



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO



FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis:

“MODELADO DE AUTOS ELÉCTRICOS CON MOTORES DE CD”

Que Presenta:

Pedro García Mendoza

PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO ELECTRICISTA

ASESOR:

Dr. Gilberto González Avalos

Morelia, Michoacán, noviembre del 2020

AGRADECIMIENTOS

- **A mis hijas** por ser el pilar más importante, su amor y apoyo incondicional.
- **A mis padres** quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir un sueño más.
- **A mis hermanos y hermana** por estar siempre presentes, por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta etapa de mi vida.
- **Al Doctor Gilberto González Avalos** por su asesoría en el diseño, análisis e interpretación de los resultados, apoyo, conocimiento y consejos para lograr con éxito este proyecto.
- **A la Dra. Ma. del Socorro Aguilar Hernández** por su apoyo durante los 5 años de mi carrera, quien con su experiencia y conocimiento me asesoro en la escritura del presente trabajo.
- **Al FIE** por ser la sede de todo el conocimiento adquirido en estos años y por la organización de la carrera de ingeniería eléctrica.
- **A la UMSNH** la máxima casa de estudios que contribuye a la formación de los estudiantes.

DEDICATORIA

Este trabajo realizado lo dedico con mucho cariño:

A mis hijas:

Yamileth Jazmín García Aguilar

Valeria Lizeth García Aguilar

A mis padres:

María del Carmen Mendoza Robles

Domingo García Martínez

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	II
DEDICATORIA	III
ÍNDICE	IV
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	X
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XI
RESUMEN	1
PALABRAS CLAVE	1
ABSTRACT	2
CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN	3
1.1 INTRODUCCIÓN	3
1.2 OBJETIVO	4
1.3 JUSTIFICACIÓN	4
1.4 METODOLOGÍA	4
1.5 CONTENIDO DE LA TESIS	5
CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES DE AUTOMÓVILES	6
2.1 INTRODUCCIÓN	6
2.2 HISTORIA DE LOS AUTOMÓVILES	6
2.3 CARACTERÍSTICAS DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO	12
2.4 CLASIFICACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS	14
2.5 COMPONENTES DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO	14
2.5.1 BATERÍA	14

2.5.1.1 FUNCIONAMIENTO DE UNA BATERÍA	16
2.5.1.2 DISEÑO DE UNA BATERÍA.....	16
2.5.2 CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS	17
2.5.2.1 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO.....	17
2.5.2.2 BATERÍAS DE NÍQUEL-HIERRO (NI-FE).....	19
2.5.2.3 BATERÍAS DE NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO (NI-MH).....	19
2.5.2.4 BATERÍAS DE IONES DE LITIO (LI-ION).....	19
2.5.2.5 BATERÍAS DE POLÍMERO DE LITIO (LIPO)	20
2.5.2.6 BATERÍAS MÁS NOVEDOSAS	21
2.5.3 ACUMULADOR	22
2.6 ESTADO DEL ARTE ACTUAL	26
CAPÍTULO 3 MODELADO DE MOTORES DE CD	28
3.1 INTRODUCCIÓN	28
3.2 MOTOR DE CORRIENTE CONTINÚA.....	28
3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	29
3.3.1 FUERZA CONTRA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA EN UN MOTOR	31
3.3.2 ESCOBILLAS.....	31
3.3.3 LAMINADO	32
3.3.4 ENTREHIERRO.....	33
3.3.5 REVERSIBILIDAD	33
3.4 CLASIFICACIÓN DE MOTORES DE CORRIENTE DIRECTA	33
3.4.1 MOTORES DE IMANES PERMANENTES	34
3.4.2 CLASES DE MOTORES DE IMANES PERMANENTES	36
3.4.2.1 MOTOR ELÉCTRICO SIN ESCOBILLAS.....	36
3.4.2.2 MOTORES DE PASO A PASO.....	37
3.4.3 MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA TIPO SHUNT	39
3.4.4 MOTOR EN SERIE.....	40
3.4.5 MOTOR COMPUESTO.....	41

CAPÍTULO 4 MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN AUTO ELÉCTRICO	43
4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS (HEV).....	43
4.2 VEHÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS ENCHUFABLES (PHEV):.....	46
4.3 CARACTERÍSTICAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS (VE).....	47
4.4 MODELO DE BATERÍA-MOTOR DE CD.....	48
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	65
5.1 CONCLUSIONES	65
5.2 RECOMENDACIONES	66
BIBLIOGRAFÍA.....	67

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2. 1 MUESTRA UN MODELO <i>JAMAIS CONTENTE</i> DE UNO DE LOS PRIMEROS COCHES ELÉCTRICOS.	7
FIGURA 2. 2 MUESTRA UN MODELO DE COCHE ELÉCTRICO EN EL AÑO DE 1890.	8
FIGURA 2. 3 TAXI ELÉCTRICO DEL AÑO 1915 EN ESTADOS UNIDOS.	8
FIGURA 2. 4 IMAGEN DE UNA ESTACIÓN DE CARGA PARA COCHES ELÉCTRICOS DE 1909.	9
FIGURA 2. 5 VEHÍCULOS ELÉCTRICOS 1898.	10
FIGURA 2. 6 MUESTRA EL PRIMER VEHÍCULO HÍBRIDO TOYOTA PRIUS 1997.	12
FIGURA 2. 7 COMPARACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DEL POZO DE LAS RUEDAS ENTRE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO Y UNO DE GASOLINA (S. EAVES ET AL. 2012).	13
FIGURA 2. 8 MUESTRA LOS PRINCIPALES COMPONENTES EN UN VEHÍCULO ELÉCTRICO.	15
FIGURA 2. 9 BATERÍA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO LITIO METAL SÓLIDO.	17
FIGURA 2. 10 ESQUEMA DE LA CLASIFICACIÓN DE LAS BATERÍAS.	18
FIGURA 2. 11 MUESTRA TRES ESCENARIOS PARA LA CUOTA DE MERCADO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN LOS EE. UU.	27
FIGURA 3. 1 MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA	28
FIGURA 3. 2 ESPIRA DONDE DISTINGUE LAS FUERZAS EJERCIDAS AL INTERACTUAR CON UN CAMPO MAGNÉTICO.	30
FIGURA 3. 3 MUESTRA EL LAMINADO DE ACERO EN UN MOTOR, QUE DISMINUYE LAS PERDIDAS ASOCIADAS A LOS CAMPOS MAGNÉTICOS.	32
FIGURA 3. 4 CLASIFICACIÓN DE LOS MOTORES DC.	34
FIGURA 3. 5 MOTOR DE CD DE IMANES PERMANENTES Y SUS COMPONENTES.	35
FIGURA 3. 6 ESQUEMA DE MOTOR DE CD DE IMÁN PERMANENTE Y CURVA TORQUE-VELOCIDAD DEL MOTOR.	35
FIGURA 3. 7 MOTOR SIN ESCOBILLAS (MOTOR <i>BRUSHLESS</i>).	36
FIGURA 3. 8 MOTOR DE PASO A PASO DE RELUCTANCIA VARIABLE.	38
FIGURA 3. 9 MOTOR PASÓ A PASO TIPO BIPOLAR.	39
FIGURA 3. 10 MOTOR PASO A PASO HÍBRIDO.	39

FIGURA 3. 11 ESQUEMA DE MOTOR DE CD SHUNT Y CURVA TORQUE –VELOCIDAD DEL MOTOR.	40
FIGURA 3. 12 ESQUEMA DE MOTOR DE CD EN SERIE Y CURVA TORQUE-VELOCIDAD DEL MOTOR.	40
FIGURA 3. 13 ESQUEMA DE MOTOR DE CD COMPUESTO Y CURVA TORQUE-VELOCIDAD DEL MOTOR.	41
FIGURA 3. 14 CURVA TORQUE-VELOCIDAD DEL MOTOR.	42
FIGURA 4. 1 DIAGRAMA DE BLOQUE DE HEV, SISTEMA PARALELO.	44
FIGURA 4. 2 DIAGRAMA DE BLOQUE DE HEV, SISTEMA EN SERIE	45
FIGURA 4. 3 DIAGRAMA DE BLOQUE DE HEV, SISTEMA COMBINADO	46
FIGURA 4. 4 DIAGRAMA DE BLOQUE DE PHEV, SISTEMA EN SERIE	47
FIGURA 4. 5 DIAGRAMA DE BLOQUES DE VE	48
FIGURA 4. 6 CIRCUITO RC QUE SIMULA EL COMPORTAMIENTO DE UNA BATERÍA.	49
FIGURA 4. 7 PROCESOS PRINCIPALES PARA EL FUNCIONAMIENTO DE UN VEHÍCULO.	49
FIGURA 4. 8 CIRCUITO RC MOSTRANDO CARGA Y DESCARGA DE UN CAPACITADOR EN FUNCIÓN DEL TIEMPO.	50
FIGURA 4. 9 DIAGRAMA DE BLOQUES QUE SIMULA EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE LA CARGA DE UNA BATERÍA	
CONSIDERANDO $R=3680.96 \Omega$; $C=0.1 \text{ F}$ Y $V_C=24 \text{ v}$.	54
FIGURA 4. 10 GRÁFICA DE VOLTAJE CONTRA TIEMPO MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE CARGA.	55
FIGURA 4. 11 GRÁFICA MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE CARGA DE UNA BATERÍA CON UNA	
RESISTENCIA $R=1000 \Omega$.	55
FIGURA 4. 12 GRÁFICA MOSTRANDO EL COMPORTAMIENTO DINÁMICO DE CARGA DE UNA BATERÍA CON UNA	
RESISTENCIA $R=7200 \Omega$.	56
FIGURA 4. 13 REPRESENTA EL DIAGRAMA ELÉCTRICO Y MECÁNICO Y SU TRANSMISIÓN HACIA UNA CARGA.	57
FIGURA 4. 14 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA PARTE ELÉCTRICA	58
FIGURA 4. 15 CIRCUITO ELECTRO-MECÁNICO CON DOS MOTORES	60
FIGURA 4. 16 A) GRÁFICAS DE VOLTAJE CONTRA TIEMPO. SE TIENE UNA CARGA RÁPIDA EN LA BATERÍA DE $T=4000 \text{ s}$	
.B) A C) GRAFICA DE VELOCIDAD CONTRA TIEMPO. MANTENIENDO EL MOTOR 1 (W-1) A UNA VELOCIDAD	
CONSTANTE DURANTE EL TIEMPO DE 5000 A 14400 s. MOTOR 2 (W-2) ENTRO EN FUNCIONAMIENTO POR UN	

T=5000 s. A 6000 s YA SEA POR UNA PENDIENTE O AL ADQUIRIR MAYOR VELOCIDAD, TENIENDO UN TOTAL DE VELOCIDAD (W-T) DE 250 (RAD/S) APROX.	61
FIGURA 4. 17 A) GRÁFICAS DE VOLTAJE CONTRA TIEMPO. B) A D) GRAFICA DE VELOCIDAD-PAR CONTRA TIEMPO.	62
FIGURA 4. 18 GRÁFICAS CON UNA CARGA DEL 87.5% EN LA BATERÍA Y UNA RESISTENCIA DE 7200 Ω LO QUE IMPLICA QUE PAR-VELOCIDAD NO SON CONSTANTES YA QUE LA BATERÍA AÚN SE ESTÁ CARGANDO, SE PUSO EN OPERACIÓN EL MOTOR 2 (MOSTRADO EN LÍNEA ROJA) A UN LAPSO DE TIEMPO DE T=9000-10000 s. TENIENDO UNA VELOCIDAD TOTAL DE 180 (RAD/S) MÁXIMO ALCANZADO.	63
FIGURA 4. 19 DIAGRAMA DE BLOQUES DE UNA BATERÍA, UN MOTOR DE CD Y PARTE MECÁNICA, SIMULADO MEDIANTE EL PROGRAMA 20SIM.	64

LISTA DE TABLAS

TABLA 2. 1 MUESTRA LAS PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE TRES TIPOS DE CARROS ELÉCTRICOS [4]..... 14

TABLA 2. 2 DATOS COMPARATIVOS DE LOS DIFERENTES TIPOS DE ACUMULADOR.....22

GLOSARIO DE TÉRMINOS

20sim	Paquete de software de modelado y simulación para sistemas mecatronicos.
Ah	Amper-hora
Ah/Kg	Amper-hora por cada kilogramo
Atkinson	Motores de combustión interna con ciclos de 4 tiempos
BEV	Vehículo eléctrico a batería
Bypass	Desvió para evitar un obstáculo
C.C.	Corriente continúa
CA	Corriente alterna
CD	Corriente directa
Ciclo otto	Motores de combustión interna con ciclos de 4 tiempos con una potencia inferior a ciclo atkinson
Dif.	Diferencial
Ea	Diferencia de potencia
Embrague	Es un sistema que permite tanto transmitir como interrumpir la transmisión de una energía mecánica a su acción final de manera voluntaria.
f	Coeficiente de fricción.
F.E.M.	Fuerza electromotriz
FCEVs	Vehículos eléctricos de celda de combustible
HEVs	Vehículos eléctricos híbridos
Inversor	Dispositivo que cambia o transforma una tensión de entrada de corriente continúa a una tensión simétrica de salida de corriente alterna,
J	Momento de inercia total.
La	Inductancia en la armadura.
mAh	miliamperio-hora
MCI	Motor de combustión interna
PEVs	Vehículos eléctricos enchufable
PHEV	Vehículo híbrido eléctrico enchufable

R	Resistencia.
Ra	Resistencia en la armadura.
RPM	Revoluciones por minuto
T	Torque del motor.
Vc	Voltaje en el capacitor
Vcarga	Fuente que carga la batería.
VCI	Vehículo de Combustión Interna
VE	Vehículo Eléctrico
W	Velocidad angular.
Wh	watt-hora
ZEV	Vehículo de cero emisiones

RESUMEN

En los últimos años el desarrollo de los vehículos eléctricos incrementó a un ritmo elevado debido a las innovaciones en la tecnología industrial y de motores, mientras que la alta demanda de combustibles fósiles por parte del sector del transporte, genera una disminución continua de los combustibles fósiles. Los vehículos eléctricos se han convertido en una alternativa seria. En los países con una industria avanzada, los vehículos eléctricos pronto se convertirán en una necesidad más que en una buena alternativa, ya que, uno de los puntos principales en el desarrollo de vehículos eléctricos es recorrer distancias más largas con menos energía y almacenar más energía tanto en baterías pequeñas como ligeras. Además, un informe reciente afirma que para 2025 los automóviles eléctricos y otros automóviles ecológicos se llevarán un tercio del total de las ventas mundiales de automóviles, debido a la búsqueda de fuentes de energía limpia para operar millones de vehículos ya que representan un problema serio por la liberación de emisiones tóxicas de los motores de combustión interna.

En este trabajo se analiza una visión general de los vehículos eléctricos con motores CD. Se presenta su diseño, modelado y rendimiento para evaluar el funcionamiento, alcances y límites que tiene con respecto a los motores de corriente alterna. Así mismo, hace énfasis en la necesidad de vehículos eléctricos y sus expectativas futuras mediante la verificación de los fundamentos del vehículo, el rendimiento y los resultados de modelado.

PALABRAS CLAVE

Vehículo Eléctrico, Motor CD, Modelado, Sim20, eficiencia.

ABSTRACT

In recent years, electric vehicles have increased at a high rate due to industrial and motor technology. In contrast, the increased demand for fossil fuels generates a continuous decrease in fossil fuels. Electric vehicles have become a serious alternative. In countries with advanced industry, electric cars will soon become a necessity rather than a good option. One of the main points of electric vehicles is to travel longer distances with less energy and store more energy both in small and light batteries. A recent report states that by 2025 electric cars and other green cars will take a third of total global car sales due to the search for clean energy sources to operate millions of vehicles. They represent a severe problem for the release of toxic emissions from internal combustion engines.

In this work, an overview of electric vehicles with DC motors is analyzed. Its design, modeling, and performance are presented to evaluate the operation, ranges, and limits concerning alternating current motors. It also emphasizes the need for electric vehicles and their future expectations by verifying vehicle fundamentals, performance, and modeling results.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La dependencia del petróleo y la electricidad ha convertido la energía en un componente vital de nuestras necesidades cotidianas. El incremento en los precios del petróleo y el gas ha llevado a todos a analizar detenidamente los problemas relacionados con nuestra oferta y demanda de energía. En el siglo XX, la población se cuadruplicó y nuestra demanda de energía aumentó 16 veces. La demanda exponencial de energía está agotando nuestro suministro de combustible fósil a un ritmo alarmante[1, 2]. Por otra parte, en los últimos años incrementó la problemática de emisiones de gases tóxicos en el mundo, por ejemplo el dióxido de carbono que es nocivo para la salud, lo que representa un grave problema en el medio ambiente. La búsqueda de nuevas alternativas de almacenamiento de energía es deseable, que sean de bajo costo, fácil fabricación, amigables con el medio ambiente y competentes con los métodos de almacenamiento convencionales.

Los vehículos eléctricos son un componente inevitable del futuro del transporte terrestre, en países como Estados Unidos actualmente tiene la oportunidad de establecerse como un líder mundial del mercado en esta tecnología. Los vehículos eléctricos reducirán las emisiones perjudiciales para la salud y las emisiones de gases de efecto invernadero, proporcionará nuevas fuentes de empleo e inversión nacionales, disminuirá la dependencia del país del petróleo importado y mejorará la balanza comercial [3].

1.2 OBJETIVO

Analizar el modelo de comportamiento de un motor de CD en carros eléctricos, mediante la medición y análisis de una variación de carga o descarga de batería.

1.3 JUSTIFICACIÓN

La población mundial aumentará de 6 mil millones en 2000 a 10 mil millones en el año 2050, y los vehículos globales aumentarán de 700 millones a 2.5 billones consecuentemente. Si todos los vehículos son impulsados por motores de combustión interna, la gasolina y el combustible diésel se agotarán rápidamente, y la emisión resultará en efecto invernadero. Por lo tanto, la conservación de la energía y la protección del medio ambiente son preocupaciones crecientes en todo el mundo[4]. El interés del desarrollo de nuevos vehículos propulsados por fuentes de energías alternativas renovables ha incrementado significativamente en los últimos años. En este trabajo, el modelo que se va analizar estará enfocado en la investigación de carros eléctricos compactos aptos para una o dos personas, por ejemplo carros de campo de golf, motos eléctricos, entre otros.

1.4 METODOLOGÍA

Mediante el uso de la teoría y análisis de datos se pretende evaluar un estudio de un motor de CD, para comprender los cambios de velocidad y par en la transmisión diferencial en las llantas de un vehículo, estimando el comportamiento del voltaje y corriente respecto al tiempo. Con ayuda del programa 20SIM se propone evaluar el comportamiento del voltaje carga-descarga utilizando como variables la resistencia, capacitancia e inductancia para la determinación de cálculos. Este programa es de manejo fácil y una herramienta que facilita los cálculos matemáticos empleando diagramas de bloques.

