



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE
SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE
POTENCIA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO

TESIS

Que para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
ELÉCTRICA

Presenta:

Ing. Victor Hugo González Murillo

Director de Tesis:

Doctor en Ingeniería en Sistemas Eléctricos de Potencia
Carlos Pérez Rojas

Agosto 2013



A mi Esposa y a mis Padres....

Agradecimientos

Gracias a mi asesor el Dr. Carlos Pérez Rojas por su invaluable apoyo y guía durante el desarrollo del presente trabajo, así como su sincera amistad durante todo este tiempo...

Gracias a todos mis maestros del Posgrado de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Michocana de San Nicolás de Hidalgo por compartir su conocimiento y contribuir a mi formación...

Gracias al CONACYT por el apoyo económico brindado durante mis estudios de Maestría...

Gracias a todos mis compañeros de generación, a Celso, Rafa, Pavel, Chino, Lalo, Sanzon, Perico y Gerson por su gran apoyo e invaluable amistad...

Gracias a mi esposa Marisol, por su comprensión, paciencia y gran apoyo...

Gracias a Dios por todo durante este tiempo,...Gracias

Abstract

The electric vehicles have gained increasing interest in today's society due to factors such as rising fuel prices, pollution and climate change as a result. Despite all electric vehicles do not enjoy a good concept in our society due to limited autonomy and a price that does not put the lead with his closest competitor that is the internal combustion car. However, new technologies in the materials used for the manufacture of batteries promises best prices and sufficient autonomies for the vehicle to be operated daily in a reliable way and their owners can perform the activities of a normal day without worrying about the level of these load. Therefore, in this work it is intended to model the elements involved in the dynamics of the vehicle and providing the movement with special emphasis on the energy source, the batteries. After completing the model, Simulink will be used in order to construct the model of the vehicle in order to compare different types of batteries and know the behavior of these to select the most appropriate considering its performance. In electric vehicles, batteries are the most important component, as they are the center of electrical energy storage that propels them, so we used a dynamic model from the electrical point of view to represent the behavior of the bank batteries and with the help of Simulink, verify their performance when integrated with other components of the vehicle such as the inverter, the induction motor and vehicle dynamics. Because it aims to use existing elements in the current mexican electricity market and with affordable price, the battery modeled here most emphatically is the lead-acid, since it is the most mature technology in addition to their characteristics robustness, greater availability and lower price and finally comparisons are made with other types of batteries, considering the performance of one of the most representative electric vehicles in the history, the General Motors EV1, which was released for the first time in 1996, using a bank of lead-acid batteries that gave him an autonomy which was about 150 km per charge, but for strategic reasons disappeared from the market.

Resumen

Los Vehículos Eléctricos han cobrado mayor interés en la sociedad actual debido a factores como el aumento en los precios de los combustibles, la contaminación y como consecuencia el cambio climático. A pesar de todo los vehículos eléctricos no gozan de un buen concepto en nuestra sociedad debido a una autonomía limitada y a un precio que no lo pone en ventaja junto a su más cercano competidor que es el auto de combustión interna. Sin embargo, las nuevas tecnologías en materiales utilizados para la fabricación de baterías promete mejores precios y autonomías suficientes para que los vehículos puedan funcionar a diario de una forma confiable y sus dueños puedan realizar las actividades de un día normal sin preocuparse por el nivel de carga de éstas. Por lo anterior en este trabajo se pretende realizar el modelo de los elementos que intervienen en la dinámica del vehículo y los que proporcionan el movimiento a éste, haciendo especial énfasis en la fuente de energía, es decir, el banco de baterías. Una vez realizado el modelo, se empleará el programa Simulink y se hará uso de los diferentes bloques que lo conforman para armar el modelo del vehículo con la finalidad de comparar diferentes tipos de baterías y saber el comportamiento de éstas para poder determinar cual utilizar considerando su desempeño.

En los vehículos eléctricos, las baterías son el componente de mayor importancia, pues son el centro de almacenamiento de la energía eléctrica que propulsa a éstos, por lo cual, se ha utilizado un modelo dinámico desde el punto de vista eléctrico para representar el comportamiento del banco de baterías y a través de la ayuda de Simulink, verificar su desempeño al integrarlo con los demás componentes del vehículo, tales como el inversor, el motor de inducción y la misma dinámica del vehículo.

Debido a que se pretende emplear elementos existentes en el mercado eléctrico actual y de costo razonable, el banco de baterías que aquí se modela con mayor énfasis es el de plomo-ácido, puesto que es la tecnología más madura, además de sus características de robustez, mayor disponibilidad y menor precio y al final se realizan las comparaciones con los demás bancos de baterías, considerando su desempeño. Uno de los vehículos eléctricos más representativos de la historia, el EV1 de General Motors, lanzado por primera vez al mercado en 1996 contaba con un banco de baterías de plomo-ácido y una autonomía nada despreciable que rondaba los 150 km por carga, pero por cuestiones estratégicas de mercado, desaparecieron.

Índice general

Agradecimientos	v
Abstract	vii
Resumen	ix
Lista de figuras	xv
Lista de tablas	xvii
Lista de símbolos y abreviaturas	xix
1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Estado del Arte	2
1.3. Justificación	5
1.4. Objetivos	8
1.5. Descripción de Capítulos	8
2. Fundamentos de la Dinámica del Vehículo	9
2.1. Introducción	9
2.2. Fuerza de tracción	9
2.2.1. Fuerza de resistencia al rodamiento	10
2.2.2. Fuerza de arrastre aerodinámico	10
2.2.3. Fuerza subiendo una pendiente	11
2.2.4. Fuerza de aceleración	11
2.2.5. Fuerza total de tracción	13
2.3. Modelo de la aceleración del vehículo	14
2.3.1. Parámetros a considerar en el desempeño de la aceleración .	14
2.3.2. Modelado de la aceleración de un vehículo eléctrico tipo sedan	15
3. Baterías	19
3.1. Introducción	19
3.2. Parámetros de la batería	20

3.2.1.	Voltajes de celda y voltajes de batería	20
3.2.2.	Capacidad de carga en Ah	21
3.2.3.	Energía almacenada	22
3.2.4.	Energía específica	22
3.2.5.	Densidad de energía	23
3.2.6.	Potencia específica	23
3.2.7.	Eficiencia de los Ah de carga	24
3.2.8.	Eficiencia de la energía	25
3.2.9.	Tasa de autodescarga	25
3.2.10.	Geometría de la batería	25
3.2.11.	Temperatura de la batería y sus necesidades de calefacción y enfriamiento	25
3.2.12.	Vida útil de la batería y cantidad de ciclos profundos	26
3.3.	Baterías de plomo-ácido	26
3.3.1.	Fundamentos de las baterías de plomo-ácido	26
3.3.2.	Características especiales de las baterías de plomo-ácido	28
3.3.3.	Vida de la batería y mantenimiento.	30
3.3.4.	Carga de la batería	31
3.3.5.	Resumen de las baterías de plomo-ácido	31
3.4.	Baterías basadas en níquel	31
3.4.1.	Introducción	31
3.4.2.	Baterías de níquel-cadmio	32
3.4.3.	Baterías de hidrógeno metálico de níquel.	34
3.5.	Baterías de litio	36
3.5.1.	Introducción	36
3.5.2.	Baterías de polímero de litio	36
3.5.3.	Baterías de iones de litio	36
3.6.	Carga de la batería	37
3.6.1.	Igualación de la carga	38
3.7.	Modelado de la batería	39
3.7.1.	Introducción	39
3.7.2.	Modelos de baterías	39
3.7.3.	Modelos electroquímicos de baterías	40
3.7.4.	Modelos de baterías basados en circuitos eléctricos	40
3.7.5.	Modelo propuesto de baterías.	41
3.7.6.	Resumen de los modelos de carga y descarga	45
3.7.7.	Obtención de los parámetros	46
4.	Modelado del tren de potencia	49
4.1.	Introducción	49
4.2.	Modelo del motor de inducción.	50
4.2.1.	Ecuaciones del MI en variables del marco de referencia ar- bitrario.	54
4.3.	Inversor trifásico.	57

4.3.1. Modulación senoidal del ancho de pulso.	58
4.4. Controlador.	59
5. Simulación del vehículo eléctrico	63
5.1. Introducción	63
5.2. Diagrama de bloques de lazo cerrado del sistema	63
5.3. Simulaciones	65
6. Conclusiones y trabajos futuros	73
6.1. Conclusiones	73
6.2. Trabajos futuros	74

Índice de figuras

1.1. Vehículo eléctrico "Jamais Contente" de Camile Jenatzy, 1899	2
1.2. Auto eléctrico de Thomas Alva Edison, 1913	3
1.3. EV1 de General Motors, 1996.	4
2.1. Fuerzas que actúan en un vehículo moviéndose a lo largo de una pendiente	10
2.2. Transmisión del par motor a una rueda del vehículo a través de un arreglo sencillo	12
2.3. Prueba de aceleración para el vehículo eléctrico EV1 de GM realizada a par máximo.	17
3.1. Circuito equivalente simplificado de una batería compuesta por seis celdas.	21
3.2. Gráfica que muestra a manera de ejemplo el cambio en la capacidad de carga en Ampers-hora de una batería de plomo-ácido de 42 Ah fabricada por Hawker Energy Products Inc.	22
3.3. Gráfica Ragone. Curvas típicas de potencia específica contra energía es- pecífica de baterías de tracción de plomo-ácido y níquel-cadmio.	23
3.4. Reacciones durante la descarga y la carga de una batería de plomo-ácido.	27
3.5. Reacciones de gasificación que ocurren cuando la batería de plomo-ácido es sobrecargada	29
3.6. Comportamiento del voltaje de circuito abierto de una batería de plomo- ácido con el estado de carga.	29
3.7. Reacciones durante la descarga de una batería de Níquel-Cadmio. Las reacciones se revierten durante la carga.	32
3.8. Reacciones durante la descarga de una batería de hidrógeno metálico de níquel. Las reacciones se revierten durante la carga.	35
3.9. Predicción de la capacidad de Peukert.	42
3.10. Curva característica de descarga.	43
4.1. Componentes del tren de potencia del vehículo eléctrico así como los periféricos.	49
4.2. Elementos del tren de potencia de un vehículo eléctrico básico.	50
4.3. Sistema de propulsión tipo serie.	50
4.4. Devanados del estator y del rotor del MI.	51
4.5. Diagrama eléctrico de los devanados del estator y del rotor del MI.	51

4.6. Circuitos equivalentes para el marco de referencia arbitrario de un motor de inducción simétrico trifásico.	57
4.7. Bloque de máquina asincrona utilizado en Simulink.	57
4.8. Topología de un inversor trifásico.	58
4.9. Modulación senoidal por ancho de pulso para un inversor trifásico. a) Voltaje de referencia y voltaje de la portadora. b),c),d) Voltajes de disparo de compuertas. e) Voltaje de línea.	59
4.10. Inversor IGBT.	60
4.11. Principio de funcionamiento del Contro de Campo Orientado.	60
4.12. Bloque del control vectorial.	61
5.1. Diagrama de bloques de lazo cerrado del modelo del vehículo eléctrico.	64
5.2. Comportamiento dinámico del MI al ser alimentado por un banco de baterías de plomo-ácido.	65
5.3. Comportamiento dinámico del banco de baterías de plomo-ácido.	66
5.4. Comportamiento dinámico del MI al ser alimentado por un banco de baterías de NiCad.	67
5.5. Comportamiento dinámico del banco de baterías de NiCad.	68
5.6. Comportamiento dinámico del MI al ser alimentado por un banco de baterías de NiMH.	69
5.7. Comportamiento dinámico del banco de baterías de NiMH.	70
5.8. Comportamiento dinámico del MI al ser alimentado por un banco de baterías de Li-Ion.	71
5.9. Comportamiento dinámico del banco de baterías de Li-Ion.	71
5.10. Comportamiento de la predicción de la capacidad de Peukert.	72

Índice de tablas

1.1. Comparación de niveles contaminantes expresado en mg/km según el tipo de vehículo,[1].	6
1.2. Emisiones contaminantes en $kg.$ por cada $100km$	7
3.1. Parámetros nominales de las baterías de plomo-ácido.	28
3.2. Parámetros nominales de las baterías de níquel-cadmio.	33
3.3. Parámetros nominales de las baterías de hidrógeno metálico de níquel.	35
3.4. Parámetros nominales de las baterías de iones de litio.	37
3.5. SOC de dos celdas diferentes de una batería. La celda A es una celda de buena calidad con bajo nivel de autodescarga. La celda B tiene un nivel mayor de autodescarga. Las dos celdas son cargadas y descargadas cierto número de veces.	38
3.6. Parámetros estándar en los 4 tipos de baterías.	48
6.1. Comparación del precio en pesos mexicanos de un banco de baterías de Li-Ion y uno de plomo-ácido.	74

Lista de símbolos y abreviaturas

Símbolos

F_{rr}	Fuerza de resistencia al rodamiento (N)
μ_{rr}	Coefficiente de resistencia al rodamiento
F_{ad}	Fuerza de arrastre aerodinámico (N)
ρ	Densidad del aire (kg/m^3)
A	Área frontal del vehículo (m^2)
C_d	Coefficiente de arrastre
v	Velocidad lineal del vehículo (m/s)
F_{la}	Fuerza de aceleración lineal (N)
m	masa (kg)
a	Aceleración lineal (m/s^2)
F_{te}	Fuerza de tracción del tren motriz (N)
r	Radio de la llanta (m)
G	Relación de transmisión
T	Par mecánico ($N \cdot m$)
ω	Velocidad angular del rotor (rad/s)
$\dot{\omega}$	Aceleración angular (rad/s^2)
ω_c	Velocidad angular crítica (rad/s)
I	Momento de inercia del rotor de motor de inducción ($kg \cdot m^2$)
$F_{\omega a}$	Fuerza necesaria en las ruedas para producir la aceleración angular (N)
η_g	Eficiencia de la transmisión
T_{max}	Par máximo ($N \cdot m$)
T_0	Par inicial ($N \cdot m$)
F_{hc}	Fuerza subiendo una pendiente (N)
g	Velocidad de la gravedad (m/s^2)
ψ	Pendiente del camino (rad)
V	Voltaje de la batería (V)
R	Resistencia de la batería (Ω)
I	Corriente de la batería (A)
E	Tensión de circuito abierto de la batería (V)
C	Capacidad de la batería expresada por el fabricante (Ah)
Q	Capacidad de la batería usada en las ecuaciones (Ah)
Q_p	Capacidad de Peukert (Ah)

k	Constante de Peukert
t	tiempo (s)
K	Cte. de polarización (V/Ah) o resistencia de polarización (Ω)
i	Corriente (A)
i^*	Corriente filtrada (A)
V_{batt}	Voltaje de la batería (V)
A_{exp}	Amplitud del voltaje en la zona exponencial (V)
B	Constante de tiempo inverso en la zona exponencial (Ah^{-1})
$u(t)$	Modo de operación de la batería
N_s	Número equivalente de vueltas del estator
N_r	Número equivalente de vueltas del rotor
R_s	Resistencia del estator (Ω)
R_r	Resistencia del rotor (Ω)
θ_r	Ángulo entre los ejes magnéticos del rotor y del estator (rad)
abc	Representa las tres fases del devanado del estator
s	Parámetros y variables asociados al estator
r	Parámetros y variables asociados al rotor
p	Operador de derivación d/dt
v	Voltaje de alimentación del motor
R	Resistencia del devanado
i	Corriente del devanado
λ	Enlaces de flujo
L_{ls}	Inductancia de dispersión de devanados del estator
L_{lr}	Inductancia de dispersión de devanados del rotor
L_{ms}	Inductancia de magnetización de devanados del estator
L_{mr}	Inductancia de magnetización de devanados del rotor
L_{sr}	Inductancia mutua entre devanados de estator rotor
$L_{ls} + L_{ms}$	Inductancia de propia de devanados del estator
$L_{lr} + L_{mr}$	Inductancia de propia de devanados del rotor
θ_r	Posición angular del rotor
μ_0	Permeabilidad magnética del entrehierro
r	Radio a la mitad del entrehierro
l	Longitud axial del entrehierro
g	Longitud uniforme del entrehierro
V_{full}	Voltaje máximo de carga (V)
V_{exp}	Voltaje al final de la zona exponencial (V)
Q_{exp}	Capacidad de la batería al final de la zona exponencial (Ah)
V_{nom}	Voltaje al final de la zona exponencial (V)
Q_{nom}	Capacidad de la batería al final de la zona exponencial (Ah)

Abreviaturas

EV	Vehículo eléctrico
SOC	Estado de carga
EOC	Fin del proceso de carga
Resist.	Resistencia

Pol.	Polarización
MI	Motor de Inducción

Introducción

1.1. Introducción

El automóvil eléctrico se presenta en las últimas décadas como la alternativa de futuro en cuanto a transporte urbano se refiere. Las comparaciones que se realizan con su inmediato competidor, el automóvil de combustión interna(VCI), se inclinan siempre hacia el lado de estos últimos por razones económicas, de prestaciones y referentes a la infraestructura. A pesar de ello, su desarrollo e investigación está más que justificado y ninguna de las compañías automotrices quiere quedarse atrás en tal materia y por ello siguen trabajando en el auto eléctrico pues saben que es una alternativa cada vez más tangible a los problemas derivados de los automóviles actuales.

El automóvil eléctrico posee innumerables beneficios en lo que a tráfico en grandes ciudades se refiere, pues es mucho más silencioso, no emite contaminantes producto de su uso directo y como consecuencia permite disminuir la concentración de contaminantes en las grandes ciudades.

Debido a los avances en la electrónica de potencia y a la disminución del precio de diferentes componentes, es posible hoy en día realizar la construcción de vehículos que satisfagan las necesidades diarias de transporte de una persona promedio, las cuales, según estudios realizados en diferentes países, tienen una media de menor a 2 personas por trayecto con velocidades en el caso urbano que oscilan alrededor de los 50 km/hr y distancias de recorrido menores a los 60 km diarios, para lo cual, los vehículos eléctricos parecen idóneos, [1][2].

Tomando en cuenta que la primer demostración de un vehículo eléctrico se llevó a cabo en 1830 y que comercialmente existieron a finales del siglo XIX, estos no gozaron del éxito que tuvieron los vehículos de combustión interna debido al auge del petróleo y en contraste a la poca infraestructura de la red eléctrica. Sin embargo, debido a las normas ambientales actuales y a los problemas de contaminación aunados al desarrollo tecnológico de las baterías y demás componentes eléctricos y electrónicos, la balanza comienza a inclinarse cada vez más a favor del desarrollo y adopción de nuevos vehículos eléctricos,[2].

1.2. Estado del Arte

La existencia del automóvil eléctrico se remonta hacia el año de 1830 y fue uno de los primeros automóviles que se desarrollaron y existieron antes que los vehículos de combustión interna de cuatro tiempos, los cuales hicieron su aparición en diferentes naciones y bajo diferentes configuraciones alrededor de 1860.

Entre 1832 y 1839, Robert Anderson, un hombre de negocios escocés, inventó el primer vehículo eléctrico puro. El profesor Sibrandus Stratingh de Groninga, en los Países Bajos, diseñó y construyó con la ayuda de su asistente Christopher Becker vehículos eléctricos a escala reducida en 1835 [1].

La mejora de la batería eléctrica de plomo-ácido por parte de los franceses Gaston Planté en 1865 y Camille Faure en 1881, facilitó el desarrollo en mayor escala de los vehículos eléctricos [1].

En la exposición mundial de 1867 en París, el inventor austriaco Franz Kravolg mostró un biciclo con motor eléctrico. Francia e Inglaterra fueron las primeras naciones que apoyaron el desarrollo generalizado de los vehículos eléctricos. En noviembre de 1881 el inventor francés Gustave Trouvé mostró un automóvil de tres ruedas en la Exposición Internacional de Electricidad de París [1].

Antes de que los vehículos de combustión interna tuvieran la preferencia de la gente, los automóviles eléctricos realizaron registros de velocidad y distancias notables, entre los que destacan la ruptura de la barrera de los 100 km/hr, de Camille Jenatzy el 29 de abril de 1899, que alcanzó la velocidad de 105.88 km/hr en su vehículo que bautizó con el nombre de *Jamais Contente*, el cual puede apreciarse en la figura 1.1, [1].

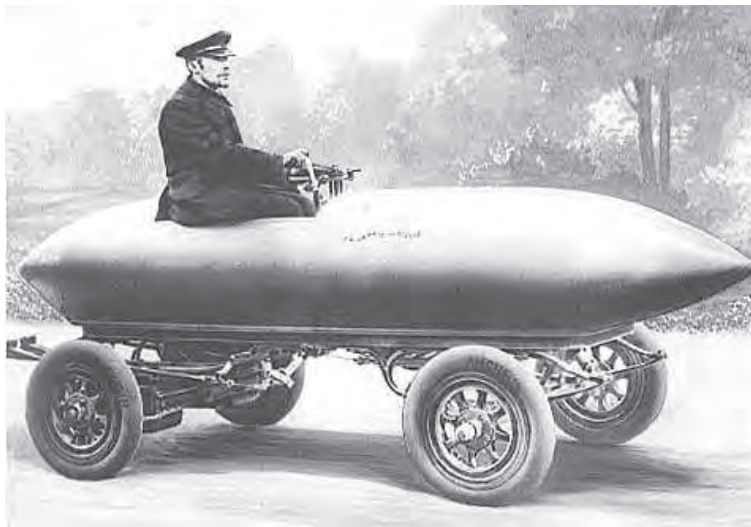


Figura 1.1: Vehículo eléctrico "Jamais Contente" de Camile Jenatzy, 1899

Los automóviles eléctricos producidos en los Estados Unidos por las compañías Anthony Electric, Baker, Detroit, Edison, Studebaker y otros durante el inicio del siglo XX tuvieron relativo éxito comercial. Debido a las limitaciones tecnológicas, la velocidad máxima de estos vehículos se limitaba a unos 32 km/hr, por lo que fueron vendidos como coches para la clase alta y con frecuencia se comercializaron también como vehículos adecuados para las mujeres debido a la conducción limpia,

tranquila y de fácil manejo, especialmente al no requerir el arranque manual con manivela, que sí necesitaban los automóviles de gasolina de la época. Ejemplo de lo anterior es el vehículo eléctrico de Thomas Alva Edison, el cual tenía el chasis y carrocería de un Ford modelo T pero con la tecnología de un vehículo eléctrico de ese entonces, tal como se puede apreciar en la figura 1.2, [1].



Figura 1.2: Auto eléctrico de Thomas Alva Edison, 1913

En España, Emilio de la Cuadra, después de haber sido cautivado por los vehículos eléctricos en las carreras celebradas en Paris-Burdeos en 1895, decide abrir su propia compañía de vehículos eléctricos, la cual por cuestiones financieras y por el estallamiento de una huelga, cerró en 1901.

La introducción del arranque eléctrico del Cadillac a gasolina en 1913, simplificó la tarea de arrancar el motor de combustión interna, que antes de esta mejora resultaba difícil e incluso peligroso. Esta innovación, junto con el sistema de producción en cadenas de montaje de forma masiva y relativamente barata implantado por Henry Ford desde 1908 contribuyó a la caída del vehículo eléctrico además de que las mejoras sucedieron con mayor velocidad en los vehículos de combustión interna que en los vehículos eléctricos [1].

A finales de 1930, la industria del automóvil eléctrico desapareció por completo, quedando relegada a algunas aplicaciones industriales muy concretas como montacargas eléctricos que fueron introducidos por Yale en 1923, elevadores eléctricos y más recientemente a carros de golf eléctricos con los primeros modelos de Lektra en 1954,[1].

Debido a diferentes crisis petroleras, al aumento de la contaminación y al desarrollo de la electrónica de potencia en la década de 1970, volvió a resurgir el interés de la investigación de los vehículos eléctricos. En esta década la aplicación de accionadores electrónicos para el uso en el sistema de propulsión tuvo un despegue muy importante y se ha desarrollado de ese entonces hasta nuestros días, [1],[2],[3],[4][5],[6].

En un principio la máquina utilizada como elemento principal del sistema propulsor fue el motor eléctrico de corriente directa o máquina de CD. Sin embargo, a partir de los años 80's, la disponibilidad de mejores y modernos semiconductores de potencia propició gradualmente la preferencia de los motores eléctricos de corriente alterna o máquinas de AC, tales como el motor de inducción, el motor síncrono y el motor de reluctancia variable,[7].

Fué así como en 1996, General Motors lanzó en el mercado de Los Estados Unidos el auto eléctrico EV1, bajo una modalidad de arrendamiento por 3 años ó 30,000 millas, saliendo al mercado con un banco de baterías de plomo-ácido y posteriormente en 1999 fueron reemplazadas por baterías de hidruro metálico de níquel.

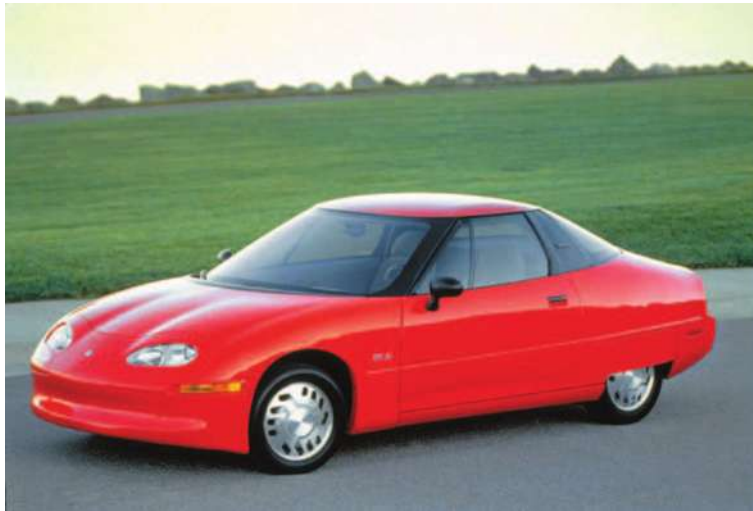


Figura 1.3: EV1 de General Motors, 1996.

En la figura 1.3, se muestra el EV1 de 1996, el cual, al tener instalado un banco de baterías de plomo-ácido le proporcionaba una autonomía superior a los 100 km con una velocidad máxima de 128 km/hr y una aceleración de 0 a 100 km/hr en menos de 10 segundos. Posteriormente en 1999 al substituirse las baterías de plomo-ácido por las de hidruro metálico de níquel, la autonomía subió hasta los 257 Km pero por motivos de escaso mercado para éstos, según lo argumentado por mismos funcionarios de General Motors, fueron recuperados y destruídos y algunos donados a museos para su exhibición,[8].

