

Autos Híbridos y Eléctricos

Proyecto Ingeniería Eléctrica

2009-2010

Martín Mora Lemes
Gastón Hernández Acosta
Sergio Santana Negrín

Tutor: Ing. Gonzalo Casaravilla Ponsetí
Co-Tutor: Ing. Fernando Berrutti Staino

UdelaR - Facultad de Ingeniería - Instituto Ingeniería Eléctrica

Resumen

En este documento se presenta el Proyecto de Fin de Carrera llamado ***Autos Híbridos y Eléctricos*** correspondiente a la carrera de Ingeniería Eléctrica. Motivados por el creciente desarrollo de la tecnología de los autos híbridos y eléctricos, este proyecto es una investigación desde el punto de vista energético de estas nuevas tecnologías.

En el documento se describen los diferentes tipos de sistemas de propulsión que existen en la actualidad para la tracción de vehículos híbridos y eléctricos (Capítulo 2). Seguidamente, se estudia cada componente del sistema de propulsión; Baterías, Celdas de Combustible, Motor de Combustión Interna, Motores Eléctricos, Convertidores (Capítulo 3).

Con el objetivo de implementar en el software de simulaciones Simu-Link sistemas de propulsión híbridos y eléctricos, primero se realiza un estudio dinámico de los vehículos convencionales, obteniendo la "carga" que tendrá que mover el motor de tracción (Capítulo 4). Luego se presenta la estrategia de control del motor de tracción, que en el caso de estudio es un motor de inducción trifásico jaula de ardilla (Capítulo 5).

Con los componentes del sistema de propulsión estudiados, y la estrategia del control del motor de tracción definida, se implementa un sistema de propulsión eléctrico y otro sistema de propulsión híbrida configuración serie (Capítulo 6).

Luego, de acuerdo a patrones de conducción estandarizados llamados Ciclos de Conducción (Capítulo 7), se simularon los sistemas de propulsión implementados y se exponen los resultados (Capítulo 8). Finalmente se presentan las conclusiones (Capítulo 9).

Índice general

1. Introducción	11
2. Tecnología de Vehículos Híbridos y Eléctricos	13
2.1. Vehículos Eléctricos (EV)	13
2.1.1. Configuraciones básicas	14
2.2. Vehículos Híbridos (HEV)	17
2.2.1. Arquitecturas de sistema de tracción	18
2.2.1.1. Configuración Serie	18
2.2.1.2. Configuración Paralelo	21
2.2.1.3. Configuración Híbrida Serie-Paralelo	23
2.3. Vehículos Híbridos Enchufables	32
3. Componentes del sistema de Propulsión - HEV y EV	33
3.1. Baterías: <i>Conceptos Básicos</i>	33
3.1.1. Componentes de Celdas y Baterías	33
3.1.2. Clasificación de Celdas y Baterías	34
3.1.2.1. Primarias	34
3.1.2.2. Celdas o baterías Secundarias o Recargables	34
3.1.2.3. Baterías de Reserva	35
3.1.2.4. Celdas de combustible	36
3.1.3. Operación de una Celda	36
3.1.3.1. Descarga	36
3.1.3.2. Carga	37
3.1.4. Selección y Aplicación de Baterías	39
3.1.4.1. Conceptos previos	39
3.1.4.2. Consideraciones importantes para la elección de una batería	40
3.1.4.3. Aplicaciones Portátiles, Industriales y en EV	42

3.1.5.	Baterías Secundarias: Tipos y características	43
3.1.5.1.	Baterías de Plomo Ácido	43
3.1.5.2.	Baterías de Hidruro de Nickel-Metal	45
3.1.5.3.	Baterías Ion-Litio	47
3.2.	Celdas de Combustible	49
3.2.1.	¿Que es una celda de combustible?	49
3.2.2.	Principio de funcionamiento	50
3.2.3.	¿Que es lo que limita la corriente?	54
3.2.4.	Conexionado de celdas en serie - La placa bipolar	56
3.2.5.	Suministro de los gases y enfriamiento	56
3.2.6.	Las Celdas de Combustible y los vehículos híbridos	58
3.3.	Motores de Combustión Interna (ICE)	60
3.3.1.	Introducción	60
3.3.2.	4S, ICE encendidos por chispa (bujías)	60
3.3.2.1.	Principios de Operación	60
3.3.3.	Parámetros operacionales	63
3.3.4.	Motores Alternantes	64
3.3.5.	Ciclos Prácticos Normales de Aire	66
3.3.6.	Ejemplos de Motores ICE en HEVs	69
3.4.	Motores Eléctricos	70
3.4.1.	Motor de Continua	71
3.4.2.	Motor de Inducción	74
3.4.2.1.	Modelo Estacionario del Motor de Inducción	76
3.4.2.2.	Modelo Dinámico del Motor de Inducción	81
3.4.2.3.	Control de velocidad del Motor de Inducción	85
3.5.	Convertidores	87
3.5.1.	Convertidores DC/DC	88
3.5.2.	Convertidores DC/AC	92
4.	Modelo del vehículo	97
4.1.	Descripción general del movimiento del vehículo	97
4.2.	Resistencia del vehículo	98
4.2.1.	Fuerza de rozamiento	98
4.2.2.	Resistencia aerodinámica	102
4.2.3.	Resistencia debido al ángulo	103
4.3.	Ecuación dinámica	105
4.4.	Adhesion cubierta-suelo y esfuerzo máximo de tracción	107
4.5.	Trasmisión y velocidad del vehículo	109