1.5 CONTENIDO DE LA TESIS

En el primer capítulo se plantea la problemática, se establecen los objetivos del presente trabajo, así como la justificación las ventajas y desventajas del mismo. El segundo capítulo refiere a los antecedentes, clasificación, componentes y características de los automóviles desde su origen hasta la actualidad. En el tercer capítulo se exponen los diferentes tipos de motores, su principio de funcionamiento y componentes principales. En el cuarto capítulo se describe el modelado y simulación de un auto eléctrico realizado mediante el programa de 20SIM donde se analizó el comportamiento de respuesta de salida de la tracción de las llantas. La resistencia, capacitor e inductancia se utilizaron como variables en la simulación indicando el comportamiento. El quinto capítulo contiene las conclusiones y recomendaciones del trabajo realizado.

CAPÍTULO 2 ANTECEDENTES DE AUTOMÓVILES

2.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo contiene la historia y de la evolución de los automóviles, así como conceptos básicos de los componentes y clasificación de los diferentes automóviles en la actualidad y por último se presenta un estado de arte actual.

2.2 HISTORIA DE LOS AUTOMÓVILES

A principios del siglo, innovadores de los países de Hungría, Holanda y Estados Unidos iniciaron a idear los primeros conceptos de vehículos alimentados por la electricidad. El primer coche eléctrico data del año 1834, mientras que el motor de combustión interna, más complejo que un motor eléctrico, llegó hasta 1861. La comercialización de coches eléctricos comenzó en 1852, pero esos primeros vehículos eléctricos no usaban baterías recargables. En la Fig. 2.1 se muestra una imagen de uno de los primeros coches eléctricos. Las baterías recargables aparecieron a finales del siglo XIX, inventadas por los franceses Gaston Planté y Camille Faure. Este tipo de baterías recargables propiciaron el auge del coche eléctrico. En 1852, Gaston Planté inventó la batería recargable de plomo y ácido. Pero su fabricación a nivel industrial no era posible. Fue en 1880 que Camille Faure inventó un procedimiento electroquímico llamado masa activa que aumentaba la capacidad de carga de la batería de Planté. La fabricación a nivel industrial de la batería recargable de plomo y ácido sería a partir de entonces una realidad comercial.



Figura 2. 1 Muestra un modelo *Jamais Contente* de uno de los primeros coches eléctricos.

El poder recargar la batería hizo que el coche eléctrico se impusiera como el automóvil por excelencia a principios del siglo XX. El coche eléctrico fue uno de los primeros automóviles que se desarrollaron. Con el motor diésel y motor a gasolina crearon las bases sobre las que se sustenta hoy el automóvil. En el periodo de 1830-1840, Robert Anderson, diseñó el primer vehículo eléctrico puro. Mientras, en los Países Bajos, el profesor Sibrandus Stratingh de Groninga construyó vehículos eléctricos a escala reducida en 1835. En los Estados Unidos de América, el coche eléctrico no debutó hasta el 1890 gracias al químico Williams Morrison. Era una especie de vagoneta eléctrica para 6 pasajeros con una velocidad punta de unos 22 km/h (ver Fig. 2.2), el prototipo no era un coche espectacular, pero ayudó a que el interés por la tecnología proliferase en el país.



Figura 2. 2 Muestra un modelo de coche eléctrico en el año de 1890.

Fue entonces cuando los vehículos eléctricos de diferentes compañías comenzaron a rodar por los caminos y carreteras de los Estados Unidos. Lo más destacable era la flota de taxis eléctricos de New York City (ver Fig. 2.3), un artículo del archivo del New York Times de 1915 que parece escrito en el futuro donde describe su funcionamiento.



Figura 2. 3 Taxi eléctrico del año 1915 en Estados Unidos.

En 1900 el coche eléctrico estaba, de repente, en auge pese a ser todavía una tecnología en sus primeros años de vida. En la siguiente década mostrarían fuertes ventas entre la población más pudiente.

El vapor supuso uno de los mayores avances en la historia de la humanidad y fue el responsable de la creación de fábricas, trenes, etc. Eso sí, los primeros coches a vapor no llegaron hasta finales del siglo XIX debido a las innumerables complicaciones. No resultó ser un combustible práctico dado que requerían tiempos de calentamiento de casi una hora en invierno y, al tener que rellenar el depósito de agua constantemente, se limitaba demasiado su autonomía. Pero llegaron dos soluciones mucho más atractivas a comienzo del siglo XX, los coches eléctricos y los coches de gasolina. Los primeros automóviles a gasolina fueron desarrollados por ingenieros alemanes de forma independiente: Karl Benz construyó su primer modelo (el Benz Patent-Motorwagen) en 1885 en Mannheim. Benz lo patentó el 29 de enero de 1886 y empezó a producirlo en 1888. Poco después, Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach, de Stuttgart, diseñaron su propio automóvil en 1889. En la Fig. 2.4 se muestra una estación de carga para coches eléctricos del año 1909.

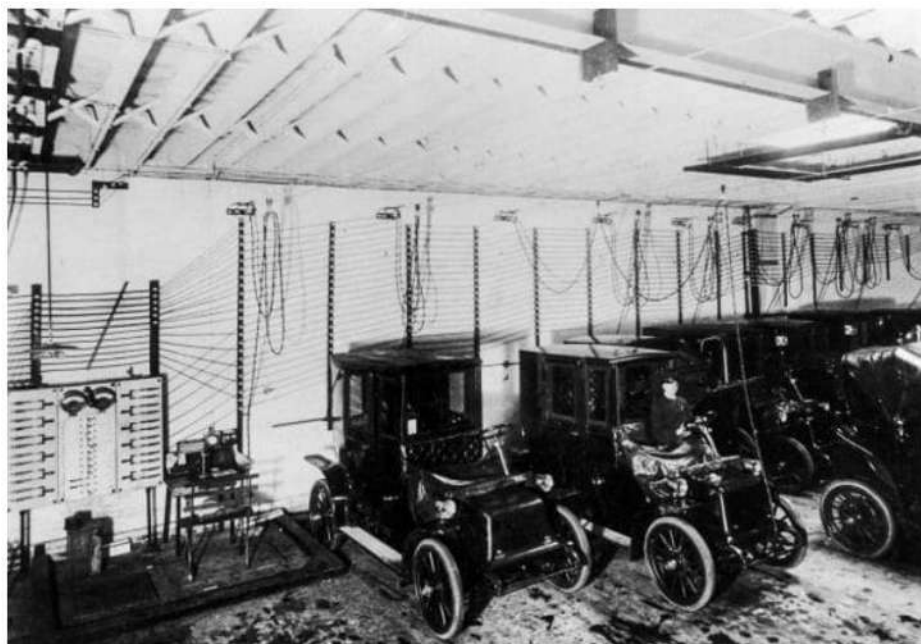


Figura 2. 4 Imagen de una estación de carga para coches eléctricos de 1909.

Los coches de gasolina ya eran atractivos, sin embargo eran muy difíciles de manejar y cambiar de marcha, costoso de operar debido a que se hacía a través de una manivela. Por si fuera poco, hacían un ruido atronador y la cantidad de humo que expulsaban era muy molesta. No eran coches como los que conocemos hoy.

De forma casi paralela se presentaban vehículos eléctricos (ver Fig. 2.5) que no tenían los compromisos de los coches a vapor o gasolina. No hacían ruido, no emitían grandes volúmenes de humo desagradable y eran los más fáciles de manejar. Comenzaron a ser una opción bastante popular en las grandes urbes, especialmente para las mujeres debido a su mayor facilidad de conducción. Eran perfectos para viajes cortos dentro de las ciudades que carecían de tantos métodos de transporte como los que disponen en la actualidad. Además, la electricidad comenzaba a ser adoptada por todas las ciudades con rapidez por lo que cargar un coche eléctrico resultaba más sencillo. Muchos inventores, atraídos por la demanda del vehículo eléctrico, comenzaron a investigar cómo mejorar la tecnología. Nombres propios, ahora conocidos por su marca, como Ferdinand Porsche fundaron compañías enfocadas a los coches eléctricos. Porsche, enfocada en los deportivos, presentó el P1 en 1898.



Figura 2. 5 Vehículos eléctricos 1898.

Thomas Edison también consideraba el carro eléctrico como la mejor opción y trabajó en varios prototipos. Por otra parte Henry Ford. Montó su propia empresa, la cual arruinó debido a que consumía todo el tiempo mejorando sus prototipos en lugar de venderlos, Después de dos intentos fracasados, a la tercera fue la vencida. Henry Ford creó la Ford Motor Company el 16 de junio de 1903. Ford exhibió un coche capaz de cubrir una milla en el lago helado de S. Clair en sólo 39,4 segundos. El piloto Barney Oldfield quedó asombrado y condujo ese coche a lo largo y ancho del país, haciendo que la marca Ford fuese conocida en todos los EE.UU. Además Ford no sólo era capaz de sorprender con sus desarrollos en motor de gasolina, era también un gran empresario. Pagaba a 5 dólares el día, un salario desorbitado para la época. Pero esa táctica hizo que los mejores mecánicos trabajasen para él, incrementando la productividad y reduciendo, en el cómputo global, los costos.

En 1912, un vehículo eléctrico costaba \$1.750 y uno de gasolina \$650. Otros avances ayudaron a que el coche eléctrico cayese hasta nuestros tiempos. Las ciudades comenzaban a estar mejor conectadas mediante carreteras y se descubrieron los yacimientos de crudo en Texas. La gasolina comenzaba a ser barata y estaba disponible en las zonas rurales mediante las estaciones de repostaje que iban apareciendo por el país. La electricidad sólo estaba disponible en las ciudades. Finalmente, en 1935 el coche eléctrico desaparece.

El renacer del coche eléctrico tuvo un claro protagonista: el Toyota Prius. Fue el primer vehículo, puesto a la venta en 1997 en Japón (Mostrado en la Fig. 2.6), híbrido producido en masa. Lanzado en todo el mundo en el año 2000, pronto se convirtió en un éxito entre las celebridades ayudando a que la tecnología se conociese. El creciente precio de la gasolina y las preocupaciones por el cambio climático ayudaron a que el Prius fuese un vehículo muy popular hasta nuestros días. Otro punto clave fue el anuncio de la fundación de una pequeña startup en Silicon Valley llamada Tesla Motors: empresa que produciría lujosos deportivos eléctricos con gran autonomía. Hoy en día todo el mundo conoce Tesla y la compañía de Elon Musk es una de las mayores propulsoras de la tecnología.



Figura 2. 6 Muestra el primer vehículo híbrido Toyota Prius 1997.

Stefano Campanari y Col. Reportaron que al usar fuentes de energía 100% renovables para generar electricidad, el BEV (Battery Electric Vehicle) es la opción más eficiente, obviamente también con cero emisiones; cuando se utiliza una mezcla de fuente primaria promedio en la generación de electricidad, o una alimentación de 100% de carbón o gas natural, los rendimientos de BEV son mucho más bajos, y las soluciones de FCEV (Fuel Cell Electric Vehicle) se vuelven mucho más favorables tanto desde el punto de vista de la eficiencia como de las emisiones de CO₂, especialmente si el requisito del campo de prácticas se vuelve significativo (por ejemplo, varios cientos de kilómetros) debido al aumento progresivo del peso de la batería [5].

2.3 CARACTERÍSTICAS DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

Para comprender mejor cuando se dice vehículo eléctrico, se debe tener claro que se trata de un vehículo que sólo se alimenta de una batería incorporada a él y que, esta batería, debe ser cargada por medio de una conexión al sistema eléctrico, el cual produce la energía necesaria para que se ponga en marcha. Cuando se habla de vehículo, se refiere a coches, motocicletas, buses, furgonetas, etc. Dependiendo del tipo de batería, es decir, del material de fabricación de ésta, se obtiene una autonomía la cual determina la cantidad de

kilómetros que el vehículo puede recorrer una vez tenga la carga completa. Los VEs presentan un notable ahorro de energía primaria si se compara con un Vehículo de combustión interna - VCI. El propio sector de la automoción reconoce que el motor de explosión, tanto de gasolina como de gasóleo, se está quedando obsoleto y tiene índices de eficiencia energética muy bajos. Menos del 30% de la energía contenida en el combustible llega realmente a las ruedas y las emisiones siguen siendo elevadas, aunque se mejore la tecnología del vehículo. Por su parte, el VE, tiene una eficiencia mucho más alta y las emisiones se reducen notablemente, sobre todo si se utilizan energías renovables para la generación de energía.

A continuación, en la Fig. 2.7 se compara la eficiencia de un vehículo eléctrico con uno de combustión interna, ambos alimentados por petróleo como energía primaria. En este ejemplo, la generación de energía para el VE, en la fuente, es tan sólo del 30% y la del VCI es de 83 %, aun así la eficiencia en las ruedas del VE es de 24 % y el de el VCI de 16%, lo que nos muestra que al VCI sólo ésta llegando 20 % de la energía contenida en el combustible, mientras que al VE le llega el 80% de la energía contenida en la batería.

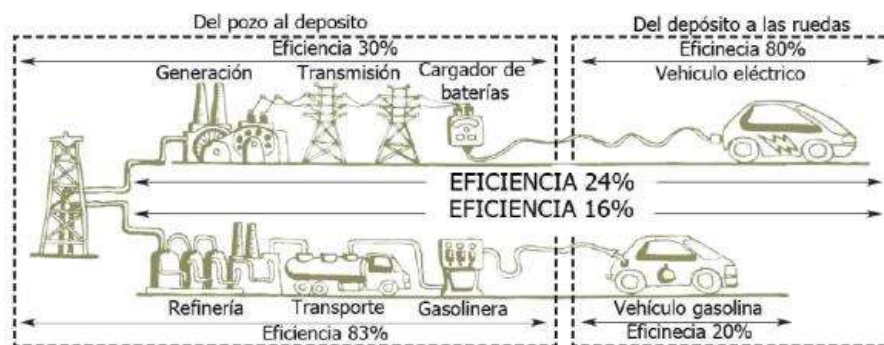


Figura 2. 7 Comparación de la eficiencia energética del pozo de las ruedas entre un vehículo eléctrico y uno de gasolina (S. Eaves et al. 2012).

2.4 CLASIFICACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Los vehículos eléctricos se pueden clasificar en tres tipos: vehículos eléctricos puros (PEVs), vehículos eléctricos híbridos (HEVs) y vehículos eléctricos de celda de combustible (FCEVs). Hoy en día, se encuentran en diferentes etapas de desarrollo debido a la tecnología existente [4]. En la tabla 2.1 se muestra las diferentes características de los vehículos eléctricos que actualmente son más amigables con el medio ambiente.

Tabla 2. 1 Muestra las principales características de tres tipos de carros eléctricos [4].

Types of EV	PEV	HEV	FCEV
Energy source	(i) Battery	(i) Battery/ultracapacitor (ii) Internal combustion engines	(i) Fuel cells
Propulsion technique	(i) Electric motor drives	(i) Electric motor drives (ii) Internal combustion engines	(i) Electric motor drives
Characteristics and feature	(i) Zero emission (ii) Short driving range (iii) Higher initial costs	(i) Low emission (ii) Longer range (iii) Complex	(i) Zero emission (ii) Highest initial costs (iii) Medium driving range
Major techniques	(i) Electric motor control (ii) Battery management (iii) Charging device	(i) Electric motor control (ii) Battery management (iii) Managing multiple energy sources and optimal system efficiency (iv) Components sizing	(i) Fuel processor (ii) Fueling system (iii) Fuel cell cost
Regenerative braking	(i) Yes	(i) Yes	(i) Yes

2.5 COMPONENTES DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

Los elementos principales que forman parte de un vehículo eléctrico son: la fuente de energía (batería), el motor eléctrico de corriente directa (CD) o corriente alterna (CA), base de enchufe de carga y las ruedas de atracción, son las partes a modelar y analizar (ver Fig. 2.8).

2.5.1 BATERÍA

La batería es uno de los principales componentes de todo vehículo eléctrico. Su importancia es tal que la autonomía y el precio del coche dependen del tipo y tamaño de la misma. Este acumulador de energía almacena la electricidad mediante elementos

electroquímicos, un proceso con pérdidas mínimas que permite un rendimiento próximo al 100%. Las baterías, dispuestas a entregar esta energía en cualquier momento, soportan un número finito de ciclos de carga y descarga completos, llamado ciclo de vida.

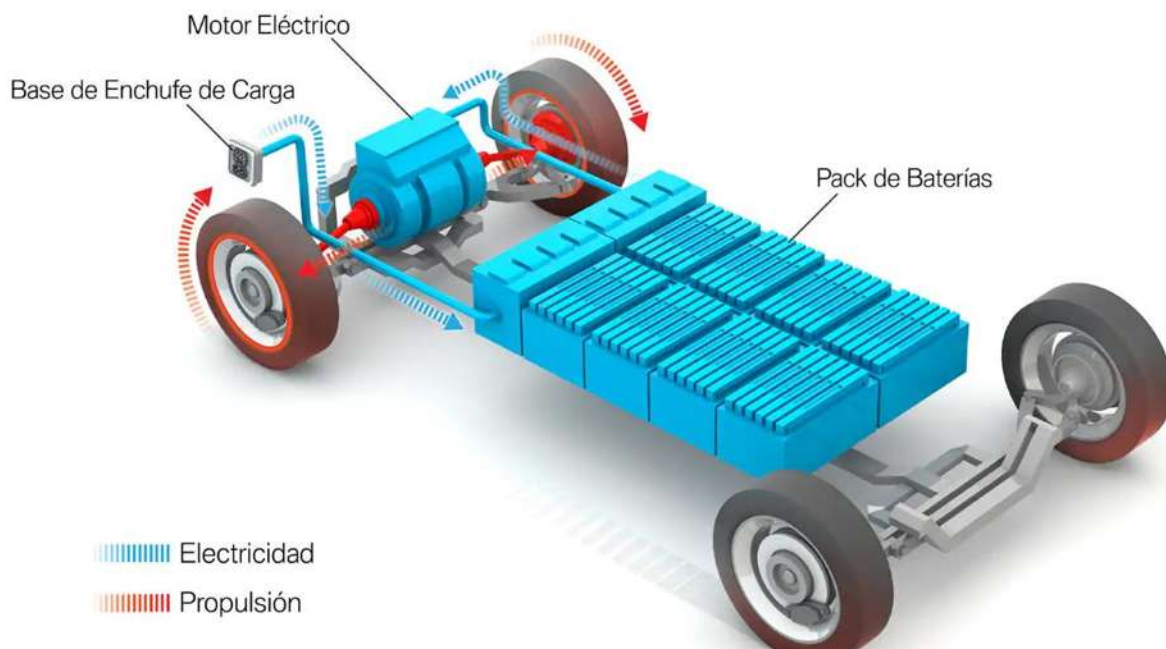


Figura 2. 8 Muestra los principales componentes en un vehículo eléctrico.