A partir de 1996 y hasta la fecha, diferentes compañías automotrices como Toyota, Honda, Mercedes Benz, BMW, Volkswagen, Nissan, Tesla Motors, Volvo, Seat, Smart, Ford, Fiat, Tata Motors, Reva, Skoda, Peugeot, Renault, Mitsubishi y la misma General Motors entre otras, han desarrollado diferentes prototipos con autonomías que van desde los 60 km hasta los 426 km por carga como es el caso del Tesla Modelo S, que cuenta con un banco de baterías de iones de litio y un par de motores de inducción,[9].

Todos los modelos de vehículos eléctricos realizados hasta ahora, enfrentan dos principales problemas para despertar un mayor interés y puedan ser considerados como una oferta atractiva de compra; el primero radica en la cantidad de energía eléctrica que puede ser almacenada en el banco de baterías, la cual es directamente

proporcional a la cantidad de kilómetros que podrá recorrer éste por cada carga; el segundo es el precio que tiene cada tipo de banco de baterías, pues es el componente más costoso y su precio está en función de dicha autonomía. Por tales motivos, el principal objetivo de este trabajo es analizar las características y prestaciones de los diferentes bancos de baterías e integrarlos a los demás componentes del tren de potencia del vehículo para obtener así un modelo general para simular su comportamiento bajo diferentes configuraciones haciendo uso de Matlab/Simulink y poder saber con certeza que tecnología de baterías puede ser la más adecuada para determinados requerimientos de servicio.

1.3. Justificación

Al paso de los años, los vehículos eléctricos han cobrado un mayor interés en la sociedad mundial, debido a diferentes factores energéticos, económicos, ecológicos o de salud.

El escenario actual de las reservas mundiales del petróleo y sus derivados está condicionado por el tiempo que éstas puedan seguir siendo explotadas, pues es bien sabido que tarde o temprano se terminarán y las estadísticas no son muy prometedoras para las próximas décadas, pues existen datos que pronostican el fin de la era del petróleo para un tiempo cercano al año 2038,[3],[10],[11]. Por otro parte, los problemas de contaminación y cambio climático cada vez agudizan más, siendo el sector de transporte el mayor consumidor de energías fósiles y el que más contribuye a la contaminación de la atmósfera y como consecuencia al cambio climático, por lo que en la actualidad una gran cantidad de naciones de todo el mundo tienen el firme compromiso de disminuir sus emisiones contaminantes a la atmósfera,[4]. Estos hechos han provocado un mayor interés en la investigación y desarrollo de fuentes de energía más amigables con el medio ambiente y la utilización de vehículos igualmente más amigables ambientalmente hablando.

En el rubro ecológico, las enormes cifras de gases tóxicos despedidos a la atmósfera por el funcionamiento de millones de vehículos de combustión interna, han provocado un alarmante incremento del llamado efecto invernadero debido principalmente a la alta concentración de Dióxido de Carbono y como consecuencia el aumento de la temperatura del planeta, provocando el descongelamiento de los polos a razones jamás antes vistas en la era humana y la inevitable afectación de ecosistemas producto del cambio climático, siendo imperante la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera,[4],[5].

Los seres humanos consumimos mucho más aire que cualquier otro alimento durante nuestras vidas. Un adulto sano toma siete mil veces más aire que agua cada día de vida. En el ámbito de salud y calidad del aire, los diferentes gases expedidos por los vehículos de combustión interna como el monóxido de carbono (CO), el bióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC), bióxido de azufre (SO_2), polvo y sólo por mencionar los principales, contribuyen de manera muy importante al incremento de morbilidad (proporción de personas que enferman en un lugar durante un periodo de tiempo determinado en relación con la población total de ese lugar) y al incremento de la mortalidad (número proporcional de defunciones en población o tiempo determinados),[5].

Además de los gases de efecto invernadero, los VCI para su funcionamiento requieren de diversos fluidos y materiales que al fin de su vida útil se convierten en residuos peligrosos para el medio ambiente y requieren de un manejo especial para evitar la contaminación de suelos y mantos acuíferos, pero tristemente en nuestro país y en muchas otras partes del mundo, el manejo de tales contaminantes no se lleva a cabo de forma adecuada [5],[6], sin contar las innumerables posibilidades de que pequeños negocios de mantenimiento automotriz lleguen a verter tales líquidos en el drenaje pensando que no existe efecto alguno, lo cual sigue ocurriendo en nuestros días.

Por todo lo anterior, es evidente que los vehículos eléctricos hoy en día juegan un papel fundamental en la reducción de emisiones contaminantes y entre más pronto se adopten formas más amigables de transporte, menos afectaciones se causarán al medio ambiente.

Sin embargo, se debe tener presente que la electricidad es una energía cuya obtención puede ser también contaminante, como por ejemplo en el caso de las centrales termoeléctricas, pero a pesar de ello, esta contaminación está más localizada, y por lo tanto se puede controlar más fácilmente.

Debido a que la comparación de los vehículos eléctricos se hace contra su inmediato competidor, el vehículo de combustión interna, para que ésta sea válida, se debe realizar comparando el ciclo completo de emisiones, es decir desde la producción de la energía necesaria, hasta la utilización directa por el automóvil. Así por ejemplo, mientras el automóvil eléctrico no genera contaminación alguna durante el consumo de la energía, sí que la produce durante la generación de la energía necesaria para recargar las baterías del mismo.

La tabla 1.1 muestra el nivel de emisiones contaminantes de los principales tipos de vehículos con propulsión a gasolina, diesel y eléctrica expresados en mg/km , en la que claramente se puede apreciar de forma general que las emisiones por el uso de los vehículos eléctricos son considerablemente menores con la excepción del (SO_2) cuya principal fuente de producción es durante la quema de carbón o aceite en centrales térmicas y durante la producción de ácido sulfúrico que utilizan las baterías de plomo-ácido, pero como ya se mencionó anteriormente, estos agentes contaminantes están más localizados y por lo tanto se pueden controlar más fácilmente que al ser arrojados a la atmosfera por el escape de los vehículos de combustión interna.

Tabla 1.1: Comparación de niveles contaminantes expresado en mg/km según el tipo de vehículo,[1].

	Gasolina	Diesel	Eléctrico
Polvo	15	135	26
SO_2	100	220	630
NO_x	880	840	276
HC	310	300	16
CO	2150	2140	27
CO_2	234	214	126

Con el Objeto de que estos resultados sean comparables es necesario establecer un ciclo de conducción estándar, en este caso se utiliza un ciclo urbano para conducción europea realizado en Bélgica denominado ECE-15. Los consumos de cada tipo de vehículo comparado eran los siguientes:

Motorización diesel: 6.51 lt a los 100 km
 Motorización gasolina: 8.51 lt a los 100 km
 Motorización eléctrica: 28 kWh a los 100 km

Para este estudio se consideró el ciclo completo de emisión, que incluye el consumo directo de la energía primaria, la producción de la electricidad, el transporte del combustible y su distribución. Los resultados de las emisiones contaminantes expresados en kg por cada 100 km fueron los que se muestran en la tabla 1.2 que aparece a continuación:

Tabla 1.2: Emisiones contaminantes en *kg.* por cada 100km

	Gasolina	Diesel	Eléctrico
Polvo	—	0.019	0.0043
SO_2	0.005	0.027	0.04
$NO_x + HC$	0.098	0.098	0.026
CO	0.27	0.27	0.0025
CO_2	0.0258	0.0198	0.0010

Tal como se puede apreciar en la tabla 1.2, los óxidos nitrosos producidos por el uso de los vehículos eléctricos constituyen menos de la tercera parte de los producidos por los de vehículos de combustión interna. El monóxido de carbono (causante de una multitud de efectos en la salud debido a la inhibición de la oxidación celular, produciendo envenenamiento celular, cuyos síntomas clínicos de un envenenamiento leve pueden imitar a los de una enfermedad viral no específica, con vómitos, dolor de cabeza, malestar, debilidad, fatiga y falta de respiración o en casos de exposición prolongada pueden causar la muerte), disminuye drásticamente con el uso de los vehículos eléctricos. En la tabla anterior también se puede apreciar que el bióxido de carbono emitido por el uso de un vehículo eléctrico es aproximadamente el 20 % de lo que emiten los vehículos de combustión interna, siendo mucho menor el impacto ambiental en materia de calidad del aire y principalmente en el tema del calentamiento global.

Otra fuente de contaminación ambiental es la acústica, la cual en grandes ciudades donde se usan primordialmente los vehículos de combustión, alcanza valores de hasta 70 dB. Este factor desaparece prácticamente mediante la utilización de automóviles eléctricos, los cuales son extremadamente silenciosos. A manera de ejemplo, el Nissan LEAF con 21 dB hace menos ruido que un beb llorando (95 db), una aspiradora (80 db) o un ventilador de techo (26 db),[1], [34]. Existen diferentes puntos de vista en cuanto a la cantidad de ruido que debe emitir un vehículo al circular. Por un lado, existe la tendencia de hacerlos lo más silenciosos posibles y empresas como Goodyear, están desarrollando llantas especiales para disminuir el nivel de ruido producido por éstas al rodar, logrado reducir el

nivel de ruido alrededor de 15 dB, [35].

Por otra parte existe la tendencia de aquellos que piensan que es necesario colocar emisores de ruido en los vehículos eléctricos debido a su bajo nivel de ruido que emiten al circular y por ende, los peatones distraídos tienen mayor probabilidad de ser atropellados, [36].

1.4. Objetivos

El objetivo de esta tesis es realizar el modelado y la simulación del sistema de potencia de un vehículo eléctrico e integrar sus diferentes componentes con la ayuda del programa Matlab/Simulink para reproducir su comportamiento utilizando cuatro diferentes tipos de baterías como la fuente de alimentación de energía eléctrica. Los tipos de baterías utilizadas son: plomo-ácido, níquel-cadmio, hidruro metálico de níquel y de iones de litio.

1.5. Descripción de Capítulos

En el primer capítulo se realiza una introducción al tema de los vehículos eléctricos y su evolución al paso del tiempo. Además se proporciona la justificación del presente trabajo, así como el objetivo del mismo.

En el capítulo dos, se aborda el modelado de la dinámica del vehículo en donde se consideran las fuerzas que actúan en éste y que son necesarias vencer para poder proporcionar el movimiento lineal del vehículo.

El capítulo tres habla de los bancos de baterías y sus diferentes tipos a considerar en el presente trabajo, así como las diferentes características de cada tipo. En este mismo capítulo se proporciona un resumen de diferentes modelos empleados para representar la dinámica de la batería y se propone una modificación a uno existente para predecir la cantidad de carga remanente al usar un vehículo.

En el capítulo cuatro se proporciona el modelo del tren de potencia del vehículo eléctrico, considerando la dinámica del mismo, así como los demás elementos que lo conforman, como el motor de inducción, inversor y controlador.

En el capítulo cinco se realiza la simulación del vehículo eléctrico en Simulink empleando los bloques de diferentes librerías, especialmente los de la librería denominada SimPowerSystems. Además se proporcionan de manera gráfica los resultados de las simulaciones y se compara el desempeño de los diferentes tipos de baterías simuladas.

El capítulo seis habla de las conclusiones y los posibles trabajos futuros que se desprenden de éste.

Fundamentos de la Dinámica del Vehículo

2.1. Introducción

En todo vehículo, datos de suma importancia son su desempeño y autonomía. Predecir dicho comportamiento puede ser razonablemente fácil haciendo uso del poder de las computadoras, pues permiten de manera sencilla experimentar modificando diferentes aspectos del vehículo, como la potencia del motor, tipo de batería y capacidad, peso y otros factores que pueden ser clave en el diseño y observar así como afectan tales modificaciones al desempeño del vehículo. En este capítulo se muestran las ecuaciones que modelan el comportamiento de la dinámica del vehículo, tomadas del libro de texto [2], para posteriormente conjuntarlas con otros elementos que serán descritos en capítulos más adelante y mostrar de manera gráfica el desempeño del automóvil.

El primer aspecto que se modela en este capítulo es el desempeño del vehículo, evaluando su aceleración y velocidad máxima en función de las fuerzas que deberá vencer para provocar su movimiento. Es necesario que todo vehículo eléctrico tenga un desempeño que le permita mezclarse de forma segura con el tráfico urbano ordinario, para lo cual, se abordarán por separado cada una de las fuerzas que intervienen en su dinámica.

2.2. Fuerza de tracción

El primer paso en el modelado del desempeño del vehículo eléctrico es obtener una ecuación para la fuerza de tracción, la cual, propulsa el vehículo hacia adelante transmitida al suelo a través de las ruedas motrices.

Consirando un vehículo de masa m , moviéndose a una velocidad v , subiendo una pendiente de un ángulo ψ , como se puede apreciar en la figura 2.1, la fuerza que provoca el movimiento del vehículo hacia adelante y que origina el esfuerzo de tracción, tiene que conseguir lo siguiente:

1. *Vencer la resistencia al rodamiento.*
2. *Vencer la resistencia aerodinámica.*

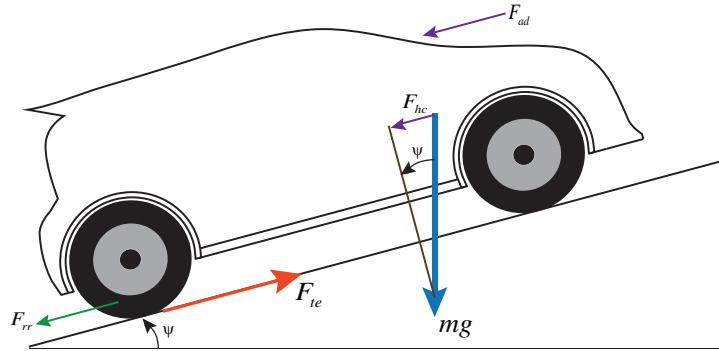


Figura 2.1: Fuerzas que actúan en un vehículo moviéndose a lo largo de una pendiente

3. Proveer la fuerza necesaria para vencer la componente del peso del vehículo que actúa pendiente abajo.
4. Acelerar el vehículo si no se requiere velocidad constante.

Por tales motivos, se considerarán cada uno de los puntos anteriores por separado.

2.2.1. Fuerza de resistencia al rodamiento

La Fuerza de resistencia al rodamiento se debe principalmente a la fricción de la llanta sobre el piso. La fricción en los rodamientos y en los elementos de la transmisión también contribuyen en parte, pero su valor es mucho menor que la de rodamiento, por lo que se considerará solamente este último. La fuerza de resistencia al rodamiento es aproximadamente constante y es proporcional al peso total del vehículo. La ecuación que la describe es:

$$F_{rr} = \mu_{rr}mg \quad (2.1)$$

donde μ_{rr} es el coeficiente de resistencia al rodamiento. Los principales factores que propician el valor de μ_{rr} son el tipo de llanta y la presión de ésta. Entre mayor sea la presión en las llantas, las ruedas girarán de forma más ligera, pero deberán estar a la presión correcta según el tipo de llanta empleada y según las especificaciones del fabricante. Los valores adimensionales típicos de μ_{rr} son 0.015 para llantas de conformación radial y hasta 0.005 para llantas especialmente diseñadas para vehículos eléctricos, [1].

2.2.2. Fuerza de arrastre aerodinámico

La fuerza de arrastre aerodinámico se debe a la fricción ejercida por la carrocería del vehículo moviéndose a través del aire. Es función del área frontal, la forma de la carrocería, partes salientes como los espejos retrovisores, ductos y pasajes de aire, alerones y demás elementos en los que incida el aire. La fórmula para este tipo de fuerza es:

$$F_{ad} = \frac{1}{2}\rho AC_d v^2 \quad (2.2)$$

donde ρ es la densidad del aire, A es el área frontal y v es la velocidad del vehículo. C_d es una constante llamada coeficiente de arrastre, el cual reduce su valor mientras la aerodinámica del vehículo sea mejor, es decir, entre menos resistencia oponga ésta al avance a través del aire. El valor típico del coeficiente de arrastre para un vehículo de uso diario es de 0.3 y hasta 0.19 para los más aerodinámicos. La densidad del aire varía por supuesto con la temperatura, altitud y humedad. Sin embargo, un valor promedio de 1.25 kg/m^3 es aceptable bajo condiciones normales. Siempre que las unidades del sistema internacional sean m^2 para denotar el área y m/s para la velocidad, entonces las unidades del valor de F_{ad} serán los newtons, [2].

2.2.3. Fuerza subiendo una pendiente

La fuerza necesaria para conducir el vehículo subiendo por un camino con determinada inclinación, F_{hc} por sus siglas en inglés, es la más sencilla de encontrar. Es simplemente la componente del peso del vehículo que actúa a lo largo de la pendiente. Por simple resolución de equilibrio de fuerzas, se puede observar en la figura 2.1 que:

$$F_{hc} = mg \sin \psi \quad (2.3)$$

2.2.4. Fuerza de aceleración

Cuando la velocidad del vehículo está cambiando, es claramente necesario aplicar una fuerza adicional a las mostradas en la figura 2.1. Esta fuerza F_{la} provocará la aceleración lineal del vehículo y está representada por la bien conocida ecuación derivada de la segunda ley de Newton,

$$F_{la} = ma \quad (2.4)$$

Sin embargo, para obtener una imagen más precisa de la fuerza necesaria para acelerar el vehículo, es necesario considerar la fuerza empleada para provocar que las partes giratorias giren más rápido. En otras palabras, es necesario considerar tanto la aceleración rotacional como la aceleración lineal. El componente principal de interés en este caso es el motor eléctrico, no necesariamente por su particular momento de inercia alto, sino más bien por sus altas velocidades angulares. Haciendo referencia a la figura 2.2, claramente se puede observar que el $Par = F_{te}r$, donde r es el radio de la llanta y F_{te} es la Fuerza de tracción entregada por el tren motriz compuesto por el motor eléctrico y el acoplamiento con el eje propulsado. G es la relación de transmisión del sistema entre el motor eléctrico y el eje propulsado y T denota el par del motor eléctrico. De tal forma que con lo

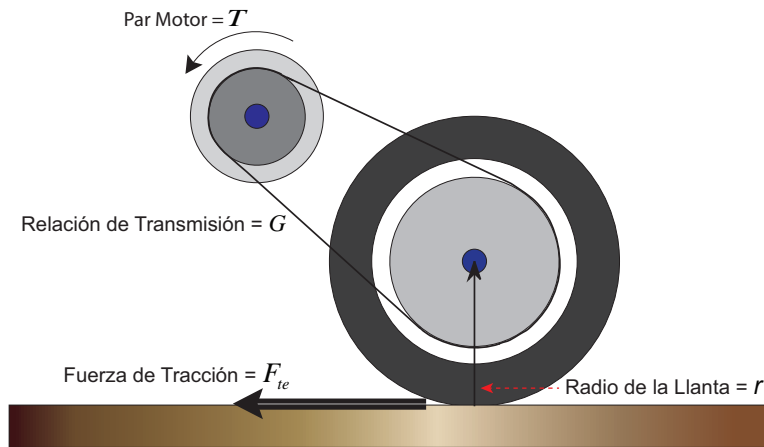


Figura 2.2: Transmisión del par motor a una rueda del vehículo a través de un arreglo sencillo

anterior, se puede establecer lo siguiente:

$$T = \frac{F_{te}r}{G}$$

$$y$$

$$F_{te} = \frac{G}{r}T \quad (2.5)$$

También debe notarse que:

$$\text{Velocidad angular del eje} = \frac{v}{r} \text{ rad/s}$$

Entonces la velocidad angular del motor es:

$$\omega = G \frac{v}{r} \text{ rad/s} \quad (2.6)$$

De forma similar, la aceleración angular del motor es:

$$\dot{\omega} = G \frac{a}{r} \text{ rad/s}^2$$

El par requerido para esta aceleración angular es:

$$T = IG \frac{a}{r}$$

donde I es el momento de inercia del rotor del motor. La fuerza en las ruedas necesaria para producir la aceleración angular ($F_{\omega a}$) se puede encontrar combinando esta ecuación con (2.5), dando como resultado:

$$F_{\omega a} = \frac{G}{r} IG \frac{a}{r}$$

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{r^2} a \quad (2.7)$$

Hasta el momento, se ha considerado que en el sistema de transmisión de potencia mecánica no existen pérdidas y por lo tanto tiene una eficiencia del 100 %. Debido a que el sistema de transmisión empleado tiene muy pocos elementos, la eficiencia de transmisión de potencia será muy alta, sin embargo, nunca será del 100 %. Por lo anterior es necesario refinar (2.7), incorporando la eficiencia del sistema de transmisión η_g . Entonces el valor de la fuerza requerida será ligeramente más grande. Así, (2.7) se convierte en:

$$F_{\omega a} = I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a \quad (2.8)$$

Valores típicos para estas constantes son 40 para $\frac{G}{r}$ y 0.025 kg.m^2 para el momento de inercia. Estos valores surgen al suponer el uso de un motor eléctrico de 30 kW , instalado en un vehículo que en conjunto pesa cerca de 800 kg y que alcanza una velocidad de 60 km/h con una velocidad angular del motor de 7000 rpm . Entonces el término $\frac{IG^2}{r^2}$ en (2.8) tendrá un valor de 40 kg en este caso. En otras palabras la fuerza de aceleración producida por (2.8) será mucho más pequeña que la fuerza de aceleración lineal dada por (2.4). En este caso específico, será más pequeña por la relación:

$$\frac{40}{800} = 0.05 = 5 \%$$

A menudo, el valor del momento de inercia del rotor del motor se desconoce. Para tal caso, una razonable aproximación es simplemente incrementar el valor de la masa del vehículo en un 5 % en (2.4), y omitir el uso de la fuerza de aceleración angular $F_{\omega a}$. [2].

2.2.5. Fuerza total de tracción

La Fuerza total de tracción es la suma de todas las fuerzas anteriores:

$$F_{te} = F_{rr} + F_{ad} + F_{hc} + F_{la} + F_{\omega a} \quad (2.9)$$

donde:

- F_{rr} es la fuerza de resistencia al rodamiento, dada por (2.1);
- F_{ad} es la fuerza de arrastre aerodinámico, dada por (2.2);
- F_{hc} es la fuerza requerida por el vehículo para subir una pendiente, dada por (2.3);
- F_{la} es la fuerza requerida para dar al vehículo aceleración lineal, dada por (2.4);
- $F_{\omega a}$ es la fuerza requerida para dar aceleración angular al rotor en movimiento, dada por (2.8).

Es necesario tomar en cuenta que F_{la} y $F_{\omega a}$ tendrán signo negativo siempre que el vehículo pierda velocidad y que F_{hc} también tendrá signo negativo cuando el vehículo sea conducido colina abajo.

2.3. Modelo de la aceleración del vehículo

2.3.1. Parámetros a considerar en el desempeño de la aceleración

La aceleración de un vehículo motorizado es un claro indicador de su desempeño, aunque no existe un estándar para medirlo. Para ello, normalmente se mide el tiempo que le toma desarrollar los 100 km/h , 50 km/h ó 30 km/h habiendo partido del reposo. Tales valores pueden encontrarse a través de simulación o medición en vehículos reales. Para el caso de los vehículos de combustión interna, esta medición se realiza a la máxima potencia o dicho de otra forma, con el acelerador totalmente abierto (WOT, por sus siglas en inglés). De manera similar, en el caso de los vehículos eléctricos, la medición de la aceleración se realiza a par máximo. Como se muestra en el capítulo 4, el par máximo es función de la velocidad angular. En la mayoría de los casos, a bajas velocidades, el par máximo es constante hasta el punto en el que la velocidad angular del rotor alcanza su valor crítico ω_c , después del cual el valor del par disminuye. La velocidad angular del motor está vinculada con la relación de transmisión G y del radio r de las ruedas de tracción, como se puede observar en (2.6). Por lo anterior es posible establecer lo siguiente:

$$\text{Para } \omega < \omega_c, \text{ o } v < \frac{r}{G}\omega_c \text{ entonces } T_L = T_{max}$$

Donde T_L es el par mecánico de carga. Una vez que esta fase de par de torsión constante pasa, o sea $\omega \geq \omega_c$, o $v \geq r\omega_c/G$, entonces la potencia se mantiene constante y se tiene:

$$T_L = \frac{T_{max}\omega_c}{\omega} = \frac{rT_{max}\omega_c}{Gv} \quad (2.10)$$

para el caso de motores de CD, de acuerdo con [2], el par decrece de acuerdo a la ecuación lineal:

$$T_L = T_0 - k\omega$$

la cual, al sustituirla por la velocidad angular en (2.6), da como resultado:

$$T_L = T_0 - \frac{kG}{r}v \quad (2.11)$$

Con las ecuaciones planteadas hasta el momento, al realizar combinaciones entre ellas se puede encontrar la aceleración del vehículo. Considerando el caso, donde se tiene un vehículo sobre una superficie plana y que la densidad del aire es de 1.25 kg.m^3 , (2.9) se convierte en:

$$F_{te} = \mu_{rr}mg + \rho AC_d v^2 + ma + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} a$$

y sustituyendo (2.5) en la ecuación anterior para F_{te} y para $a = \frac{dv}{dt}$ y despejando T_L se tiene:

$$T_L = \mu_{rr}mg \frac{r}{G} + \frac{\rho}{2}AC_d\omega^2 \frac{r^3}{G^3} + \left(m \frac{r}{G} + I \frac{G}{\eta_g r} \right) \dot{\omega} \frac{r}{G} \quad (2.12)$$

y considerando que la ecuación de oscilación del motor de inducción (ver (4.21)) es :

$$J\dot{\omega} = T_e - T_L$$

donde T_e es el par electromagnético del motor de inducción y T_L es el par de carga. Por lo tanto al sustituir (2.12) en la ecuación de oscilación, se tiene:

$$\dot{\omega} = \frac{T_e - (\mu_{rr}mg \frac{r}{G} + \frac{\rho}{2}AC_d\omega^2 \frac{r^3}{G^3})}{J + (m \frac{r^2}{G^2} + \frac{J}{\eta_g})} \quad (2.13)$$

Como se puede observar, el par del motor T_L , en cualquiera de (2.10) y (2.11), está en función de la velocidad, por lo que (2.13) puede reducirse a una ecuación diferencial de primer orden, para la velocidad v . Así el valor de v puede ser encontrado para cualquier valor de t .