4.6.	Características de la transmisión de la planta de energía . . .	111
4.6.1.	Características de la planta de energía	111
4.6.2.	Características de la transmisión	112
4.6.3.	Grado de inclinación	113
4.7.	Modelo dinámico del vehículo implementado	114
4.7.1.	Ecuación dinámica del bloque	114
4.7.2.	Parámetros utilizados	115
5.	Control del Motor de Tracción	117
5.1.	Estrategia de control del Motor de Inducción	117
5.1.1.	Descripción de los Bloques que conforman el Módulo de Control	117
5.2.	Control Vectorial de Corriente	128
5.2.1.	Introducción	128
5.2.2.	Conceptos Básicos	129
5.2.3.	Algoritmo de Control	131
5.2.3.1.	Selección del modo de conmutación para mi- nimizar armónicos	132
5.2.3.2.	Transformación entre sistemas de referencia de tensión y corriente	133
5.2.3.3.	Selección del modo de conmutación para res- puesta rápida	136
6.	Sistemas de Propulsión Implementados	141
6.1.	Modelo Vehículo Eléctrico	141
6.1.1.	Modelo implementado	141
6.1.1.1.	Bloque del Motor de Inducción	141
6.1.1.1.1.	<i>Modelo básico.</i> -	141
6.1.1.1.2.	<i>Entrada mecánica.</i> -	142
6.1.1.1.3.	<i>Preferencias.</i> -	143
6.1.1.1.4.	<i>Parámetros.</i> -	144
6.1.1.1.5.	<i>Parámetros utilizados para el Motor de Inducción.</i> -	145
6.1.1.2.	Modelo de la batería	146
6.1.1.2.1.	<i>Características principales.</i> -	146
6.1.1.2.2.	<i>Curvas y funcionamiento.</i> -	149
6.1.1.2.3.	<i>Parámetros.</i> -	149

6.1.1.2.4.	Celdas de baterías en serie o en paralelo. -	153
6.1.1.2.5.	Salidas de la batería. -	153
6.1.1.2.6.	<i>Supuestos del modelo.</i> -	154
6.1.1.2.7.	<i>Convertidor DC/DC.</i> -	154
6.1.1.2.8.	<i>Parámetros utilizados.</i> -	155
6.1.1.3.	Controlador	156
6.1.1.3.1.	Control Vectorial de Corriente	156
6.1.1.4.	Bloque del Convertidor de Potencia	160
6.1.1.4.1.	<i>Modelo básico.</i> -	160
6.1.1.4.2.	<i>Parámetros.</i> -	161
6.1.1.4.3.	<i>Entradas.</i> -	161
6.1.1.5.	Modelo Físico del Vehículo Implementado	162
6.2.	Modelo Vehículo Híbrido	163
6.2.1.	Modelo Implementado	163
6.2.1.1.	Motor de Combustión Interna (ICE) Modelo Simulink implementado	163
6.2.1.1.1.	Estrategia de Control Energética	163
6.2.1.1.2.	Bloque implementado	166
7.	Ciclos de Conducción	169
7.1.	Introducción	169
7.2.	Utilización de Ciclos de Conducción	169
7.3.	Descripción de diversos Ciclos de conducción	170
7.3.1.	Ciclos de Conducción Europeos	170
7.3.1.1.	ECE15	171
7.3.1.2.	EUDC	171
7.3.1.3.	EUDCL	171
7.3.1.4.	NEDC	171
7.3.1.5.	HYZEM	171
7.3.2.	Ciclos de conducción de EE.UU	171
7.3.2.1.	FTP 72	172
7.3.2.2.	SFUDS	172
7.3.2.3.	FTP 75	172
7.3.2.4.	HFEDS	172
7.3.2.5.	IM 240	172
7.3.2.6.	LA-92	172
7.3.2.7.	NYCC	173

7.3.3.	US 06	173
7.3.4.	Ciclos de Conducción Japoneses.	173
7.3.4.1.	Mode 10	173
7.3.4.2.	Modo 15	173
7.3.4.3.	Modo 10-15	173
7.3.5.	Comparación entre Ciclos de Conducción	173
8.	Simulaciones	175
8.1.	Condiciones Iniciales	175
8.2.	Controlador	177
8.3.	Modelo Vehículo Eléctrico	179
8.3.1.	Batería Plomo Ácido (Lead-Acid)	180
8.3.2.	Níquel Metal (NiMH)	185
8.3.3.	Ion Litio (Li-ion)	190
8.3.4.	Análisis de Resultados	195
8.4.	Modelo Vehículo Híbrido	197
8.4.1.	Análisis de Resultados	199
9.	Conclusiones	203
9.1.	Vehículo Eléctrico	203
9.2.	Vehículo Híbrido	207
10.	Mejoras Futuras y Agradecimientos	209
11.	Anexo	211
11.1.	Transformadas	211
11.1.1.	Transformada de Clark	211
11.1.2.	Transformada de Park	212
11.2.	CD adjunto	214

Capítulo 1

Introducción

El desarrollo de la industria automotriz y el número cada vez mayor de automóviles en todo el mundo están causando graves problemas para el medio ambiente.