Los principales parámetros que se deben considerar en una batería para un vehículo eléctrico son:

- **Densidad energética:** Expresada en Wh/kg. Es la energía que puede suministrar la batería por cada kg. Cuanto mayor sea más autonomía tendrá el vehículo o menor será el peso de este.
- **Potencia:** Expresada en (W/kg). Es la capacidad de proporcionar potencia (amperaje máximo) en el proceso de descarga. A más potencia mejores prestaciones para el vehículo eléctrico.
- **Eficiencia:** Es el rendimiento de la batería, la energía que realmente aprovecha. Medido en (%).
- **Costo:** Es la mayor influencia en el precio total del vehículo.

- **Ciclo de vida:** Ciclos completos de carga y descarga que soporta la batería antes de ser sustituida. Cuanto más ciclo mejor, ya que será más duradera.

2.5.1.1 FUNCIONAMIENTO DE UNA BATERÍA

La explicación química del funcionamiento de los diferentes tipos de batería para coche eléctrico consiste en el aprovechamiento de la energía que se desprende de reacciones de oxidación-reducción para producir una corriente eléctrica. Esto sería fundamentalmente el proceso de descarga, siendo a la inversa, mediante el uso de una corriente eléctrica para producir un cambio químico, el proceso de carga. Una reacción de oxidación-reducción, conocida como «redox», es un proceso donde uno de los componentes de la batería pierde electrones y el otro los gana, uno se oxida y otro se reduce respectivamente. Una batería está formada por dos electrodos llamados ánodo y cátodo, sumergidos en un electrolito. El primero de ellos se oxidará, mientras que el segundo ganará electrones, reduciéndose. Esto ocurre en el proceso de descarga, y es debido a que la electricidad tiene signo opuesto al flujo de electrones, por lo que esta irá desde el polo positivo (cátodo) hasta el negativo (ánodo). En el proceso de carga ánodo y cátodo se invierten para que el primero vuelva a ganar los electrones perdidos durante la conducción.

2.5.1.2 DISEÑO DE UNA BATERÍA

En la Figura 2.9 se muestra una batería de litio metal que se está diseñando para futuro próximo, protegido contra la corrosión. Esta tecnología se basa de iones de litio, esto con el fin de triplicar su capacidad, cambiar el electrolito líquido por un sólido.



Figura 2. 9 Batería de un vehículo eléctrico litio metal sólido.

El diseño de una batería prácticamente es que la carga sea duradero, compacto y tenga varios ciclos de carga.

2.5.2 CLASIFICACIÓN DE BATERÍAS

De acuerdo a su naturaleza interna y características electroquímicas las baterías son clasificadas como se muestra en la Fig. 2.10.

2.5.2.1 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

Está constituida por dos electrodos de plomo, de manera que, cuando el aparato está descargado, se encuentra en forma de sulfato de plomo (II) (PbSO_4) incrustado en una matriz de plomo metálico en el elemento metálico (Pb); el electrolito es una disolución de ácido sulfúrico.

Ciclos y vida: Este proceso no se puede repetir indefinidamente, porque, cuando el sulfato de plomo (II) forma cristales, ya no responden bien a los procesos indicados, con lo que se pierde la característica esencial de la reversibilidad. Se dice entonces que la batería se ha «sulfatado» y es necesario sustituirla por otra nueva. Las baterías de este tipo que se venden actualmente, utilizan un electrolito en pasta, que no se evapora y hace mucho más segura y cómoda su utilización. Entre sus ventajas destaca su bajo costo y fácil fabricación. Las desventajas que tiene es que no admiten sobrecargas ni descargas profundas, viendo seriamente disminuida su vida útil, son altamente contaminantes y tienen baja densidad de energía: 30 Wh/kg. Además su peso excesivo, al estar compuesta principalmente de plomo; por esta razón su uso en automóviles eléctricos no es viable.

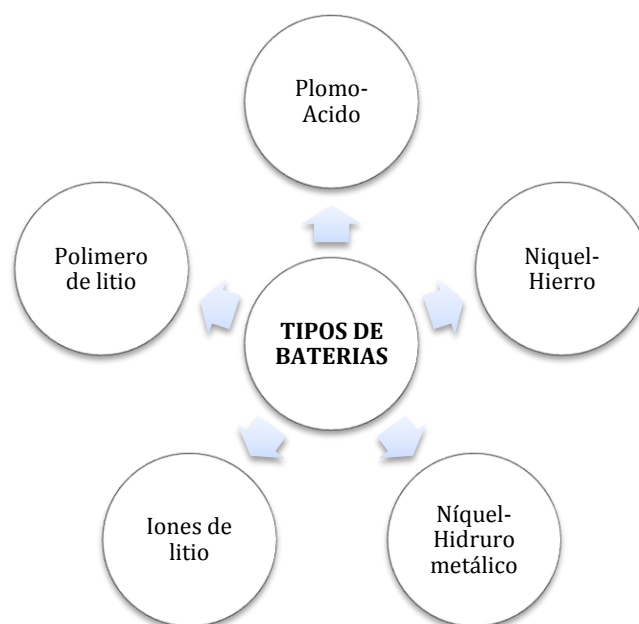


Figura 2. 10 Esquema de la clasificación de las baterías.

2.5.2.2 BATERÍAS DE NÍQUEL-HIERRO (NI-FE)

La batería de níquel-hierro, también denominada de ferroníquel, fue inventada por Waldemar Jungner en 1899, posteriormente desarrollada por Thomas Alva Edison y patentada en 1903. En el diseño original de Edison el cátodo estaba compuesto por hileras de finos tubos formados por láminas enrolladas de acero niquelado, estos tubos están rellenos de hidróxido de níquel u oxi-hidróxido de níquel. El ánodo se componía de cajas perforadas delgadas de acero niquelado que contienen polvo de óxido ferroso. El electrolito es alcalino, una disolución de un 20 % de potasa cáustica en agua destilada. Por mencionar algunas de sus ventajas son de bajo costo, fácil fabricación, admite sobrecargas, repetidas descargas totales e incluso cortocircuitos sin pérdida significativa de capacidad, no es contaminante, no contiene metales pesados y el electrolito diluido se puede usar en aplicaciones agrícolas, tiene una larga vida útil, está compuesta de elementos abundantes en la corteza de la tierra (hierro, níquel, potasio) y funciona en un mayor rango de temperaturas, entre -40°C y 46°C . Como desventaja es que sólo posee una eficiencia del 65 %

2.5.2.3 BATERÍAS DE NÍQUEL-HIDRURO METÁLICO (NI-MH)

Utilizan un ánodo de hidróxido de níquel y un cátodo de una aleación de hidruro metálico. Este tipo de baterías se encuentran menos afectadas por el llamado efecto memoria. Aunque tienen las desventajas no admiten bien el frío extremo, reduciendo drásticamente la potencia eficaz que puede entregar. Se caracterizan por tener Voltaje proporcionado: 1,2 V, Densidad de energía: 80 Wh/kg, Capacidad usual: 0,5 a 2,8 A (en pilas tipo AA) y Efecto memoria: bajo.

2.5.2.4 BATERÍAS DE IONES DE LITIO (LI-ION)

Las baterías de iones de litio (Li-ion) utilizan un ánodo de grafito y un cátodo de óxido de cobalto, trifilina u óxido de manganeso. Su desarrollo es más reciente, y permite llegar a

altas densidades de capacidad. No admiten descargas y sufren mucho cuando éstas suceden; por lo que suelen llevar acoplada circuitería adicional para conocer el estado de la batería, y evitar así tanto la carga excesiva como la descarga completa. Apenas sufren el efecto memoria y pueden cargarse sin necesidad de estar descargadas completamente, sin reducción de su vida útil, Altas densidades de capacidad, no admiten bien los cambios de temperatura ni descargas completas y sufren mucho cuando estas suceden. Poseen Voltaje proporcionado: a plena carga: entre 4,2 V y 4,3 V dependiendo del fabricante., a carga nominal: entre 3,6 V y 3,7 V dependiendo del fabricante y a baja carga: entre 2,65 V y 2,75 V dependiendo del fabricante (este valor no es un límite, se recomienda). También tienen Densidad de energía: 115 Wh/kg, Capacidad usual: 1,5 a 2,8 A (en pilas tipo AA), Efecto memoria: muy bajo.

2.5.2.5 BATERÍAS DE POLÍMERO DE LITIO (LIPO)

Son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion). Sus características son muy similares, pero permiten una mayor densidad de energía, así como una tasa de descarga bastante superior. Estas baterías tienen un tamaño más reducido respecto a las de otros componentes.

Cada celda tiene un voltaje nominal de 3,7 V, voltaje máximo 4,2 V y mínimo 3,0 V. Este último debe respetarse rigurosamente ya que la pila se daña irreparablemente a voltajes menores a 3 volts. Se suele establecer la siguiente nomenclatura XSYP que significa X celdas en serie y en paralelo. Por ejemplo 3s2p son dos baterías en paralelo, donde cada una tiene tres celdas o células. Esta configuración se consigue conectando ambas baterías con un cable paralelo. Mayor densidad de carga, por tanto tamaño reducido, Buena velocidad de descarga, bastante superior a las de iones de litio. Quedan casi inutilizadas si se descargan por debajo del mínimo de 3 volts.

2.5.2.6 BATERÍAS MÁS NOVEDOSAS

Una compañía suiza llamada NanoFlowcell lleva años hablando de una revolución en la conducción de vehículos eléctricos. La empresa ha confirmado la presentación durante el Salón del Automóvil de Ginebra 2017 de su último prototipo, el Quant 48Volt, que eleva el concepto de eléctrico a un nivel superior. Hablamos de una batería de flujo que permite 1.000 kilómetros de autonomía y un motor de 770 CV que alcanza los 300km/h con una distribución inteligente de la potencia. Lo que le hace especial es que su batería dista de ser convencional, ya que este modelo cuenta con una tecnología de pila de combustible electrolítico.

El concepto fue patentado por la NASA en 1976: la idea era encontrar una forma más eficiente de almacenar energía para los viajes espaciales. De esta forma, se llegó a la utilización de las baterías de flujo. Su funcionamiento en las baterías de flujo, la energía es almacenada a través de electrolitos líquidos, que son básicamente agua con sales metálicas. NanoFlowcell afirma que un kilogramo de este líquido es capaz de almacenar 20 veces más energía que un kilogramo de las baterías convencionales y cinco veces más que las de ion-litio.

Los líquidos nunca reaccionan entre ellos, ya que se almacenan en dos tanques separados: uno positivo y otro negativo que se llenan en cinco minutos, y al descargarse ocurre la magia. La tecnología de NanoFlowcell hace que los líquidos interactúen a través de una membrana, y del proceso se produce la energía eléctrica. En este punto se distribuye a los cuatro motores eléctricos localizados en cada una de las ruedas, pero montados en el centro del vehículo. Cuenta con unas prestaciones muy a tener en cuenta: cada una de las baterías tienen 140 kW que permiten 1,000 kilómetros de autonomía con cada depósito y pasar de 0 a 100 en 2,4 segundos. El líquido con el que se llenan los tanques es inocuo: no es ni inflamable ni tóxico ni se precisan de grandes presiones durante el proceso y el posterior almacenamiento, y además el procedimiento de llenado es similar al de un coche convencional. (Costos, materiales usados eficiencia) Mayor eficiencia del motor, Cero emisiones, Silencio total, Costes de la energía, Menores costes de mantenimiento, Frenado

regenerativo, Comodidad y confort, Impuestos e incentivos, Peso de la batería, Vida útil de las baterías, Rendimiento en bajas temperaturas y su autonomía

Otra de las ventajas de los coches totalmente eléctricos es que son el tipo de vehículos eléctricos que tienen más prioridad a la hora de acceder a las ayudas públicas y las ventajas fiscales. Este tipo de coches son ideales para quienes se desplazan de forma cotidiana en entornos urbanos y pueden cargar la batería del vehículo eléctrico en casa o en el trabajo. La infraestructura pública aún está por desarrollar en muchos países. Aún así, se están implementando constantemente nuevas estaciones de carga en las zonas metropolitanas y a lo largo de las autovías.

2.5.3 ACUMULADOR

En la actualidad han sido reportados diversos tipos de acumulador como el de plomo, Niquel- Fierro, Niquel-Cadmio etc. los cuales son seleccionados de acuerdo a sus ventajas que poseen, en la tabla 2.2 se puede apreciar algunas características básicas que deben considerarse para su elección.

Tabla 2. 2 Datos comparativos de los diferentes tipos de acumulador.

Tipo ⇄	Energía/ peso ⇄	Tensión por elemento (V) ⇄	Duración (número de recargas) ⇄	Tiempo de carga ⇄	Auto-descarga por mes (% del total) ⇄
Plomo	30-40 Wh/kg	2 V	1000	8-16h	5 %
Ni-Fe	30-55 Wh/kg	1,2 V	+ de 10 000	4-8h	10 %
Ni-Cd	48-80 Wh/kg	1,25 V	500	10-14h *	30 %
Ni-Mh	60-120 Wh/kg	1,25 V	1000	2h-4h *	20 %
Li-Ion	110-160 Wh/kg	3,7 V	4000	2h-4h	25 %
Li-Po	100-130 Wh/kg	3,7 V	5000	1h-1,5h	10 %

La tensión o diferencia de potencial (volts): es el primer parámetro a considerar, ya que, determina si el acumulador es viable al uso al cual se le destina. Viene fijado por el potencial de reducción del par redox utilizado; suele estar entre 1 v y 4 v por elemento.

Se le define como el trabajo realizado sobre la unidad de carga circulante. La unidad de tensión es el voltio, de ahí que se llame a menudo voltaje. Matemáticamente:

$$V = \frac{dW}{dq} \quad \text{Dónde: } V: \text{ voltaje, } W: \text{ trabajo, } q: \text{ carga}$$

Simplificando mucho, mediante una analogía mecánica, la diferencia de potencial es como la altura de una cascada de agua. Cuanta más alta sea la cascada, mayor será la energía disponible para mover una rueda. Una cascada de agua de altura pequeña moverá poco la rueda, realizara poco trabajo. Una cascada de mayor altura moverá mucho la rueda, realizara más trabajo. Por ello si se quiere obtener más trabajo se necesita una pila de tensión superior. Por ejemplo en autos, cuanto más voltaje tenga la batería será mayor la potencia que mueve el automóvil.

Intensidad de corriente: Es la carga eléctrica neta (medida en culombios) transferida a través de una sección transversal de un conductor por unidad de tiempo. Su definición formal es

$$I = \frac{dq}{dt} \quad \text{Donde: } (I) \text{ intensidad de la corriente, } (q) \text{ carga y } (t) \text{ tiempo}$$

Siguiendo la analogía anterior, la densidad de la corriente es como el flujo o corriente de agua de la cascada que mueve la rueda. En motores de corriente continua cuanto mayor es la corriente mayor será el par del motor que puede suministrar el motor. Siendo simplista más potencia podrá dicho motor.

Capacidad de carga: La capacidad de carga o capacidad del acumulador es la carga puede almacenar el elemento. Se mide en amperes-hora (Ah) y es el segundo parámetro a considerar. En las baterías de baja capacidad de carga, suele expresarse en miliamperios-hora (mAh).

Una capacidad de carga de 1 amperio-hora significa que la batería puede suministrar una intensidad de corriente de 1 A durante 1 hora antes de agotarse. Entre una batería o pila de 1200 mAh y otra de 2400 mAh, la segunda durara más tiempo (el doble) por que tiene más carga eléctrica almacenada.

Carga eléctrica: La carga eléctrica se mide en la práctica por referencia a los tiempos de carga y descarga en amperes (A). La unidad SI es el culombio (C).

$Q = I \cdot t = I (3600 \text{ th})$ Donde: Q: carga eléctrica, I: intensidad, t: tiempo (en segundos), th: tiempo en horas.

Por lo tanto, la carga eléctrica en las distintas unidades es:

$$1 \text{ Ah} = 3600 \text{ C} \quad \text{y} \quad 1 \text{ C} = 0.278 \text{ mah}$$

Energía: La cantidad de energía que puede suministrar una batería depende de su capacidad y de su voltaje, y se mide habitualmente en Wh (vatios-hora); la unidad de SI es el julio.

$W = P \cdot t = P(3600 \text{ th})$ Donde: W: energía, P: potencia, t: tiempo (en segundos), th: tiempo (en horas)

Por tanto las equivalencias entre unidades son:

$$1 \text{ Wh} = 3600 \text{ J} \quad \text{y} \quad 1 \text{ J} = 0.278 \text{ mWh}$$

Como:

$P = I \cdot V$ Donde: P: potencia, I: intensidad y V: diferencia de potencial

La equivalencia de unidades se puede expresar como:

$1 \text{ Wh} = 1 \text{ AhV}$ (la energía se obtiene multiplicando la capacidad por la diferencia de potencial)

Téngase en cuenta que cuando se dan indicaciones en el cuerpo de las baterías o en sus envases, tales como «Cárguese a 120 mA durante 12 horas», si se exceden estos requisitos, el exceso de carga se disipa dentro de la batería en forma de calor a causa de su resistencia interna. Si la capacidad del acumulador fuese 1200 mAh y se le aplicara una corriente de carga de 120 mA durante 12 horas, $120 \cdot 12 = 1440 \text{ mAh}$, por lo que 240 mAh será la carga convertida en calor dentro de la batería y 1200 mAh la efectivamente almacenada en ella. Para calcular la energía perdida bastaría multiplicar los 240 mAh de exceso de carga por la tensión de carga.

Resistencia: La resistencia de las baterías es muy inferior a la de las pilas, lo que les permite suministrar intensidades de corriente mucho más intensas que las de estas, sobre todo de forma transitoria. Por ejemplo, la resistencia interna típica de una batería de plomo-ácido es del orden de $6\text{ m}\Omega$ (miliohmios) y la de otra de Ni-Cd, de $9\text{ m}\Omega$.

Masa: Otra de las características importantes de una batería es su masa y la relación entre ella y la capacidad eléctrica (Ah/kg) o la energía (Wh/kg) que puede suministrar. En algunos casos puede ser también importante el volumen que ocupe (Ah/m³) o (Ah/litro).

Rendimiento: El rendimiento es la relación porcentual entre la energía eléctrica recibida en el proceso de carga y la que el acumulador entrega durante la descarga. La batería de plomo-ácido tiene un rendimiento de más del 90 %. Y las baterías Ni-Cd un 83 %.