Por ejemplo, en la fase inicial de aceleración, cuando $T_L = T_{max}$, (2.12) se convierte en:

$$\frac{G}{r}T_{max} = \mu_{rr}mg + 0.625AC_d v^2 + \left(m + I \frac{G^2}{\eta_g r^2} \right) \frac{dv}{dt} \quad (2.14)$$

Considerando que se conocen todas las constantes o que pueden ser satisfactoriamente estimadas, la ecuación anterior es una ecuación diferencial no lineal de primer orden, cuya solución puede obtenerse de forma numérica utilizando algún método de integración como el Runge-Kutta o la Regla Trapezoidal, los cuales se encuentran incluidos en Matlab/Simulink, que será el ambiente en el que se llevarán a cabo las simulaciones del presente trabajo.

En la siguiente sección se utilizarán las ecuaciones anteriores en el modelado de la aceleración de un vehículo, tomando en este caso, todos los parámetros del EV1 de General Motors.

2.3.2. Modelado de la aceleración de un vehículo eléctrico tipo sedan

Para realizar el modelo de aceleración de un vehículo, primeramente se debe considerar el tipo de vehículo, sus dimensiones y prestaciones deseadas, para lo cual y en este caso, serán considerados los valores correspondientes al vehículo eléctrico EV1 de General Motors, según datos obtenidos de la página oficial del fabricante de este vehículo en [12],[13],[15].

Sus principales características son:

- Coeficiente de arrastre $C_d = 0.19$;
- Coeficiente de resistencia al rodamiento $\mu_{rr} = 0.0048$;

- Motor de inducción de alta velocidad, operando cerca de las 7000 rpm como velocidad máxima;
- Masa del vehículo=1400 kg, de los cuales 594 kg son de las baterías de plomo-ácido. Si se agrega el peso del conductor y pasajero cada uno pesando 70 kg, se tiene un total de $m = 1540$ kg;
- El momento de inercia del motor no se conoce, sin embargo, comparado con la masa total del vehículo es muy pequeño; las ruedas también son muy ligeras y se puede aproximar este término incrementando modestamente el valor total de la masa del vehículo a 1560 kg en el término final de (2.12);
- La relación de transmisión es 11 : 1, por lo tanto $G = 11$; el radio de la llanta es $r = 0.30$ m;
- Para el motor, $T_{max} = 140$ Nm y $\omega_c = 733$ rad/s; nótese que esto significa que $T = T_{max}$ mientras $v = 19.8$ m/s = 71.3 km/h;
- Mas allá de los 19.8 m/s, el motor opera a 102 kW constantes y como este es una prueba a WOT o par máximo, entonces:

$$T = \frac{102000}{37 \times v} = \frac{2756}{v}$$

- Área frontal $A = 1.8$ m²;
- La eficiencia del acoplamiento entre el motor y la transmisión se estima en un 95 %, por lo que $\eta_g = 0.95$;

Los valores anteriores al sustituirlos en (2.12), dados para la primer fase de aceleración en la que el par del motor es constante, se obtiene lo siguiente:

$$0.95 \times 37 \times 140 = 72.4 + 0.21v^2 + 1560 \frac{dv}{dt}$$

entonces

$$\frac{dv}{dt} = 3.11 - 0.000137v^2 \quad (2.15)$$

Una vez que la velocidad ha alcanzado el valor de 19.8 m/s, la velocidad se obtendrá a través de la ecuación diferencial:

$$0.95 \times 37 \times \frac{2756}{v} = 72.4 + 0.21v^2 + 1560 \frac{dv}{dt}$$

así

$$\frac{dv}{dt} = \frac{62.1}{v} - 0.046 - 0.000137v^2 \quad (2.16)$$

Cuando el vehículo alcanza la velocidad de 35.8 m/s, es decir 128.88 km/h, ésta deja de crecer, debido a que en este punto, el controlador del motor limita la aceleración y no permite que aumente el valor de la velocidad.

En este punto, las ecuaciones anteriores fueron incluídas en un programa realizado en Matlab. Al obtener de forma gráfica el comportamiento de éstas, en

la figura 2.3 se puede observar el tiempo que tarda un vehículo eléctrico con los parámetros arriba descritos en alcanzar los 96.56 km/h , lo cual es equivalente a 60 mph , siendo ésta una muy buena aproximación, pues en los datos oficiales del fabricante [15], se reporta un valor de 8.04 segundos, representando la diferencia un error del 0.03 %.

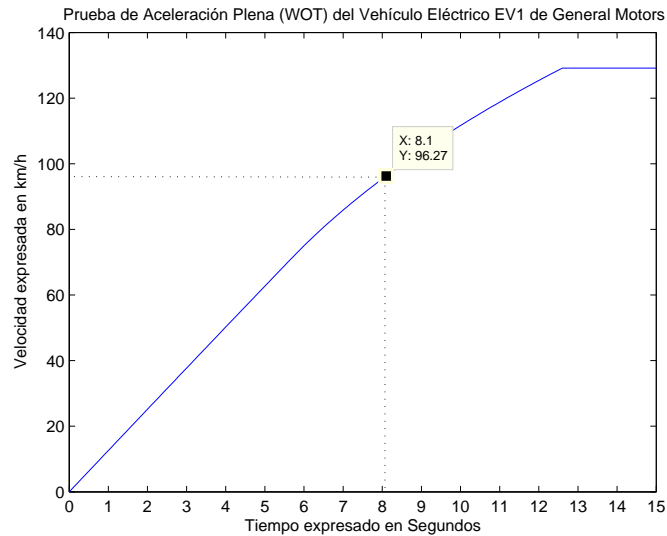


Figura 2.3: Prueba de aceleración para el vehículo eléctrico EV1 de GM realizada a par máximo.

Por lo observado en la gráfica, se puede concluir que este método de modelado del comportamiento del vehículo produce resultados que se pueden validar con los datos reales, traduciéndose en una simulación confiable. Sin embargo, los vehículos requieren tener más que solamente un buen desempeño en la aceleración partiendo del reposo hasta alcanzar las 60 mph , por lo que en el siguiente capítulo se abordará uno de los aspectos más importantes del modelado del comportamiento de los vehículos eléctricos, los bancos de baterías y el tren de potencia de éstos, para evaluar sus prestaciones según las características de los elementos que lo conforman, [2], [16].

Baterías

3.1. Introducción

En el campo del diseño de vehículos eléctricos, las baterías constituyen la parte fundamental, debido a que son el único elemento de almacenamiento de energía, además de ser el elemento de mayor costo, peso y volumen. Por lo tanto, la comprensión de la tecnología y el desempeño de las baterías es fundamental para todo aquel interesado en los vehículos eléctricos.

Hoy en día, las baterías están fabricadas bajo diferentes procesos determinados por la tecnología utilizada en éstas, pero sobre todo por los materiales que las componen. Dentro de los tipos de baterías más comúnmente utilizados en los vehículos eléctricos, destacan las baterías de plomo-ácido, las baterías de hidruro metálico de níquel, las baterías de níquel-cadmio y las baterías de iones de litio, las cuales se detallarán dentro de este capítulo.

Pero, ¿Qué es una batería eléctrica?. Una batería consiste en una o más celdas eléctricas entrelazadas. Las celdas convierten la energía química en energía eléctrica. Las celdas están constituidas por un electrodo positivo y uno negativo sumergidos en un electrolito y es la reacción química entre los electrodos y el electrolito que genera electricidad en forma de corriente directa. En el caso de las baterías recargables, la reacción química puede revertirse, invirtiendo el flujo de la corriente y la batería se cargará.

El principio de funcionamiento de las baterías fué descubierto por Luigi Galvani en 1780. A partir de una rana y dos metales diferentes, descubrió que circulaba corriente por la rana, que cumplía la función de electrolito. En 1800 Alessandro Volta desarrolló la idea de Galvani, colocando las baterías en serie para obtener una mayor tensión y obteniendo baterías tal y como se conocen en la actualidad. A partir de 1836, con la batería Daniell se empezó a utilizar las baterías en la industria y como fuente de energía para el telégrafo.

La batería de plomo-ácido es del tipo recargable más conocida, pero existen un gran número de materiales y electrolitos que se pueden combinar para formar una batería. Sin embargo, sólo un número relativamente pequeño de combinaciones se han desarrollado como baterías eléctricas recargables comerciales adecuados para su uso en vehículos. En la actualidad éstos incluyen plomo, hierro-níquel, níquel-cadmio, hidruro metálico de níquel, polímero de litio, hierro-litio, sulfuro de sodio

y cloruro de sodio metálico. A pesar de las diferentes combinaciones de materiales citados y cerca de 150 años de desarrollo, no se ha elaborado aún una batería que permita el uso generalizado de vehículos eléctricos. Sin embargo, recientemente se han producido importantes avances en la tecnología de baterías que mantienen una gran esperanza para el futuro. Además, siempre que su desempeño se entienda y se modele correctamente, es perfectamente posible diseñar vehículos eléctricos muy útiles usando las baterías actuales como el único almacén de energía,[2].

Desde el punto de vista del diseñador del vehículo eléctrico, la batería puede ser tratada como una caja negra, que tiene una serie de parámetros de rendimiento. Estos parámetros comprenden la energía específica, la densidad de energía, potencia específica, voltajes típicos, eficiencia en Amperios-hora, la eficiencia energética, disponibilidad comercial, el costo, las temperaturas de funcionamiento, las tasas de auto-descarga, el número de ciclos de vida y las tasas de recarga, términos que se explican en la siguiente sección. El diseñador también tiene que entender cómo la disponibilidad de la energía varía con respecto a la temperatura ambiente, tasa de carga y descarga, la geometría de la batería, temperatura óptima, métodos de carga, las necesidades de refrigeración y las posibles tendencias futuras. Sin embargo, al menos un conocimiento básico de la química de la batería es muy importante, de lo contrario los requisitos de funcionamiento y mantenimiento de los diferentes tipos y la mayoría de los aspectos relacionados con uso de la batería, tales como su periodo de vida útil, auto-descarga, la reducción de la eficiencia a mayores corrientes, entre otros aspectos, no puede ser entendido. Este conocimiento básico también es necesario en lo que respecta a los posibles peligros de un accidente y el impacto global del uso de sustancias químicas de la batería en el medio ambiente.

3.2. Parámetros de la batería

3.2.1. Voltajes de celda y voltajes de batería

Todas las celdas eléctricas tienen tensiones nominales y pueden ser conectadas en serie para dar el voltaje total requerido. Las baterías de tracción para vehículos eléctricos usualmente manejan voltajes de 6V ó 12V y estas unidades son a su vez conectadas en serie para producir la tensión necesaria. Este voltaje, cuando se pone en funcionamiento la batería, cambiará. Cuando una corriente eléctrica salga de ésta, la tensión disminuirá, y cuando la corriente entre a la batería, es decir se esté cargando, el voltaje aumentará. Lo anterior se puede expresar mejor en términos de la resistencia interna, cuyo circuito equivalente de la batería se muestra en la figura 3.1. La batería está representada por un voltaje E fijo, pero la tensión en las terminales es una tensión V diferente, debido al voltaje a través de la resistencia interna R de la batería. Suponiendo que una corriente I fluye hacia afuera de la batería, como en la figura 3.1, entonces por teoría básica de circuitos se puede establecer que:

$$V = E - IR \quad (3.1)$$

Nótese que si la corriente I es cero, la tensión en terminales es igual a E , lo cual a menudo se conoce como voltaje de circuito abierto. Si la batería está siendo cargada, entonces claramente la tensión incrementará por IR . En las baterías de vehículos eléctricos la resistencia interna debe ser claramente tan bajo como sea

posible. Generalmente, (3.1) proporciona una buena predicción del voltaje de la

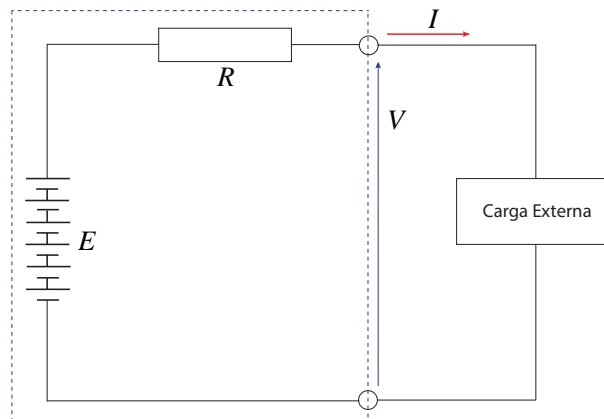


Figura 3.1: Circuito equivalente simplificado de una batería compuesta por seis celdas.

batería en uso. Sin embargo, la tensión de circuito abierto E no permanece constante. La tensión también es afectada por el estado de carga (SOC por sus siglas en inglés), además de otros factores como la temperatura.

3.2.2. Capacidad de carga en Ah

La carga eléctrica que una batería puede suministrar es claramente el parámetro más importante de ésta. La unidad en el Sistema Internacional (SI) para denotar la capacidad de una batería es el Coulomb, que es la carga cuando un Amper fluye durante un segundo. Sin embargo esta unidad es inconvenientemente pequeña, por lo cual se utiliza en su lugar la unidad del Amper-hora (Ah), que es el flujo de un Amper durante una hora. La capacidad de la batería podría ser, por ejemplo, 10 Ah, lo cual significa que la batería puede suministrar 1 Amper durante 10 horas ó 2 Ampers durante 5 horas, o en teoría 10 Ampers durante 1 hora. Sin embargo, en la práctica, no funciona así para la mayoría de las baterías, es decir, en el caso de que una batería pueda proporcionar 1 Amper durante 10 horas, si se le demandan 10 Ampers de forma continua, la carga durará menos de una hora. La figura 3.2 muestra una gráfica de operación característica de una batería de plomo-ácido y se puede apreciar como la capacidad se ve afectada si la carga se remueve más rápido o más lento. Este cambio en la capacidad se produce debido a reacciones secundarias no deseadas dentro de las celdas. Este efecto es más notable en las baterías de plomo-ácido, pero se produce en todos los tipos de éstas. Es muy importante predecir con precisión los efectos de este fenómeno, lo cual será tratado más adelante en este mismo capítulo en el momento del modelado. La capacidad de una batería en Ampers-hora se representa por la letra C . Sin embargo, también se utiliza para representar una corriente, por ejemplo, si una batería tiene una capacidad de 42 Ampers-hora, entonces se dice que $C = 42$ Ampers-hora. Cuando se habla de una 'corriente de descarga de $2C$ ', o que 'la carga de la batería es a $0.4C$ ', en estos casos, esto significa una corriente de descarga de 84 Ampers y una corriente de carga de 16.8 Ampers. Esta manera de expresar la corriente de descarga de la batería es muy útil, ya que relaciona la corriente con el tamaño de la batería.

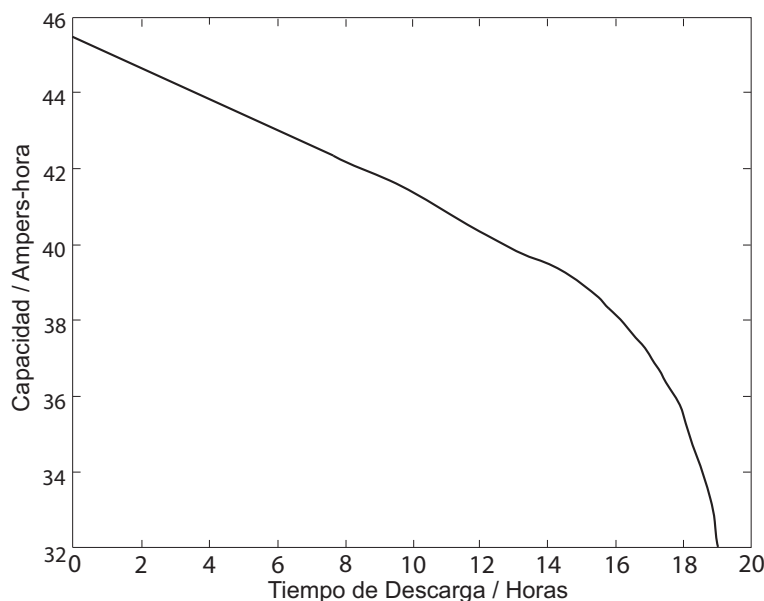


Figura 3.2: Gráfica que muestra a manera de ejemplo el cambio en la capacidad de carga en Amperes-hora de una batería de plomo-ácido de 42 Ah fabricada por Hawker Energy Products Inc.

3.2.3. Energía almacenada

El propósito de la batería es almacenar energía, con la cual se puede realizar un trabajo durante un periodo de tiempo. La energía almacenada en una batería depende de su tensión, y de la carga almacenada. En el SI, la energía se representa mediante la unidad denominada Joule, pero es una unidad inconvenientemente pequeña, por lo que en su lugar se utiliza el Watt-hora, que es el equivalente de realizar un trabajo con un ímpetu o a una potencia de 1 Watt durante 1 hora. Un Watt-hora (Wh) es equivalente a 3,600 Joules. El Watt-hora es compatible con el uso del Amper-hora para la carga, y se relacionan a través de la siguiente fórmula:

$$Wh = V \times Ah = V \times C \quad (3.2)$$

Para fines prácticos se debe considerar que la tensión de la batería, y más aún la capacidad C , varían considerablemente dependiendo de cómo se utiliza la batería. Ambos decrecen considerablemente entre mayor sea la corriente que se le demande a la batería y entre más rápida sea tal demanda. Por lo tanto, la energía almacenada es una cantidad bastante variable y se reduce si se libera rápidamente.

3.2.4. Energía específica

La energía específica es la cantidad de energía eléctrica almacenada por cada kilogramo de masa de la batería. Se expresa en unidades de Wh/kg . Una vez que se conoce la capacidad de energía de la batería necesaria en un vehículo (Wh), puede dividirse entre la energía específica Wh/kg para dar una primera aproximación de la masa de las baterías. La energía específica citada puede no ser más que una guía, ya que como se explicó anteriormente, la energía almacenada en una batería varía

considerablemente debido a factores tales como la temperatura y la velocidad de descarga, además de los materiales que la componen, tal como se puede apreciar en la figura 3.3.

3.2.5. Densidad de energía

La densidad de energía es la cantidad de energía eléctrica almacenada por metro cúbico de volumen de la batería. Normalmente tiene unidades de Wh/m^3 . También es un parámetro importante debido a que la capacidad de energía de la batería (Wh) puede ser dividido por la densidad de energía de la batería (Wh/m^3) para determinar el volumen del banco de baterías requerido. Alternativamente, si se conoce el volumen (m^3) destinado para alojar las baterías, se puede multiplicar por la densidad de energía de éstas (Wh/m^3) para dar una primera aproximación de la cantidad de energía eléctrica que se puede almacenar debido al volumen disponible. El volumen de la batería tiene un impacto considerable en el diseño del vehículo. Al igual que con la energía específica, la densidad de energía es una cifra nominal.

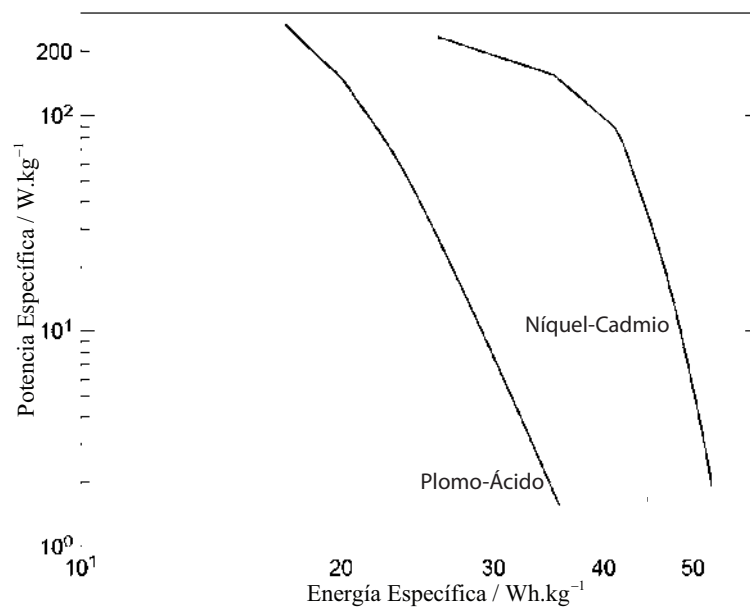


Figura 3.3: Gráfica Ragone. Curvas típicas de potencia específica contra energía específica de baterías de tracción de plomo-ácido y níquel-cadmio.

3.2.6. Potencia específica

La potencia específica es la cantidad de energía obtenida por kilogramo de la batería. Es una cantidad muy variable y bastante anómala, ya que la potencia dada por la batería depende mucho más del comportamiento de la carga conectada que de la propia batería. Aunque las baterías tienen una potencia máxima, no es aconsejable para su funcionamiento operarlas a potencia máxima o cerca de esa zona durante más de unos pocos segundos, ya que no funcionará mucho tiempo y su comportamiento será muy ineficiente debido a la naturaleza de la reacción

química en su interior y a la alza de la temperatura. Las unidades para expresar la potencia específica son W/kg . Algunas baterías tienen una muy buena energía específica, pero tienen una baja potencia específica, lo que significa que almacenan una gran cantidad de energía, pero sólo la pueden entregar lentamente. En términos de vehículos eléctricos, lo anterior quiere decir que pueden conducir el vehículo lentamente a una gran distancia. La alta potencia específica normalmente se traduce en una menor energía específica para cualquier tipo de batería. Esto se debe a que, como se mostró en la sección 3.2.2, si se le demanda la energía a una batería de forma rápida, es decir, a alta potencia, se reduce la cantidad de energía disponible. Esta diferencia en el cambio de potencia específica con la energía específica es muy importante para diferentes baterías y es de mucha ayuda poder compararlas. Esta comparación se realiza generalmente a través de unas gráficas denominadas Ragone. En este tipo de gráficas se utilizan escalas logarítmicas debido a que de esa forma se modela de forma aproximada el comportamiento de la potencia demandada a las baterías, la cual puede variar enormemente dependiendo de la aplicación a la que estén sometidas. Un ejemplo de gráfica Ragone es la figura 3.3, en la que se muestra la potencia específica contra la energía específica de una batería de tracción de plomo-ácido y una similar de níquel-cadmio. Se puede observar que, para ambas baterías, conforme aumenta la potencia específica, la energía específica se reduce. En el rango de potencia de 1 a 100 W/kg , la batería de NiCad muestra un poco menos cambio. Sin embargo, por encima de aproximadamente 100 W/kg la batería de níquel-cadmio cae mucho más rápido que la de plomo-ácido. Las gráficas Ragone se utilizan para comparar las fuentes de energía de todo tipo. Para el ejemplo anterior se puede concluir que, haciendo caso omiso de otros factores tales como el costo, la batería de níquel-cadmio se comporta mejor si se requieren densidades de potencia de menores de 100 W/kg . Sin embargo, a valores más altos, de hasta 250 W/kg o más, la batería de plomo-ácido comienza a ser más atractiva. Las gráficas Ragone también enfatizan el punto de que no es posible dar una simple respuesta a la pregunta, ¿Cuál es la potencia específica de esta batería?.

3.2.7. Eficiencia de los Ah de carga

De una manera ideal, una batería podría proporcionar la totalidad de la carga suministrada a ésta, en cuyo caso la eficiencia de carga en Amperes-hora sería del 100%. Sin embargo, ningún tipo de batería lo puede lograr, puesto que su eficiencia de carga es menor al 100%. El valor de la cantidad de carga retenida, variará dependiendo de diferentes factores como el tipo de batería, la temperatura, la velocidad de carga e incluso con el estado de carga de ésta. Por ejemplo, cuando la carga va desde un 20% a un 80% de su totalidad, la eficiencia por lo general será muy cercana al 100%, pero para el último 20% de la carga, la eficiencia disminuye en gran medida. Las razones del por qué de esto se detallarán poco más adelante en este mismo capítulo cuando se aborden más a fondo los tipos de baterías.

3.2.8. Eficiencia de la energía

La eficiencia de la energía es otro parámetro importante y se define como la relación de la energía eléctrica suministrada por una batería entre la cantidad de energía eléctrica requerida para regresarla a su estado inicial antes de comenzar el proceso de descarga. Un argumento de suma importancia para el uso de los vehículos eléctricos se basa en su eficiente uso de energía, con la consiguiente reducción del total de emisiones, por lo que es deseable una alta eficiencia en el uso de la energía. Como ya se mencionó en apartados anteriores, la eficiencia de la energía proporcionada por una batería variará en gran medida dependiendo de como se use dicha batería. Si la batería se carga y descarga rápidamente, por ejemplo, la eficiencia energética disminuye considerablemente. Este parámetro de la eficiencia de la energía proporcionada por una batería sirve para comparar baterías de forma similar como se comparan el consumo de combustible de los autos.

3.2.9. Tasa de autodescarga

La mayoría de las baterías se descargan cuando no se utilizan, lo cual se conoce como autodescarga. Esto es importante ya que significa que algunas baterías no pueden pasar largos periodos de tiempo sin recarga. Las razones de esta autodescarga se explican en las secciones que siguen. La tasa varía dependiendo del tipo de batería, y con otros factores tales como la temperatura, puesto que entre mayor sea ésta, mayor será la tasa de autodescarga.

3.2.10. Geometría de la batería

Las celdas de las baterías se fabrican en muchas formas: redondas, rectangulares, hexagonales o prismáticas. Normalmente están empaquetadas en bloques rectangulares. Sólo algunas baterías pueden ser suministradas con una geometría especificada, pero esto las hace más costosas si tal geometría se sale de las formas comerciales. Las baterías se pueden suministrar en una amplia variedad de altura, de ancho y largo. Esto puede dar al diseñador un gran campo de acción o de posibilidades a la hora de determinar el tamaño y la geometría del espacio que las alojará, que podría ser, por ejemplo, repartir las baterías en toda el área del piso, lo que garantiza al vehículo un bajo centro de gravedad y muy buenas características de manejo.

3.2.11. Temperatura de la batería y sus necesidades de calefacción y enfriamiento

Aunque la mayoría de las baterías funcionan a temperatura ambiente, algunas funcionan a temperaturas más altas y necesitan ser calentadas para iniciar su funcionamiento, y luego ser enfriadas cuando están en uso. En otras baterías, su desempeño disminuye en gran medida a bajas temperaturas, lo cual es indeseable, pero este problema se puede superar mediante el calentamiento de la batería. Al elegir una batería el diseñador tiene que estar al tanto de la temperatura de la

batería, las necesidades de calefacción y refrigeración y tiene que tomar esto en cuenta durante el proceso de diseño del vehículo.

3.2.12. Vida útil de la batería y cantidad de ciclos profundos

Debido a datos estadísticos del uso de vehículos urbanos, la mayoría de las baterías recargables sólo se someterán a un centenar de ciclos profundos de hasta un 20 % de la carga de la batería durante su vida útil. Sin embargo, el número exacto depende del tipo de batería, así como de diferentes parámetros del diseño de ésta y de cómo sea utilizada, lo cual al final se refleja en los gastos de funcionamiento de los vehículos eléctricos y directamente en la vida útil de las baterías. La información específica de todos los parámetros mencionados, se darán a continuación para cada tipo de batería citada en la introducción de este capítulo.