El deterioro de la calidad del aire, los problemas del calentamiento global, y agotamiento de los recursos del petróleo, se está convirtiendo en una seria amenaza induciendo a todos los países a la investigación, la financiación y el fomento de tecnologías "limpias", "amigables" con el medio ambiente. Dentro de estas nuevas tecnologías se encuentran los vehículos de propulsión eléctrica e híbrida.

En la actualidad existen tres tipos de sistemas de propulsión para tracción de vehículos con el fin de disminuir o eliminar la emisión de gases de efectos invernadero, los mismos son:

- vehículos eléctricos (EV),
- vehículos híbridos (HEV),
- vehículos híbridos enchufables.

El sistema de propulsión de los vehículos eléctricos esta formado por una banco de baterías, convertidores electrónicos de potencia, controladores y motor de tracción eléctrico. Mientras que en los vehículos híbridos el sistema de propulsión esta compuesto además por un motor de combustión interna.

Los sistemas de propulsión de los vehículos híbridos enchufables, son similares a los vehículos híbridos, con la variante que el banco de baterías se puede cargar además, a través de la red eléctrica.

En el presente trabajo se realizan estudios del sistema de propulsión eléctrico, y del sistema de propulsión híbrido configuración serie. En los sistemas de propulsión eléctricos se analiza de acuerdo al régimen de conducción urbano o carretero, el rendimiento para diferentes bancos de baterías (Plomo Ácido, Níquel Metal, Litio-Ion), y se compara energéticamente con vehículos convencionales. Mientras que para el sistema de propulsión híbrida se analiza el desempeño para diferentes regímenes de conducción (urbano, carretero), y también se compara energéticamente con los vehículos convencionales.

Capítulo 2

Tecnología de Vehículos Híbridos y Eléctricos

En el presente capítulo, se describen los diferentes tipos o arquitecturas de sistemas de propulsión que existen en la actualidad para los vehículos híbridos y eléctricos.

2.1. Vehículos Eléctricos (EV)

Luego de reducir la limitación tecnológica relacionada al almacenamiento de energía, los EV tienden a ocupar un lugar importante en la plaza automotriz de diferentes países, sustituyendo a los vehículos convencionales de combustión interna. Debido a su autonomía estos vehículos tienen un buen desempeño en el ámbito urbano, de acuerdo a la tipología y el número de baterías utilizada tienen una capacidad de desplazamiento de unos 50 a 200 kilómetros. Desde el punto de vista medio ambiental estos vehículos tienen los beneficios de cero emisiones de gases de efectos invernadero y baja contaminación sonora, características importantes para el ámbito de desempeño.

Otra de las características de los EVs, que potencia su desempeño en el ámbito urbano, es su alta eficiencia debido a los frenos regenerativos. Estos sistemas de frenos tienen la capacidad de aprovechar la energía cinética del vehículo y en el momento del frenado cargar la batería, a diferencia de los vehículos convencionales que "malgastan" esta energía mediante rozamiento generando calor.

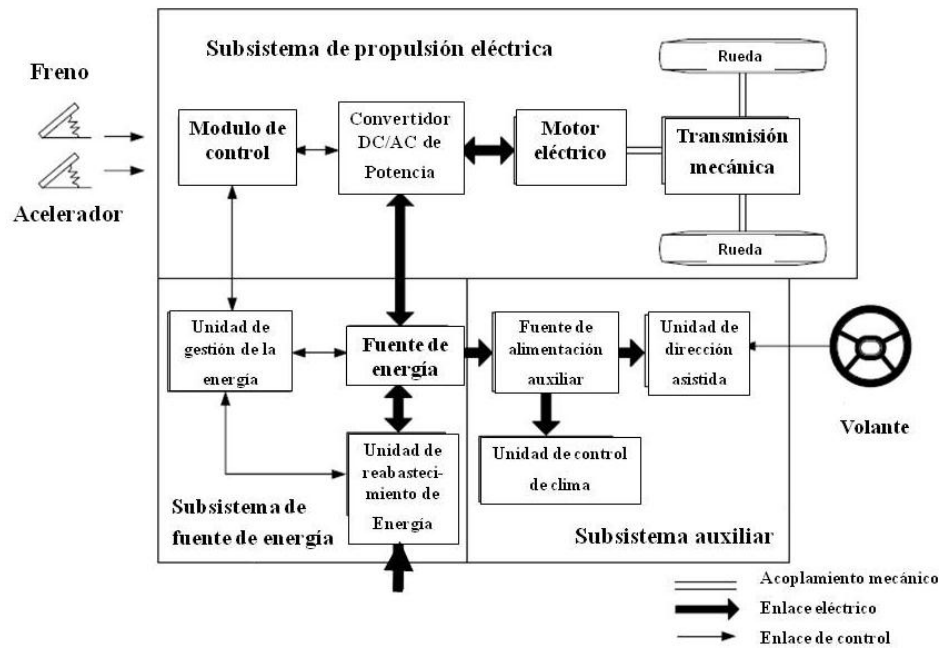


Figura 2.1: Ilustración conceptual de una configuración general de vehículos eléctricos. (extraída de [2] pág. 106)

2.1.1. Configuraciones básicas

En los primeros tiempos, los vehículos eléctricos se construían convirtiendo un vehículo de combustión interna, mediante el reemplazo del ICE y el Tanque de Combustible por un Motor Eléctrico y un Banco de Baterías respectivamente, mientras se mantenían todos los demás componentes. Sin embargo, hoy en día los vehículos eléctricos se diseñan desde cero, para satisfacer requerimientos especiales de peso, flexibilidad y performance.