Constante de carga/descarga (C): C es una constante creada por los fabricantes que depende de los miliamperios-hora especificados en la batería y que se usa para poder señalar más fácilmente la intensidad a la que debe cargarse o descargarse una batería sin que ésta sufra daños. Se calcula como sigue:

$$C = \frac{X}{1000} \quad \text{Dónde: (C) constante de carga o descarga, (X) capacidad en mAh de la batería.}$$

En el mercado, por ejemplo, las pilas LiPo vienen rotuladas con 20C o similares, este número indica la máxima capacidad de descarga y se destaca en los rótulos porque según el uso que se les dé, por ejemplo para radioaficionados que compiten en carreras de auto o aviones les indicará el tiempo de vuelo, la duración variará.

Ejemplo:

Para una pila LiPo de 1200 mAh, $C = \frac{1200}{1000} = 1.2$

Luego el fabricante colocaría (no cargar la batería más de 1 C), entonces $1 \times 1.2 = 1.2$, por lo que no se debería cargar a más de 1.2 A. también señala (no descargue la batería a más de 7

C), entonces $7 \cdot C = 7 \cdot 1.2 = 8.4$, por lo que no deberíamos descargar la LiPo del ejemplo con una intensidad mayor de 8.4 A.

Efecto memoria: El efecto memoria es un efecto no deseado que afecta a las baterías y por el cual en cada recarga se limita el voltaje o la capacidad (a causa de un tiempo largo, una alta temperatura, o una corriente elevada). La consecuencia es la reducción de su capacidad para almacenar energía.

2.6 ESTADO DEL ARTE ACTUAL

Las versiones anteriores de vehículos eléctricos no han logrado alcanzar una cuota de mercado significativa. Las deficiencias de estos vehículos incluían baterías costosas y tóxicas con una vida útil limitada, rangos de conducción severamente limitados, bajo rendimiento y altos costos generales. Las mejoras en la tecnología de la batería en las últimas dos décadas, en particular los avances en la tecnología de la batería de iones de litio (Li-ion), así como los avances tecnológicos automotrices introducidos por los vehículos híbridos, han hecho posible diseñar y fabricar vehículos eléctricos con mejores rendimiento que los de gasolina. Aunque la cantidad de vehículos eléctricos en las carreteras actualmente es de miles, esa cantidad cambiará pronto. Impulsados por los avances en tecnología de baterías y automotrices, muchos fabricantes de vehículos han indicado su intención de comenzar a producir vehículos eléctricos con baterías de iones de litio en los próximos cinco años [3].

El equipo y los costos operativos asociados con los autos eléctricos incluyen el precio de la batería, el costo de la electricidad para cargar la batería y el costo de desplegar una infraestructura de carga. El precio de los autos eléctricos está dominado por el precio de la batería. Una batería que puede alcanzar un rango de 100 millas para un sedán pequeño debe tener una capacidad de energía de aproximadamente 24 kWh.[6]

Tres escenarios para la cuota de mercado de vehículos eléctricos en los EE. UU. Las previsiones de cuota de mercado se basan en el modelo Bass (1969) de adopción de nuevas tecnologías. Los escenarios de referencia y de alto precio del petróleo provienen de la EIA 2009 Annual Energy Outlook. El escenario subsidiado por el operador utiliza el escenario

de alto precio del petróleo de la EIA, pero agrega la posibilidad de que los operadores de red puedan usar una parte de su margen bruto para subsidiar la compra de automóviles eléctricos a cambio de que los clientes firmen contratos a largo plazo por milla. El tamaño máximo del mercado es del 64% en el escenario de referencia, el 85% en el escenario de precios altos y el 86% en el escenario subsidiado por el operador [3] Fig. 2.11

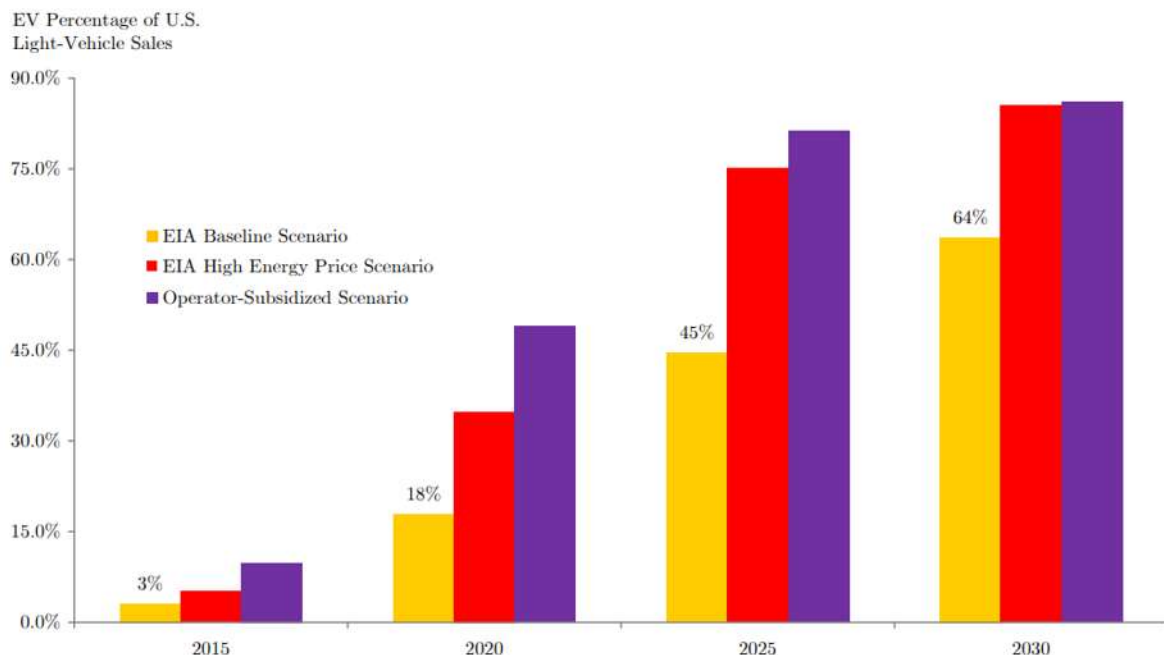


Figura 2. 11 Muestra tres escenarios para la cuota de mercado de vehículos eléctricos en los EE. UU.

En el escenario del alto precio del petróleo, estimamos una penetración máxima en el mercado de vehículos eléctricos del 90 por ciento del mercado de vehículos ligeros. Los altos precios de la gasolina en este escenario hacen que una mayor parte del público conductor esté dispuesto a hacer los cambios de comportamiento que conlleva la posesión de un vehículo eléctrico [3].

CAPÍTULO 3 MODELADO DE MOTORES DE CD

3.1 INTRODUCCIÓN

Los motores de corriente directa (CD) son ampliamente usados a nivel industrial. Permiten un amplio rango de velocidad y pueden proporcionar un alto par con control más sencillo y económico que cualquier motor de corriente alterna. En los últimos años se han diversificado las técnicas de control no lineal, el análisis de pasividad ha sido ampliamente estudiado [7-9]. Este capítulo contiene una clasificación de los motores actualmente activos en la industria automotriz y sus principios de funcionamiento.

3.2 MOTOR DE CORRIENTE CONTINÚA

Un motor de corriente directa se distingue de otros tipos de motores por que convierte la energía eléctrica en mecánica, provocando un movimiento rotatorio, gracias a la acción de un campo magnético. En la Fig. 3.1 se muestra un par de motor CD en donde se puede distinguir algunos de sus principales componentes.

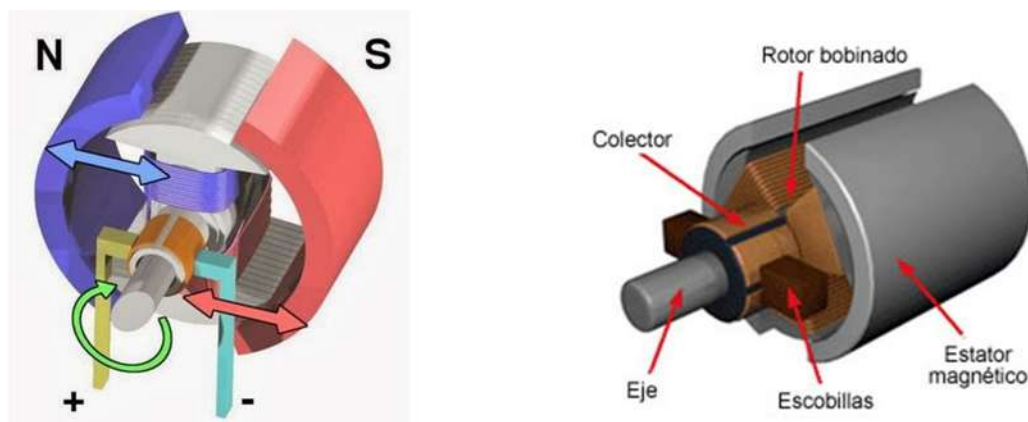


Figura 3. 1 Motor de corriente directa

Un motor eléctrico opera en base a dos principios: El principio de inducción, descubierto por Michael Faraday en 1831; que señala, que si un conductor se mueve a través de un campo magnético o está situado en las proximidades de otro conductor por el que circula una corriente de intensidad variable, se induce una corriente eléctrica en el primer conductor. Y el principio de André Ampère de 1820, en el que establece: que si una corriente pasa a través de un conductor situado en el interior de un campo magnético, éste ejerce una fuerza mecánica o fuerza electromotriz (f.e.m.), sobre el conductor.

Se compone, principalmente, de dos partes: (1) **El estator**: este componente da soporte mecánico al aparato y contiene los polos de la máquina, que pueden ser o bien devanados de hilo de cobre sobre un núcleo de hierro, o imanes permanentes. (2) **El rotor**: es generalmente de forma cilíndrica, también devanado y con núcleo, alimentado con corriente directa a través las delgas, que están en contacto alternante con escobillas fijas.

Algunas aplicaciones especiales de estos motores son: los motores lineales, cuando ejercen tracción sobre un riel, servomotores y motores paso a paso. Además, existen motores de CC sin escobillas (brushless) utilizados en el aeromodelismo por su bajo par motor y su gran velocidad. Es posible controlar la velocidad y el par de estos motores utilizando técnicas de control de motores de corriente continua.

3.3 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

El principio de funcionamiento básico de un motor de CC se explica a partir del caso de una espira de material conductor inmersa en un campo magnético, a la cual se le aplica una diferencia de potencial (o voltaje) entre sus extremos, de forma que a través de la misma circula una corriente (I). Para este caso la espira constituye el rotor del motor, y los imanes que producen el campo magnético constituyen el estator. Entonces, dado que cuando un conductor, por el que pasa una corriente eléctrica, se encuentra inmerso en un campo magnético, éste experimenta una fuerza según la Ley de Lorentz. Donde dicha fuerza, es perpendicular al plano formado por el campo magnético y la corriente, y su magnitud está dada por:

$$F = B * L * I * \text{sen} (\theta)$$

Dónde:

F: Fuerza en newton

I: Intensidad que recorre el conductor en amperes

L: Longitud del conductor en metros

B: Densidad de campo magnético o densidad de flujo teslas

Φ : Ángulo que forma I con B

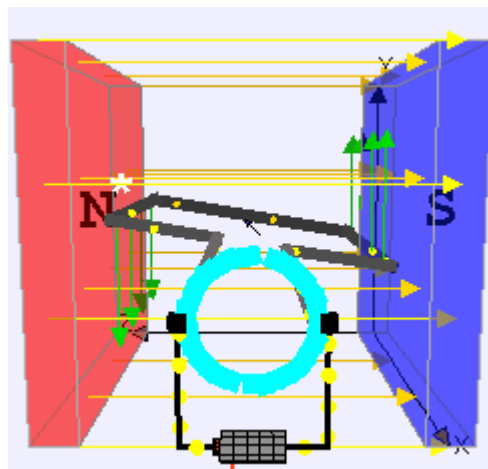


Figura 3. 2 Espira donde distingue las fuerzas ejercidas al interactuar con un campo magnético.

La espira experimenta fuerzas en sus dos segmentos laterales, como puede observarse en la Figura 3.2. Sin embargo, en el resto de los segmentos que interactúan con el campo magnético, las fuerzas experimentadas se cancelan entre sí. Las fuerzas en los segmentos laterales tienen una dirección y sentido tales que producen el giro del rotor. Sin embargo, existe un punto en donde el cambio de la posición de las espiras produce que la misma fuerza se oponga a continuar el movimiento. Es en este punto en el que se cambia o alterna

la polaridad del voltaje aplicado, lo cual cambia el sentido de la fuerza y por ende vuelve a impulsar el giro del rotor. Es posible que el rotor supere este punto, en el que no se aplican fuerzas, debido a su inercia.

3.3.1 FUERZA CONTRA ELECTROMOTRIZ INDUCIDA EN UN MOTOR

El funcionamiento en un motor eléctrico encierra un concepto un poco más complejo: la fuerza electromotriz inducida que se opone a la tensión aplicada al motor para hacer que éste funcione. Es decir, además de provocar el buscado movimiento rotativo utilizando el principio de Faraday, nos encontramos con que en los devanados del rotor se induce una corriente eléctrica debido al movimiento de las espiras del rotor en el seno del campo magnético del estator. Dado que esta fuerza electromotriz generada en los devanados del rotor (inducido) se opone a la tensión aplicada de manera externa, es necesario aumentar ligeramente la tensión nominal calculada para que el giro se mantenga.

3.3.2 ESCOBILLAS

Es necesario establecer una conexión eléctrica entre una parte fija y una parte rotatoria en un dispositivo. Este es el caso de los motores o generadores eléctricos, donde se debe establecer una conexión de la parte fija de la máquina con las bobinas del rotor.

Para realizar esta conexión, se fijan dos anillos en el eje de giro, generalmente de cobre, aislados de la electricidad del eje y conectados a las terminales de la bobina rotatoria. Enfrente de los anillos se disponen unos bloques de grafito, que mediante unos resortes, hacen presión sobre ellos para establecer el contacto eléctrico necesario. Estos bloques de grafito se denominan escobillas (carbones) y los anillos rotatorios reciben el nombre de colector. En determinado tipo de máquinas electromagnéticas, como los motores o generadores de corriente continua, los anillos del colector están divididos en dos o más

partes, aisladas unas de otras y conectadas a una o más bobinas. En este caso, cada una de las partes en que está dividido el colector se denomina delga.

Debido a que, por el roce que se ocasiona al girar el dispositivo se produce un desgaste por abrasión, las escobillas deben ser sustituidas periódicamente. Por este motivo se han inventado los motores eléctricos sin escobillas.

3.3.3 LAMINADO

En máquinas de corriente directa de mediana y gran potencia, es común la fabricación de rotores y estatores con láminas de acero eléctrico para disminuir las pérdidas asociadas a los campos magnéticos variables, como las corrientes de Foucault y las producidas por histéresis. En la Fig. 3.3 se muestra la parte de un motor laminado.

Para disminuir el desarrollo de las corrientes de Foucault se emplea el sistema de construir los núcleos de hierro en lugar de macizos, mediante chapas o láminas superpuestas con un espesor de 0.2 a 0.6 mm, aisladas unas de las otras con barniz o papel. Las chapas se hacen con un acero al silicio de alta resistividad, de modo que la intensidad de la corriente inducida disminuye y las pérdidas alcanzan así un valor admisible. Esta construcción no produce la disminución del flujo magnético, ya que se dispone siempre según el plano que recorren las líneas de fuerza.



Figura 3. 3 Muestra el laminado de acero en un motor, que disminuye las pérdidas asociadas a los campos magnéticos.

La calidad de estas láminas en cuanto a las pérdidas por histéresis y corrientes de Foucault se caracteriza por la potencia en vatios (W), disipada por kilo de plancha sometido a una inducción alternativa de un tesla, a razón de 60 ciclos de imantación por segundo.

3.3.4 ENTREHIERRO

Es el espacio situado entre el estator y el rotor, es por donde el flujo magnético pasa de uno a otro. Algunos motores además incorporan polos de conmutación, rodeados por unas bobinas conectadas en serie con el devanado inducido y recubiertas de una película aislante para evitar cortocircuitos.

3.3.5 REVERSIBILIDAD

Los motores y los generadores de corriente continua están constituidos esencialmente por los mismos elementos, diferenciándose únicamente en la forma de utilización. Por reversibilidad entre el motor y el generador se entiende que si se hace girar el rotor, se produce en el devanado inducido una fuerza electromotriz capaz de transformarse en energía eléctrica. En cambio, si se aplica una tensión continua al devanado inducido del generador a través del colector delga, el comportamiento de la máquina ahora es de motor, capaz de transformar la fuerza contra electromotriz en energía mecánica. En ambos casos el inducido está sometido a la acción del campo magnético del inductor principal en el estator.

3.4 CLASIFICACIÓN DE MOTORES DE CORRIENTE

DIRECTA

Los motores de corriente continua se construyen con rotores bobinados, y con estatores bobinados o de imanes permanentes. Además existen muchos tipos de motores especiales, por ejemplo, los servomotores y los motores paso a paso, que se fabrican utilizando un

motor de corriente continua como base. Los motores de corriente directa se pueden clasificar de acuerdo a la forma en que crean los campos magnéticos del estator.

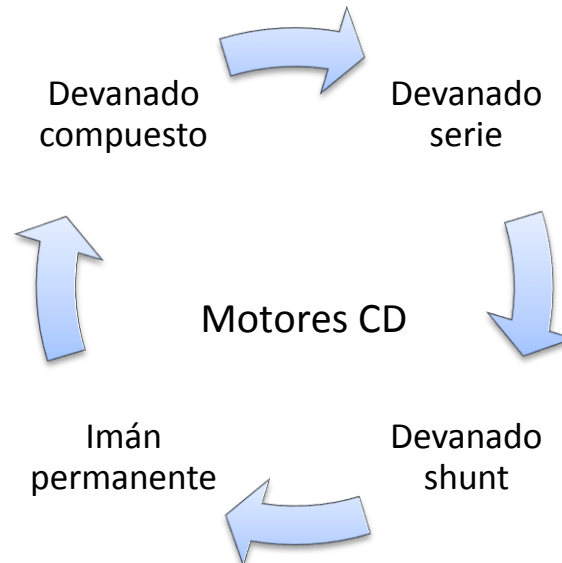


Figura 3. 4 Clasificación de los motores DC.

3.4.1 MOTORES DE IMANES PERMANENTES

En este tipo de motores, los campos del estator son generados mediante imanes permanentes que no requieren fuente de alimentación externa y por lo tanto no producen un calentamiento. Los motores son más ligeros y pequeños en comparación con otros motores de CD con algunas características equivalentes ya que la intensidad del campo del imán permanente es alta. También resulta sencillo invertir el sentido de giro al conmutar la dirección del voltaje aplicado, ya que la corriente y el campo cambian de dirección sólo en el rotor. En la Fig.3.5 se puede ver un motor de CD de imanes permanente y otras partes que lo componen.

