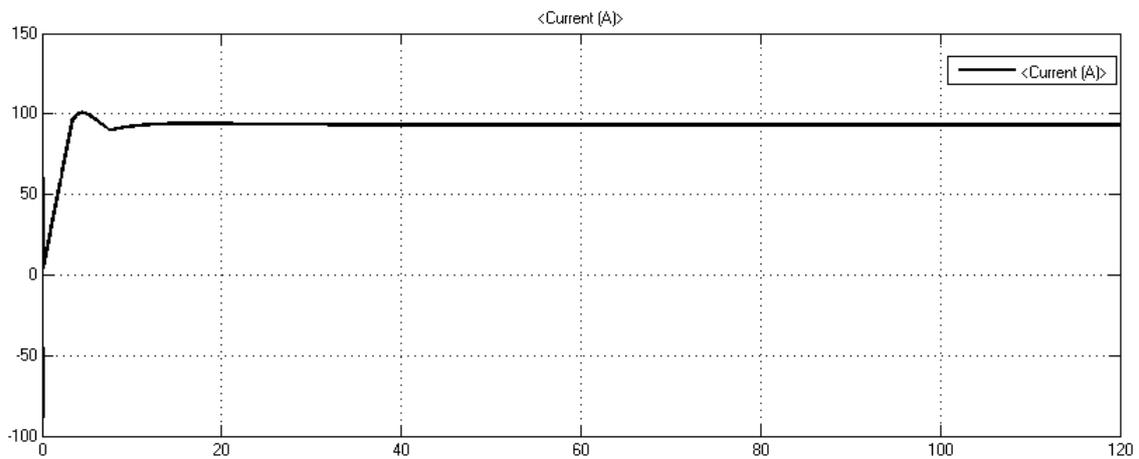


Fig. 4.15 Corriente en la batería.

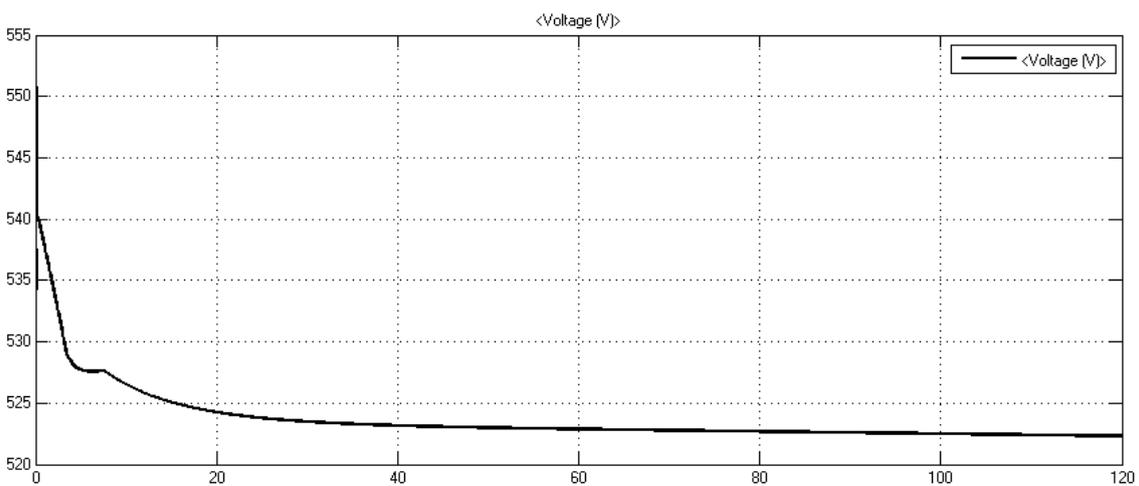


Fig. 4.16 Voltaje en la batería.

4.3 Simulación de Conducción con Arranque Suave

Para la simulación de conducción con arranque suave, se exige al motor un torque inicial pequeño y se va aumentando gradualmente con el tiempo. Para esa simulación se supone una superficie plana con cero grados de inclinación. Los resultados obtenidos de la simulación se muestran en las figuras 4.17 - 4.24.