El tren de tracción para un vehículo eléctrico, está formado básicamente por dos subsistemas: el eléctrico de propulsión, y la fuente de energía. El subsistema eléctrico de propulsión está compuesto por el controlador del vehículo, el convertidor electrónico de potencia, el motor eléctrico, la transmisión mecánica y las ruedas. El subsistema Fuente de Energía, incluye el banco de baterías y el convertidor DC/DC.

Basados en las entradas de control (velocidad dada por el conductor), el controlador provee las señales de control *gates* para el convertidor electrónico

de potencia, el cual funciona para regular el flujo de energía entre el motor y la fuente de energía. El flujo de energía "hacia atrás" es debido al freno regenerativo del EV, y esta energía regenerada (el motor funciona como generador en este caso) puede almacenarse nuevamente en la fuente de energía, siempre y cuando dicha fuente pueda ser receptora de energía. La mayoría de las baterías de los EV así como los ultracapacitores poseen la habilidad de aceptar energía regenerativa.

Hay una gran variedad de posibles configuraciones para los EV debido a las variaciones en las características de los sistemas eléctricos de propulsión y las fuentes de energía, las mismas se muestran en la Figura 2.2.

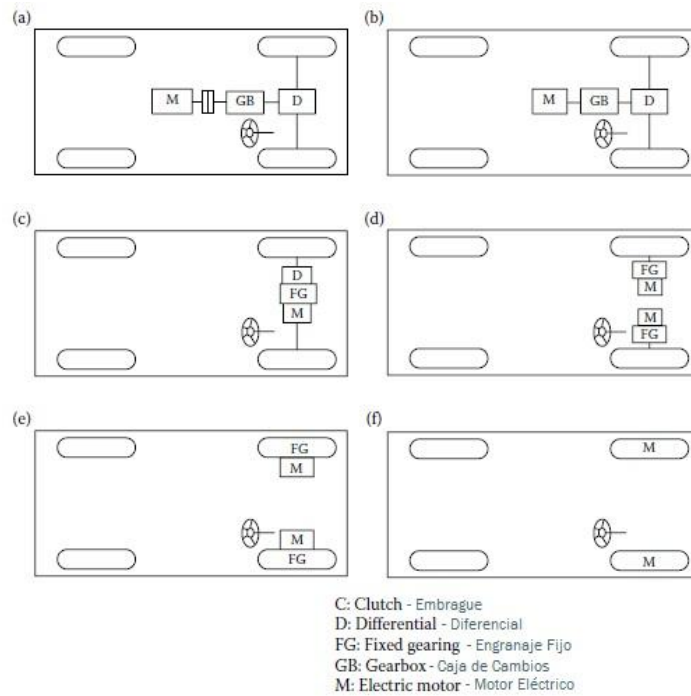


Figura 2.2: Configuraciones posibles de EV: (a) vehículo convencional con transmisión de cambios múltiples y embrague, (b) transmisión de un solo cambio sin necesidad de embrague, (c) engranaje fijo integrado y diferencial, (d) dos motores separados con un engranaje fijo, (e) engranajes directos a las ruedas con dos motores separados, y (f) dos motores separados uno en cada rueda. (extraída de [2] pág. 107)

- a. La Figura 2.2(a) muestra la primer alternativa, en la cual la propulsión eléctrica reemplaza el ICE de un vehículo convencional. Consiste en un motor eléctrico, un embrague, una caja de cambios, y un diferencial. El embrague y la caja de cambios pueden ser reemplazados por una transmisión automática. El embrague es usado para conectar o desconectar el motor eléctrico de las ruedas. La caja de cambios provee un juego de distintos radios de engranajes para modificar el perfil par-velocidad según sea el requerimiento de carga. El diferencial es un sistema mecánico (usualmente un juego de engranajes planetarios, se describen en la Sección 2.2.1.3), el cual permite a las ruedas de ambos lados girar a diferentes velocidades cuando el vehículo circula por una curva.
- b. Con un motor eléctrico que tenga una potencia constante para un amplio rango de velocidades, un engranaje fijo puede reemplazar la caja de cambios y reducir la necesidad del embrague. Esta configuración no solo reduce el tamaño y peso de la transmisión mecánica, sino que simplifica el control ya que no se necesitan cambios de engranajes.
- c. Similar al tren de tracción de (b), un motor eléctrico, el engranaje fijo, y el diferencial pueden ser integrados en una única pieza, al eje entre las ruedas.
- d. El diferencial mecánico, es reemplazado usando dos motores de tracción. Cada uno de ellos mueve una rueda lateral y opera a diferentes velocidades cuando el vehículo circula por una curva.
- e. Para simplificar aún mas el tren de tracción, el motor puede ser ubicado adentro de la rueda.
- f. Sin utilizar engranajes mecánicos entre el motor eléctrico y las ruedas, se conecta la salida del rotor del motor a la rueda. El control de velocidad del motor eléctrico es equivalente al control de la velocidad de las ruedas, por lo tanto la velocidad del vehículo. Sin embargo, este arreglo requiere que el motor eléctrico tenga un par de arranque mayor para arrancar y acelerar el vehículo.[2]

La elección de una u otra configuración del sistema de propulsión disminuye las pérdidas mecánicas debido a la caja de cambios, diferencial, etc.,

pero se ve cada vez mas complejo el módulo de control del motor o motores eléctricos de tracción.