3.3. Baterías de plomo-ácido

3.3.1. Fundamentos de las baterías de plomo-ácido

La batería más conocida y más utilizada en aplicaciones para vehículos eléctricos es la batería de plomo-ácido, además que son ampliamente utilizadas en los vehículos de motor de combustión interna y como tales, son bien conocidas. Sin embargo para los vehículos eléctricos, se utilizan baterías de plomo-ácido más robustas que soportan un ciclado profundo y en lugar de un electrolito líquido utilizan un electrolito de gel debido a que ofrece un mejor comportamiento de la reacción química que se lleva dentro de ésta en el momento de almacenar y proporcionar la carga. Estas baterías son aproximadamente un 50 % más caras de producir que las de electrolito líquido. En las celdas de plomo-ácido de las placas negativas tienen un plomo esponjoso como su material activo, mientras que las placas positivas tienen un material activo de dióxido de plomo. Las placas se sumergen en un electrolito de ácido sulfúrico diluído. El ácido sulfúrico se combina con el plomo y el óxido de plomo para producir sulfato de plomo y agua y como consecuencia la energía eléctrica se libera durante este proceso. La reacción global es:



Las reacciones en cada electrodo de la batería se muestran en la figura 3.4. En la parte superior se muestra el proceso de descarga. La reacción produce en ambos electrodos sulfato de plomo. El electrolito gradualmente pierde ácido sulfúrico y se torna más diluído. Cuando comienza el proceso de carga, como se muestra en la parte baja de la figura 3.4, los electrodos revierten al plomo y al dióxido de plomo y el electrolito recupera su propiedad de ácido sulfúrico y la concentración se restituye. Como ya se ha mencionado, la batería de plomo-ácido es la batería recargable más comunmente utilizada. Las principales razones, son que los constituyentes principales (plomo, ácido sulfúrico, un recipiente de plástico) no son caros y funcionan de manera confiable, además que tienen una tensión por celda comparativamente alta de alrededor de 2 V por celda. Las características generales de la batería se muestran en la tabla 3.1. Una de las características más notables

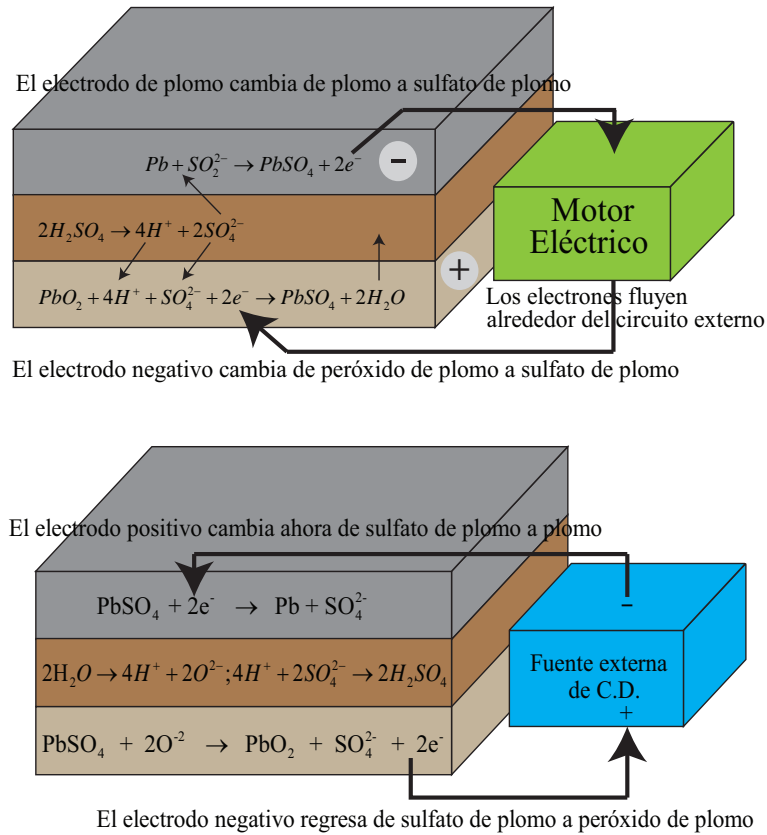


Figura 3.4: Reacciones durante la descarga y la carga de una batería de plomo-ácido.

de este tipo de baterías es su extremadamente baja resistencia interna, lo cual significa que la caída tanto en el voltaje como la corriente que es drenada son considerablemente pequeños, probablemente los valores más pequeños de todos los tipos de baterías candidatos a ser seleccionados para instalarse en un vehículo eléctrico. El valor indicado en la tabla 3.1 es para una sola celda de la batería a una capacidad nominal de 1.0 Ampers-hora. La capacidad de cada celda de una batería es proporcional al área de las placas y la resistencia interna es de forma aproximada inversamente proporcional al área de la placa. El resultado es que la resistencia interna, en una buena aproximación, es inversamente proporcional a la capacidad. El valor dado en la tabla 3.1 de 0.022Ω por celda se puede considerar nominal para las baterías de tracción de buena calidad. Una buena aproximación en el cálculo de la resistencia interna de una batería de plomo-ácido se puede realizar de la siguiente forma:

$$R = No. de celdas \times \frac{0.022}{C_{10}} Ohms \tag{3.3}$$

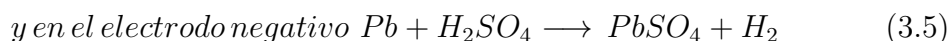
El número de celdas se obtiene del voltaje nominal de la batería dividido entre 2. C_{10} es la capacidad de Ampers-hora en un tiempo de 10 horas, [2].

Tabla 3.1: Parámetros nominales de las baterías de plomo-ácido.

Energía específica	20 – 35 Wh/kg dependiendo del uso.
Densidad de energía	54 – 95 Wh/L
Potencia específica	~ 250 W/kg antes, la <i>efic. cae grandemente</i> .
Voltaje por celda	2V
Eficiencia en Ah	~ 80 %, varía con la tasa de descarga y la temp.
Resistencia interna	~ 0.022 Ω por celda para 1Ah por celda.
Disponibilidad Comercial	Totalmente disponible en muchas marcas.
Temperatura de operación	Ambiente. Pobre desempeño en frío extremo.
Auto – descarga	~ 2 %, por día.
Cantidad de ciclos de vida	arriba de 800 al 80 % de la capacidad.
Tiempo de recarga	8 h (pero es posible recargar el 90 % en 1 h).

3.3.2. Características especiales de las baterías de plomo-ácido

Desafortunadamente las reacciones mostradas en la figura 3.4 no son las únicas que ocurren. El plomo y el dióxido de plomo no son estables en el ácido sulfúrico y se descomponen, aunque lentamente, a través de las siguientes reacciones:



Las reacciones anteriores provocan la autodescarga de la batería y la rapidez con la que puede ocurrir depende de la temperatura de las celdas, es decir, más rápido entre mayor sea la temperatura de éstas,[18]. También depende de otros factores como la pureza o calidad de los componentes y las aleaciones precisas usadas para fabricar los soportes de los electrodos. Estas reacciones no deseadas, también producen hidrógeno y oxígeno y también se producen durante el proceso de descarga y ocurren más rápido entre más corriente se les demande, debido al menor voltaje presente, el aumento de la temperatura y el aumento de la actividad química en los electrodos. Desafortunadamente las reacciones de descarga no ocurren a la misma velocidad en todas las celdas, lo cual provoca que unas celdas estén más descargadas que otras. Lo anterior tiene importantes consecuencias en lo que respecta a la forma en que son cargadas las baterías, es decir, unas celdas obtendrán más pronto su totalidad de carga que otras y por lo tanto deberán soportar ser sobrecargadas mientras las demás llegan al total de carga. Las reacciones que ocurren en las baterías de plomo-ácido cuando son sobrecargadas se muestran en la figura 3.5. Estas reacciones de gasificación ocurren cuando no queda más sulfato de plomo en los electrodos para ceder o aceptar electrones y tales reacciones ocurren cuando la batería está casi completamente cargada. Como se puede notar en la figura 3.4, las reacciones de carga y descarga involucran un cambio en la concentración del electrolito de las celdas. Dicho cambio en la concentración de los reactantes significa que existe un pequeño cambio en el voltaje, producido por las celdas a medida

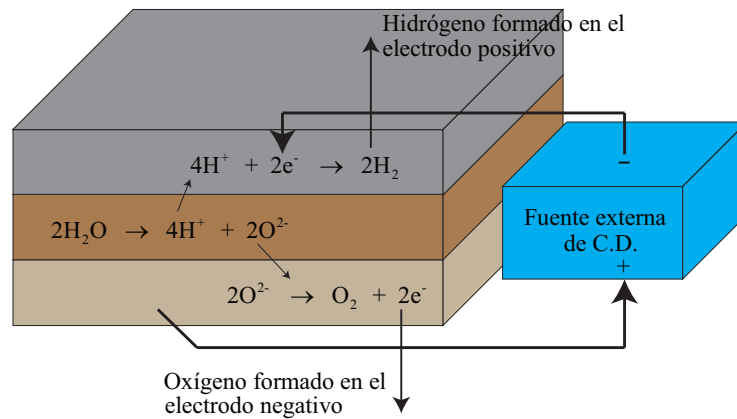


Figura 3.5: Reacciones de gasificación que ocurren cuando la batería de plomo-ácido es sobrecargada

que se descargan. Este descenso en el voltaje se ilustra en la figura 3.6. En las baterías modernas selladas se puede decir de forma aproximada que tal descenso en el voltaje tiene un comportamiento lineal. Cabe señalar que este voltaje de la batería no puede normalmente ser usado para dar una indicación del estado de carga de la batería. Normalmente no es posible medir este voltaje de circuito abierto cuando la batería está en uso, y en cualquier caso, también se ve afectado en gran medida por la temperatura.[17] Una característica notable de las reacciones

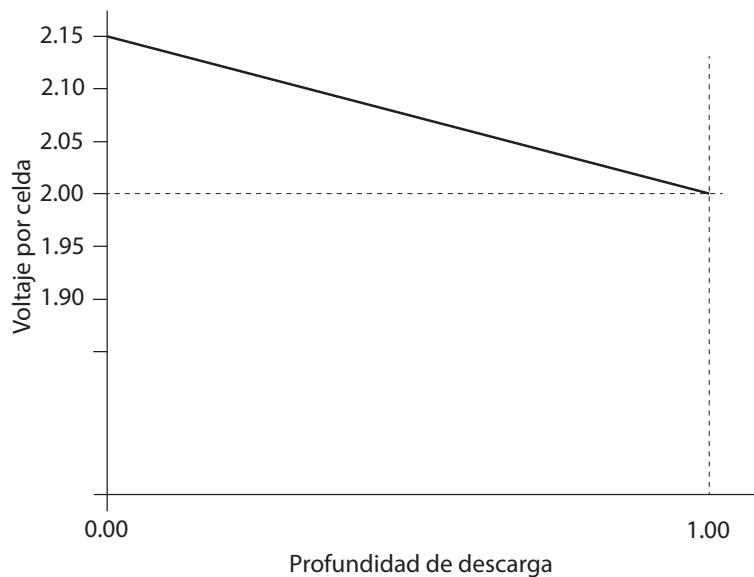


Figura 3.6: Comportamiento del voltaje de circuito abierto de una batería de plomo-ácido con el estado de carga.

de sobrecarga mostradas en la figura 3.5 y las reacciones de autodescarga en (3.4) y (3.5), es que el agua se descompone en hidrógeno y oxígeno y es por eso que en diseños de baterías más antiguas era necesario revisar y corregir el nivel del electrolito añadiendo agua en las celdas. En las baterías selladas modernas esto no

es necesario, incluso no es posible por el diseño de éstas, debido a que los gases quedan atrapados al interior y se recombinan de forma espontánea reformando la constitución del agua, pero existe un límite de la velocidad a la que esto puede suceder, para lo cual se deben tomar en cuenta ciertas consideraciones para asegurarse de que el gas no se produzca demasiado rápido. Los fabricantes de baterías de plomo-ácido las pueden suministrar en un amplio rango de dimensiones y formas, sin embargo, el problema con el amplio uso de las baterías es que existen diferentes diseños para diferentes aplicaciones, por lo que es importante seleccionar el tipo de batería adecuado para la aplicación correcta. El tipo de batería usado en un vehículo convencional es el llamado de 'arranque', iluminación e ignición (SLI) por sus siglas en inglés y es inadecuado para aplicación en vehículos eléctricos, siendo las baterías de 'tracción' o de 'ciclado profundo' las correctas.

3.3.3. Vida de la batería y mantenimiento.

Las baterías modernas de plomo-ácido de los vehículos eléctricos utilizan un electrolito en forma de gel además de estar selladas y contar con una válvula para prevenir sobrepresión y la pérdida de electrolito por los efectos de gasificación descritos, lo cual es un requerimiento de seguridad y le da el nombre a este tipo de baterías el cual es "batería de plomo-ácido sellada con válvula regulada" (VRLA) por sus siglas en inglés. Tales reacciones de gasificación resultan si las reacciones de sobrecarga de la figura 3.5 ocurren muy rápido. Esto sucederá si el voltaje de recarga es muy elevado y claramente esto no debe suceder o la batería se puede dañar. Por otro lado, se puede decir que este tipo de baterías son libres de mantenimiento, sin embargo eso no significa que las baterías durarán por siempre, incluso aunque no haya pérdida de agua, las baterías de plomo-ácido están sujetas a diferentes efectos que acortan su vida. Uno de los más conocidos es el proceso de sulfatación, el cual ocurre si la batería se deja por largos periodos en estado de descarga y el sulfato de plomo, como se puede apreciar en la figura 3.4, en los electrodos se forman cristales más grandes que son más difíciles de convertir de vuelta en plomo o en dióxido de plomo, lo cual va formando una capa aislante alrededor de los electrodos. Tal proceso puede ser revertido parcialmente cargando la batería lentamente, pero depende de que tan grande sea dicha capa para que se pueda revertir. Mantener siempre la batería en un buen estado de carga puede prevenir el problema de la sulfatación, que es una de las principales causas de falla de las baterías. También existen otros problemas que no pueden prevenirse (hasta el momento) por más que se tenga cuidado, como lo son las reacciones de corrosión que ocurren en los electrodos de las baterías que incrementan la resistencia eléctrica entre los materiales activos y los soportes de los electrodos. los materiales activos gradualmente forman cristales cada vez más grandes que por consecuencia disminuyen la superficie del área activa, reduciendo tanto la capacidad de la batería como la velocidad de reacción. Los efectos de la vibración y los continuos cambios del tamaño y composición de los materiales activos durante los ciclos de carga y descarga, gradualmente afectan los contactos, siendo siempre progresiva tal afectación hasta llegar al punto de no proporcionar un buen contacto eléctrico e incluso llegando a fallar una o varias celdas y abriendo el circuito en serie, provocando la falla de la batería. Todos estos problemas llevan la vida útil

de la batería a una cifra cercana a los 700 ciclos, aunque esto dependerá de lo profundo de éstos. Datos de camionetas de carga industriales, reportan que es posible obtener una vida útil de baterías de plomo-ácido de entre 1200 a 1500 ciclos o lo equivalente en tiempo alrededor de 7 a 8 años. Otras compañías con flotas de vehículos eléctricos de carga han llegado a reportar periodos de vida de baterías de hasta 5 años o 700 ciclos. La vida más corta de las baterías en los vehículos eléctricos de carretera es el resultado de estar sometidas a cargas más demandantes y de comportamiento más variado, afectando así el rendimiento y por ende sufren típicamente la descarga alrededor de dos horas,[2].

3.3.4. Carga de la batería

La carga de una batería de plomo-ácido es un procedimiento complejo y, como con cualquier batería, si se realiza incorrectamente se arruinará rápidamente y se reducirá su vida útil. Como hemos visto, la carga no debe llevarse a cabo a una tensión demasiado alta, o resultará una pérdida de agua en el electrolito.

3.3.5. Resumen de las baterías de plomo-ácido

Las baterías de plomo-ácido están comercialmente muy bien establecidas en el mercado y con un muy buen respaldo de la industria. Estas son las baterías recargables más baratas por kW-h de carga y lo seguirán siendo en un futuro previsible. Sin embargo, poseen bajo nivel de energía específica y es difícil ver cómo un vehículo para recorrer grandes distancias puede ser diseñado con baterías de este tipo. Por otro lado, sin duda seguirán siendo usadas por un tiempo considerable en los vehículos de corto alcance. Las baterías de plomo-ácido tienen un mayor rango de potencia específica que muchos otros tipos de baterías (ver figura 3.3) y por eso siguen bastante ligadas a los vehículos eléctricos híbridos, en los que solo una cantidad limitada de energía es almacenada, pero se debe almacenar y entregar en forma rápida, para lo cual estas baterías funcionan correctamente.

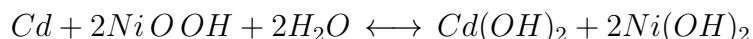
3.4. Baterías basadas en níquel

3.4.1. Introducción

Diferentes baterías comerciales que utilizan níquel en el electrodo positivo se han desarrollado desde finales del siglo XIX a partir de los trabajos realizados por Edison. Las baterías basadas en el uso del níquel incluyen las de hierro de níquel, níquel-zinc, níquel-cadmio y baterías de hidrógeno metálico de níquel. Dos de estas baterías se abordarán a continuación. Las baterías de níquel-zinc tienen un desempeño razonable, pero por otro lado poseen una vida útil algo limitada de alrededor de los 300 ciclos, por lo cual no son tomadas en cuenta en este trabajo. Las baterías de hierro-níquel raramente son utilizadas, motivo por el cual comercialmente están poco disponibles, por lo tanto tampoco se tomarán en cuenta en el presente trabajo.

3.4.2. Baterías de níquel-cadmio

La batería de níquel-cadmio (NiCad) fué considerada como una de las principales competidoras de las de plomo-ácido para ser usadas en vehículos eléctricos, debido a que tienen cerca del doble de energía específica. Creada por Waldemar Jungner de Suecia en 1899, basada en la primera batería alcalina de Thomas Edison. Las baterías de NiCad utilizan oxihidróxido de níquel para el electrodo positivo y el cadmio metálico para el electrodo negativo. la energía eléctrica se obtiene de la siguiente reacción:



Las reacciones ocurridas en cada electrodo se muestran en la figura 3.7, donde se puede apreciar de donde provienen los electrones y como funciona la batería. Las baterías NiCad han sido ampliamente usadas en muchas aplicaciones, incluyendo el uso de los vehículos eléctricos. Tienen diferentes ventajas como por ejemplo, una alta potencia específica, un periodo de vida de alrededor de los 1200 ciclos y una rango de temperatura de operación de $-40^{\circ}C$ a $+80^{\circ}C$, una baja auto descarga y bajo avenjamiento por almacenamiento a largo plazo. En este tipo de baterías las reacciones de autodescarga suceden muy lentamente. Existen en el mercado en diferentes formas y tamaños, pero no son tan fáciles de conseguir en tamaños necesarios para vehículos eléctricos. Su principal mercado son las herramientas portátiles y diferente equipo electrónico. Son muy robustas tanto en forma mecánica como eléctrica y pueden ser recargadas en poco más de una hora y al 60 % de su capacidad en 20 minutos. Una desventaja de estas baterías es el voltaje de operación que aporta cada celda de tan solo 1.2V, por lo que se necesitan 10 celdas para conformar una batería de 12V, comparada con las 6 celdas que se requieren en una de plomo-ácido. Lo anterior explica en parte el alto costo de este tipo de baterías. Un problema adicional es que el costo de cadmio es varias veces mayor que el plomo, y esto es probable que no cambie. El cadmio también es ambientalmente perjudicial y cancerígeno. En la figura 3.7 se puede observar

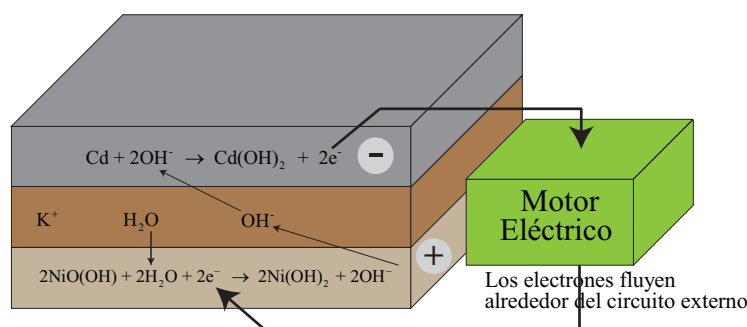


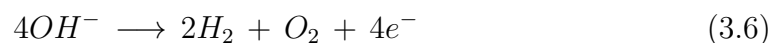
Figura 3.7: Reacciones durante la descarga de una batería de Níquel-Cadmio. Las reacciones se revierten durante la carga.

la pérdida de agua en la reacción, lo que provoca que el electrolito se vuelva más

Tabla 3.2: Parámetros nominales de las baterías de níquel-cadmio.

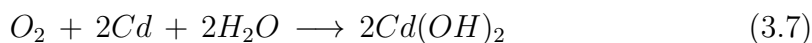
Energía específica	40 – 55 Wh/kg dependiendo de la corriente (ver fig. 3.3).
Densidad de energía	70 – 90 Wh/L dependiendo de la corriente.
Potencia específica	~ 125 W/kg
Voltaje por celda	1.2 V.
Eficiencia en Ah	Aceptable.
Resistencia interna	Muy baja, ~ 0.06 Ω por celda para 1Ah por celda.
Disponibilidad Comercial	Disponibles en tamaños pequeños, difícil en grandes.
Temperatura de operación	–40°C a 80°C.
Auto – descarga	0.5 % por día, muy baja.
Cantidad de ciclos de vida	1200 al 80 % de la capacidad.
Tiempo de recarga	1h, y en carga rápida hasta el 60 % en 20 min.

concentrado. El costo de las baterías de NiCad es tres veces mayor a las de plomo-ácido y se debe a que tienen una vida útil mayor a estas últimas. Su eficiencia de carga decrece de forma rápida con temperaturas arriba de los 35°C, pero de cierta forma no afecta tanto su uso en vehículos eléctricos. Han sido utilizadas con éxito en autos eléctricos como el Peugeot 106, Citroen AX, Renault Clio, en el Ford Think y en el mismo EV1 de General Motors, [2],[13],[15]. Las características nominales de las baterías de NiCad se pueden apreciar en la tabla 3.2. Al igual que con las baterías de plomo-ácido, las baterías de NiCad deben cargarse correctamente. Los puntos señalados en la sección 3.6 aplican también a éstas. Sin embargo, ya que las celdas de NiCad son menos propensas a la autodescarga, el problema planteado no es tan grande como con las de plomo-ácido. Normalmente, la batería se carga a una corriente constante hasta que sus voltajes de celda alcanzan un nivel predeterminado, momento en el que se le desconecta la corriente. En este punto, los voltajes de celda caen a un voltaje menor predeterminado y entonces se vuelve a alimentar corriente. Este proceso se repite hasta que la batería acepta el total de carga para la cual está diseñada. Como ya se mencionó, en 1 hora se puede lograr que una batería de NiCad sea cargada en una buena porción, cerca del 90 %, pero como se explica en la sección 3.6, las celdas deben funcionar a una corriente bastante baja, con lo cual la mayoría de las celdas se sobrecargan durante periodos de tiempo más largos. Alternativamente, la batería puede ser recargada a una corriente menor pero de forma constante, lo que es un sistema más sencillo, pero toma más tiempo. Una característica sobresaliente de la batería NiCad es la forma en que hace frente a la sobrecarga. Las celdas están hechas con un excedente de hidróxido de cadmio en el electrodo negativo. Esto produce que el electrodo positivo siempre sea completamente cargado primero. Como resultado del proceso de carga, se produce oxígeno en el electrodo positivo a través de la reacción:



El oxígeno libre resultante se difunde hacia el electrodo negativo, donde reacciona con el cadmio, produciendo hidróxido de cadmio, utilizando el agua producida por

(3.6).



Además de esta reacción, la reacción normal de carga se llevará a cabo en este electrodo, usando los electrones producidos por (3.6).



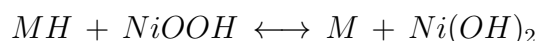
Comparando (3.7) y (3.8), se puede observar que la cantidad producida de hidróxido de cadmio es exactamente igual a la cantidad de cadmio producido en la reacción inversa. Aunque el valor de la resistencia interna de la batería de NiCad es muy bajo, no es tan bajo como el de la batería de plomo-ácido. Una forma de calcular la resistencia interna de las baterías de NiCad es a través de la fórmula:

$$R = \text{No. de celdas} \times \frac{0.06}{C_3} \text{Ohms} \quad (3.9)$$

donde el factor de 0.06 se obtiene de mediciones a baterías de tracción de NiCad y comparando éste con el valor de (3.3) de las baterías de plomo-ácido, se puede apreciar que es un valor mucho mayor e incluso el número de celdas también será mayor debido a su bajo nivel de voltaje de aportación de cada una.