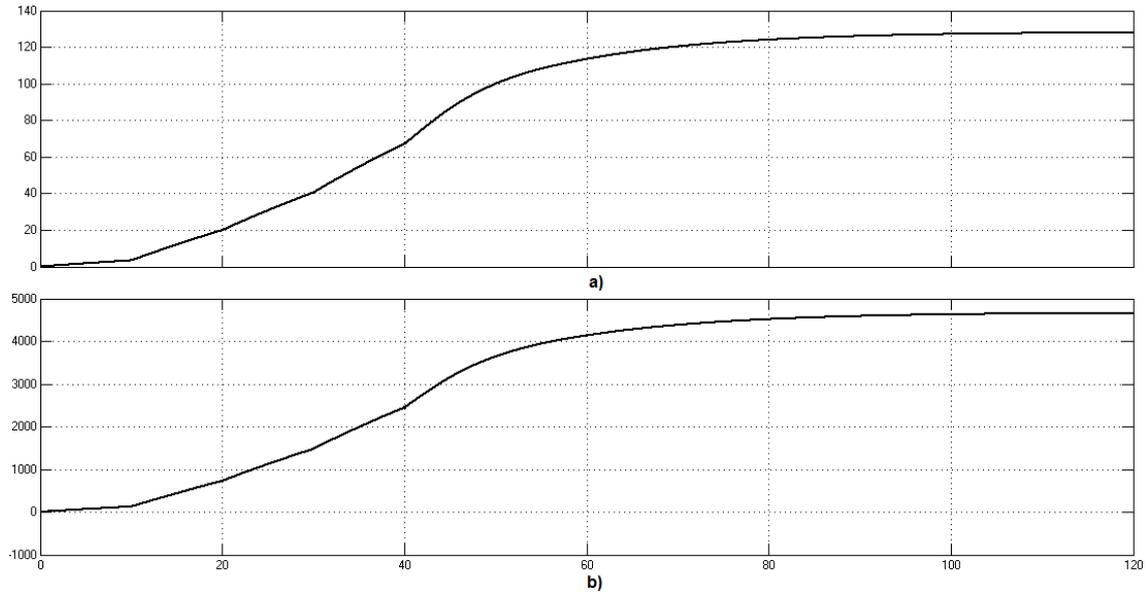


Fig. 4.17 a) Velocidad del vehículo en km/h y b) velocidad del rotor en rpm.

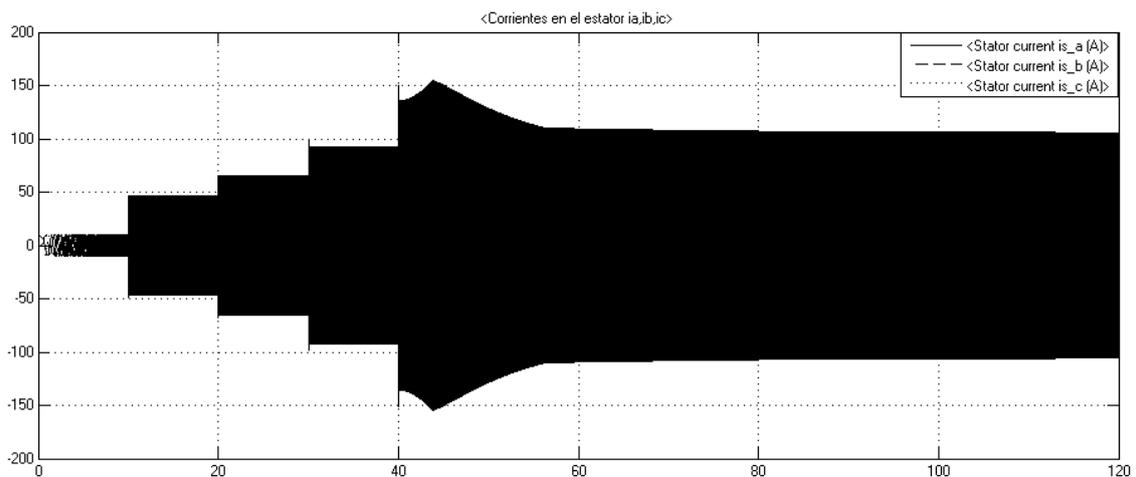


Fig. 4.18 Corrientes en el estator en términos de abc.