2.2. Vehículos Híbridos (HEV)

Como se mencionó los vehículos eléctricos puros tienen un buen desempeño en el ámbito urbano, pero a la hora de realizar recorridos de varios kilómetros la autonomía limita su capacidad no siendo aptos para realizar viajes extensos. Para estos fines existen los vehículos híbridos los cuales están constituidos por un motor eléctrico y otro de combustión interna.

Estos vehículos comparados con los convencionales de combustión interna son más eficientes, consumen menos combustible y emiten menor cantidad de gases de efecto invernadero al ambiente.

De acuerdo a cómo se dispongan los acoplamientos del motor eléctrico y del ICE interna existen varias arquitecturas en el sistema de tracción. Las configuraciones más populares son la configuración serie y la configuración paralelo que se describen en la Sección 2.2.1.

En la Figura 2.3 se muestra una configuración serie. Como se observa está constituida por un generador de combustión interna acoplado en serie con un motor eléctrico (ver Sección 2.2.1 por más detalles).

Esta configuración tiene la particularidad de que el motor eléctrico es el encargado de impulsar el vehículo, mientras que el ICE se acopla a un generador. En términos generales el conjunto Motor-Generador(M/G) tiene la función de ampliar el rango de funcionamiento del vehículo logrando aumentar la capacidad de desplazamiento del mismo.

En líneas punteadas se muestra el flujo de energía que carga el banco de baterías. Como se puede observar existe un flujo que corre desde el motor de tracción hacia el banco de baterías producto de los frenos regenerativos, aumentando su eficiencia al igual que los autos eléctricos.

En la Figura 2.4 se muestra la configuración en paralelo (ver Sección 2.2.1 por más detalles). De acuerdo a la forma de operar el motor eléctrico y el motor de combustión interna, existen diferentes arquitecturas de acoplamiento mecánico a la transmisión mecánica del vehículo. En un buen diseño de la configuración en paralelo, la arquitectura de acoplamiento mecánico elegida depende de las necesidades del vehículo, velocidad y características del par, y también depende de las características de los recursos utilizados, tamaños de los motores, la complejidad del modulo de control utilizado, etc.

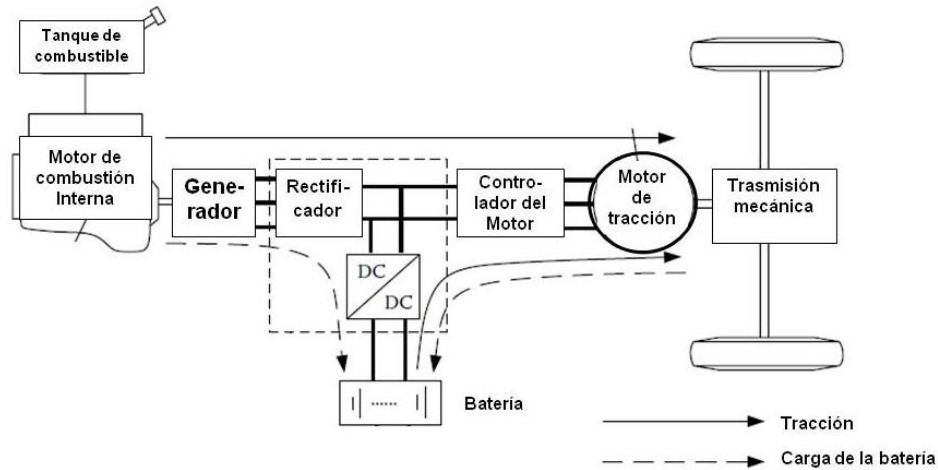


Figura 2.3: Configuración en serie de un híbrido con propulsión eléctrica (basada en imagen extraída de [2], pág. 128)

Nuevamente en líneas punteadas se describen los flujos de energía que cargan el banco de baterías. Como se puede ver esta configuración también se beneficia con las ventajas que proporcionan los frenos regenerativos.

2.2.1. Arquitecturas de sistema de tracción

2.2.1.1. Configuración Serie

Una transmisión híbrida serie es aquella en la que dos fuentes de energía eléctrica alimentan una planta eléctrica simple (motor eléctrico) que impulsa el vehículo. La configuración que se utiliza más comúnmente es la que se muestra en la Figura 2.3. La fuente de energía unidireccional es un tanque de combustible y el convertidor de energía unidireccional (planta de energía) es un Motor de Combustión Interna (ICE), acoplado a un generador eléctrico.

La salida del generador eléctrico se conecta a una bus de potencia DC a través de un convertidor electrónico controlable (inversor bidireccional). La fuente de energía bidireccional es un banco de baterías conectado al bus de potencia DC mediante un convertidor electrónico de potencia (convertidor DC/DC), controlable. El motor de tracción, puede funcionar o bien como motor o bien como generador, y en movimiento de avance o retroceso. La