3.4.3. Baterías de hidrógeno metálico de níquel.

Este tipo de batería fué introducida al mercado cerca del año 2000. Tiene un desempeño similar al de la batería de NiCad, pero principalmente la diferencia con las baterías de hidrógeno metálico de níquel (NiMH), por sus siglas en inglés, es que el electrodo negativo usa hidrógeno absorbido en un hidrógeno de metal y tal proceso se hace independiente del cadmio, lo cual le da una ventaja importante debido a que el comportamiento del electrodo negativo en este tipo de batería tiene un parecido con el negativo de las baterías de combustible. En el electrodo positivo se llevan a cabo las mismas reacciones que en el de la batería de NiCad, es decir, el oxihidróxido de níquel se convierte en hidróxido de níquel durante la descarga y en el electrodo negativo se libera el hidrógeno que estaba temporalmente adherido al metal y reacciona produciendo agua y electrones. Tales reacciones se pueden observar en la figura 3.8. Los metales usados para alojar hidrógeno son aleaciones cuya formulación es propiedad intelectual protegida por los fabricantes, pero básicamente lo que ocurren en éstos, es que se produce una reacción reversible en la que el hidrógeno está unido al metal y cuando es necesario se libera. Para que esto funcione las celdas deben estar perfectamente selladas para que el proceso de absorción / liberación del hidrógeno, no se contamine por aire y partículas que se pueden filtrar al interior y ocupar espacio que está destinado para el hidrógeno, además de que estas reacciones deben llevarse a cabo a un valor de presión constante. Se puede apreciar durante las reacciones tanto de carga como de descarga, que se produce agua a la misma razón que es usada, por lo cual el electrolito no cambia respecto del estado de carga. La reacción química global para la batería de NiMH se escribe como:



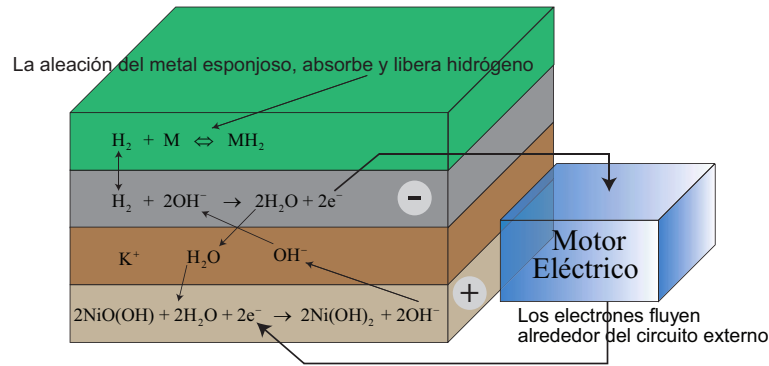


Figura 3.8: Reacciones durante la descarga de una batería de hidruro metálico de níquel. Las reacciones se revierten durante la carga.

Tabla 3.3: Parámetros nominales de las baterías de hidruro metálico de níquel.

Energía específica	$\sim 65 Wh/kg$ dependiendo de la potencia
Densidad de energía	$\sim 150 Wh/L$
Potencia específica	200 W/kg
Voltaje por celda	1.2 V
Eficiencia en Ah	Muy buena
Resistencia interna	Muy baja, $\sim 0.06 \Omega$ por celda para 1Ah por celda
Disponibilidad Comercial	Disponibles en tamaños pequeños, difícil en grandes
Temperatura de operación	ambiente
Auto – descarga	5 % por día
Cantidad de ciclos de vida	1000 al 80 % de descarga
Tiempo de recarga	1h, y en carga rápida hasta el 60 % en 20 min.

Las baterías de NiMH tienen una energía nominal específica de aproximadamente $65Wh/kg$, una densidad de energía nominal de $150Wh/L$ y una potencia máxima específica de aproximadamente $200W/kg$, tal como se puede apreciar en la tabla 3.3 además de otra información. En términos generales se puede concluir que son un poco mejores que las baterías de NiCad. Debido al calor generado por el proceso en el que el hidrógeno se une a la aleación del metal, se produce una elevación de temperatura que hace necesario enfriamiento asistido por ventiladores, generalmente incluidos en las baterías de este tipo. El régimen de carga es similar al de la batería de NiCad. La corriente se está encendiendo y apagando para mantener el voltaje de celda entre un límite superior y un límite inferior. Al igual que las baterías de NiCad las de NiMH se pueden cargar en 1 hora. Desafortunadamente en nuestro país este tipo de baterías no son nada fácil de encontrarlas, lo cual las pone en un escenario muy desfavorable por todos los aranceles de importación, pero a pesar de ello cuentan con características a su favor que las hacen seleccionables en el diseño de un vehículo eléctrico y lo serán más con el avance de la tecnología.

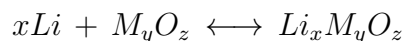
3.5. Baterías de litio

3.5.1. Introducción

A finales de la década de 1980 las baterías de litio aparecieron en el mercado. Ofrecieron un importante aumento en la densidad de energía en comparación con otras baterías recargables, aunque a un precio también considerablemente más elevado que todas las consideradas anteriormente en este trabajo.

3.5.2. Baterías de polímero de litio

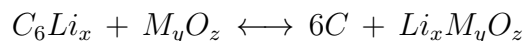
Las baterías de polímero de litio utilizan en el electrodo negativo metal de litio y para el electrodo positivo, óxido de un metal de transición. En la reacción química resultante el litio se combina con el óxido de metal para formar un óxido de metal de litio y de esta forma liberar energía. Cuando se recarga la batería la reacción química se invierte. Por lo tanto el litio hace las veces de un reactivo como la de los iones que se mueven a través del electrolito. La reacción química general es:



El electrodo negativo de litio sólido ha sido la causa de los problemas con este tipo de baterías, pues genera problemas de seguridad y una disminución en el rendimiento de la misma. Debido a lo anterior, han sido sustituidas en gran medida por la batería de iones de litio.

3.5.3. Baterías de iones de litio

Las baterías de iones de litio (Li-Ion) se introdujeron al mercado a principios de 1990. Para el electrodo positivo, utilizan un metal de transición litiado con intercalación de óxido y el carbono litiado para el electrodo negativo. El electrolito puede ser una solución líquida orgánica o un polímero sólido. La energía eléctrica se obtiene a partir de la combinación del carbono de litio y el óxido de metal de litio para formar carbono y óxido de metal de litio. La reacción química global de la batería es:



Las características esenciales de este tipo de baterías se muestran en la tabla 3.4. Un punto muy importante es que éstas necesitan un control preciso de la tensión al ser cargadas, debido a que si sobrepasa el nivel superior predeterminado, se produce un aumento importante en la temperatura, lo cual se vuelve peligroso pues pueden llegar a explotar, o en el mejor de los casos se pueden dañar y disminuir su vida útil. De tal forma, las baterías Li-Ion para asegurar la estabilidad de su temperatura, utilizan sistemas de enfriamiento y esquemas de protección contra elevaciones de temperatura. Por otro lado, si el nivel de tensión es demasiado bajo, la batería se carga de forma insuficiente. Por tal motivo en los últimos años, los cargadores para este tipo de baterías, han experimentado un importante avance. Este tipo de baterías tienen amplia ventaja sobre las demás tecnologías y son en la actualidad las más atractivas, debido a sus prestaciones, para ser utilizadas en vehículos

Tabla 3.4: Parámetros nominales de las baterías de iones de litio.

Energía específica	90 Wh/kg
Densidad de energía	153 Wh/L
Potencia específica	300 W/kg
<i>Voltaje por celda</i>	3.5 V.
<i>Eficiencia en Ah</i>	Muy buena.
<i>Resistencia interna</i>	Muy baja.
<i>Disponibilidad Comercial</i>	Disponibles a través de importación.
<i>Temperatura de operación</i>	Para un buen desempeño $\sim 25^{\circ}\text{C}$.
<i>Auto – descarga</i>	Muy baja, $\sim 10\%$ por mes.
<i>Cantidad de ciclos de vida</i>	más de 1000.
<i>Tiempo de recarga</i>	2 – 3h.

eléctricos. La energía específica, por ejemplo, es tres veces mayor que las de plomo-ácido, lo cual puede permitirle a un automóvil recorrer distancias mayores. Sin embargo, en la actualidad, el precio de estas baterías sigue siendo bastante alto, lo cual se ve reflejado en los precios tan altos de los vehículos eléctricos actuales.

3.6. Carga de la batería

La cuestión de la carga de las baterías es la de mayor importancia para mantenerlas en buen estado y prevenir así fallas prematuras. Como ya se mencionó, por ejemplo, al dejar una batería de plomo-ácido en un bajo estado de carga puede causarle daños permanentes debido al proceso de sulfatación. Por otra parte, la carga de manera incorrecta también puede fácilmente dañar las baterías. La carga de la batería de un vehículo moderno no es una cuestión de simplemente proveer un voltaje o una corriente. Debido a la falta de infraestructura y especialmente, debido a la falta de estaciones de carga en lugares públicos o espacios comunes, constantemente será necesario cargar el vehículo contando solamente con tomas de corriente convencionales, por lo que lo más conveniente para el vehículo será contar con un cargador ligero a bordo, el cual, deberá tener ciertos parámetros preestablecidos para realizar su labor de forma correcta y eficiente. En el ámbito de los cargadores públicos, una de las cuestiones principales será la estandarización de este proceso para que los vehículos puedan ser cargados de forma correcta. Recientemente en ciudades o estados de diferentes partes del mundo que cuentan con leyes estrictas en materia ambiental, como por ejemplo California, cuentan ya con estaciones de carga que proporcionan la información necesaria para que cualquier usuario recargue las baterías de su vehículo eléctrico sin preocuparse por daños en este sentido. Sin embargo, cualquiera que sea el método de carga usado para cualquier tipo de batería, es muy importante entender la ecualización de este proceso, el cual será explicado en la siguiente sección.

Tabla 3.5: SOC de dos celdas diferentes de una batería. La celda A es una celda de buena calidad con bajo nivel de autodescarga. La celda B tiene un nivel mayor de autodescarga. Las dos celdas son cargadas y descargadas cierto número de veces.

SOC Celda A	SOC Celda B	Evento
100 %	100 %	Completamente cargada
48 %	40 %	50 % descargada
98 %	90 %	50 % carga repuesta
35 %	19 %	60 % descargada
85 %	69 %	50 % carga parcial
33 %	9 %	50 % descargada
83 %	59 %	50 % carga parcial
18 %	Batería descargada	60 % descargada, requiere recarga en estación

3.6.1. Igualación de la carga

Un punto fundamental que aplica para los diferentes tipos de baterías en el mercado actual, es la equalización de la carga, que debe hacerse a intervalos regulares para evitar que se produzcan daños. Un problema con todas las baterías es que cuando se les está demandando corriente, no todas las celdas individuales pierden la misma cantidad de carga. Dado que una batería es un conjunto de celdas conectadas en serie, esto puede parecer a primera vista equivocado, después de todo, exactamente la misma corriente fluye a través de todas las celdas. Sin embargo, esto no ocurre debido a las diferentes corrientes de aporte de cada una de las celdas producto de los efectos de autodescarga que se llevan a cabo a diferentes velocidades en diferentes celdas, señalados por ejemplo, en (3.4) y (3.5) en el caso de las baterías de plomo-ácido. Esto se debe a variaciones en la fabricación y también a causa de los cambios de temperatura; las celdas de una batería no están todas exactamente a la misma temperatura. Si de una batería se extrae el 50 % de carga, algunas celdas habrán perdido más del 50 % de su carga, por decir 52 %, y algunas otras un poco menos. Si la batería se carga con lo justo por celda, entonces las celdas más propensas a la autodescarga no se cargarán completamente. Para ejemplificar lo anterior, observar la tabla 3.5.

Los ciclos de la celda A están entre 20 % y 80 % de carga, lo cual es perfectamente satisfactorio. Sin embargo la celda B se descarga un poco más en cada ciclo y eventualmente falla después de un número relativamente pequeño de ciclos, tal como se puede apreciar en la tabla 3.5. La gran diferencia entre la autodescarga de este ejemplo es un poco improbable. Sin embargo, el ejemplo ilustra lo que sucede, aunque por lo general más lentamente que los cuatro ciclos de la tabla anterior. Si una celda de una batería se descarga completamente como en el ejemplo, el voltaje de la batería decrecerá de manera abrupta debido a que la celda se torna solo una resistencia que disminuye el voltaje. Si a la batería se le sigue demandando corriente en este estado, seguramente la celda presentará daños severos. Debido a que una batería es un circuito en serie, una celda dañada arruina el total de la batería. Este efecto es probablemente el mayor causante de fallas prematuras. La forma de prevenir lo anterior es cargar la batería hasta que todas y cada una de las

celdas estén completamente cargadas. Este proceso se conoce como igualación de carga a intervalos regulares, lo cual significa que inevitablemente algunas celdas serán sobrecargadas por más tiempo que otras. Una vez que la mayoría de las celdas han sido cargadas, la corriente debe continuar siendo alimentada por el cargador hacia la batería de tal forma que aquellas celdas que están más propensas a la autodescarga se carguen completamente. Sin embargo, como ya se mencionó en las secciones 3.3 y 3.4, en zona de sobrecarga, la batería sólo acepta una corriente limitada, típicamente de $C/10$. Por esta razón el proceso de llevar todas las celdas a un estado totalmente cargado no se puede realizar de forma rápida, lo cual explica por qué toma mucho más tiempo cargar completamente la batería que llevarla a un estado cercano al totalmente cargado. La última parte del proceso de carga debe realizarse lentamente, lo cual, en parte también explica la complejidad de un buen cargador de batería y el porque la eficiencia del proceso de carga es considerablemente menor al 100 %.

3.7. Modelado de la batería

3.7.1. Introducción

Utilizar de forma conjunta el modelado y la simulación en un proceso de diseño y construcción es muy útil debido al ahorro que se puede obtener en tiempo, dinero, mano de obra y otros aspectos importantes que se pueden lograr aprovechando las innovaciones tecnológicas que nos ofrece hoy en día el ámbito de la programación y la computación. En el presente trabajo, como ya se mencionó, se utilizará el programa MATLAB/Simulink para reproducir el comportamiento del modelo propuesto del banco de baterías acoplado con los demás elementos que conforman el tren de potencia de un vehículo eléctrico. En este capítulo se abordará solamente el modelo de la batería y en el siguiente se presentarán los modelos de los demás componentes del tren de potencia.

3.7.2. Modelos de baterías

Las baterías tienen una importancia primordial en las prestaciones de un vehículo eléctrico debido a que son la única fuente de energía de éstos, para la simulación, se debe contar con un modelo tal que represente lo mejor posible su desempeño. Como ya se hizo mención, existen diferentes tipos de baterías y muchos factores que afectan su comportamiento. Para predecir dicho desempeño, existen diferentes modelos matemáticos y ninguno de éstos es completamente exacto pues ninguno incluye todos los factores que intervienen en el funcionamiento de una batería, tales como:

- Estado de Carga (SOC).
- Capacidad de almacenamiento de la batería.
- Velocidad de carga/descarga.
- Temperatura.

- Edad de la batería.

Teniendo en cuenta qué se necesita en la simulación, se construye el modelo de la batería. De forma general, los modelos propuestos por la comunidad científica [] se pueden catalogar en 5 grupos:

1. *Modelos electroquímicos.*
2. *Modelos basados en circuitos eléctricos.*
3. *Modelos experimentales.*
4. *Modelos hidrodinámicos, usando elemento finito.*
5. *Modelos de datos tabulados.*

En este trabajo se realizará la introducción de 2 de los métodos anteriores con la finalidad de proporcionar un modelo no lineal que represente el comportamiento de la batería y que pueda ser usado en la simulación del funcionamiento de un vehículo eléctrico.

3.7.3. Modelos electroquímicos de baterías

Los modelos electroquímicos son los más sencillos. Estos modelos desprecian o ignoran los efectos termodinámicos y como consecuencia, pueden predecir el almacenamiento de energía pero no pueden modelar fenómenos como la tasa de variación de tensión bajo carga, ni tampoco los efectos de temperatura[19]. En esta familia de modelos electroquímicos, Karden [20] desarrolla un modelo unidimensional de una batería a partir de 5 ecuaciones diferenciales que representan el transporte de carga en el electrolito, en los electrodos, cinética de las reacciones de carga y descarga, transporte en el electrolito y cambios estructurales de los electrodos porosos en el caso de las baterías de plomo-ácido. El inconveniente de este modelo es su enfoque excesivamente electroquímico y la complejidad del mismo. A pesar de lo bien logrados, tanto los modelos electroquímicos como los modelos tipo 3, 4 y 5, no son muy adecuados para representar la dinámica de las celdas con el fin de realizar estimaciones del SOC de los bancos de baterías.

3.7.4. Modelos de baterías basados en circuitos eléctricos

El modelo más simple de este tipo, básicamente está compuesto de una fuente ideal de voltaje en serie con una resistencia interna que representa la de la batería [23]. Sin embargo este modelo tampoco toma en cuenta el SOC. Existe otro modelo basado en un voltaje de circuito abierto en serie con una resistencia y circuitos RC en paralelo con la llamada impedancia de Warburg [24]. La identificación de todos los parámetros de este modelo está basada en una técnica bastante complicada llamada espectroscopía de la impedancia [25]. Shepherd desarrolló una ecuación para describir el comportamiento electroquímico de una batería directamente en términos de voltaje, voltaje de circuito abierto, resistencia interna, corriente de

descarga y el SOC [21]. Su modelo es aplicado tanto para carga como para descarga pero sin considerar los efectos de la temperatura. En contraparte en [22], se utiliza una versión modificada de la de Shepherd y consiste en usar un voltaje de polarización en lugar de una resistencia de polarización con la finalidad de eliminar el problema algebraico de trayectoria debido a la simulación de sistemas eléctricos en Simulink, pero usa solamente el SOC como variable de estado para representar el comportamiento del voltaje y es válido en estado estable, pero produce resultados falsos cuando varía la corriente. Debido a que los vehículos eléctricos tienen la necesidad de funcionar a diferentes velocidades, los motores que los impulsan demandan diferentes valores de corriente en intervalos de tiempo variables. Es por esto que es necesario contar con un modelo que represente de la forma más cercana a la realidad el desempeño del banco de baterías sometido a demandas de corriente tanto en régimen constante como variable.

3.7.5. Modelo propuesto de baterías.

Considerando el trabajo realizado por Oliver Tremblay y Louis-A. Dessaint en [26], en el presente trabajo se pretende realizar una modificación a su modelo al considerar la afectación de la capacidad de la batería cuando se somete a demandas de corriente en régimen variable, para representar de forma más cercana a la realidad su comportamiento. Como ya se mencionó en el punto 3.2.2, la capacidad de la batería varía si se le demanda mayor corriente. Una corriente de 1 A durante 10 horas, en realidad no representa la misma cantidad de carga en una batería que se le demanda 10 A durante 1 hora. Este fenómeno es particularmente importante en aplicaciones de vehículos eléctricos, porque en éstos, las corrientes son generalmente mayores, con lo que el resultado de la capacidad puede ser menor a la esperada. Conocer la profundidad de descarga de la batería es también esencial para calcular el voltaje de circuito abierto. La mejor forma de estimar el comportamiento de la capacidad de una batería es usando la ecuación del científico alemán W. Peukert [2][10], que expresa la capacidad de una batería de plomo-ácido en términos de la velocidad a la cual es descargada. Conforme la velocidad de descarga incrementa, la capacidad disponible decrece. El punto de partida de este modelo es que existe una capacidad, llamada Capacidad de Peukert, la cual es constante y está dada por la ecuación:

$$Q_p = I^k t \quad (3.10)$$

donde k es una constante (típicamente alrededor de 1.2 para baterías de plomo-ácido) llamada coeficiente de Peukert y t es el tiempo de descarga en segundos. Por ejemplo, supóngase que una batería tiene una capacidad nominal de 40 Ah a una tasa de 5 h, lo cual significa que la corriente de descarga será:

$$I = \frac{40}{5} = 8A$$

y si el coeficiente de Peukert es 1.2, entonces Q_p es:

$$Q_p = 8^{1.2} \times 5 = 60.6Ah$$

Ahora, reordenando (3.10), se puede encontrar el tiempo que le tomará a la batería llegar a determinada profundidad de descarga para cualquier valor de corriente I :

$$t = \frac{Q_p}{I^k} \quad (3.11)$$

La exactitud de este modelo de Peukert se puede observar considerando los datos de la batería de la figura 3.2, la cual tiene una capacidad nominal de 42 Ah a una tasa de 10 h y muestra como cambia la capacidad con el tiempo de descarga. En la figura 3.9, la línea sólida muestra los datos de la figura 3.2 de una forma diferente, es decir, muestra como la capacidad decrece incrementando la corriente de descarga. Usando los métodos descritos anteriormente, el coeficiente de Peukert para esta batería se encontró que es 1.107 y de (3.10) se tiene:

$$Q_p = 4.2^{1.107} \times 10 = 49 \text{ Ah}$$

usando este último valor y (3.11), se puede calcular la capacidad de la batería que la ecuación de Peukert puede predecir para un determinado rango de valores de corriente. En la figura 3.9 se han representado tales valores con cruces y se puede observar que son muy cercanas a los valores de la medición real. Considerando

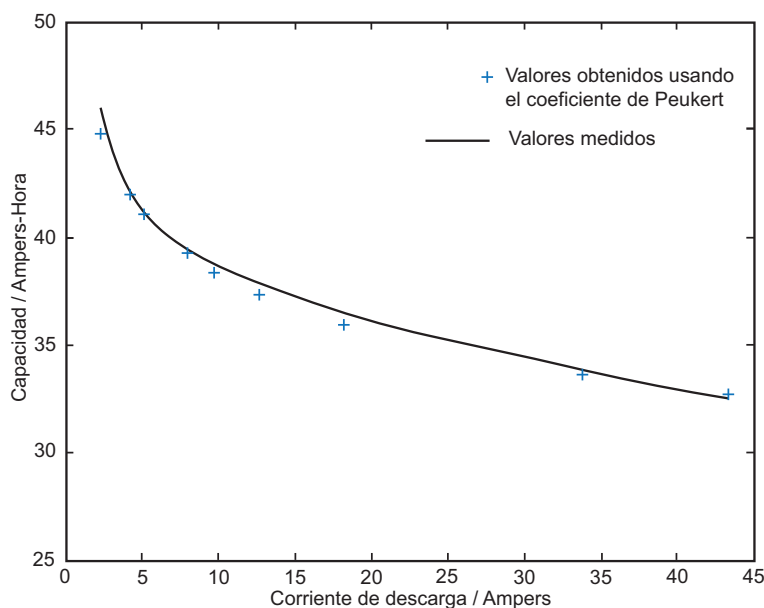


Figura 3.9: Predicción de la capacidad de Peukert.

la teoría del modelo de Peukert y habiendo mostrado la cercanía del cálculo de la capacidad comparada con valores reales en la figura 3.9, es hora de abordar el modelo de descarga.

3.7.5.1. Modelo de descarga

Tomando como base el modelo propuesto por Shepherd en [21] y las modificaciones propuestas en [26] al modelo de Shepherd para representar la dinámica del voltaje cuando la corriente varía, pero que no toma en cuenta la dinámica de la

capacidad por tales variaciones de corriente, se introducirá el modelo de Peukert para representar tal cambio en la capacidad de la batería y predecir de forma más cercana a la real la dinámica del voltaje y el SOC. Debido a que el modelo propuesto integra valores que se obtienen de las gráficas características de descarga de cada tipo de batería proporcionadas por los fabricantes, en la figura 3.10 se muestra la de una batería de hidrógeno metálico de níquel, en la que se puede observar dos zonas muy importantes que son la zona exponencial y la zona nominal, de las cuales más adelante se obtendrán valores para el modelo. El modelo de descarga

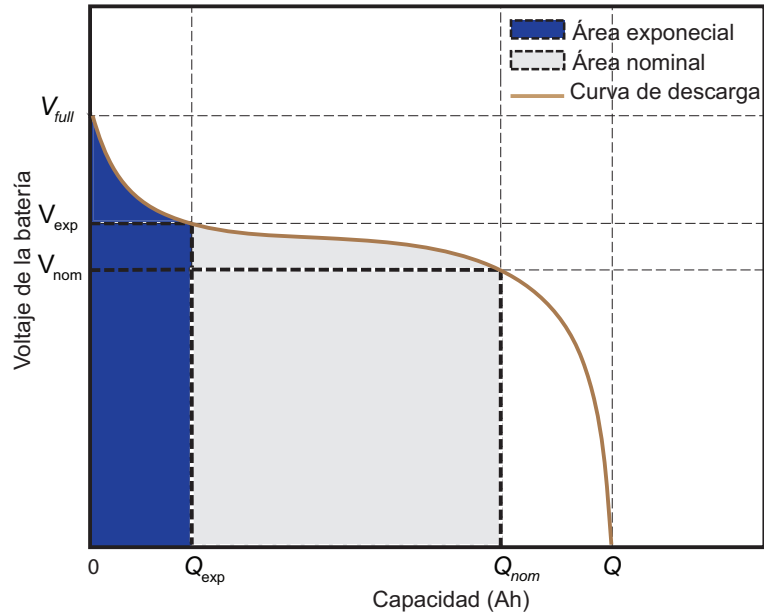


Figura 3.10: Curva característica de descarga.

está representado por la siguiente ecuación :

$$V_{bat} = E_0 - \underbrace{K \frac{Q_p}{Q_p - it} \cdot it}_{Vol. de polarizacion.} - R \cdot i + A \exp(-B \cdot it) - \underbrace{K \frac{Q_p}{Q_p - it}}_{Res. de polarizacion.} \cdot i^* \quad (3.12)$$

donde:

V_{bat} es el voltaje de la batería (V),

E_0 es el voltaje constante de la batería (V),

K es la constante de polarización (V/(Ah)) o resistencia de polarización (ohms),

Q_p es la capacidad de Peukert de la batería (Ah),

it es la $\int idt$, es decir, la carga actual de la batería (Ah),

A es la amplitud del voltaje en la zona exponencial (V),

B es la constante de tiempo inverso de la zona exponencial $(Ah)^{-1}$,

R es la resistencia interna (ohms),

i es la corriente de la batería (A),

i^* es la corriente filtrada (A).

Lo particular del modelo utilizado en [26] es el uso de la corriente filtrada i^* circulando por la resistencia de polarización. Estudios experimentales señalan un

comportamiento lento en la dinámica del voltaje como respuesta ante un escalón de corriente. Esta corriente filtrada resuelve también el problema algebraico de trayectoria debido a la simulación de sistemas eléctricos en simulink. El OCV varía de forma no lineal con el SOC y este fenómeno está modelado por el término del voltaje de polarización. La zona exponencial de (3.12) es válida para las baterías de iones de litio y en los otros tres tipos de baterías tratadas en este trabajo se presenta un fenómeno de histéresis entre el proceso de carga y el de descarga, sin importar el SOC de la batería como se señala en [27],[28] y sólo ocurre en la zona exponencial. Este fenómeno se puede representar por el siguiente sistema dinámico no lineal:

$$\dot{Exp}(t) = B \cdot |i(t)| \cdot (-Exp(t) + A \cdot u(t)) \quad (3.13)$$

donde:

$Exp(t)$ = voltaje de la zona exponencial (V),

$i(t)$ = corriente de la batería,

$u(t)$ = modo de operación, ya sea en modo carga o descarga.

El voltaje exponencial depende de su valor inicial $Exp(t_0)$ y del modo de carga ($u(t) = 1$) o de descarga ($u(t) = 0$).

3.7.5.2. Modelo de carga

El comportamiento de la batería en el modo carga y particularmente al final de la carga (EOC), es diferente del modo descarga y depende del tipo de la batería.