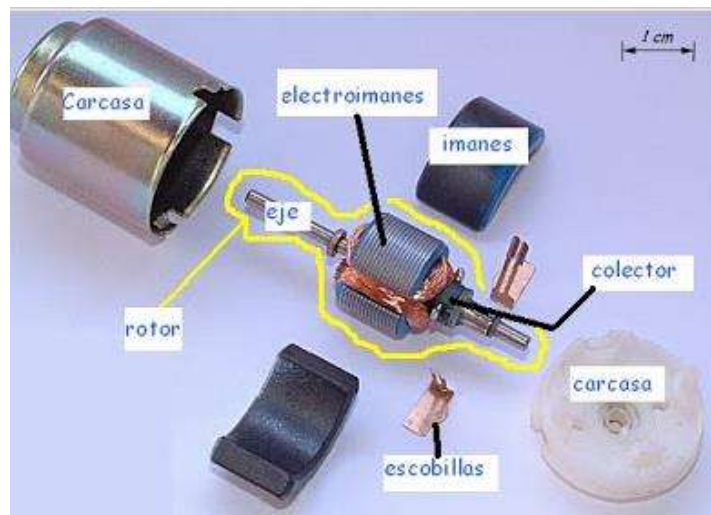


Figura 3. 5 Motor de CD de imanes permanentes y sus componentes.

El motor de imán permanente es ideal en aplicaciones de control por computadora debido a su linealidad torque-velocidad, aunque únicamente se utilizan en aplicaciones de baja potencia porque su potencia nominal usualmente se limita a 5 hp (3278 W) o menos. Su comportamiento de respuesta es lineal como aparece en la imagen de la Fig. 3.6.

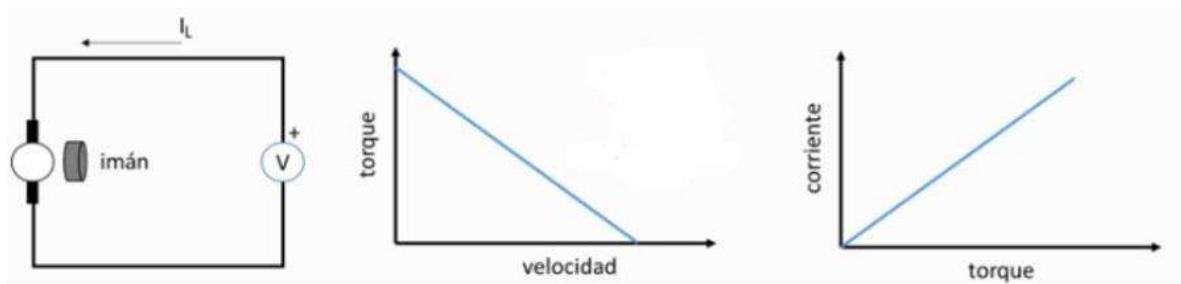


Figura 3. 6 Esquema de motor de CD de imán permanente y curva torque-velocidad del motor.

3.4.2 CLASES DE MOTORES DE IMANES PERMANENTES

3.4.2.1 MOTOR ELÉCTRICO SIN ESCOBILLAS

Un motor eléctrico sin escobillas o motor Brushless, no emplea escobillas para realizar el cambio de polaridad en el rotor (Ver Fig.3.7). Los primeros motores sin escobillas fueron los motores de corriente alterna asíncronos. Hoy en día, gracias a la electrónica, se muestran muy ventajosos, ya que son más baratos de fabricar, pesan menos y requieren menos mantenimiento, su control no es complejo debido a los controles electrónicos. El inversor convierte la corriente alterna en corriente continua, y otra vez en alterna de otra frecuencia. Otras veces se puede alimentar directamente con corriente continua, eliminado el primer paso. Por este motivo, estos motores de corriente alterna se pueden usar en aplicaciones de corriente continua, con un rendimiento mucho mayor que un motor de corriente continua con escobillas.



Figura 3. 7 Motor sin escobillas (motor *Brushless*).

Su mecanismo de funcionamiento se basa en sustituir la conmutación (cambio de polaridad) mecánica por otra electrónica sin contacto. En este caso, la espira sólo es impulsada cuando el polo es el correcto, y cuando no lo es, el sistema electrónico corta el suministro de corriente. Para detectar la posición de la espira del rotor se utiliza la

detección de un campo magnético. Este sistema electrónico, además, puede informar de la velocidad de giro, o si está parado, e incluso cortar la corriente si se detiene para que no se queme. Tienen la desventaja de que no giran al revés al cambiarles la polaridad (+ y -). Para hacer el cambio se deberían cruzar dos conductores del sistema electrónico.

Un sistema algo parecido, para evitar este rozamiento en los anillos, se usa en los alternadores. En este caso no se evita el uso de anillos rozantes, sino que se evita usar uno más robusto y que frenaría mucho el motor. Actualmente, los alternadores tienen el campo magnético inductor en el rotor, que induce el campo magnético al estator, que a la vez es inducido. Como el campo magnético del inductor necesita mucha menos corriente que la que se va generar en el inducido, se necesitan unos anillos con un rozamiento menor. Esta configuración la usan desde pequeños. Este tipo de motor se utiliza en coches y aviones con radiocontrol, ventiladores de ordenador, alternadores de autos y generadores de centrales con potencias del orden del megavatio, etc.

3.4.2.2 MOTORES DE PASO A PASO

Los motores paso a paso son ideales para la construcción de mecanismos en donde se requieren movimientos muy precisos. La característica principal de estos motores es el hecho de poder moverlos un paso a la vez por cada pulso que se le aplique. Este paso puede variar desde 90° hasta pequeños movimientos de tan solo 1.8° , es decir, que se necesitarán 4 pasos en el primer caso (90°) y 200 para el segundo caso (1.8°), para completar un giro completo de 360° .

Estos motores poseen la habilidad de poder quedar enclavados en una posición o bien totalmente libres. Si una o más de sus bobinas están energizada, el motor estará enclavado en la posición correspondiente y por el contrario quedará completamente libre si no circula corriente por ninguna de sus bobinas.

Básicamente estos motores están constituidos normalmente por un rotor sobre el que van aplicados distintos imanes permanentes y por un cierto número de bobinas excitadoras bobinadas en su estator. Las bobinas son parte del estator y el rotor es un imán permanente.

Toda la conmutación (o excitación de las bobinas) deber ser externamente manejada por un controlador. Dentro de estos tipos de motores se encuentran los de reluctancia variable, de imán permanente e híbrido.

Motor paso a paso de reluctancia variable (Fig.3.8): Este motor no utiliza un campo magnético permanente, como resultado puede moverse sin limitaciones o sin un par de parada. Este tipo de montaje es el menos común y se usa, generalmente, en aplicaciones que no requieren un alto grado de par de fuerza, como puede ser el posicionamiento de un mando de desplazamiento.

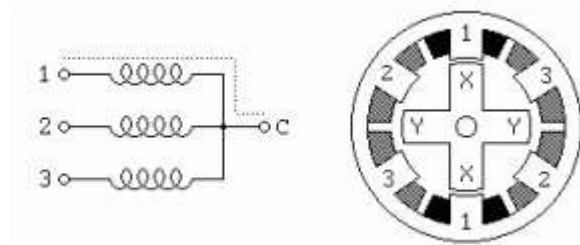


Figura 3. 8 Motor de paso a paso de reluctancia variable.

Motor paso a paso de imán permanente: Existen dos tipos de motores de imán permanente unipolares y bipolares que son los más utilizados en la robótica. Los unipolares, son motores que suelen tener 5 o 6 cables de salida dependiendo de su conexión interno, suelen ser 4 cables por los cuales se recibe los pulsos que indican la secuencia y duración de los pasos y los restantes sirven como alimentación del motor. Este tipo se caracteriza por ser más simple de controlar.

Bipolares, este tipo de motores por lo general tienen 4 cables de salida, necesitan ciertas manipulaciones para poder ser controlados, debido a que requieren del cambio de dirección de flujo de corriente a través de las bobinas en la secuencia apropiada para realizar un movimiento, es necesario un puente H por cada bobina del motor, es decir que para controlar un motor paso a paso de 4 cables (dos bobinas), se necesitan usar dos puentes H. Esto hace que la tarjeta controladora se vuelva más compleja y costosa. Su uso no es tan común como en el caso de los de tipo unipolar (Fig. 3.9).

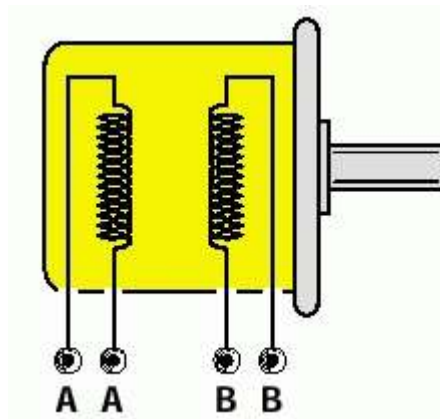


Figura 3. 9 Motor pasó a paso tipo bipolar.

Motor paso a paso híbrido (Fig. 3.10) es un motor eléctrico del tipo paso a paso, cuyo funcionamiento se basa en la combinación de los otros dos tipos de motores paso a paso, el Motor de reluctancia variable y el motor de magnetización permanente.



Figura 3. 10 Motor paso a paso híbrido.

3.4.3 MOTOR DE CORRIENTE DIRECTA TIPO SHUNT

Conformados por una armadura y devanados de campo conectados en paralelo que son activados mediante la misma fuente. Los motores shunt (ver Fig.3.11) presentan velocidad casi constante sobre un gran rango de carga, cuentan con un torque de arranque de aproximadamente 1.5 veces el torque operativo nominal, tienen torque de arranque más bajo que cualquiera de los motores de CD y se puede convertir

económicamente para permitir una velocidad ajustable al colocar un potenciómetro en serie con los devanados de campo. La corriente de carga total es la suma de las corrientes de armadura y campo.

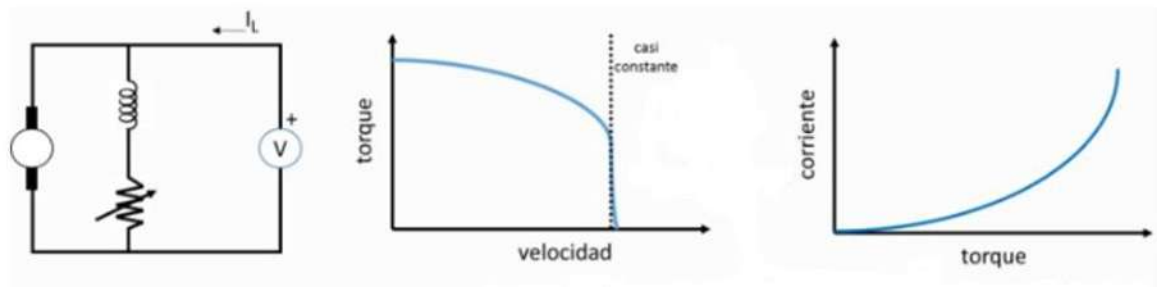


Figura 3. 11 Esquema de motor de CD shunt y curva torque –velocidad del motor.

3.4.4 MOTOR EN SERIE

Cuenta con devanados de armadura y campo conectados en serie, de modo que las corrientes de armadura y campo son iguales. Los motores en serie generan torques de arranque muy altos, velocidad extremadamente variable dependiendo de la carga, y gran velocidad cuando la carga es pequeña. Los motores en serie grandes pueden fallar catastróficamente cuando se descargan súbitamente debido a la fuerza dinámica a altas velocidades, a esto se le llama sin control.

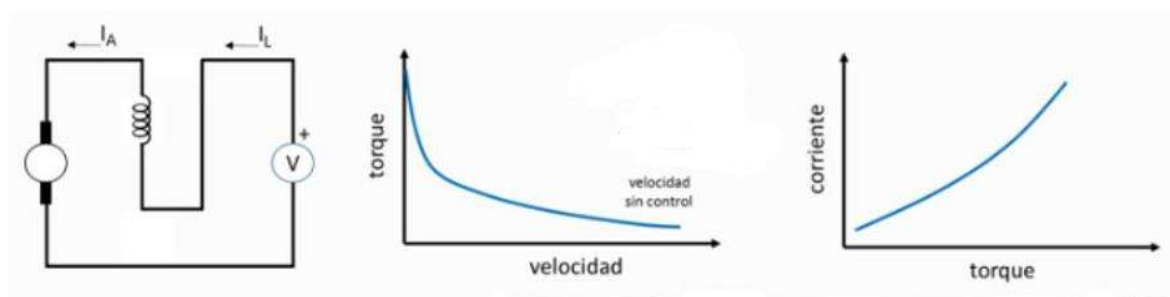


Figura 3. 12 Esquema de motor de CD en serie y curva torque-velocidad del motor.

La curva torque-velocidad para un motor en serie tiene forma hiperbólica, lo que implica una relación inversa entre el torque y la velocidad, con una potencia casi constante (Fig. 3.12).

3.4.5 MOTOR COMPUESTO

Estos motores incluyen tanto devanados de campo en derivación como en serie, lo que resulta en características combinadas de motores en derivación y en serie. Parte de la corriente de carga pasa a través de los devanados de armadura y serie, la corriente de carga restante pasa sólo a través de los devanados en derivación. La velocidad máxima de un motor compuesto es limitada, su regulación de velocidad no es tan buena como la de un motor en derivación. El torque producido por los motores compuestos es un poco menor que el de los motores en serie de similar tamaño (Fig. 3.13).

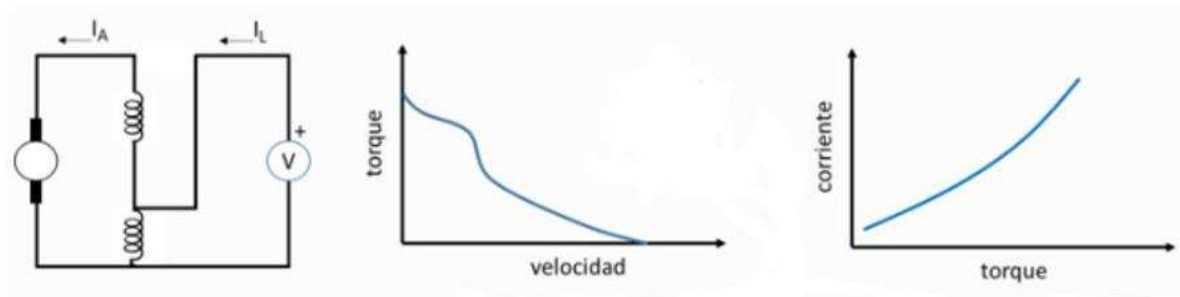


Figura 3. 13 Esquema de motor de CD compuesto y curva torque-velocidad del motor.

A diferencia del motor de imán permanente, cuando cambia la polaridad de la alimentación para un motor CD en derivación, en serie o compuesto, el sentido de rotación no cambia (lo que significa que dichos motores no son reversibles). La razón de esto es la polaridad del estator y el rotor cambia debido a que los devanados de campo y armadura son excitados por la misma fuente.

Curva de torque

La siguiente gráfica Fig.3.14 es una representación de los torques que un motor puede proporcionar a diferentes velocidades a los voltajes nominales.

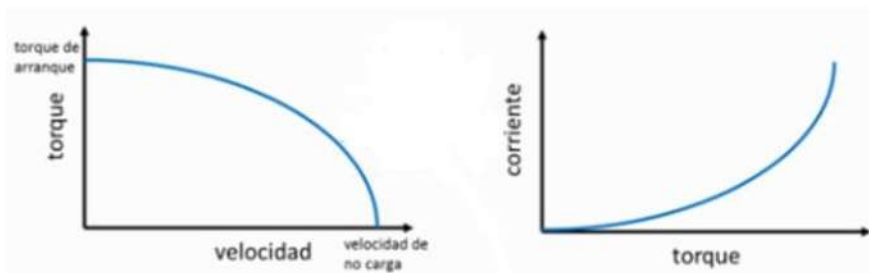


Figura 3. 14 Curva torque-velocidad del motor.

Para un dado torque proporcionado por el motor, se puede utilizar la curva corriente-torque para determinar la corriente requerida cuando se le aplica el voltaje nominal al motor. Como regla general, los motores generan grandes torques a baja velocidad, y grandes torques implican una demanda mayor de corriente por parte del motor. El torque de arranque o torque crítico (T_s): Es el torque máximo que puede proporcionar un motor a velocidad cero, asociado con el arranque o sobrecarga del motor. La velocidad de no carga $W_{\text{máx}}$: Es la máxima velocidad sostenida que puede lograr el motor. Esta velocidad sólo se puede lograr cuando no se aplica carga o torque al motor.

CAPÍTULO 4 MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN AUTO ELÉCTRICO

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS (HEV)

Son vehículos que tienen dos o más fuentes de energía para ser impulsados, usualmente se utiliza un motor de combustión interna (MCI) y un motor eléctrico. Ahorran energía y tienen un bajo nivel de emisiones, en comparación con un vehículo que utiliza un motor de combustión interna para propulsarse, alimentados por combustibles fósiles (vehículo convencional).

En el HEV el motor de combustión interna permite recorrer largas distancias, mientras que el motor eléctrico aumenta la eficiencia y permite el ahorro de combustibles fósiles, ya que regenera energía durante el tiempo de frenado y almacena la energía que se genera en exceso en el MCI durante el tiempo que el vehículo está detenido. Posteriormente esta energía almacenada es utilizada por el motor eléctrico para propulsar el vehículo [10].

La mayoría de vehículos híbridos utilizan un MCI de ciclo Atkinson por las ventajas que tiene comparado con un ciclo otto.

Característica de un motor de ciclo Atkinson: Mayor eficiencia, compresión menor (mejor en aplicaciones sobrealimentadas), menos combustible, menos potencia y pérdida de torque. Los vehículos híbridos eléctricos se puede categorizar de acuerdo a la trayectoria que recorre el flujo de la energía transmitida de las baterías o del MCI hacia las ruedas en: (1) configuración o sistema paralelo y (2) configuración o sistema en serie, a partir de estas dos configuraciones se desarrolló (3) el sistema combinado.

(1) Configuración o sistema paralelo: En este sistema la propulsión del vehículo puede darse solo por el motor de combustión interna, solo por el motor eléctrico o los dos motores pueden actuar conjuntamente. Cuando el motor de combustión interna genera mayor cantidad de energía mecánica que la requerida para propulsar el vehículo, esta energía se transforma a energía eléctrica y es almacenada en las baterías. Además, durante el frenado se genera energía, la misma que es utilizada para cargar las baterías. Los sistemas paralelos a diferencia de los sistemas en serie, solo requieren dos motores, un MCI y un motor eléctrico.

Componentes principales de un sistema paralelo (ver figura 4.1):

- Motor de combustión interna: Es el encargado de generar la energía mecánica.
- Baterías: Almacenan la energía eléctrica para propulsar el motor eléctrico.
- Motor Eléctrico: Es el encargado de dar la propulsión al vehículo.
- Acoplamiento: Es el que permite la conexión entre el MCI y el motor eléctrico hacia el eje de transmisión. Pueden ser sistema de embrague, engranajes, etc.