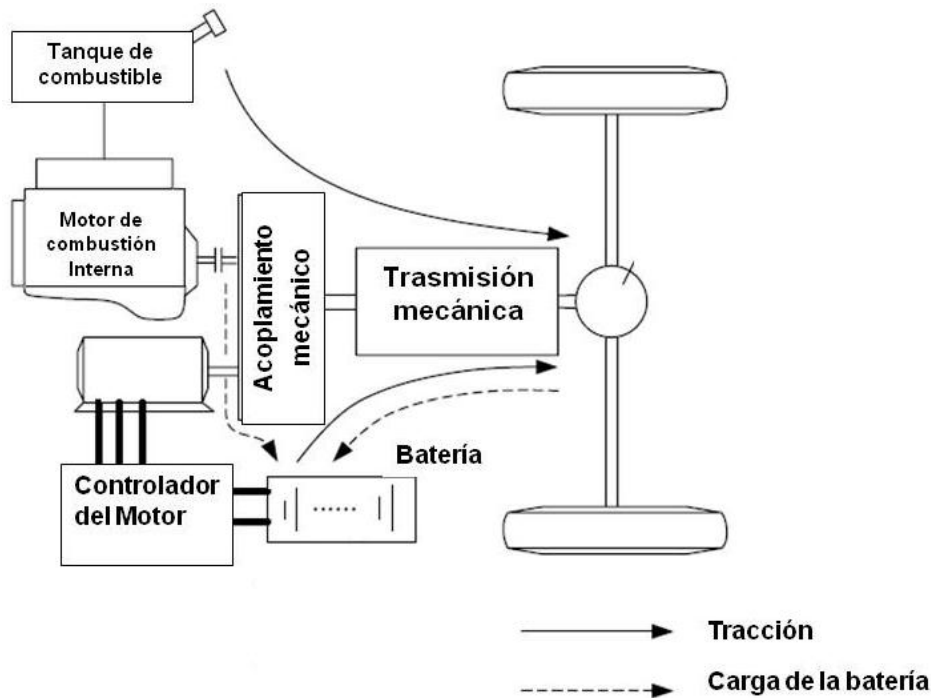


Figura 2.4: Configuración en paralelo de un híbrido con propulsión eléctrica (basada en imagen extraída de [2], pág. 131)

trasmisión híbrida serie proviene originalmente de un EV en el que se agrega un M/G adicional para ampliar el rango operativo que está limitado por la densidad de energía pobre de las baterías.

La transmisión necesita un controlador de vehículo para controlar la operación y los flujos de energía basado en el comando operativo del conductor a través de los pedales de acelerador y freno y otra información de realimentación desde los componentes. El controlador del vehículo controla el ICE a través de su acelerador, acoples eléctricos (inversor controlable y convertidor DC/DC), y motor de tracción para generar el torque de propulsión demandado o torque de freno regenerativo con uno de los siguientes modos de operación:

1. *Modo de tracción puramente eléctrico:* El motor se apaga y el vehículo se impulsa únicamente desde las baterías.

20CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍA DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS

2. *Modo de tracción puramente a motor:* La energía de tracción del vehículo proviene solamente del M/G, mientras que las baterías ni alimentan y reciben energía desde la transmisión. Las máquinas eléctricas ofician como transmisión eléctrica desde el motor a las ruedas.
 3. *Modo de tracción híbrido:* La energía de tracción es entregada por el M/G y las baterías, sumadas ambas en el acoplador eléctrico
 4. *Modo tracción a motor y carga de batería:* el M/G entrega energía para cargar las baterías e impulsar el vehículo simultáneamente. La energía del M/G se divide en el acoplador eléctrico
 5. *Modo freno regenerativo:* El M/G se apaga y el motor de tracción se opera como generador impulsado por la energía cinética o potencial del vehículo. La energía generada es cargada a las baterías y reutilizada luego para propulsión.
 6. *Modo carga de batería:* El motor de tracción no recibe energía y el M/G se opera solamente para cargar las baterías.
 7. *Modo de carga de batería híbrido:* Tanto el M/G como el motor de tracción operan como generadores en frenado para cargar las baterías. La transmisión híbrida Serie, ofrece muchas ventajas:
1. No hay conexión mecánica entre el ICE y las ruedas. Consecuentemente, el ICE puede operarse potencialmente en cualquier punto sobre su mapa par-velocidad. Esta ventaja particular, con un control de flujo de energía sofisticado, permiten operar el ICE siempre dentro de su región de máxima eficiencia. La eficiencia y las emisiones del ICE en esta estrecha región puede ser mejorada aún más mediante diseños especiales y tecnologías de control, que son mas fácil de implementar que en el dominio de operación completo. Más aún, el desacople mecánico del ICE de las ruedas permite el uso de motores de alta velocidad, donde es difícil impulsar las ruedas a través de un vínculo mecánico, tal como turbinas de gas o plantas de energía que tienen respuestas dinámicas lentas (e.g. motor Stirling)
 2. Debido a que los motores eléctricos tienen un perfil torque-velocidad que está muy cerca de ser ideal para tracción, la transmisión puede no

necesitar transmisión de múltiples velocidades. Por lo tanto, la estructura puede simplificarse mucho y tener menor costo. Al igual que en los EV, se pueden utilizar dos motores, cada uno impulsando un solo neumático, y se puede remover el diferencial mecánico. Tal configuración (ver Figura 2.2, (e) y (f)), tiene además las siguientes ventajas: el desacople de las velocidades de las ruedas, función similar a un diferencial mecánico, y la función adicional de anti-deslizamiento, similar a un control de tracción convencional. También, se pueden utilizar cuatro motores en las ruedas, cada uno manejando un neumático. En tal configuración, la velocidad y el torque de cada neumático puede controlarse independientemente. Consecuentemente, la capacidad de conducción (conductibilidad), del vehículo puede mejorarse significativamente. Esto es muy importante para los vehículos todo terreno que usualmente operan en terreno escabroso, como hielo, nieve o suelo blando.