Modelo de carga para baterías de plomo-ácido y de iones de litio

Las baterías de plomo-ácido y de iones de litio tienen las mismas características al EOC, debido a que en ambas el voltaje se incrementa rápidamente cuando la batería alcanza la carga completa. Este fenómeno está modelado por el término de la resistencia de polarización. En el modo carga, la resistencia de polarización incrementa su valor hasta que la batería está casi completamente cargada, es decir $i(t) = 0$. Después de este punto, el valor de la resistencia de polarización incrementa abruptamente. En lugar de la resistencia de polarización del modelo de descarga de la ecuación (3.12), la resistencia de polarización tiene la siguiente forma:

$$Resist. de Pol. = K \frac{Q_p}{it} \quad (3.14)$$

Teóricamente, cuando $it = 0$ (completamente cargada), la resistencia de polarización es infinita. Este no es el caso exactamente en la práctica. De hecho, los resultados experimentales mencionados en [26], han mostrado que la contribución de la resistencia de polarización es modificada por un valor aproximado del 10 % de la capacidad de la batería, entonces (3.14) puede reescribirse de la siguiente forma:

$$Resist. de Pol. = K \frac{Q_p}{it - 0.1 \cdot Q_p} \quad (3.15)$$

Similar al modelo de descarga, el voltaje exponencial para las baterías de iones de litio está representado por el término $A \cdot \exp(-B \cdot it)$ y para las baterías de plomo-ácido por (3.13).

Modelo de carga para baterías de NiMH y NiCad

Estos tipos de baterías tienen un particular comportamiento del EOC. De hecho, después que la batería ha alcanzado el voltaje máximo de carga, el voltaje comienza a decrecer lentamente, dependiendo de la magnitud de la corriente. Este fenómeno es muy importante modelar porque el cargador de este tipo de baterías monitorea el valor de ΔV o el valor del cambio de voltaje para detener el proceso de carga y evitar daños en la batería por sobrecarga y por ende sobrecalentamiento. Este comportamiento está representado a través de una modificación a la resistencia de polarización. Cuando la batería está totalmente cargada, es decir que ($it = 0$), el voltaje comienza a decrecer. El cargador continúa sobrecargando la batería ($it < 0$) y el voltaje disminuye. Este fenómeno puede representarse disminuyendo el valor de la resistencia cuando la batería es sobrecargada a través del uso del valor absoluto de la carga (it):

$$Resist. de Pol. = K \frac{Q_p}{|it| - 0.1 \cdot Q_p} \quad (3.16)$$

Similar al modelo de descarga, el voltaje exponencial de estas baterías está dado por (3.13).

3.7.6. Resumen de los modelos de carga y descarga

3.7.6.1. Plomo-ácido

- Descarga: $V_{bat} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q_p}{Q_p - it} \cdot (it + i^*) + \text{Exp}(t)$
- Carga: $V_{bat} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q_p}{it - 0.1 \cdot Q_p} \cdot i^* - K \frac{Q_p}{Q_p - it} \cdot it + \text{Exp}(t)$

3.7.6.2. Li-Ion

- Descarga: $V_{bat} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q_p}{Q_p - it} \cdot (it + i^*) + A \exp(-B \cdot it)$
- Carga: $V_{bat} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q_p}{it - 0.1 \cdot Q_p} \cdot i^* - K \frac{Q_p}{Q_p - it} \cdot it + A \exp(-B \cdot it)$

3.7.6.3. NiCad y NiMH

- Descarga: $V_{bat} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q_p}{Q_p - it} \cdot (it + i^*) + \text{Exp}(t)$
- Carga: $V_{bat} = E_0 - R \cdot i - K \frac{Q_p}{|it| - 0.1 \cdot Q_p} \cdot i^* - K \frac{Q_p}{Q_p - it} \cdot it + \text{Exp}(t)$

Todos los modelos anteriores tienen ciertas limitantes y están basados en ciertas consideraciones, como:

3.7.6.4. Consideraciones del modelo

- La resistencia interna se considera constante durante los ciclos de carga y descarga y no varía con la amplitud de la corriente.
- Los parámetros de los modelos se obtienen de las curvas características de descarga y se suponen las mismas para el ciclo de carga.
- Los ciclos de carga y descarga se consideran isotérmicos.
- No se considera el efecto memoria.

En el presente trabajo, solamente se utilizarán las ecuaciones del modo de descarga para realizar la simulación del consumo de la energía almacenada en cada tipo de baterías.

3.7.7. Obtención de los parámetros

Una característica importante de este modelo propuesto es la simplicidad con la que se pueden obtener los parámetros del modelo dinámico, debido a que no es necesario realizar mediciones experimentales a la batería para obtenerlos, pues solamente se requieren 3 puntos de la curva característica de descarga proporcionada por el fabricante como la mostrada en la figura (3.10). Tales puntos son el valor del voltaje máximo de carga (V_{full}), el valor del voltaje y de la capacidad de la batería al final de la zona exponencial (V_{exp} , Q_{exp}) y el valor del voltaje y de la capacidad de la batería al final de la zona nominal (V_{nom} , Q_{nom}), que es la zona donde el voltaje comienza a decrecer abruptamente. Generalmente el fabricante también proporciona el valor de la resistencia interna. Con estos tres puntos, usando (3.12), es posible resolver (3.17, 3.18 y 3.19). Nótese que la curva proporcionada por el fabricante es obtenida a corriente constante (generalmente a $0. C$). Para el voltaje máximo de carga, la carga extraída de la batería es 0, es decir ($it = 0$) y la corriente filtrada i^* es 0, debido a que en ese momento el escalón de corriente ha iniciado:

$$V_{full} = E_0 - R \cdot i + A \quad (3.17)$$

Para el final de la zona exponencial, el factor B puede ser obtenido aproximándolo a $3/Q_{exp}$ debido a que la corriente del término exponencial es casi 0 (5%) después de 3 constantes de tiempo. La corriente filtrada i^* es igual a i porque la corriente en estado estable es:

$$V_{exp} = E_0 - K \frac{Q_p}{Q_p - Q_{exp}} \cdot (Q_{exp} + i) - R \cdot i + A \exp\left(\frac{-3}{Q_{exp}} \cdot Q_{exp}\right) \quad (3.18)$$

El voltaje de la zona nominal está dado por:

$$V_{nom} = E_0 - K \frac{Q_p}{Q_p - Q_{nom}} \cdot (Q_{nom} + i) - R \cdot i + A \exp\left(\frac{-3}{Q_{exp}} \cdot Q_{nom}\right) \quad (3.19)$$

Finalmente, la constante de tiempo de la corriente filtrada i^* no está dada en la tabla de datos del fabricante. Sin embargo, datos experimentales han mostrado

una constante de tiempo con valor cercano a los 30 segundos para los 4 tipos de baterías abordados en este trabajo. Los parámetros utilizados en estos modelos se pueden observar en la tabla 3.6.

Tabla 3.6: Parámetros estándar en los 4 tipos de baterías.

Tipo Parámetros	Plomo-ácido 12V 7.2Ah	NiCad 1.2V 2.3Ah	NiMH 1.2V 6.5Ah	Li – Ion 3.3V 2.3Ah
$E_0 (V)$	12.4659	1.2705	1.2816	3.366
$R (\Omega)$	0.04	0.003	0.002	0.01
$K (\Omega \text{ ó } V/(Ah))$	0.047	0.0037	0.0014	0.0076
$A (V)$	0.83	0.127	0.111	0.26422
$B (Ah)^{-1}$	125	4.98	2.3077	26.5487

Capítulo 4

Modelado del tren de potencia

4.1. Introducción

El tren de potencia de un vehículo eléctrico es el conjunto de elementos que transforman la energía eléctrica almacenada en el banco de baterías en la energía mecánica que le proporciona el movimiento a éste. Los elementos que lo conforman son el inversor acoplado al banco de baterías, el inversor acoplado al motor eléctrico y este último al diferencial. Aunque el diferencial no es una parte eléctrica, se considera dentro del tren de potencia debido a que es el eslabón entre la parte eléctrica y la mecánica que propicia el movimiento angular a las ruedas del vehículo. En la figura 4.1 se puede apreciar de forma general esquemática como está conformado el tren de potencia, además de otros elementos periféricos como el sistema auxiliar para accesorios y señalización. En la siguiente sección se

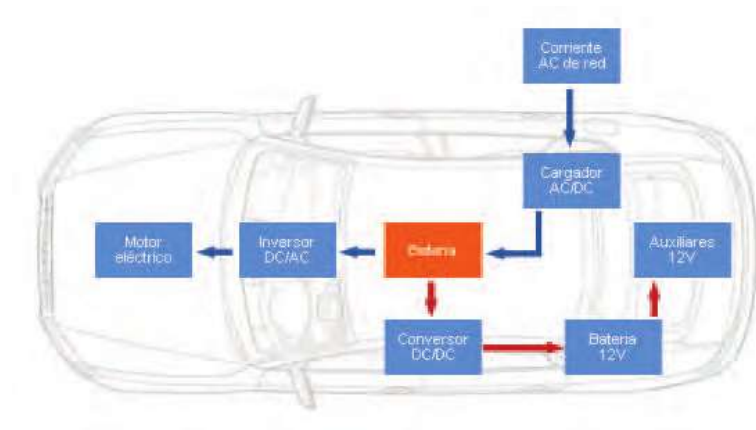


Figura 4.1: Componentes del tren de potencia del vehículo eléctrico así como los periféricos.

abordarán los modelos de los elementos del tren de potencia sin considerar los periféricos debido a que solamente son accesorios. En la figura 4.2 se puede apreciar de forma simplificada los elementos del tren de potencia de un vehículo eléctrico básico. La forma en que reciben las ruedas el movimiento angular del motor puede realizarse colocando motores directamente en cada una de éstas, en el eje delantero, en el eje trasero, o en un motor central que a través del diferencial reparte

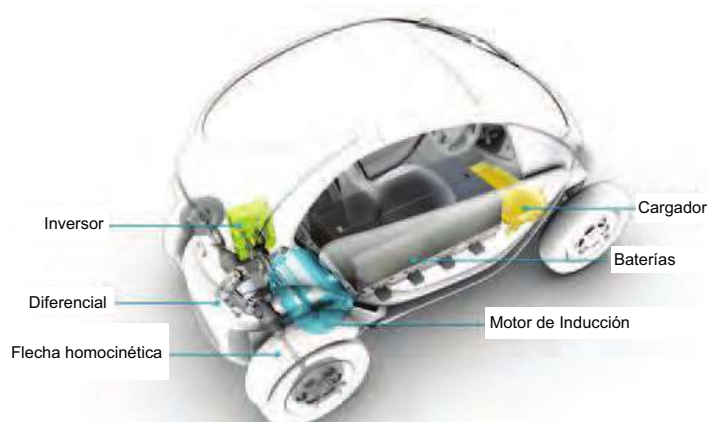


Figura 4.2: Elementos del tren de potencia de un vehículo eléctrico básico.

el movimiento angular a dos ruedas. La última configuración mencionada recibe el nombre de sistema de propulsión en serie y es la que por su sencillez y economía se abordará en este trabajo. En la figura 4.3 se muestra un sistema de propulsión tipo serie y los elementos que lo conforman.

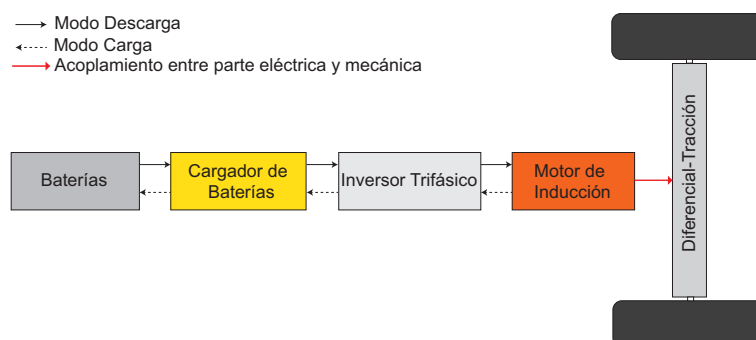


Figura 4.3: Sistema de propulsión tipo serie.

4.2. Modelo del motor de inducción.

Los sistemas de propulsión eléctrica para vehículos terrestres generalmente caen en el rango de potencias entre 10 y 100 kW o más, dependiendo de la configuración. Hasta el momento no existe un consenso internacional sobre cuál es la máquina idónea para un sistema de tracción en un vehículo, por ejemplo el MI (Motor de inducción) es preferida en América y Europa, mientras los investigadores japoneses se inclinan por el uso de la MSE (máquina síncrona sin escobillas), [29]. En general, las especificaciones que se requieren del motor de tracción son: alta densidad de potencia, masa y volumen pequeño, gran par, alta eficiencia, facilidad de control, hardware y software sencillos, bajo mantenimiento y disponibilidad en el mercado y costo razonable. El motor de inducción cumple con los requerimientos deseados como motor de tracción y prueba de ello es que en la actualidad es usado en una amplia variedad de aplicaciones con el objeto de convertir la potencia eléctrica en trabajo mecánico. Por los motivos anteriores, para el modelo del motor de tracción se tomará un MI con las siguientes consideraciones: máquina de inducción

trifásica, simétrica, de cuatro polos, conectada en estrella. Los devanados del estator son idénticos, están distribuidos en forma senoidal, desplazados 120° eléctricos entre sí, con un número equivalente de vueltas N_s , y resistencia R_s . Para este caso, se representan los devanados equivalentes a los del estator, con N_s vueltas y resistencia R_s . Los devanados equivalentes del rotor están representados con un número de vueltas equivalentes N_r y resistencia R_r , [30]. Se parte de la suposición de que la máquina de inducción es un circuito magnético lineal. Es decir, la permeabilidad del núcleo se considera infinita y, además, la saturación, las pérdidas en el hierro y el efecto de las ranuras son despreciadas. El esquema fundamental de los devanados del motor de inducción considerado se muestra en la figura 4.4, en el que los devanados del estator están representados por los circuitos $as-as'$, $bs-bs'$ y $cs-cs'$. Los devanados del rotor están presentados por $ar-ar'$, $br-br'$ y $cr-cr'$. Cada devanado produce un flujo magnético y cada flujo magnético se representa por los ejes magnéticos as , bs , cs , ar , br y cr . θ_r representa el ángulo comprendido entre los ejes magnéticos del rotor y los del estator y ω_r representa la velocidad angular del rotor. Ahora, para obtener las ecuaciones que modelan

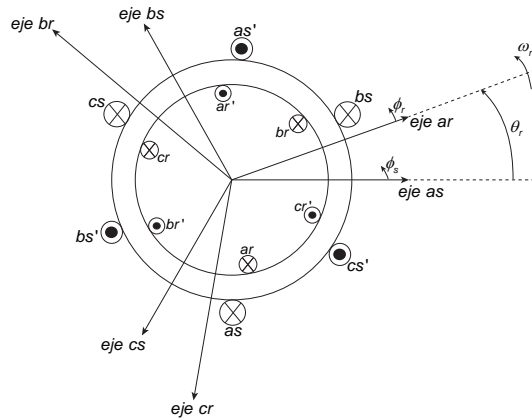


Figura 4.4: Devanados del estator y del rotor del MI.

el MI, se tomará como apoyo el diagrama eléctrico de la máquina de inducción representado en la figura 4.5. A la izquierda de la figura, se encuentra el diagrama del devanado del estator y a la derecha el del rotor con cierta inclinación, para mostrar el defasamiento existente entre ambos devanados. Del diagrama eléctrico

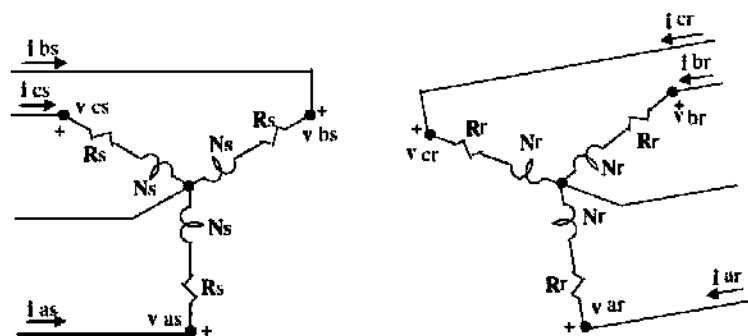


Figura 4.5: Diagrama eléctrico de los devanados del estator y del rotor del MI.

anterior consultado en [30], las ecuaciones del voltaje de la MI son:

$$v_{as} = r_s i_{as} + \frac{d\lambda_{as}}{dt} \quad (4.1)$$

$$v_{bs} = r_s i_{bs} + \frac{d\lambda_{bs}}{dt} \quad (4.2)$$

$$v_{cs} = r_s i_{cs} + \frac{d\lambda_{cs}}{dt} \quad (4.3)$$

$$v_{ar} = r_r i_{ar} + \frac{d\lambda_{ar}}{dt} \quad (4.4)$$

$$v_{br} = r_r i_{br} + \frac{d\lambda_{br}}{dt} \quad (4.5)$$

$$v_{cr} = r_r i_{cr} + \frac{d\lambda_{cr}}{dt} \quad (4.6)$$

Las ecuaciones de los devanados de fase del estator y del rotor, se pueden escribir en forma matricial como:

$$V_{abcs} = R_s \cdot i_{abcs} + p\lambda_{abcs} \quad (4.7)$$

$$V_{abcr} = R_r \cdot i_{abcr} + p\lambda_{abcr} \quad (4.8)$$

donde:

- abc representa las tres fases del devanado del estator.
- s representa parámetros y variables asociados al estator.
- r representa parámetros y variables asociados al rotor.
- p representa el operador de derivación d/dt .
- v representa el voltaje de alimentación.
- R representa la resistencia del devanado.
- i representa la corriente del devanado.
- λ representa los enlaces de flujo.

(4.7) y (4.8) se pueden agrupar en una sola ecuación de la forma siguiente:

$$v = R \cdot i + p\lambda \quad (4.9)$$

donde:

$i = [i_{as} \ i_{bs} \ i_{cs} \ i_{ar} \ i_{br} \ i_{cr}]^T$ representa al vector de corrientes del estator y del rotor,

$$R = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}$$

representa la matriz de resistencias del estator y del rotor,

$v = [v_{as} \ v_{bs} \ v_{cs} \ v_{ar} \ v_{br} \ v_{cr}]^T$ representa al vector de voltajes del estator y del rotor.

Los enlaces de flujo representados por λ para un sistema magnético lineal son de la forma:

$$\lambda = Li \quad (4.10)$$

por lo que, para los devanados del estator y del rotor, son respectivamente:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abc} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abc} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Ahora, las matrices de inductancias para el estator, rotor e inductancias mutuas son respectivamente:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$L_{sr} = [L_{sr}]^T = L_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r & \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_r \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

donde:

L_{ls}	representa la inductancia de dispersión de devanados del estator.
L_{lr}	representa la inductancia de dispersión de devanados del rotor.
L_{ms}	representa la inductancia de magnetización de devanados del estator.
L_{mr}	representa la inductancia de magnetización de devanados del rotor.
L_{sr}	representa la inductancia mutua entre devanados de estator rotor.
$L_{ls} + L_{ms}$	representa la inductancia de propia de devanados del estator.
$L_{lr} + L_{mr}$	representa la inductancia de propia de devanados del rotor.
θ_r	representa la posición angular del rotor.

Las inductancias de magnetización de los devanados de estator y rotor se encuentran definidas en [30], de la siguiente forma:

$$L_{ms} = \frac{N_s^2}{2} \cdot \frac{\pi\mu_0rl}{g} \quad (4.15)$$

$$L_{mr} = \frac{N_r^2}{2} \cdot \frac{\pi\mu_0rl}{g} \quad (4.16)$$

$$L_{ms} = \frac{N_s}{2} \cdot \frac{N_r}{2} \cdot \frac{N_s^2}{2} \cdot \frac{\pi\mu_0rl}{g} \quad (4.17)$$

donde:

- N_s representa el número de vueltas del devanado del estator
- N_r representa el número de vueltas del devanado del rotor.
- μ_0 representa la permeabilidad magnética del entrehierro.
- r representa el radio a la mitad del entrehierro.
- l representa la longitud axial del entrehierro.
- g representa la longitud uniforme del entrehierro.

De (4.10), la derivada de los enlaces del flujo magnético es:

$$\frac{d\lambda}{dt} = \frac{dL}{dt}i + L\frac{di}{dt} \quad (4.18)$$

Al desarrollar el primer término del lado derecho de (4.18) empleando la regla de la cadena, se tiene:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{dL}{d\theta_r} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \quad (4.19)$$

en donde $\frac{d\theta_r}{dt}$ es la velocidad de giro del rotor y está definida como sigue:

$$\frac{d\theta_r}{dt} = n_p\omega_r \quad (4.20)$$

siendo:

- θ_r la posición angular del rotor.
- n_p el número de pares de polos en el devanado del estator.
- ω_r velocidad angular o de giro del rotor expresada en rad/s .

Para el par electromagnético T_e del MI se tiene:

$$T_e = j \left(\frac{2}{n_p} \right) \frac{dw_r}{dt} + T_L \quad (4.21)$$

siendo:

- j la inercia del rotor y en algunos casos de la carga en $kg \cdot m^2$.
- n_p el número de pares de polos del MI.
- ω_r velocidad angular del rotor expresada en rad/s .
- T_L el par de carga expresado en $N \cdot m$.

Hasta ahora, se tiene el modelo del MI y se puede observar que las ecuaciones diferenciales son variantes en el tiempo incluyendo la posición angular, lo cual aumenta la complejidad del modelo y dificulta su análisis y simulación. Para tornar el modelo más sencillo, se realizará una transformación que se abordará en la siguiente subsección.

4.2.1. Ecuaciones del MI en variables del marco de referencia arbitrario.

Para hacer más simple el modelo del MI es necesario aplicar una transformación para referir las variables de la máquina (variables abc) a un marco de referencia que gira a una velocidad angular arbitraria. Tal transformación de variables se

puede realizar según [30], mediante:

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abc} \quad (4.22)$$

donde

$$(\mathbf{f}_{qd0s})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{0s}] \quad (4.23)$$

$$(\mathbf{f}_{abc})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (4.24)$$

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \text{sen}\theta & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad (4.26)$$

y para la la transformación inversa se tiene:

$$(\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \text{sen}\theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \text{sen}(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

En las ecuaciones anteriores, f puede representar cualquier sistema trifásico de variables eléctricas como voltajes, corrientes, enlaces de flujo, defasadas 120° eléctricos entre sí. El superíndice T denota la transpuesta de una matrix. El subíndice s indica las variables, parámetros y transformación asociada con circuitos estacionarios. abc denota el sistema en variables originales y $dq0$ al sistema en variables resultantes. El marco de referencia puede rotar a cualquier velocidad, ya sea constante, variable o puede permancer estacionario. Usando la información previa en este capítulo y la información contenida en [31], las ecuaciones de voltaje en el marco de referencia arbitrario, son:

$$\mathbf{V}_{qd0s} = \mathbf{r}_s \mathbf{i}_{qd0s} + \omega \boldsymbol{\lambda}_{dq} + p \boldsymbol{\lambda}_{qd0s} \quad (4.28)$$

$$\mathbf{V}'_{qd0r} = \mathbf{r}'_r \mathbf{i}'_{qd0r} + (\omega - \omega_r) \boldsymbol{\lambda}'_{dqr} + p \boldsymbol{\lambda}'_{qd0r} \quad (4.29)$$

donde:

$$(\boldsymbol{\lambda}_{qd0s})^T = [\lambda_{ds} \quad -\lambda_{qs} \quad 0] \quad (4.30)$$

$$(\boldsymbol{\lambda}'_{qd0r})^T = [\lambda'_{dr} \quad -\lambda'_{qr} \quad 0] \quad (4.31)$$

Ahora, para determinar las expresiones de los enlaces de flujo en el marco de referencia arbitrario es necesario sustituir las ecuaciones de transformación en las ecuaciones de los enlaces de flujo expresadas en variables abc , (ver [30]), obteniendo:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qd0s} \\ \lambda'_{qd0r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} & \mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_r)^{-1} \\ \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} & \mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_r)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qd0s} \\ i'_{qd0r} \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

donde

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}_s (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

siendo $L_M = \frac{3}{2} L_{ms}$.

Debido a que \mathbf{L}'_r es similar en forma a L_s se tiene que:

$$\mathbf{K}_r \mathbf{L}'_r (\mathbf{K}_r)^{-1} = \begin{bmatrix} L'_{lr} + L_M & 0 & 0 \\ 0 & L'_{lr} + L_M & 0 \\ 0 & 0 & L'_{lr} \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Además:

$$\mathbf{K}_s \mathbf{L}'_{sr} (\mathbf{K}_r)^{-1} = \mathbf{K}_r (\mathbf{L}'_{sr})^T (\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_M & 0 & 0 \\ 0 & L_M & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Las ecuaciones de voltaje a menudo son escritas en su forma expandida. De (4.28) y (4.29) se obtiene:

$$v_{qs} = r_s i_{qs} + \omega \lambda_{ds} + p \lambda_{qs} \quad (4.36)$$

$$v_{ds} = r_s i_{ds} + \omega \lambda_{qs} + p \lambda_{ds} \quad (4.37)$$

$$v_{0s} = r_s i_{0s} + p \lambda_{0s} \quad (4.38)$$

$$v'_{qr} = r'_r i'_{qr} + (\omega - (\omega_r) \lambda'_{dr} + p \lambda'_{qr} \quad (4.39)$$

$$v'_{dr} = r'_r i'_{dr} + (\omega - (\omega_r) \lambda'_{qr} + p \lambda'_{dr} \quad (4.40)$$

$$v'_{0r} = r'_r i'_{0r} + p \lambda'_{0r} \quad (4.41)$$

Sustituyendo (4.33), (4.34) y (4.35) en (4.32) se obtienen las expresiones para los enlaces de flujo. En su forma expandida, se tiene:

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (4.42)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (4.43)$$

$$\lambda_{0s} = L_{ls} i_{0s} \quad (4.44)$$

$$\lambda'_{qr} = L'_{lr} i'_{qr} + L_M (i_{qs} + i'_{qr}) \quad (4.45)$$

$$\lambda'_{dr} = L'_{lr} i'_{dr} + L_M (i_{ds} + i'_{dr}) \quad (4.46)$$

$$\lambda'_{0r} = L'_{lr} i'_{0r} \quad (4.47)$$

Todos los elementos de las ecuaciones de voltaje y enlaces de flujo se pueden visualizar en la figura 4.6.