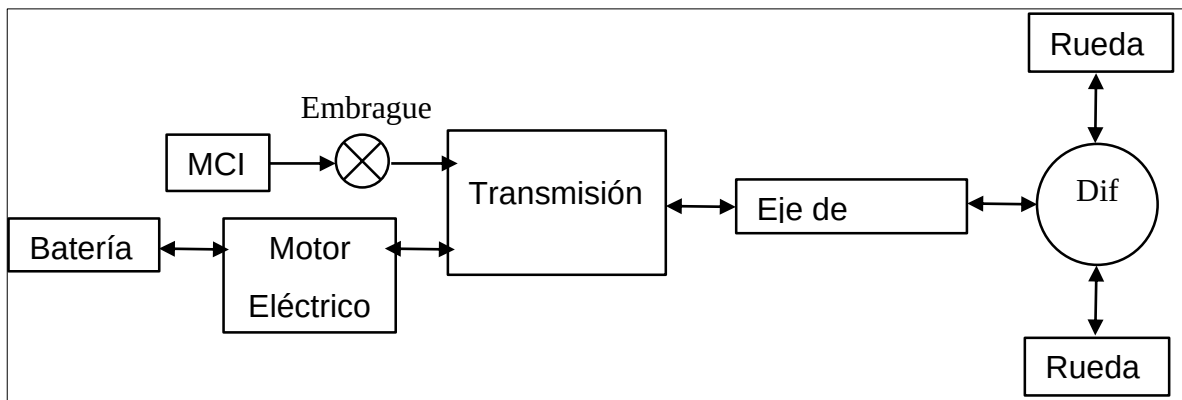


Figura 4. 1 Diagrama de bloque de HEV, sistema paralelo.

(2) Configuración o sistema en serie: en este tipo de configuración, el vehículo es propulsado únicamente por el motor eléctrico y el motor de combustión interna genera energía mecánica, la cual posteriormente es transformada a energía eléctrica. Esta transformación se logra realizar ya que el MCI está acoplado a un generador. La energía eléctrica es utilizada para cargar las baterías de los vehículos, las mismas que luego darán

movimiento al motor eléctrico y este a su vez, propulsará el vehículo; además, la energía eléctrica generada puede utilizarse directamente para dar movimiento al motor eléctrico, en este caso se efectúa un bypass a las baterías. Los sistemas en serie requieren tres motores, un MCI y dos motores eléctricos[11].

Componentes principales en un sistema en serie:

- Motor de Combustión Interna: Es el encargado de generar la energía mecánica.
- Generador: Transforma la energía mecánica en energía eléctrica.
- Convertidor: Convierte la energía eléctrica de salida del generador a DC para poder cargar las baterías.
- Baterías: Almacenan la energía eléctrica para propulsar el motor eléctrico.
- Inversor: Convierte la energía de las baterías DC en AC para propulsar el motor Eléctrico.
- Motor Eléctrico: Es el encargado de dar la propulsión al vehículo.

En la figura 4.2 se muestra un diagrama de bloque de HEV, sistema en serie.

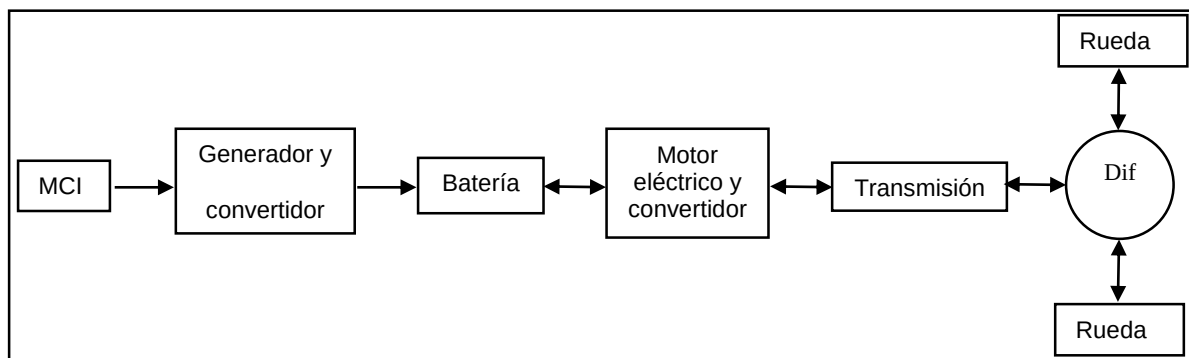


Figura 4. 2 Diagrama de bloque de HEV, sistema en serie

Sistema Combinado

A este tipo de vehículo también se le conoce como vehículo híbrido con divisor de potencia (power-split hybrid vehicle).

(3) Los sistemas combinados utilizan los beneficios de los sistemas en serie y paralelo, y permite una capacidad de carga sostenible. En este tipo de sistema, el MCI da propulsión a las ruedas y además da energía al generador, para que luego el mismo cargue las baterías o alimente el motor eléctrico según sea el caso de manejo. Los sistemas combinados se han desarrollado para mejorar el consumo de combustible y aumentar la eficiencia de los vehículos.

Componentes principales de sistemas combinados (Figura 4.3):

El sistema combinado cuenta con un motor de combustión interna, un generador, Convertidor / inversor, baterías y motor eléctrico.

Divisor de Potencia (Power-split): Divide la potencia generada por el motor en mecánica y eléctrica. Utiliza una transmisión del tipo planetaria.

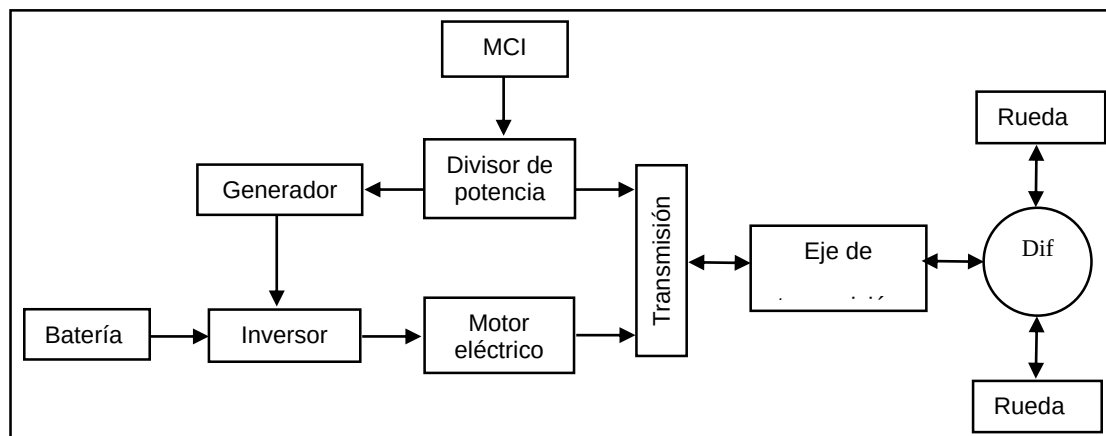


Figura 4. 3 Diagrama de bloque de HEV, sistema combinado

4.2 VEHÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS ENCHUFABLES (PHEV):

Estos vehículos son similares a los vehículos híbridos eléctricos ya que pueden cargar las baterías por medio del MCI, pero a diferencia de los HEV, en los PHEV las baterías tienen densidad de energía alta, lo que les permite un mayor recorrido que los HEV. Las baterías en los PHEV pueden ser cargadas por el motor de combustión interna o pueden cargarse al conectar el vehículo a una toma de corriente de la red eléctrica. La energía utilizada de la red eléctrica, deja de lado la energía generada al combustionar los combustibles fósiles en

el MCI; esta es una ventaja frente a los HEV ya que estos necesitan un MCI para poder cargar las baterías. El PHEV es un vehículo que puede utilizarse en distancias cortas – aproximadamente 60 km – sin necesidad de utilizar el MCI, lo cual lo convierte en un ZEV (Vehículo de cero emisiones).

Componentes principales (figura 4.4):

- De manera similar a los HEV, utiliza un motor de combustión interna, un generador y motor eléctrico.
- Interfaz y convertidor: Utilizados para poder conectar el vehículo a la toma de corriente y convertir de AC a DC para cargar las baterías.

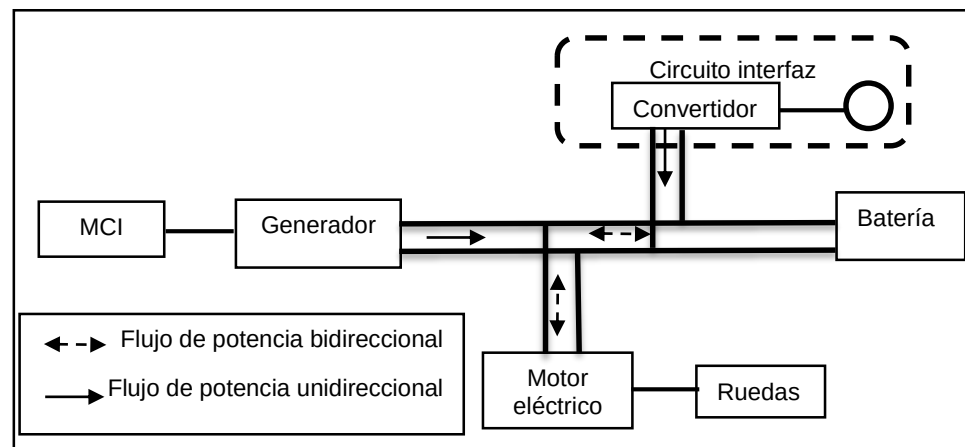


Figura 4. 4 Diagrama de bloque de PHEV, sistema en serie

4.3 CARACTERÍSTICAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS (VE)

Los vehículos eléctricos no cuentan con un motor de combustión interna, la propulsión del vehículo es lograda por uno o hasta cuatro motores eléctricos. Es un vehículo de cero emisiones (ZEV). Es necesario recargar las baterías por medio de la red eléctrica o por medio de infraestructura dedicada; es decir, conexiones de electricidad. En este tipo de vehículo también se puede cargar las baterías por medio del frenado regenerativo.

Componentes principales (ver figura 4.5)

- Controlador electrónico: Recibe la información del usuario, aceleración y frenado, Para luego transmitirla al motor eléctrico y así propulsar el vehículo o detenerlo.
- Convertidor electrónico de potencia: Es un convertidor para DC a AC, un inversor AC a DC y convertidor DC a DC.
- Baterías: Suministran la energía necesaria para accionar el motor eléctrico.
- Motor eléctrico: Es el encargado de propulsar el vehículo.

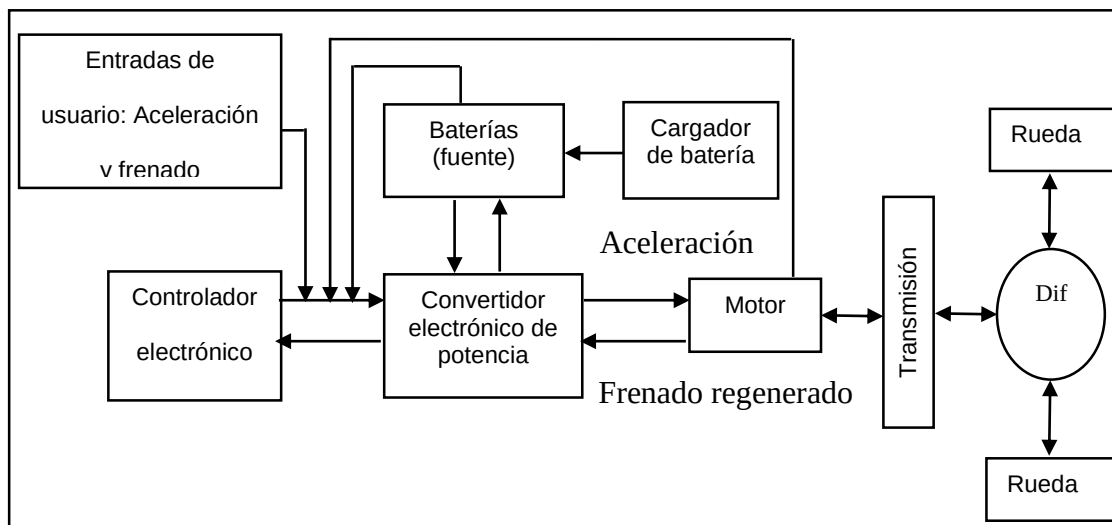


Figura 4. 5 Diagrama de bloques de VE

4.4 MODELO DE BATERÍA-MOTOR DE CD

La carga de batería de un auto se puede modelar como la carga de un Capacitor a través de una fuente de CD y el circuito es RC.

Se obtienen las ecuaciones en el dominio del tiempo y en Laplace, para obtener la función de transferencia y su diagrama de bloques, siendo la entrada el voltaje de la fuente y la salida el voltaje de carga del capacitor (C), y la única variable es el tiempo de carga (t).

En la figura 4.6 se muestra un circuito RC, donde: V representa el voltaje de la fuente, C el voltaje de carga del capacitor y R la resistencia.

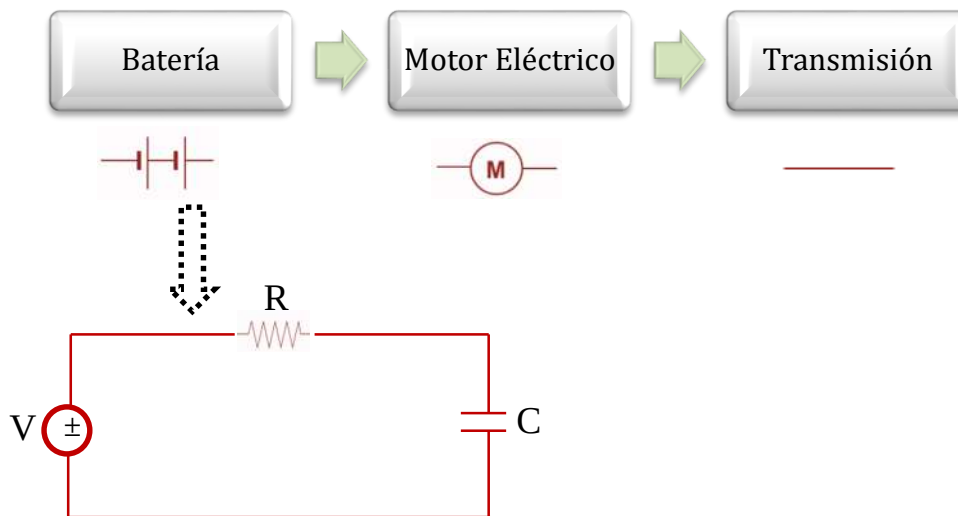


Figura 4. 6 Circuito RC que simula el comportamiento de una batería.



Figura 4. 7 Procesos principales para el funcionamiento de un vehículo.

La batería se puede modelar como un capacitador en carga o descarga durante un periodo de tiempo (ver fig. 4.8). En este circuito cada componente simula un efecto de la batería, siendo la entrada el voltaje de la fuente (V_{carga}), la resistencia representada por (R), la corriente (i) y la salida el voltaje de carga del capacitor (C).

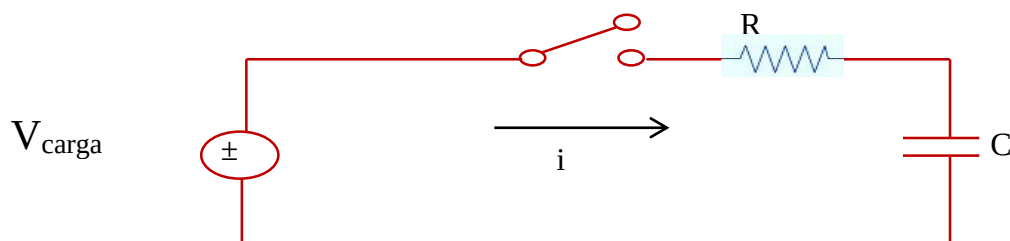


Figura 4. 8 Circuito RC mostrando carga y descarga de un capacitador en función del tiempo.

El proceso del circuito RC mostrado en la figura 4.8 puede describirse mediante la ecuación de la ley de voltaje de Kirchhoff:

$$V_{Carga} = V_R + V_c, \text{ donde: } V_R = R_i \text{ Ley de ohm}$$

Por otro lado sabemos que:

$$q = V_c \cdot C$$

Al derivar la ecuación se obtiene lo siguiente:

$$\frac{dq}{dt} = i = C \frac{dV_c}{dt}$$

$$\frac{dq}{dt} = \frac{1}{C} i dt = dV_c$$

$$V_c = \frac{1}{C} \int i dt$$

Sustituyendo los valores de: V_R y V_c en la ecuación siguiente:

$$V_{Carga} = V_R + V_c$$

$$\text{se obtiene: } V_{carga} = R_i + \frac{1}{C} \int i dt \quad (4.1)$$

Aplicando la transformada de Laplace a la ecuación (4.1) se obtiene lo siguiente:

$$V_{carga}(s) = RI(s) + \frac{1}{C} \cdot \frac{1}{s} I(s)$$

$$V_{carga}(s) = I(s) \left[R + \frac{1}{sC} \right]$$

$$\frac{I(s)}{V_{carga}(s)} = \frac{1}{R + \frac{1}{sC}} = \frac{sC}{RCs + 1} = \frac{\frac{sC}{RC}}{s + \frac{1}{RC}} = \frac{\frac{1}{R}s}{s + \frac{1}{RC}}$$

$$I(s) = \frac{\frac{1}{R}s}{s + \frac{1}{RC}} V_{carga}(s); \quad V_{carga}(s) = \frac{V_c}{s}$$

$$I(s) = \frac{\frac{1}{R}s}{s + \frac{1}{RC}} \cdot \frac{V_c}{s}$$

$$I(s) = \frac{\frac{1}{R}}{s + \frac{1}{RC}} V_c \rightarrow i(t) = \mathcal{L}I(s) = \mathcal{L} \frac{\frac{1}{R}}{s + \frac{1}{RC}} V_c$$

Aplicando Transformada de Laplace inversa

$$i(t) = \frac{1}{R} e^{\frac{-1}{RC}t} \cdot V_c$$

$$\begin{aligned} V_{carga} &= \frac{1}{C} \int i(t) dt = \frac{V_c}{C} \int \frac{1}{R} e^{\frac{-1}{RC}t} dt \quad \text{Donde: } w = \frac{-1}{RC} t \quad \text{entonces } dw \\ &= -\frac{1}{RC} dt \end{aligned}$$

$$V_{c\text{carga}} = -V_c \int e^{\frac{-1}{RC}t} \left(-\frac{1}{RC}\right) dt = -V_c e^{\frac{-1}{RC}t} \Big|_0^T$$

$$V_{c\text{carga}} = -V_c \left[e^{\frac{-1}{RC}t} - e^0 \right] = -\left[e^{\frac{-1}{RC}t} - 1 \right] V_c = \left[1 - e^{\frac{-1}{RC}t} \right] V_c$$

cuando $t \rightarrow \infty$ entonces $V_c = 1$

$$V_{c\text{carga}} = V_c \left[1 - e^{\frac{-1}{RC}t} \right]$$

$$\text{si } V_{c\text{carga}} = 0.9 V_c$$

$$- \quad 0.9 V_c = V_c \left[1 - e^{\frac{-1}{RC}t} \right]$$

$$0.9 = 1 - e^{\frac{-1}{RC}t} \rightarrow e^{\frac{-1}{RC}t} = 0.9 - 1$$

$$e^{\frac{-1}{RC}t} = 0.1 \rightarrow \ln e^{\frac{-1}{RC}t} = \ln 0.1$$

$$\frac{-1}{RC} t = \ln 0.1 \rightarrow t = -RC \ln 0.1$$

$$\text{Si } c = 0.1 F \text{ y } R = 10\Omega$$

$$t = -(10)(0.1) \ln 0.1 = 2.3025 \text{ seg}$$

Generalizando el sistema se obtiene lo siguiente:

$$V_{c\text{carga}} = k V_c$$

$$k V_c = V_c \left[1 - e^{\frac{-1}{RC}t_c} \right] \rightarrow 1 - e^{\frac{-1}{RC}t_c} = k$$

$$-e^{\frac{-1}{RC}t_c} = k - 1 \rightarrow e^{\frac{-1}{RC}t_c} = 1 - k$$

$$\ln e^{\frac{-1}{RC}t_c} = \ln(1 - k)$$

$$\frac{-1}{RC} t_c = \ln(1 - k) \rightarrow t_c = -RC \ln(1 - k)$$

$$t_c = -RC \ln(1 - k)$$

Considerando un $k = 98\%$ de carga total

$$C = 0.1 \text{ F y } t_c = 4 \text{ horas } \frac{3600 \text{ segundos}}{1 \text{ hora}} = 14400 \text{ segundos}$$

El tiempo requerido para una carga del 98% será de: $t_c = 14400 \text{ segundos}$

Para lograr esto:

$$R = -\frac{t_c}{C \ln(1-K)} = \frac{-14400 \text{ segundos}}{(0.1) \ln(1-0.98)} = 36809.6 \Omega \rightarrow R = 36.8096 \text{ K}\Omega$$

Por lo tanto para un capacitor de 0.1F (se puede cambiar) para una carga de 98% (no se puede del 100%) y para un tiempo de carga de 4 horas que es igual a 14400 segundos, se requiere una resistencia de 36809.6 ohms para lograr esto en el circuito RC.