3. La estrategia de Control de la transmisión puede ser simple, comparada con otras configuraciones, debido a su desacople mecánico entre el motor y las ruedas.

De todas formas, las transmisiones híbrido-eléctricas tienen algunas desventajas como las que siguen:

1. La energía desde el ICE, cambia su forma dos veces para alcanzar su destino -ruedas (mecánica a eléctrica en el generador y eléctrica a mecánica en el motor de tracción). La ineficiencia del generador y del motor de tracción puede causar pérdidas significativas.
2. El generador agrega peso y costo adicionales.
3. Debido a que el motor de tracción es la única planta de energía impulsando el vehículo, debe dimensionarse para producir suficiente potencia para un desempeño óptimo del vehículo en términos de aceleración y capacidad de subida.

2.2.1.2. Configuración Paralelo

Una transmisión híbrido paralelo es una transmisión en la que el motor suministra su energía mecánica directamente a las ruedas en una forma similar a un vehículo convencional con motor de combustión. El motor es asistido por un motor eléctrico que está acoplado mecánicamente al eje. Las energías

22CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍA DE VEHÍCULOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS

de los motores de combustión y eléctrico se acoplan juntas mediante un acoplamiento mecánico, como se muestra en la Figura 2.4.

Todos los posibles modos de operación mencionados para la transmisión híbrida Serie continúan siendo válidos. Las mayores ventajas de la transmisión híbrida paralelo sobre la serie son las siguientes:

1. Tanto el motor eléctrico como el de combustión suministran torque a las ruedas sin conversión de energía, por lo cual las pérdidas de energía pueden ser menores.
2. Es compacto debido a que no hay necesidad de un generador adicional y el motor de tracción es más pequeño que en la configuración Serie.

Su mayor desventaja es el acoplamiento mecánico entre el ICE y las ruedas, como consecuencia los puntos de operación del ICE no pueden ajustarse en una región acotada de par-velocidad.

Otra desventaja es la complejidad de la estructura y el control.

Generalmente, el acoplamiento mecánico consiste de un acoplamiento de torque y acoplamiento de velocidad. En el acoplamiento de torque, el acoplador mecánico suma los torques del motor de combustión y del eléctrico juntos y entrega el torque total a las ruedas. Los torques del ICE y del motor eléctrico pueden controlarse independientemente. Pero la velocidad del ICE y del motor eléctrico del vehículo están vinculadas mediante una relación ajustada y no pueden controlarse independientemente debido a la restricción de conservación de la energía. De forma similar, en el acoplamiento de velocidad, las velocidades del ICE y del motor eléctrico puede sumarse, todos los torques están vinculados y no pueden controlarse independientemente.

2.2.1.3. Configuración Híbrida Serie-Paralelo

Conceptos previos - Dispositivos de acoplamiento mecánico, Engranaje Planetario

- Dispositivo de acople por Torque

El dispositivo de acople por Torque es un dispositivo mecánico con 3 conexiones y 2 grados de libertad. El puerto de conexión 1 es una entrada unidireccional y los puertos 2 y 3 son entrada y salida bidireccionales, pero no son entradas simultáneas (Ver Figura 2.5). Se entiende por entrada, al par que se transmite hacia el dispositivo, y salida, al par que se transmite desde el dispositivo. En una aplicación de HEV el puerto 1 es conectado a un ICE directamente o a través de una transmisión mecánica. El puerto 2 es conectado al eje de un motor eléctrico directamente o a través de una transmisión mecánica. El puerto 3 se conecta a las ruedas a través de un vínculo mecánico.

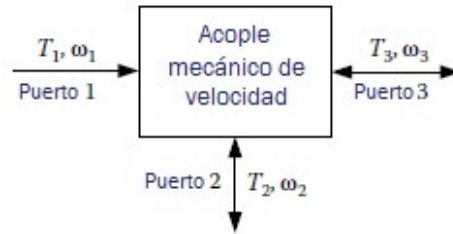


Figura 2.5: Acople de velocidad (basada en imagen extraída de [2], pág. 138)

Si se ignoran las pérdidas y se considera un estado estacionario, el par de entrada al acople de torque es siempre igual a la salida. Se supone ahora que en el puerto 2 el motor eléctrico está entregando par. El par de salida de las ruedas del vehículo es:

$$T_3 \cdot \omega_3 = T_1 \cdot \omega_1 + T_2 \cdot \omega_2 \quad (2.1)$$

El torque puede expresarse como:

$$T_3 = k_1 \cdot T_1 + k_2 \cdot T_2 \quad (2.2)$$

donde k_1 y k_2 son los parámetros estructurales del acople que están descritos por las relaciones de transmisión que son usualmente constantes. Para el acople de torque, T_3 , es el par de carga, y T_1 y T_2 son pares de entrada al acople que son independientes uno del otro y pueden controlarse independientemente. Sin embargo, debido a la restricción de la Ecuación 2.1, las velocidades angulares ω_1 , ω_2 y ω_3 están relacionadas y no pueden ser controladas independientemente, como lo expresa:

$$\omega_3 = \frac{\omega_1}{k_1} = \frac{\omega_2}{k_2} \quad (2.3)$$

- Dispositivo de acople por Velocidad

Las potencias producidas por las dos plantas de energía se pueden acoplar juntas para sumar sus velocidades. El dispositivo es análogo al acople de torque, el acople de velocidad es también un dispositivo mecánico de 3 puertos de conexión y 2 grados de libertad, y los puertos tienen las mismas características.