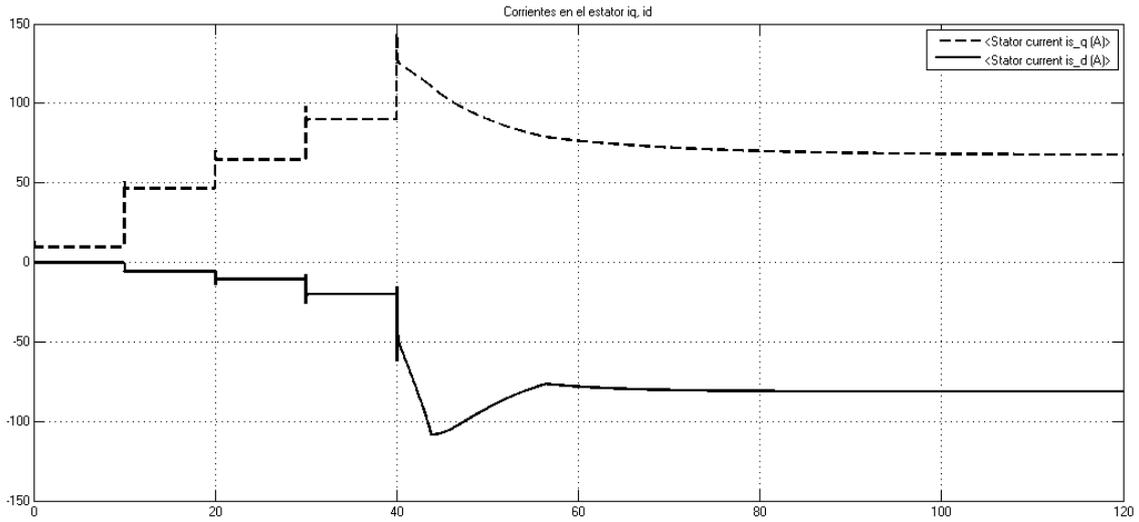


Fig. 4.19 Corrientes en el estator en términos de i_q , i_d .

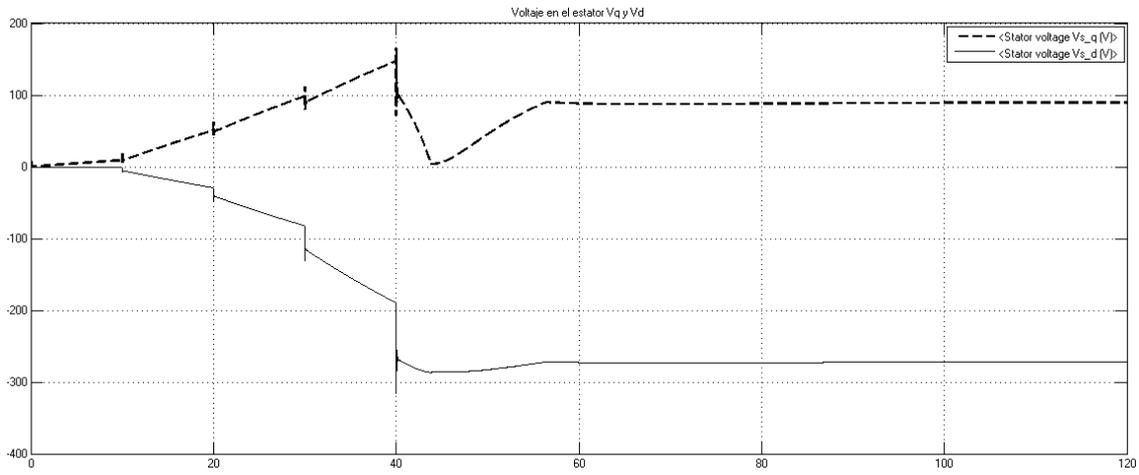


Fig. 4.20 Voltajes en el estator en términos de V_q , V_d .

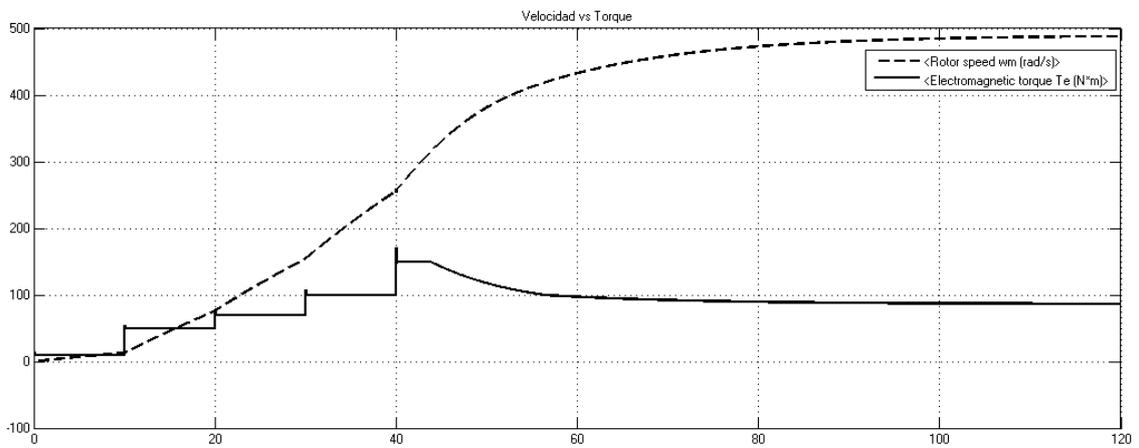


Fig. 4.21 Velocidad del rotor en rad/s y torque en Nm.