El diagrama de bloques mostrado en la fig. 4.9 corresponde a una simulación de una batería. Donde se mantuvo constante los parámetros: Capacitor =0.1 F y Voltaje= 24 v mientras que se varió la resistencia para analizar el comportamiento de carga y descarga en función del tiempo.

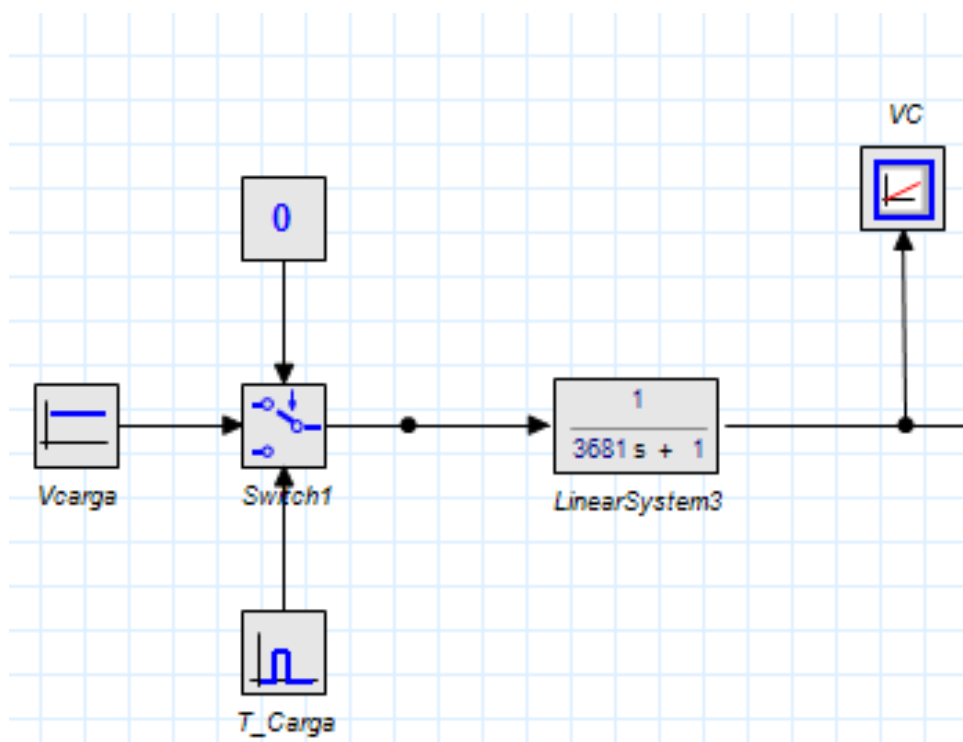


Figura 4. 9 Diagrama de bloques que simula el comportamiento dinámico de la carga de una batería considerando $R=3680.96 \, \Omega$; $C=0.1 \, F$ y $V_c= 24 \, v$.

Para un valor de resistencia $R=3681 \, \Omega$ el voltaje de carga tiende a una parábola suave hasta llegar a su máxima carga de 98% al transcurrir un tiempo de 14400 s. (Ver fig. 4.10).

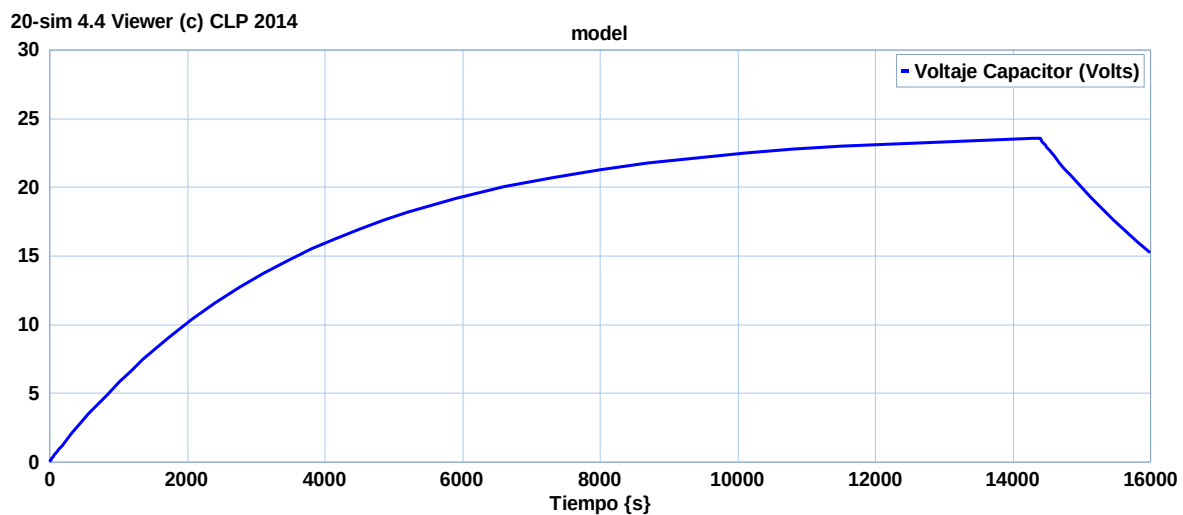


Figura 4. 10 Gráfica de voltaje contra tiempo mostrando el comportamiento dinámico de carga.

Considerando un valor de resistencia $R=1000\Omega$ se obtiene como resultado la gráfica de voltaje contra tiempo mostrada en la figura 4.11.

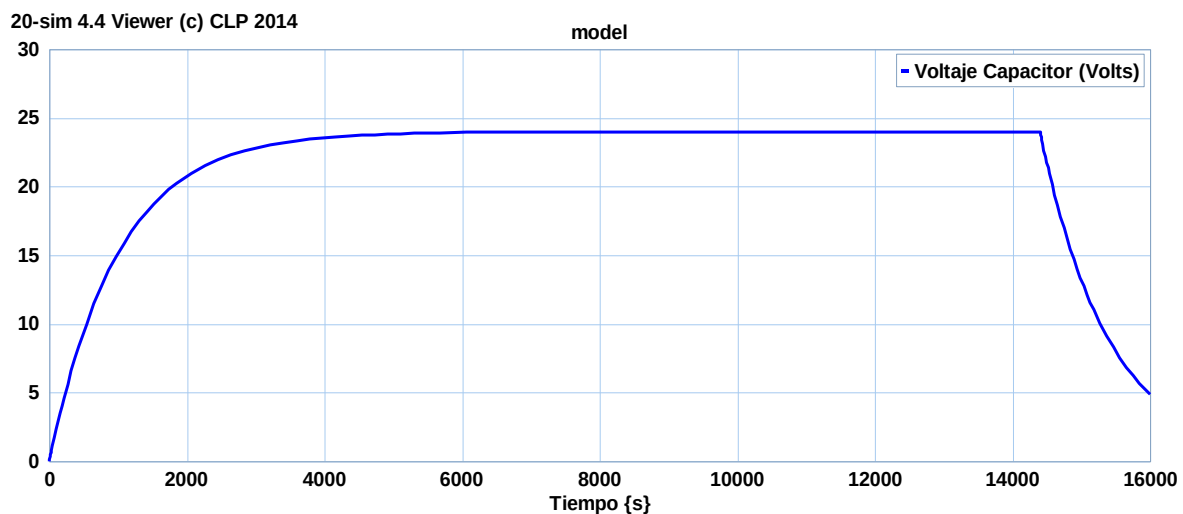


Figura 4. 11 Gráfica mostrando el comportamiento dinámico de carga de una batería con una resistencia $R=1000\Omega$.

La tendencia es de carga más rápido antes de los 7000 s. Esto se debe a que se modificó el parámetro de resistencia a un valor menor ($R=1000\Omega$) comparado con la resistencia utilizada en la simulación mostrada en la figura 4.10 ($R=3681\Omega$).

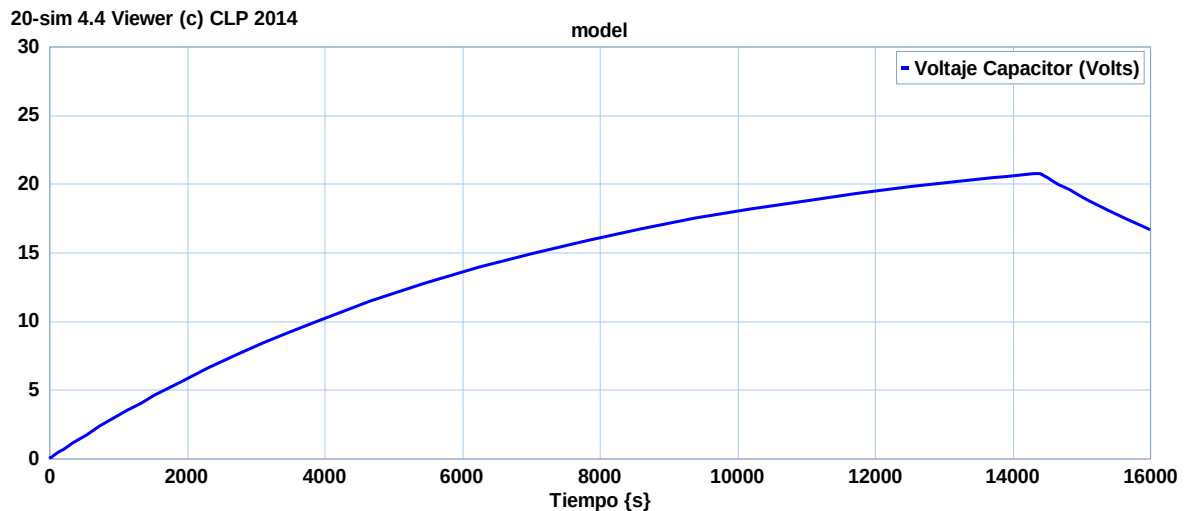


Figura 4. 12 Gráfica mostrando el comportamiento dinámico de carga de una batería con una resistencia $R=7200\Omega$.

Explorando el efecto para diferentes valores de la resistencia se obtuvo un cambio notable en el comportamiento de carga. En la figura 4.12 se utilizó un valor de resistencia $R=7200\Omega$ que corresponde a el doble de la resistencia utilizada en la gráfica de la figura 4.10. La gráfica obtenida (ver fig. 4.12) mostro que el tiempo de 14400 s no fue suficiente para cargar la batería, por lo tanto solo alcanzó un máximo de 21 volts equivalente a 87% de su carga total. Esto con el fin de observar la carga de nuestra batería respecto al tiempo.

En el siguiente texto se describe el análisis del sistema batería-motor cd. El motor de CD que alimenta a la tracción del auto eléctrico, primero es alimentado por el capacitor que es la batería para nuestro caso, se modela el motor de CD, el circuito de armadura, en este caso el circuito del devanado de campo es constante y la parte mecánica se tiene el momento de inercia y la fricción

En la figura 4.13 se muestra un diagrama eléctrico y mecánico para hacer el análisis.

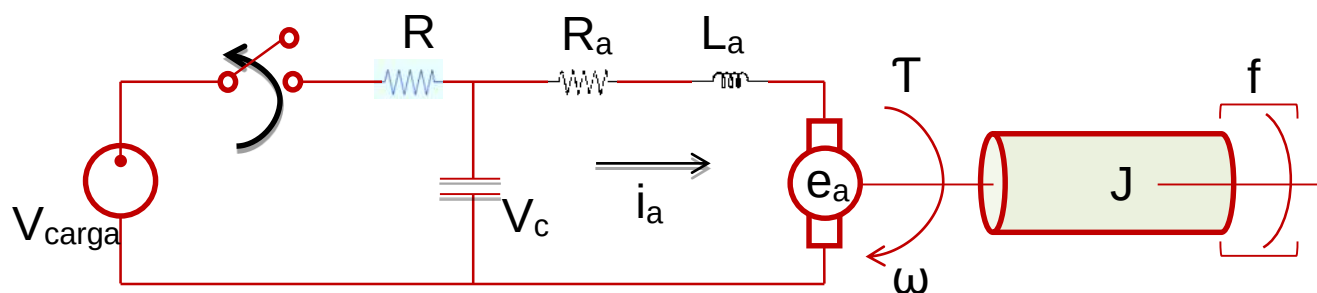


Figura 4. 13 Representa el diagrama eléctrico y mecánico y su transmisión hacia una carga.

Donde:

V_{carga} : la fuente que carga nuestra batería

R : resistencia de la batería

V_c : voltaje en el capacitor

R_a : resistencia de armadura

L_a : inductancia de armadura

E_a : diferencia de potencia

w : velocidad angular del motor

T : torque del motor

J : momento de inercia total

f : coeficiente de fricción

Se tienen las ecuaciones y el diagrama de bloques del motor de CD.

Aplicando el análisis de malla del circuito

$$V_C = V_{Ra} + V_{La} + e_a ; V_{Ra} = i_a R_a ; V_{La} = L_a \frac{di_a}{dt}$$

$$V_C = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a ; e_a = k, \omega \quad T = k, i_a$$

Aplicando la transformada de Laplace obtenemos:

$$V_C(S) = R_a I_a(S) + L_a S I_a(S) + E_A(S)$$

$$V_C(S) - E_A(S) = I_a(S)[R_a + S L_a]$$

Obteniendo el modelo matemático que a través de un cociente relaciona la respuesta de un sistema (modelada o señal de salida) con una señal de entrada o excitación. Se inyecta el voltaje y como salida se obtiene la corriente de la armadura (fig. 4.14).

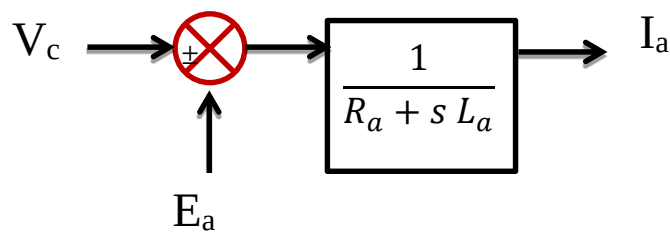


Figura 4. 14 Diagrama de bloques de la parte eléctrica

La siguiente ecuación muestra la deducción de la parte mecánica donde aplicando la transformada de Laplace se obtiene lo siguiente:

$$ZT = 0 ; T = J \frac{d\omega}{dt} + f\omega$$

$$T(s) = J S \omega(s) + f \omega(s) = \omega(s)[J S + f]$$

La función de transferencia de la velocidad angular con respecto al torque se expresa en un diagrama de bloques como:

$$\frac{w(s)}{T(s)} = \frac{1}{JS + f}$$

Donde:

$$T(s) \rightarrow \boxed{\frac{1}{JS + f}} \rightarrow w(s)$$

$$T = k_1 i_a \rightarrow T(s) = k_1 I_a(s)$$

$$I_a(s) \rightarrow k_1 \rightarrow T(s)$$

$$e_a = k_1 w \rightarrow E_a(s) = k_1 w(s)$$

$$w(s) \rightarrow k_1 \rightarrow E_A(s)$$

$$R_a = 0.1 ; L_a = 0.01, \quad f = 1.5 \quad J = 3.2 \quad K = 0.2$$

$$V_c = V_{carga} - V_a = V_{carga} - RI$$

Aplicando la transformada de Laplace:

$$V_c(S) = V_{carga}(S) - RI(S) \quad ; \quad \frac{I(S)}{V_{carga}(S)} = \frac{SC}{R(S + 1)}$$

$$V_c(S) = V_{carga}(S) - R \left[\frac{SC}{R(S + 1)} \right] V_{carga}(S)$$

$$V_c(S) = V_{carga}(S) \left[1 - \frac{SCR}{CSR + 1} \right]$$

$$V_c(S) = V_{carga}(S) \left[\frac{SRC + 1 - SRC}{SRC + 1} \right] = V_{carga}(S) \left[\frac{1}{CSR + 1} \right]$$

$$c = 0.1 F, R = 3680.98 \Omega, K = 0.2$$

$$V_{carga}(S) \rightarrow \left[\frac{1}{3680.98 (S + 1)} \right] \rightarrow V_c(S)$$

La figura 4.15 muestra un diagrama con dos motores de cd debido a que en ciertos obstáculos el vehículo puedes presentar una superficie con una pendiente o simplemente que remos más velocidad-par, el motor 1 es el que se mantiene en funcionamiento eléctricamente y el motor 2 entra en funcionamiento por periodos cortos).