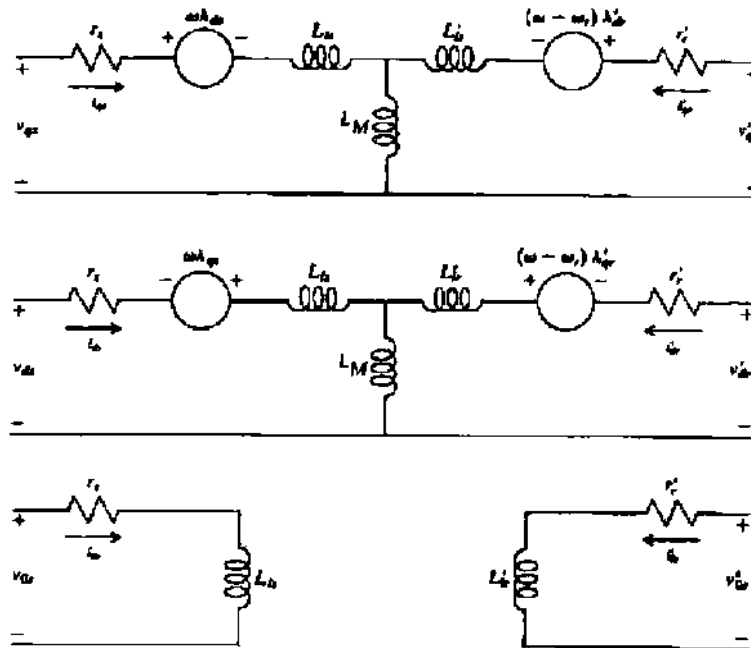


Figura 4.6: Circuitos equivalentes para el marco de referencia arbitrario de un motor de inducción simétrico trifásico.

Para la simulación del MI en Simulink, se utilizará el bloque de la máquina asíncrona que tiene incluidas en su programación las ecuaciones del modelo de la MI antes descritas en este capítulo, así como las ecuaciones para la transformación de variables abc a $dq0$. La forma gráfica de este bloque es la aparece en la figura 4.7

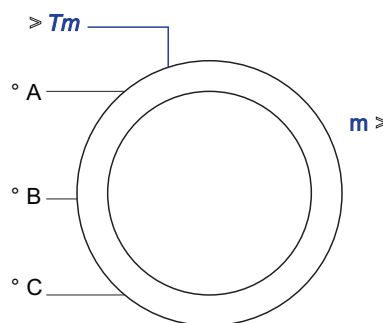


Figura 4.7: Bloque de máquina asincrona utilizado en Simulink.

4.3. Inversor trifásico.

Debido a que una de las formas de propulsión de los vehículos eléctricos es a través de motores de inducción, es necesario convertir la naturaleza de la fuente de voltaje de CD (banco de baterías) en una fuente de CA. Los convertidores de

CD a CA son conocidos como inversores y su función consiste en transformar el voltaje de CD que reciben y entregar un voltaje simétrico de CA con la magnitud y la frecuencia que sea necesaria, las cuales pueden ser tanto fijas como variables. Un inversor trifásico está compuesto por seis interruptores y un punto común de alimentación de CD como se muestra en la figura 4.8. La modulación por ancho de pulso (PWM por sus siglas en inglés), es una técnica que proporciona una forma de voltaje arbitraria a través del ajuste de las funciones de encendido y apagado de los interruptores. De forma física, los interruptores IGBTs son los más utilizados, seguidos de los MOSFETs que son empleados a bajo voltaje y alta frecuencia de interrupción cercana a los $30kHz$. Nótese en la figura del inversor que cada interruptor tiene un diodo en antiparalelo para propiciar las trayectorias de conmutación para cargas inductivas. La topología del inversor que aparece en

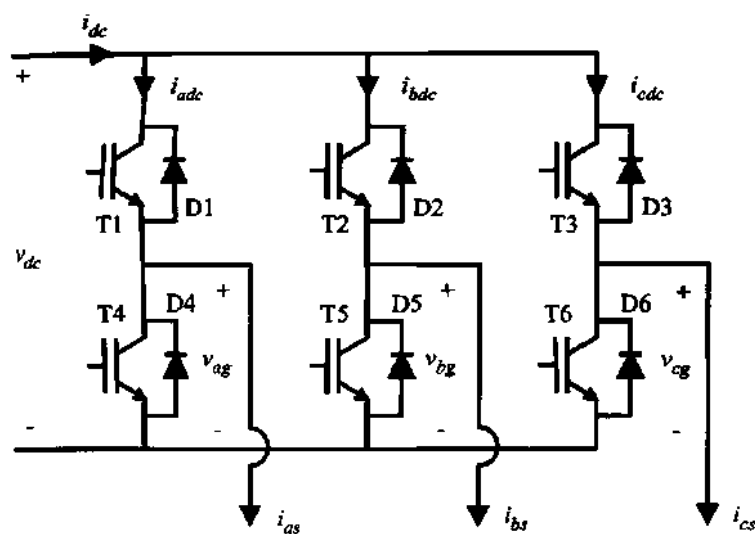


Figura 4.8: Topología de un inversor trifásico.

la figura 4.8 es la conexión en paralelo de tres inversores monofásicos cuyas señales de compuerta deben adelantarse 120° uno con respecto al otro con el objeto de obtener voltajes trifásicos balanceados, [32].

4.3.1. Modulación senoidal del ancho de pulso.

Existe un método de modulación comúnmente aplicado en la industria conocido como Modulación Senoidal del Ancho de Pulso (SPWM por sus siglas en inglés). Este método se describe en [33]. Parecido a los inversores monofásicos, el objetivo en inversores trifásicos modulados por el ancho de pulsos es formar y controlar los voltajes trifásicos de salida en magnitud y frecuencia a partir de un voltaje de CD de entrada esencialmente constante. A fin de obtener voltajes de salida trifásicos balanceados, se compara una misma forma de onda de voltaje triangular con tres voltajes de control sinusoidales que están defasados 120° eléctricos, tal como se puede apreciar en la figura 4.9. Una onda portadora se compara con la señal de referencia correspondiente a una fase, a fin de generar las señales de excitación. Para generar el voltaje de salida, como aparece en la figura 4.9, se tiene la condición de que dos dispositivos de conmutación de una misma rama no pueden conducir

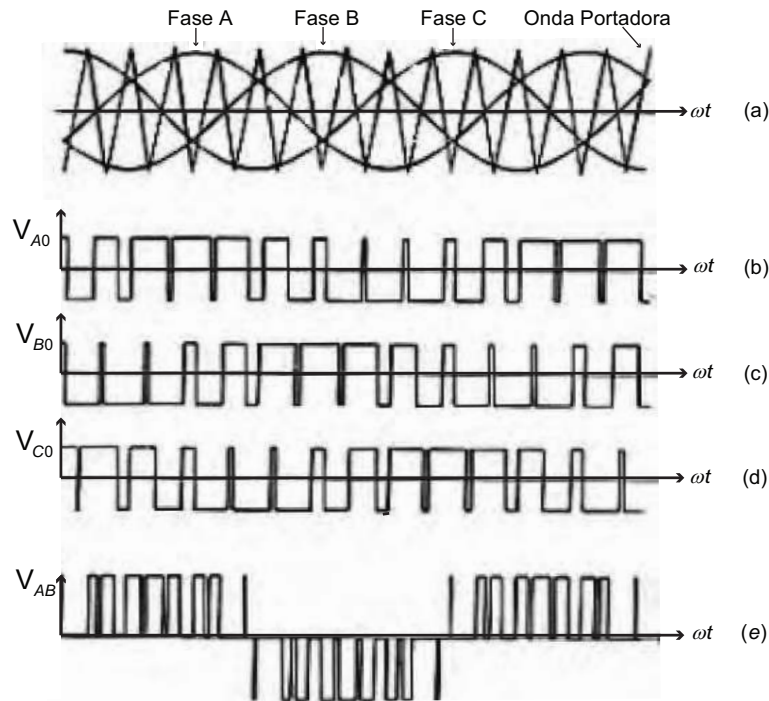


Figura 4.9: Modulación senoidal por ancho de pulso para un inversor trifásico. a) Voltaje de referencia y voltaje de la portadora. b),c),d) Voltajes de disparo de compuertas. e) Voltaje de línea.

simultáneamente. Para realizar la simulación del inversor, se utilizará el bloque del Inversor IGBT encontrado en la librería Simscape-SimPowerSystems-Power Electronics de Simulink. Tal bloque aparece en la figura 4.10 y se puede apreciar en que el lado derecho tiene la entrada de alimentación de CD, mientras que por el lado izquierdo tiene una entrada g de pulsos provenientes del control vectorial para generar los voltaje de salida de CA de las tres fases A,B y C. Como ya se mencionó, el inversor requiere de una señal de pulsos enviada a éste por el controlador, el cual funciona bajo el principio del control de campo orientado, que será abordado a continuación.

4.4. Controlador.

El motor de inducción está alimentado por un inversor PWM controlado por corriente, el cual funciona como una fuente de corriente sinusoidal de tres fases. La velocidad angular del motor ω se compara con la velocidad angular de referencia ω^* y el error es procesado por el controlador de velocidad para producir un comando de par T_e^* . Como ya se mencionó con anterioridad, el flujo magnético en el rotor y el par pueden ser controlados de forma independiente por medio de la corriente de estator i_{ds} del eje directo d y la corriente i_{qs} del eje en cuadratura q , como se puede apreciar en la figura 4.11. La corriente de referencia del estator i_{qs}^* del eje de cuadratura es calculada del par de referencia T_e^* de la siguiente manera:

$$i_{qs}^* = \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{p} \cdot \frac{L_r}{L_m} \cdot \frac{T_e^*}{|\psi_r|_{est}} \quad (4.48)$$

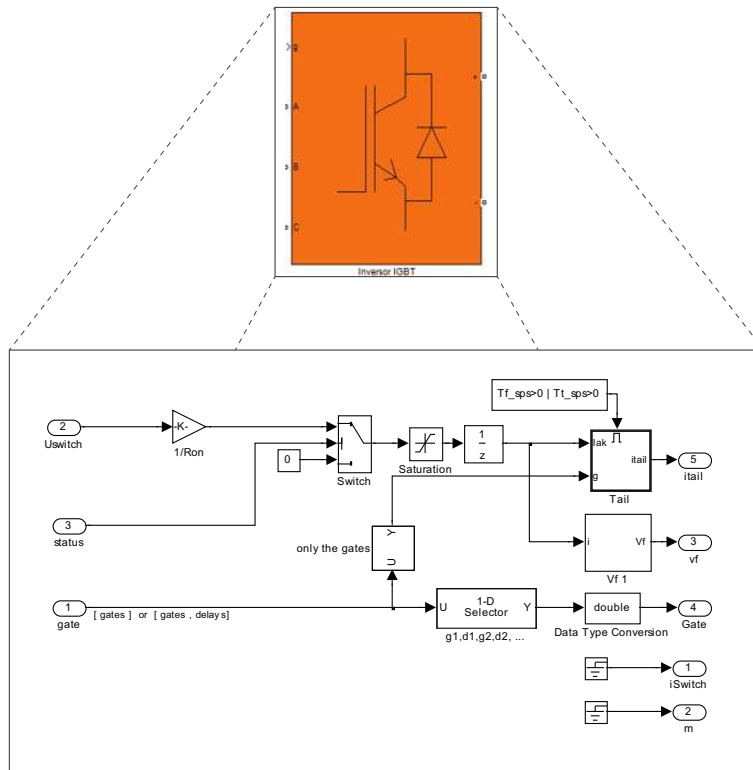


Figura 4.10: Inversor IGBT.

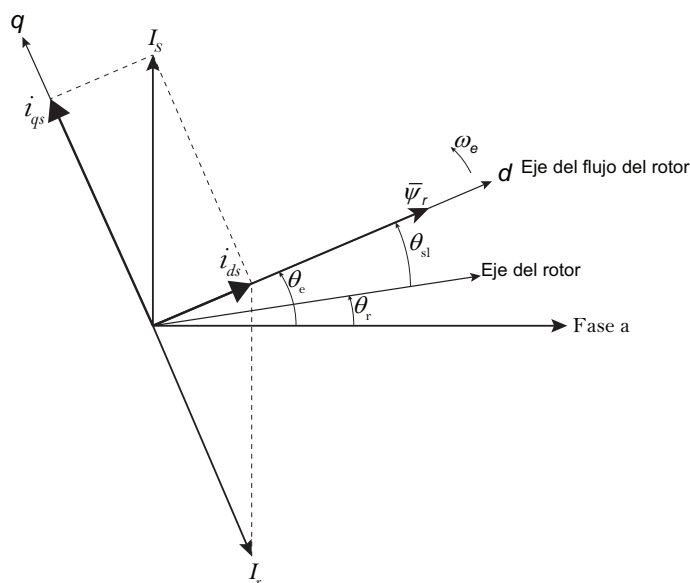


Figura 4.11: Principio de funcionamiento del Control de Campo Orientado.

donde L_r es la inductancia del rotor, L_m es la inductancia mutua y $|\psi_r|_{est}$ es los enlaces de flujo estimados del rotor dados por:

$$|\psi_r|_{est} = \frac{L_m \cdot i_{ds}}{1 + \tau_r \cdot s} \quad (4.49)$$

Simulación del vehículo eléctrico

5.1. Introducción

Una vez que fueron abordados los elementos que intervienen en el tren de potencia, así como los diferentes tipos de baterías, se procedió a realizar el diagrama de bloques en lazo cerrado del sistema del vehículo eléctrico utilizando Simulink, para simular su comportamiento al utilizar los cuatro tipos de baterías descritos en el capítulo tres y poder así visualizar su comportamiento de forma gráfica. El objetivo es, utilizando los componentes ya desarrollados en Simulink, hacer la analogía de que son los componentes que se pueden adquirir en el mercado, lo cual es cierto, quedando por realizar tanto en Simulink como en la realidad el adecuado acoplamiento entre los elementos indicados. En la siguiente sección se muestra el diagrama de bloques de lazo cerrado en donde se puede apreciar dicho acoplamiento.

5.2. Diagrama de bloques de lazo cerrado del sistema

En la figura 5.1 se pueden observar todos los elementos antes descritos que intervienen en el modelo del vehículo eléctrico construido en Simulink, en la cual en la parte superior izquierda aparecen las fuerzas involucradas en la dinámica del vehículo, así como en la sección central aparecen los elementos del tren motriz como lo son el motor de inducción, el controlador y la batería. En la parte inferior derecha aparecen los coeficientes de Peukert para los diferentes tipos de baterías que fueron descritos en el capítulo 3, los cuales fueron seleccionados uno a uno para cada tipo de batería en la simulación. En la siguiente sección se presentarán los resultados del comportamiento del MI y de los bancos de baterías al realizar una prueba que consta en acelerar el vehículo a fondo, es decir a T_{max} hasta alcanzar una velocidad de $80km/hr$.

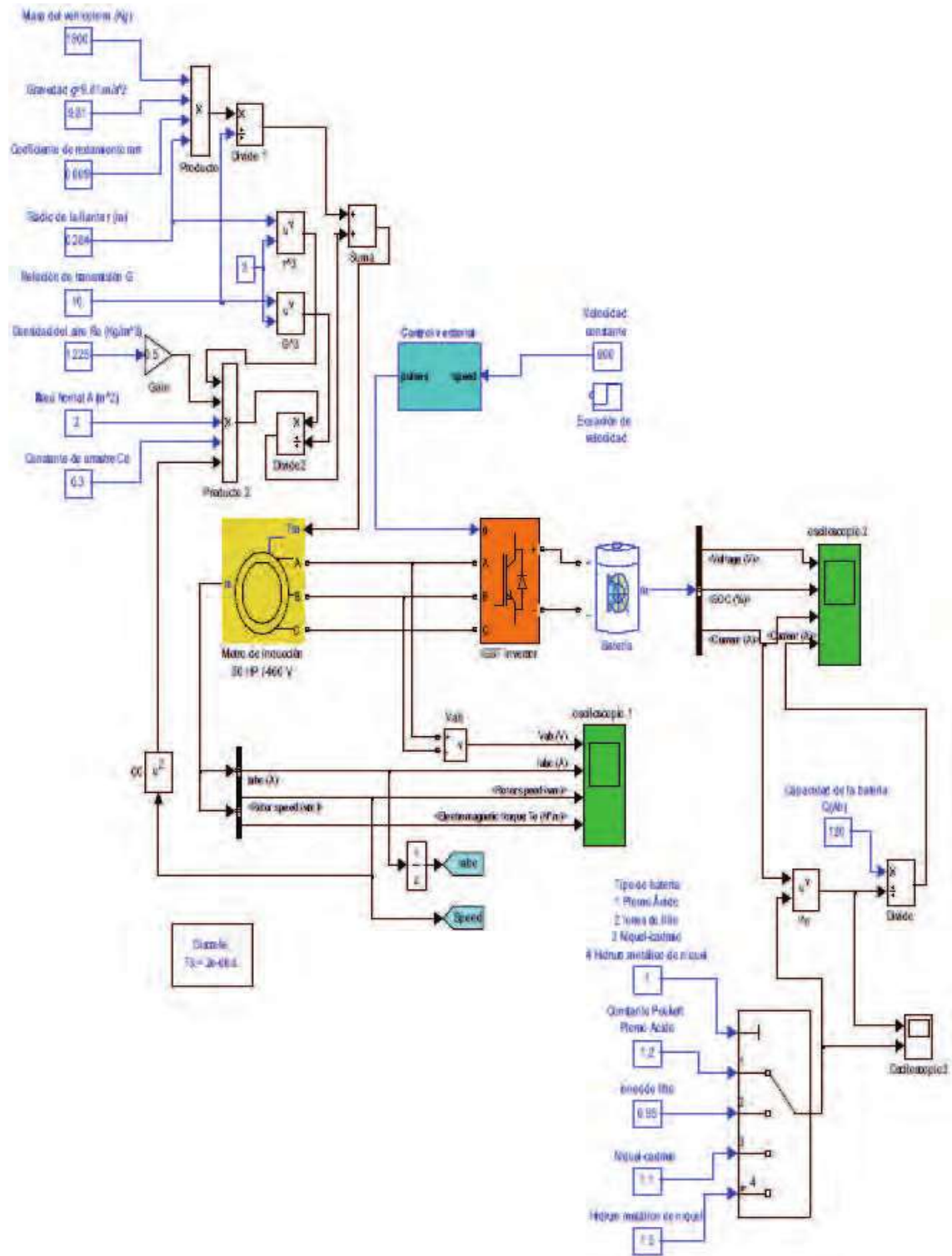


Figura 5.1: Diagrama de bloques de lazo cerrado del modelo del vehículo eléctrico.

5.3. Simulaciones

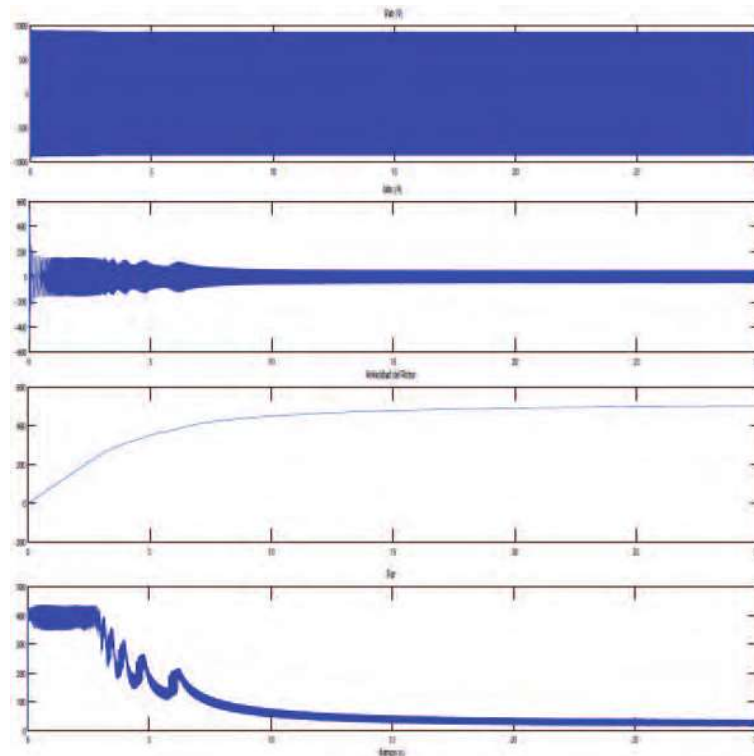


Figura 5.2: Comportamiento dinámico del MI al ser alimentado por un banco de baterías de plomo-ácido.

En la figura 5.2 se puede observar el comportamiento dinámico del motor de inducción al ser alimentado por un banco de baterías de plomo-ácido. El MI es el que produce el desplazamiento lineal del vehículo al estar conectado al diferencial de tracción a través de la relación de transmisión. La simulación se realizó acelerando el vehículo a par máximo hasta llegar a un valor de velocidad preestablecido, pudiéndose observar en la primera gráfica el comportamiento del voltaje de alimentación v_{ab} proporcionado por el inversor, el cual se mantiene estable y sin abatimientos que impidan un buen desempeño en el MI. En la segunda gráfica se observa la corriente demandada por el MI en esta prueba y se puede apreciar la amplitud máxima de la corriente al inicio y que posteriormente atraviesa por un transitorio, hasta llegar al estado estable una vez que el vehículo alcanza la velocidad solicitada. A pesar de los transitorios en la forma de onda de la corriente de alimentación, el MI al ser alimentado por los valores rms se comporta de forma característica en este tipo de pruebas a Par máximo. En la tercera gráfica se aprecia el incremento de la velocidad angular del rotor del MI conforme transcurre la prueba, hasta desarrollar la velocidad angular que le permite al auto llegar a la velocidad lineal solicitada. En la cuarta gráfica se ve claramente como el MI se pone en funcionamiento a Par máximo y disminuye su valor conforme la velocidad angular del rotor aumenta, pasando por el transitorio debido a las oscilaciones en la corriente pero disminuyendo de forma gradual conforme transcurre el tiempo de simulación de la prueba hasta llegar a la velocidad solicitada.

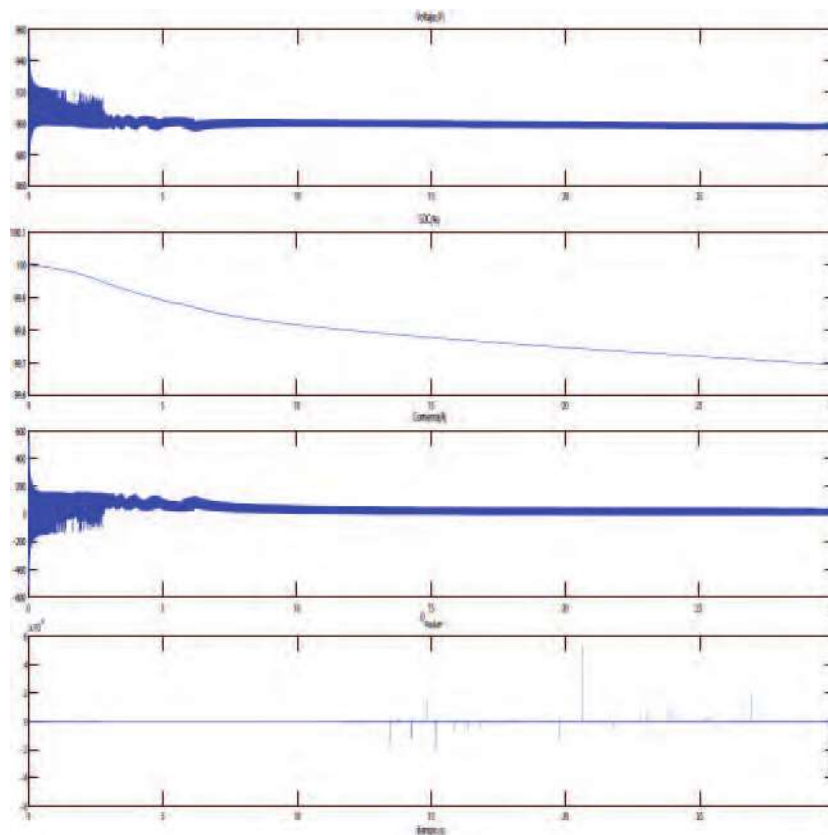


Figura 5.3: Comportamiento dinámico del banco de baterías de plomo-ácido.

En la figura 5.3, se presenta la dinámica del banco de baterías al alimentar el MI en una prueba de aceleración lineal del vehículo eléctrico. Al inicio de la primera gráfica se observa un comportamiento oscilatorio en el voltaje de la batería debido a la demanda máxima de corriente en este punto, pero sin observarse un abatimiento importante que produzca un funcionamiento anormal de la MI que no le permita revolucionar hasta la velocidad angular solicitada. En la segunda gráfica se presenta el estado de carga de la batería, observándose en ésta al inicio de la descarga un decremento exponencial característico de este tipo de batería, pero que conforme transcurre el tiempo de la simulación disminuye la pendiente de la curva de descarga debido a la disminución de la demanda de corriente conforme transcurre la prueba y posteriormente disminuye el SOC pero más lentamente, permitiéndole al vehículo funcionar de manera satisfactoria durante un uso normal urbano. En la tercer gráfica se aprecia el comportamiento de la corriente de la batería, observándose el transitorio al inicio de la prueba y la disminución de la amplitud de la corriente conforme la velocidad angular del MI llega al valor solicitado. En la cuarta gráfica se observa el comportamiento de la capacidad de Peukert, y al iniciar la prueba con el 100 % de carga, la batería se comporta totalmente estable, pero conforme transcurre el tiempo, las reacciones que se producen al interior de ésta conforme se le demanda corriente se hacen más evidentes, pero aún así, la batería tiene un buen desempeño indicado de forma más tangible por el SOC.