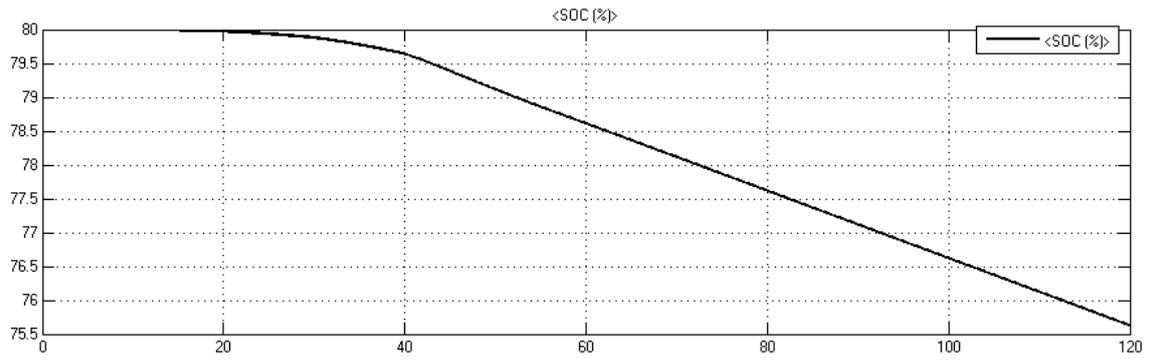


Fig. 4.22 Estado de carga de la batería en porcentaje.

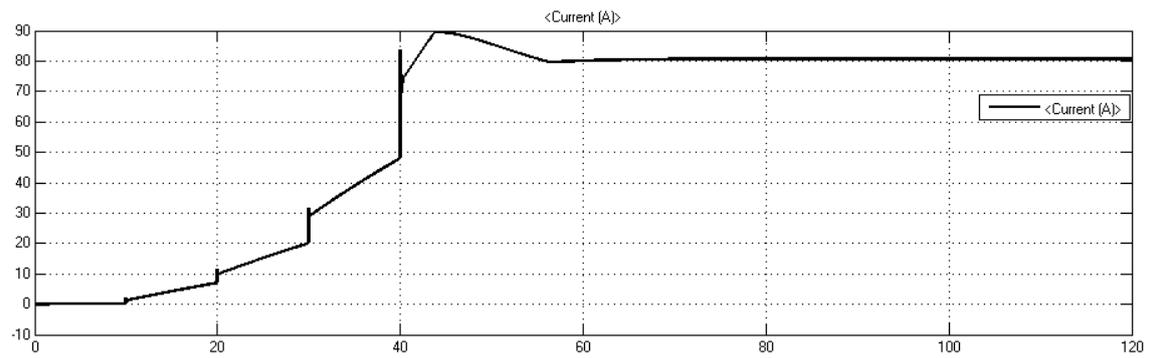


Fig. 4.23 Corriente en la batería.

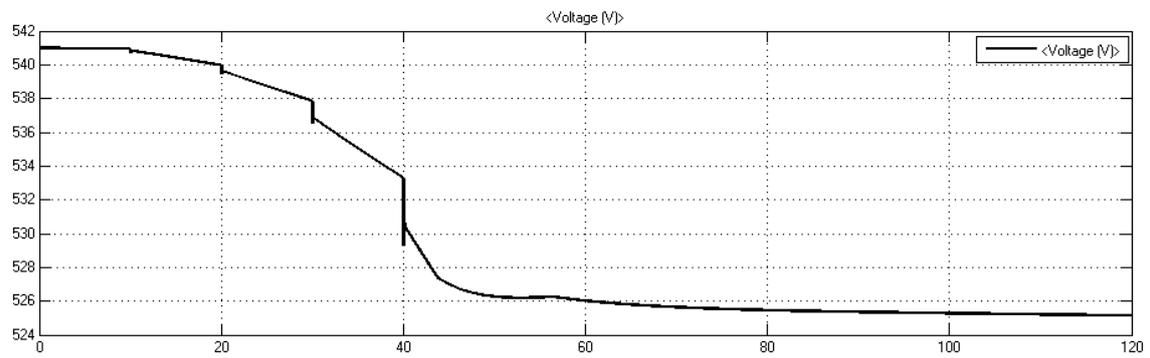


Fig. 4.24 Voltaje en la batería.