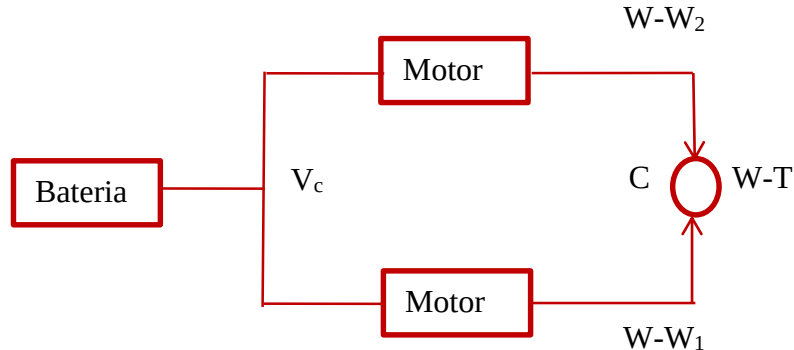


Figura 4. 15 Circuito electro-mecánico con dos motores

Ahora se presentan los resultados obtenidos de la simulación utilizando el programa de 20SIM. Se analizara el comportamiento en nuestra salida del torque variando la resistencia de la batería. Para un valor de la resistencia $R=1000\Omega$ se obtuvo como resultado la tendencia mostrada en la gráfica de la figura 4.16.

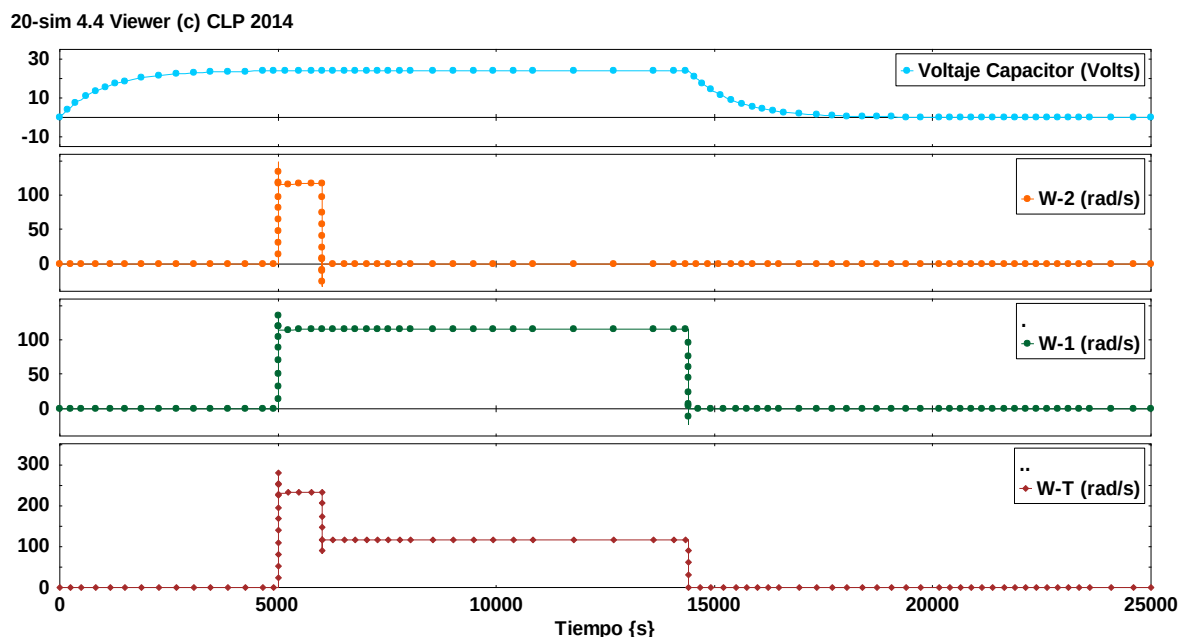


Figura 4. 16 a) Gráficas de voltaje contra tiempo. Se tiene una carga rápida en la batería de $t=4000$ s .B) a C) grafica de velocidad contra tiempo. Manteniendo el motor 1 (W-1) a una velocidad constante durante el tiempo de 5000 a 14400 s. motor 2 (W-2) entro en funcionamiento por un $t=5000$ s. A 6000 s ya sea por una pendiente o al adquirir mayor velocidad, teniendo un total de velocidad (W-T) de 250 (rad/s) aprox.

Al variar la resistencia a un valor de $R=3681\Omega$ (figura 4.17) las gráficas muestran que el par-velocidad tanto en el motor 1 como en el motor 2 tiene un ligero pendiente con un Angulo de 2° aprox. Esto se atribuye a que la batería aún no está cargada al 98%, así mismo, se puede explicar que el motor 2 entra en funcionamiento en un periodo entre $t=8000$ s a $t=9000$ s con una velocidad total (W-T) de 200 (rad/s) en el punto máximo.

20-sim 4.4 Viewer (c) CLP 2014

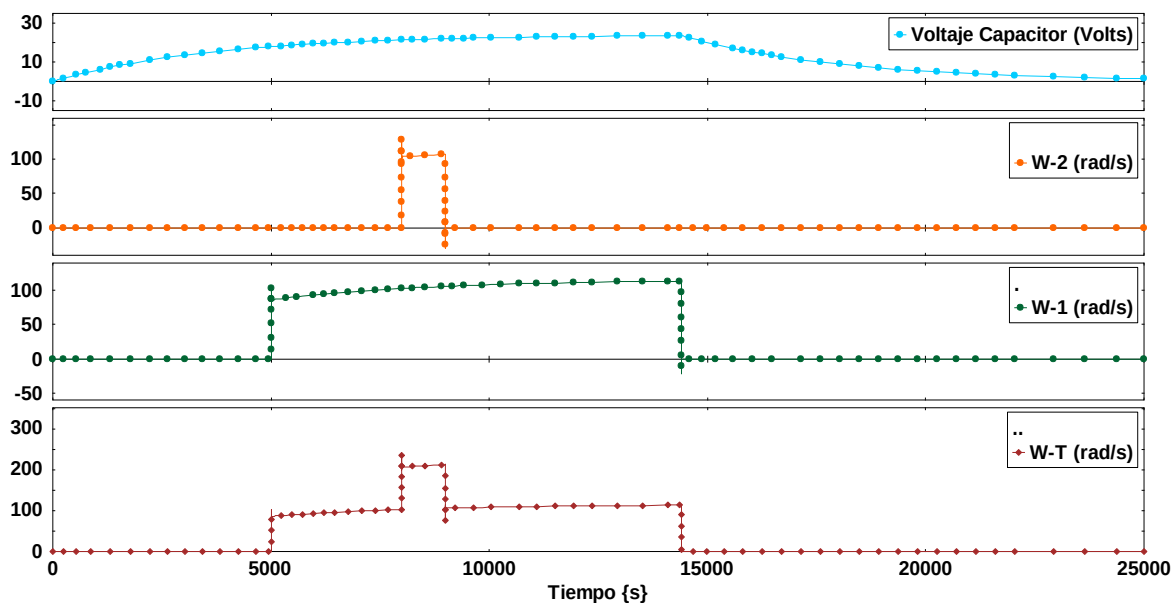


Figura 4. 17 a) Gráficas de voltaje contra tiempo. b) a d) grafica de velocidad-par contra tiempo.

Para una $R=7200\Omega$ casi el doble de lo calculado:

20-sim 4.4 Viewer (c) CLP 2014

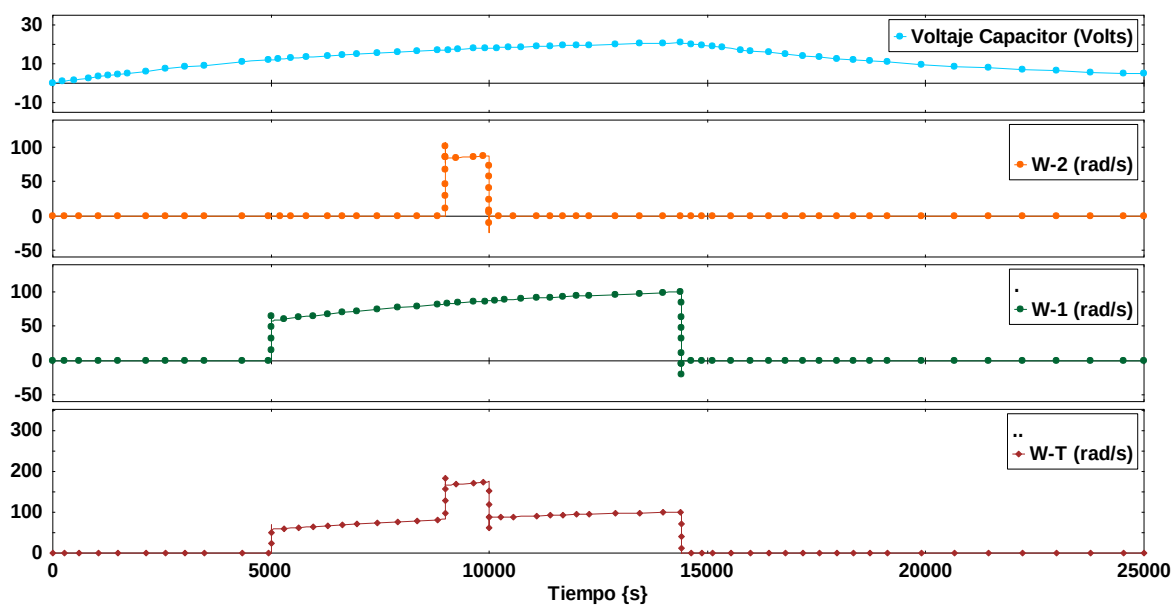


Figura 4. 18 Gráficas con una carga del 87.5% en la batería y una resistencia de $7200\ \Omega$ lo que implica que par-velocidad no son constantes ya que la batería aún se está cargando, se puso en operación el motor 2 (mostrado en línea roja) a un lapso de tiempo de $t=9000$ - 10000 s. Teniendo una velocidad total de 180 (rad/s) máximo alcanzado.

El programa de 20SIM es un software de modelado y simulación para sistemas mecatrónicos. En el presente trabajo se utilizó el programa 20SIM para realizar la simulación del sistema electro-mecánico (ver fig.4.19). El diagrama está compuesto por tres partes principales la primera parte mostrada al lado izquierdo representa la batería y esta compuesta por 6 bloques que son los siguientes: Vcarga el cual representa la fuente de carga con un valor de 24 volts de salida, T_carga indica el tiempo que deja pasar los 24 volts en este caso es de $t=0$ a 14400 s, tiempo calculado para la carga de la batería; bloque cero y bloque swich1 es cuando bloquea o conmuta el voltaje de 24 volts a (off), el bloque linearsystem3 representa la función de transferencia RC y el bloque VC su función es mostrar el resultado grafico del comportamiento de carga – descarga mediante una gráfica de voltaje-tiempo de la batería.

La segunda parte del sistema presenta dos motores de CD enel diagrama de bloques mostrado en la figura 4.19 es la parte media, está compuesto de 5 bloques en la parte inferior y 5 bloques en la parte superior. Donde la función cada uno de los bloques se describe de la siguiente manera: V_M1_act es el tiempo que se le da el motor 1 para que inicie su funcionamiento, el bloque Switch4 y bloque cero conmuta el bloque de la salida de la batería con el tiempo de encendido del motor 1, posteriormente en el swich4 llega a un nodo donde se transfiere al bloque de la función de transferencia (LinearSystem4) que es la función de transferencia RL, posteriormente continua en el bloque K con un valor de 0.2 . En la parte inferior se muestra el bloque de V_M2_Act que es el tiempo que le damos para que entre en funcionamiento el motor 2 por tiempos cortos, el bloque de swich2 es el que conmuta la entrada de tiempo en off, posteriormente se muestra un nodo. El bloque LineraSystem1 es de la función de transferencia del circuito RL y el bloque K representa la ganancia con valor igual a 0.2 .

Por último se muestra la parte mecánica del sistema que se conforma de 4 bloques inferiores y 8 bloques superiores: el primer bloque LinearSystem5 almacena la función de transferencia de la parte mecánica del motor 1 (momento de inercia, aceleración, fricción, velocidad angular), posteriormente el bloque Esc_M1 representa una ganancia con valor de 100 esto con el objetivo de amplificar la señal para que sea posible apreciarla en la salida (grafica), posteriormente tenemos el bloque W_1 que muestra la señal de salida del funcionamiento de nuestro motor 1 también se tiene una retroalimentación de una ganancia K (Gain4) con un valor de 0.2 que llega al nodo.

En la parte superior se tiene LinearSystem2 que es la función de transferencia de la parte mecánica del motor 2 (momento de inercia, aceleración, fricción, velocidad angular), posteriormente se tiene una ganancia Esc_M2 con un valor de 100 y otra ganancia K (Gain2) que es retroalimentada en el nodos del motor 2, así mismo, que a su vez la Esc_M2 va conectado al bloque W_2 que muestra la señal obtenida de motor 2, por último en la parte derecha se tiene el bloque W_m2_Act en este bloque tiene la opción de restringir el tiempo que queremos manipular para que entre en funcionamiento el motor 2 el cual va conectado a un nodo de adición de la salida del motor 1 con el motor 2 esto con el fin de ver el comportamiento de la suma de potencia de ambos motores de CD cuando entren en funcionamiento ambos. El bloque W_T muestra par-velocidad total contra tiempo.

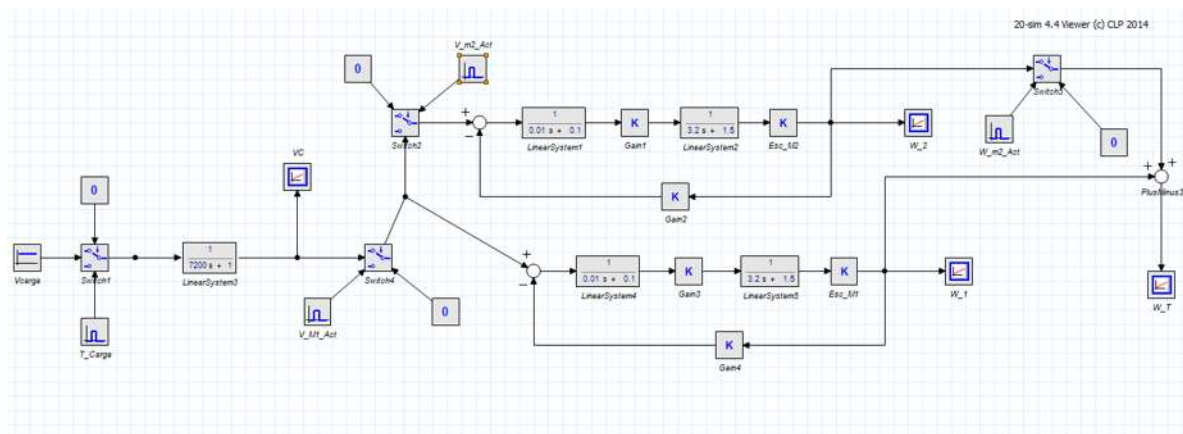


Figura 4. 19 Diagrama de bloques de una batería, un motor de cd y parte mecánica, simulado mediante el programa 20SIM.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

En el presente trabajo tesis, primeramente se realizó una descripción de la evolución de los automóviles hasta llegar a los autos eléctricos.

Actualmente, los autos eléctricos han encontrado un gran desarrollo debido al incremento de los combustibles y a la contaminación que genera los automóviles con motores de combustión interna.

Debido a esto, esta tesis contribuye al modelado en diagrama de bloques de la sección de la tracción de un auto eléctrico, donde las partes más importantes son la batería y el motor de CD.

Así mismo, se ha demostrado que los autos eléctricos están formados por más de un motor de CD. En esta tesis se presentan dos motores de CD para llevar a cabo la tracción mecánica necesaria para el funcionamiento del auto.

Se realizan combinaciones de los accionamientos de cada uno de los motores, sin embargo, se considera que el motor de CD 1 es el que mantiene a tracción en todo momento y el motor de CD 2 es utilizado para la aceleración en periodos cortos de tiempo, de esta manera, el desgaste del motor de CD 1 se garantiza que será constante evitando que opere en revoluciones elevadas, y el motor de CD 2, realizará esta función.

Estos casos de estudio se describen en gráficas obtenidas por el software 20-Sim. Así, se puede llevar a cabo múltiples combinaciones de carga y descarga de la batería y combinaciones de los dos motores de CD, sin necesidad de realizar pruebas en prototipos.

Una vez, que se ha caracterizado el funcionamiento del modelo completo, entonces se puede comprobar y analizar en prototipos construídos, lo cual se puede contemplar en futuros trabajos de tesis.

5.2 RECOMENDACIONES

- Se debe evaluar el programa para diferentes condiciones con el objetivo de encontrar las más óptimas condiciones para el sistema.
- Mejorar y encontrar los mejores materiales químicos para la fabricación de baterías más duraderas y ligeras ya que los autos eléctricos dependen de la autonomía del vehículo involucra mayor distancia recorrido y mejor par-velocidad en el motor además implica precio y costos en el mercado.
- Encontrar motores más eficientes, con menores pérdidas de rozamiento, calentamiento, arco eléctrico,

BIBLIOGRAFÍA

1. Weisz, P.B., *Basic choices and constraints on long-term energy supplies*. PHYSICS TODAY., 2004. **57**(7): p. 47-52.
2. Bartlett, A.A., *Sustained availability: A management program for nonrenewable resources*. American Journal of Physics, 1986. **54**(5): p. 398-402.
3. Becker, T.A., I. Sidhu, and B. Tenderich, *Electric vehicles in the United States: a new model with forecasts to 2030*. Center for Entrepreneurship and Technology, University of California, Berkeley, 2009. **24**.
4. Shen, C., P. Shan, and T. Gao, *A comprehensive overview of hybrid electric vehicles*. International Journal of Vehicular Technology, 2011. **2011**.
5. Campanari, S., G. Manzolini, and F.G. De la Iglesia, *Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations*. Journal of Power Sources, 2009. **186**(2): p. 464-477.
6. Howell, D., *Annual Merit Review: Energy Storage R&D Overview*. US Department of Energy, Energy Efficiency and Renewable Energy, 2009.
7. Brunovský, P., *A classification of linear controllable systems*. Kybernetika, 1970. **6**(3): p. (173)-188.
8. Chaouch, S. and M.-S. Nait-Said, *Backstepping control design for position and speed tracking of DC motors*. Asian Journal of Information Technology, 2006. **5**(12): p. 1367-1372.
9. Paredes, S.R., R.R. Lozoya, and M.G. Solano, *Análisis estructural de un motor de corriente directa*. ContactoS, 2010. **75**: p. 21-26.
10. Husain, I., *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. 2010: CRC press.
11. Soylyu, S., *Electric Vehicles: Modelling and Simulations*. 2011: BoD—Books on Demand.