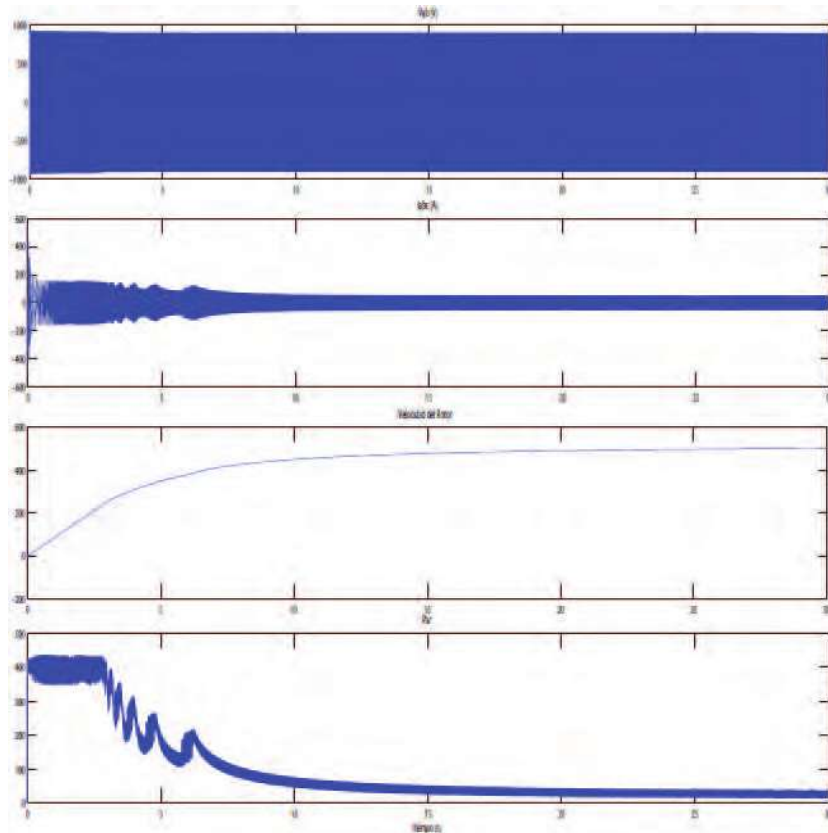


Figura 5.4: Comportamiento dinámico del MI al ser alimentado por un banco de baterías de NiCad.

En la figura 5.4 se puede observar el comportamiento dinámico del motor de inducción al ser alimentado por un banco de baterías de NiCad. La simulación se realizó de forma idéntica a la practicada con el banco de baterías de plomo-ácido para poder observar las diferencias de comportamiento entre un tipo de baterías y otro. Se puede observar en la primer gráfica que los resultados en la alimentación del voltaje v_{ab} son casi iguales a los obtenidos con el banco de baterías de plomo-ácido. De igual forma la gráfica de la corriente demandada por el MI es muy parecida y muestra también las mismas características típicas de la demanda de corriente de un motor de inducción sometido a determinada aceleración angular hasta alcanzar una velocidad angular determinada. La tercer gráfica de la velocidad angular del rotor del MI también presenta los mismos resultados que los obtenidos con el banco de baterías de plomo-ácido. La cuarta gráfica presenta el mismo comportamiento del Par en el MI que el obtenido con las baterías de plomo-ácido. De forma general se puede decir que los resultados fueron casi iguales, pudiéndose explicar esa pequeña diferencia con la siguiente gráfica del comportamiento de las baterías de NiCad.

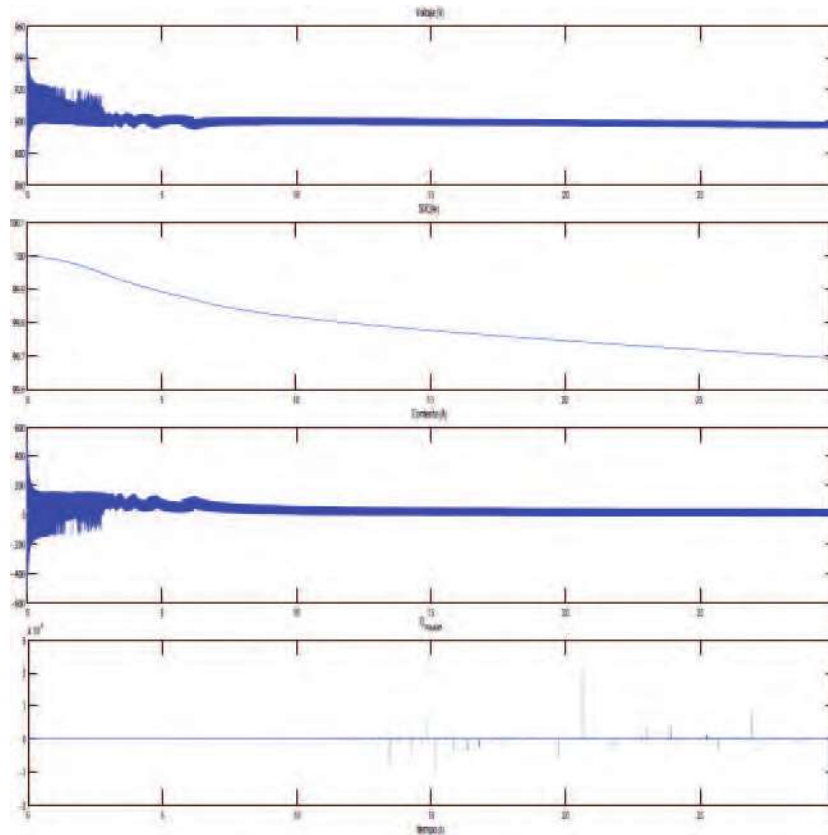


Figura 5.5: Comportamiento dinámico del banco de baterías de NiCad.

Observando los resultados gráficos en la figura 5.5 de la dinámica de las baterías de NiCad comparados con las de plomo-ácido, se podría decir que no presentan diferencia alguna en el comportamiento del voltaje, la corriente y el estado de carga. Pero si se observa con cuidado la cuarta gráfica del comportamiento de la capacidad de Peukert, se pueden apreciar pequeñas diferencias en su desempeño, debidas a que los reactivos químicos no son los mismos, pero se comportan de una forma muy parecida al menos en esta prueba.

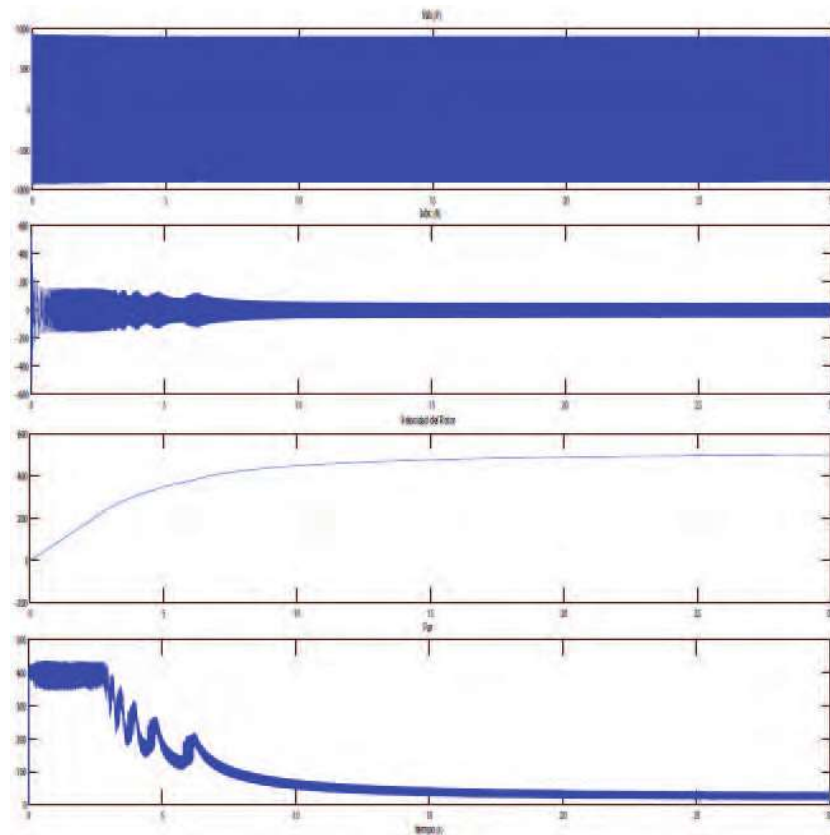


Figura 5.6: Comportamiento dinámico del MI al ser alimentado por un banco de baterías de NiMH.

En la figura 5.6 se puede observar el mismo comportamiento del voltaje y corriente de alimentación, así como el desempeño de la velocidad angular del rotor del MI y del Par proporcionado por éste siendo alimentados por un banco de baterías de hidrógeno metálico de níquel en comparación con las otras dos tecnologías anteriores. Al igual que en el caso anterior, podría decirse que las gráficas son casi iguales, pero para poder apreciar la diferencia entre éstos, es necesario observar la siguiente gráfica.

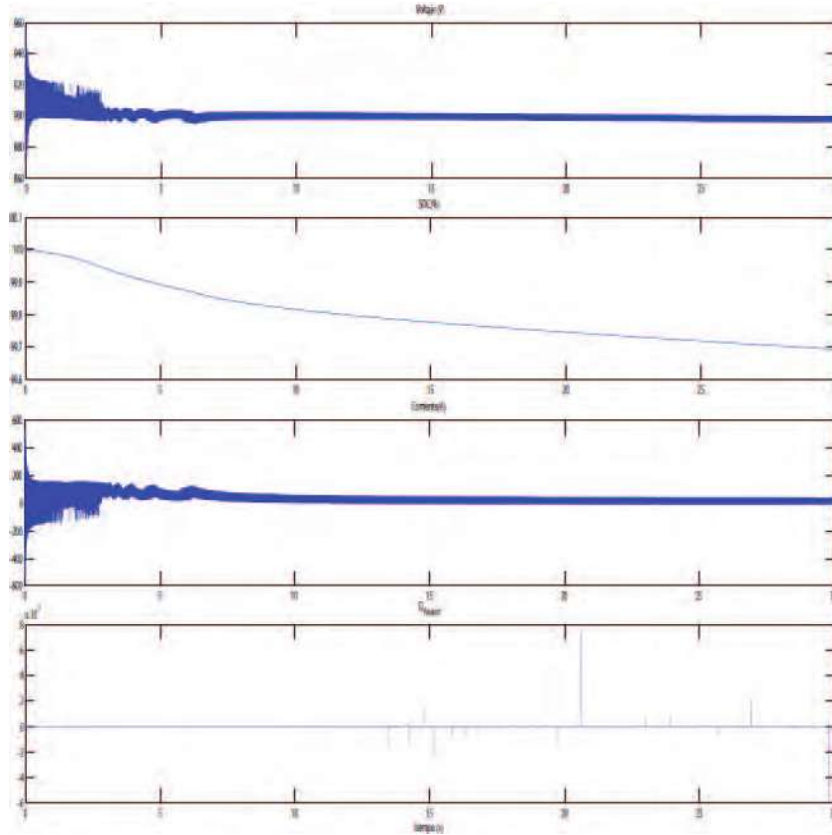


Figura 5.7: Comportamiento dinámico del banco de baterías de NiMH.

En la figura 5.7, Los resultados del comportamiento del voltaje de la batería, la corriente y el estado de carga de ésta al ser sometida a la misma prueba, son casi los mismo, pero al igual que en la comparación anterior, la capacidad de Peukert presenta pequeñas diferencias al transcurrir la prueba. Sin embargo también no influyen en los resultados obtenidos al realizar la misma prueba de aceleración a par máximo con esta tecnología.

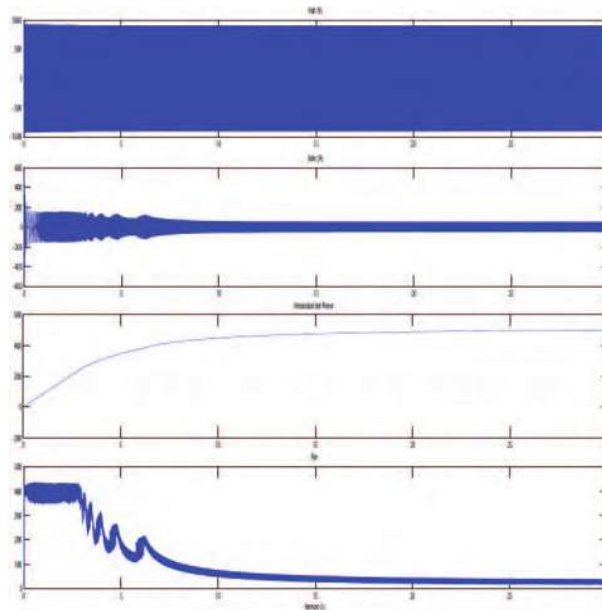


Figura 5.8: Comportamiento dinámico del MI al ser alimentado por un banco de baterías de Li-Ion.

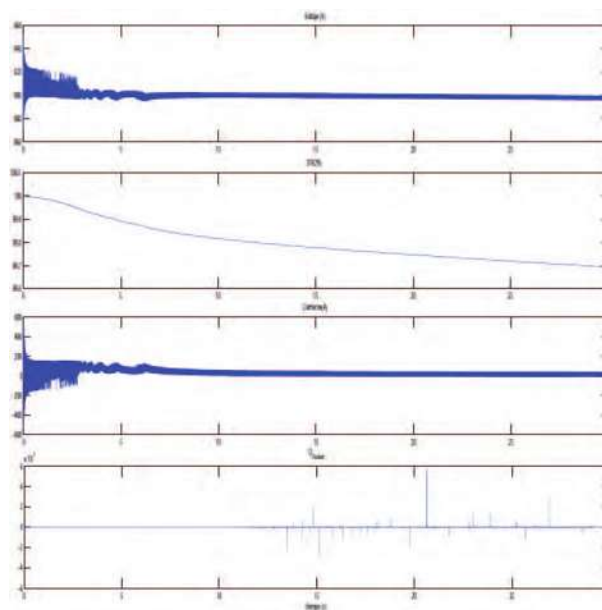


Figura 5.9: Comportamiento dinámico del banco de baterías de Li-Ion.

La figura 5.8 muestra los mismos resultados de las tres comparaciones anteriores entre las baterías de plomo-ácido, NiCad y NiMH. Las tres primeras gráficas de la figura 5.9, al igual que los casos anteriores, son casi las mismas y al igual, en este caso la capacidad de Peukert presentó pequeñas diferencias respecto de las demás.

Debido a que las diferencias en las gráficas anteriores es poco notable, a continuación se muestran las diferencias entre cada tipo de batería en cuanto a capacidad y autonomía expresada en tiempo se refiere, producto de la anterior simulación.

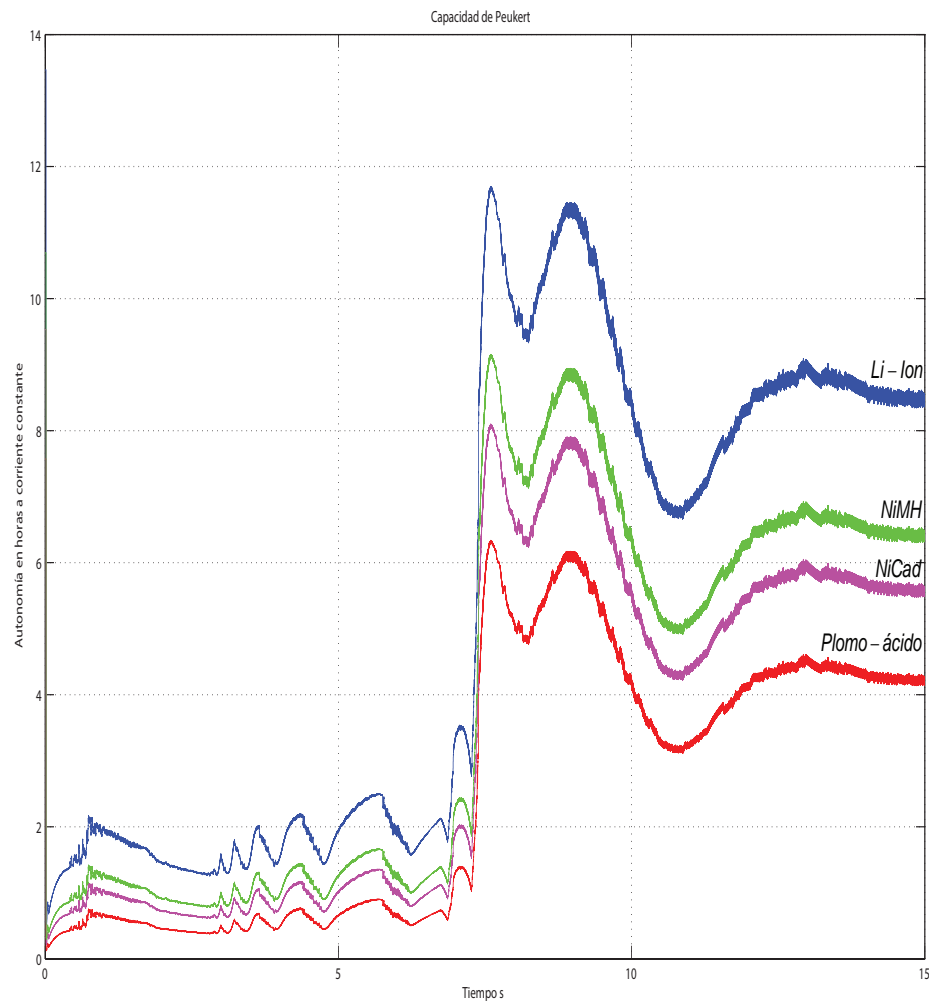


Figura 5.10: Comportamiento de la predicción de la capacidad de Peukert.

Como se puede apreciar en la figura 5.10, el comportamiento de los cuatro tipos de baterías en la prueba realizada es el mismo, pero se puede apreciar que la predicción de la capacidad sí varía, y se comprueba que la batería de plomo-ácido es la que presenta una menor capacidad, seguida de la de NiCad, después la batería de NiMH y con la mejor capacidad la batería de Li-Ion.

Conclusiones y trabajos futuros

6.1. Conclusiones

Se ha realizado el modelado y la simulación del sistema de potencia de un vehículo eléctrico.

Se realizó el modelo de la dinámica del vehículo, considerando las diferentes fuerzas que interactúan al ponerse en movimiento el auto.

Se abordaron cuatro diferentes tecnologías empleadas en la construcción de las baterías que se utilizan para alimentar el motor eléctrico del tren de potencia del vehículo.

Se utilizaron bloques preestablecidos en Simulink de la librería de SimPowerSystems para realizar la simulación del comportamiento de los diferentes elementos que conforman el tren de potencia del vehículo eléctrico, además de bloques de uso común para representar la dinámica del vehículo.

Al observar las gráficas del comportamiento dinámico de cada tipo de batería, se puede decir que los cuatro se pueden emplear sin problema para propulsar un vehículo urbano con las características físicas y de recorrido descritas en el capítulo 1.

Las pequeñas diferencias observadas en la simulación realizada al modelo del vehículo a Par máximo hasta alcanzar una determinada velocidad, están determinadas por los materiales empleados en la construcción de las baterías y para esta prueba, son tan pequeñas que cualquier tipo de las cuatro baterías puede ser empleado como fuente de alimentación del tren de potencia eléctrico para un vehículo urbano.

Al haber comprobado en la prueba realizada que el comportamiento de las baterías es indistinto, el criterio del diseñador para elegir el tipo de batería se centrará en considerar la capacidad, el peso, el volumen y sobre todo el precio.

Considerando el punto anterior, en nuestro país la opción más viable en la selección del banco de baterías de tracción por su precio son las de plomo-ácido de ciclo profundo, pues cualquiera de los otros tres tipos descritos en esta tesis solo se fabrican en el extranjero y al realizar la importación debe pagarse un arancel del 22 % sobre el precio de de éstas.

Realizando una comparación entre precio de un banco de baterías de Li-Ion y uno de plomo-ácido de ciclo profundo, de $20kWh$, $200V$, $100Ah$, se tiene lo siguiente:

Tabla 6.1: Comparación del precio en pesos mexicanos de un banco de baterías de Li-Ion y uno de plomo-ácido.

Li-Ion	Plomo-ácido	Diferencia de precio	Porcentaje de diferencia
148000	54400	93639	63.25

Por los datos mostrados en la tabla anterior se puede concluir que al menos para un vehículo de conducción urbana la opción más viable de banco de baterías en nuestro país es el de plomo-ácido de ciclo profundo.

6.2. Trabajos futuros

Realizar un modelo eléctrico de carácter híbrido, combinando baterías, super-capacitores, volantes de inercia.

Construir el prototipo de un vehículo eléctrico para la validación de los resultados obtenidos y para demás pruebas.

Bibliografía

- [1] LARRODÉ PELLICER, EMILIO, *Automóviles Eléctricos*, primera edición, Reverte, Zaragoza, España, 1997.
- [2] LARMINIE, J., LOWRY, J., *Electric Vehicle Technology Explained*, primera edición, John Wiley and Sons, 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA, 2003.
- [3] WOOD, J.H., LONG, G.R., MOREHOUSE, D.F., *Long Term World Oil Supply Scenarios*, US Department of Energy, August 18, 2004.
- [4] ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS, *Protocolo de Kyoto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*, Naciones Unidas, 1998.
- [5] ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD, *Medio ambiente y seguridad humana, Calidad del aire y Contaminación del aire urbano*, Pags. 72,73,74, Salud en las Américas, Edición 2012.
- [6] SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS NATURALES, *NOM-052-SEMARNAT-2005*, 23 de Junio, 2006.
- [7] JAHNS T., BLASKO V., *Recent Advances in Power Electronics Technology for Industrial and Traction Machine Drives*, Proc. IEEE Vol. 89, No. 6, pp-963-975, junio 2001.
- [8] CHRIS P., MARTIN S., *Documental Who Killed the Electric Car.*, 1st. Edition, Sony Documentals, November 14, 2006.
- [9] TESLA MOTORS COMPANY, *Tesla Model S Specs*, Silicon Valey, California, 2012.
- [10] EHSANI, D., HOELSCHER AND N. ASADI, P., *Impact of hybrid electric vehicles on the worlds petroleum consumption and supply*, Society of Automotive Engineers (SAE) Future Transportation Technology Conference, Paper No. 2003-01-2310, 2003.
- [11] HAKES, J.E., *International energy outlook-2000 with projection to 2020*, U.S. Energy Information Administration, Washington, DC., March 16, 2000.

- [12] SHNAYERSON, M., *The Car that could*, 1st. edition, By Michael Shnayerson, August 27, 1996.
- [13] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, *General Motors EV1, Vehicle Specifications*, Electric Transportation Applications, 1996.
- [14] LARMINIE, J., LOWRY, J., *Electric Vehicle Technology Explained*, Supplementary Material, John Wiley and Sons, 111 River Street, Hoboken, NJ 07030, USA, 2003.
- [15] MENDOZA, A., ARGUETA, J., *Performance Characterization GM EV1*, Southern California EDISON, Electric Transportation Division, April, 2000.
- [16] EHSANI, M., GAO, Y. AND EMADI, A., *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cells Vehicles, Fundamentals, Theory and Design*, Second Edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, 2010.
- [17] JOHNSON, V.; ZOLOT, M.; PESARAN, A., *Development and Validation of a Temperature-Dependent Resistance/Capacitance Battery Model for ADVISOR.*, EVS-18: Proceedings of the 18th International Electric Vehicle Symposium, 20-24 October 2001, Berlin, Germany.
- [18] PESARAN, A. A.; KEYSER, M., *Thermal Characteristics of Selected EV and HEV Batteries.*, IEEE, Sixteenth Annual Battery Conference on Applications and Advances; Proceedings of the Conference 9-12 January 2001, Long Beach, California.
- [19] S.WILLIAMSON S.; RIMMALAPUDI C.; EMADI A., *Electrical Modeling of Renewable Energy Sources and Energy Storage Devices.*, Journal of Power Electronics, Vol.4, No.2, April 2004
- [20] KARDEN, E., MAURACHER, P., SCHOFÉ, F., *Electrochemical Modelling of Lead-Acid Batteries Under Operating Conditions of Electric Vehicle.*, Journal of Power Sources. Elsevier. 1997, vol. 64, p. 175-180.
- [21] SHEPHERD, C. M., *Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge.*, Journal of Electrochemical Society, Volume 112, July 1965, pp 657-664.
- [22] TREMBLAY, O.; DESSAINT, L.-A.; DEKKICHE, A.-I., A., *Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles.*, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2007. VPPC 2007. IEEE , pp. 284-289, 9-12 Sept. 2007.
- [23] DURR, MATTHIAS; CRUDEN, ANDREW; GAIR, SINCLAIR; MC-DONALD, J.R., *Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system.*, Journal of Power Sources, Volume 161, no 2, Oct 27, 2006, pp. 1400-1411.
- [24] KUHN, E.; FORGEZ, C.; LAGONOTTE, P.; FRIEDRICH, G., *Modelling Ni-MH battery using Cauer and Foster structures.*, Journal of Power Sources, v 158, no 2 SPEC. ISS., Aug 25, 2006, pp. 1490-1497.

- [25] MAURACHER, P.; KARDEN, E., *Dynamic modelling of lead/acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification.*, Journal of Power Sources, Volume 67, no 1-2, July/August, 1997, pp. 69-84.
- [26] OLIVIER TREMBLAY, LOUIS-A. DESSAINT, *Experimental Validation of a Battery Dynamic Model for EV Applications.*, World Electric Vehicle Journal Vol. 3 - ISSN 2032-6653 - 2009 AVERE, Stavanger, Norway, May 13 - 16, 2009.
- [27] RYNKIEWICZ, R., *Discharge and charge modeling of lead acid batteries.*, Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1999. APEC 99. Fourteenth Annual, vol.2, no., pp.707-710 vol.2, 14-18 Mar 1999.
- [28] FENG XUYUN,; SUN ZECHANG,; *A battery model including hysteresis for State-of-Charge estimation in Ni-MH battery.*, Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC 08. IEEE , vol., no., pp.1-5, 3-5 Sept. 2008
- [29] CHAN C. C,; *The state of the art of Electric and Hybrid Vehicles.*, Proceedings of the IEEE, Vol. 90, No. 2, February 2002, University of Hong Kong.
- [30] KRAUSE P. C; WASYN CZUK S. D; SUDHOFF,; *Analysis of Electric Machinery.*, reimpression de la 1^{ra} edición, New York, IEEE PRESS, 1995.
- [31] P.C. KRAUSE, C.H. THOMAS,; *Simulation of Symmetrical Induction Machinery, IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems.*, Vol.84, november 1965,pp.1038-1053.
- [32] KWANG HEE NAM,; *AC Motor Control and Electric Vehicle Applications*, CRC Press, Taylor and Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, Florida, USA, 2010.
- [33] NED MOHAN; TORE M. UNDELAND; WILLIAM P. ROBBINS, *Power Electronics*, (ISBN:978-0-471-22693-2), John Wiley and Sons, Inc.
- [34] ROBERTO PÉREZ S.,; *Prueba de manejo al Nissan LEAF 2013.*, www.visionautomotriz.com.mx/2013/pruebas-de-manejo/136-hatchback-electrico/376-nissan-leaf-2013.html.
- [35] GOODYEAR CORPORATE,; *Goodyear Technology All Set to Help Create the First Quiet City.*, www.goodyear.com/cfm/web/corporate/media/news/story.cfm?aid=647.
- [36] ORGANIZACIÓN VIDA SOSTENIBLE,; *El sonido de los coches eléctricos.*, www.vidasostenible.org/observatorio/f2_fina1.asp?idinforme=2128.