4.4 Conclusiones

En esta investigación se ha desarrollado el diseño y la simulación de un vehículo eléctrico basado en los modelos de bloques de Matlab/Simulink. Previo a ello se ha realizado un estudio acerca de las características y componentes más importantes de un vehículo eléctrico, siendo las unidades de almacenamiento de energía, el motor eléctrico y las variables propias del vehículo.

Desde el punto de vista técnico, un vehículo propulsado por motor eléctrico es totalmente viable para conducir en la ciudad, logrando alcanzar autonomías similares a las de un vehículo propulsado por motor de combustión. El comportamiento presentado por los resultados de simulación demuestra una buena capacidad de superar los desniveles propios a la conducción.

La eficiencia comparada entre los sistemas de propulsión a gasolina y los de propulsión eléctrica es similar, sin embargo el impacto ambiental producido por los de propulsión eléctrica está limitado a la obtención del combustible. El impacto medioambiental se reduce casi en su totalidad si se emplean fuentes de energía renovable para recargar las baterías que alimentan al motor eléctrico.

Las principales ventajas del sistema de propulsión propuesto es el bajo mantenimiento requerido, la simplicidad en la conducción, el costo de la electricidad para las baterías es menor que el de la gasolina, tiene mayor eficiencia total, tiene la posibilidad de recuperar energía sin agregar componentes extras al sistema original y la reducción en la contaminación ambiental.

Referencias Bibliográficas

- (Vindel David, 2011) Vindel, David. "Design, Simulation and Implementation of a PMSM Drive System." (2011).
- (Nerg, etal,2012) Nerg, J., Rilla, M., Ruuskanen, V., Pyrhonen, J., & Ruotsalainen, S. (2012, September). Design of direct-driven permanent magnet synchronous motors for an electric sports car. In *Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on* (pp. 177-182). IEEE.
- (Chau, etal, 2008) Chau, K. T., C. C. Chan, and Chunhua Liu. "Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles." *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 55.6 (2008): 2246-2257.
- (Zeraoulia, etal, 2006) Zeraoulia, Mounir, Mohamed El Hachemi Benbouzid, and Demba Diallo. "Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: A comparative study." *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 55.6 (2006): 1756-1764.
- (Goss, etal,2013) Goss, J., Popescu, M., & Staton, D. (2013, May). A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application. In *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International* (pp. 220-225). IEEE.
- (Richard Folkson, 2014) Richard Folkson, "Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance", towards zero carbon transportation, Woodhead publishing Series in energy: Number 57 (2014): p. 655-730.
- (Boldea, etal, 2014) I. Boldea, L. Tutelea, L. Parsa, D. Dorrell. "Automotive Electric Propulsion Systems With Reduced or No Permanent Magnets: An Overview" *Industrial Electronics, IEEE Transactions* vol. 61, no. 10, october 2014
- (Kar, etal, 2013) Kar, N. C., Liger, K. L. V., Balamurali, A., Labak, A., Lu, X., Lai, C.,... & Sid-Ahmed, M. (2013). Courting and Sparking. *IEEE Electrification Magazine*, 1(1), 21-31.
- (Sefik, Hiyama, 2011) Sefik, I., & Hiyama, T. (2011, September). Performance evaluation of hybrid powertrain system simulation model for Toyota Prius car. In *Electrical Machines and Power Electronics and 2011 Electromotion Joint Conference (ACEMP), 2011 International Aegean Conference on* (pp. 404-407). IEEE.
- (Hori, Yoichi, 2012) Hori, Yoichi. "Novel EV society based on motor/capacitor/wireless—Application of electric motor, supercapacitors, and wireless power transfer to enhance operation of future vehicles." *Microwave Workshop Series on*

Innovative Wireless Power Transmission: Technologies, Systems, and Applications (IMWS), 2012 IEEE MTT-S International. IEEE, 2012.

(James, etal, 2013) Goss, James, Mircea Popescu, and Dave Staton. "A comparison of an interior permanent magnet and copper rotor induction motor in a hybrid electric vehicle application." *Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International.* IEEE, 2013.