El acople por velocidad tiene la propiedad

$$\omega_3 = k_1.\omega_1 + k_2.\omega_2 \quad (2.4)$$

donde k_1 y k_2 son constantes asociadas con el diseño estructural y geométrico. Dentro de las tres velocidades, ω_1 , ω_2 , y ω_3 , dos de ellas son independientes una de la otra y pueden ser controladas independientemente. Debido a la restricción de la conservación de energía, los torques están relacionados como:

$$T_3 = \frac{T_1}{k_1} = \frac{T_2}{k_2} \quad (2.5)$$

El mínimo torque determina los otros dos. Un dispositivo de acople por velocidad típico es el llamado engranaje planetario.

- Engranaje Planetario

El engranaje planetario es un conjunto de engranajes compuesto por tres partes, el engranaje solar (sun gear), el engranaje corona (ring gear) y el engranaje porta-planetarios, 1, 2 y 3 respectivamente en la Figura 2.6. Las relaciones de velocidad entre los engranajes pueden obtenerse como se detalla a continuación.

Primero se supone que el engranaje porta-planetarios se considera desde un marco de referencia estacionario, esto es, $\omega_3 = 0$; entonces la relación de transmisión entre los engranajes corona y solar es

$$i_{1-2}^3 = \frac{\omega_2^3}{\omega_1^3} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.6)$$

donde ω_1^3 y ω_2^3 son las velocidades angulares de los engranajes corona y solar referidas, como indica el supraíndice, al engranaje porta-planetario (cuando este está quieto), R_1 y R_2 son los radios de los engranajes solar y

corona respectivamente, y Z_1 y Z_2 son los números de dientes de los engranajes solar y corona respectivamente. Aquí, se define el giro contrario a las agujas del reloj como velocidad positiva.

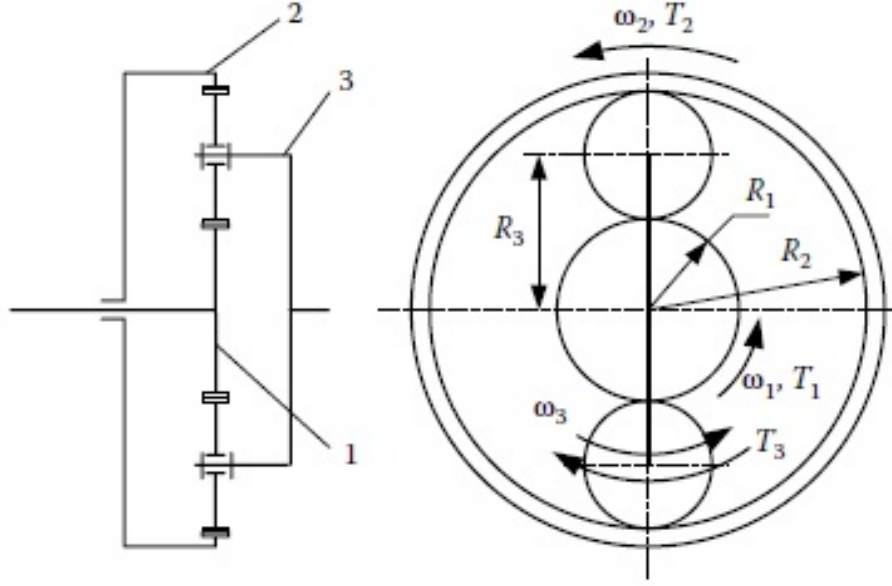


Figura 2.6: Engranaje planetario, usado para acoplamientos por velocidad (extraído de [2] pág. 139)

La Ecuación 2.6 indica que ω_1^3 y ω_2^3 tienen direcciones de rotación opuestas, y por lo tanto la relación de transmisión i_{1-2}^3 es negativa. Cuando el engranaje porta-planetario es liberado del marco estacionario, las velocidades absolutas de todos los ejes se expresan como:

$$\frac{\omega_1 - \omega_3}{\omega_2 - \omega_3} = i_{1-2}^3 \quad (2.7)$$

Luego se obtiene

$$\omega_1 - i_{1-2}^3 \cdot \omega_2 - (1 - i_{1-2}^3) \cdot \omega_3 = 0 \quad (2.8)$$

No es común trabajar con relaciones de transmisión negativas, por lo cual se define una relación de transmisión positiva como sigue,

$$i_g = -i_{1-2}^3 = \frac{R_2}{R_1} = \frac{Z_2}{Z_1} \quad (2.9)$$

La Ecuación 2.9, puede reescribirse como:

$$\omega_1 + i_g.\omega_2 - (1 + i_g).\omega_3 = 0 \quad (2.10)$$

o

$$\omega_3 = \frac{1}{1 + i_g}.\omega_1 + \frac{i_g}{1 + i_g}.\omega_2 \quad (2.11)$$

De igual forma que para la velocidad, cuando hay un torque actuando sobre cada elemento del engranaje planetario, y es considerado positivo cuando gira en la dirección contraria a las agujas del reloj, entonces la potencia total en todo el engranaje debería ser cero (siempre y cuando las pérdidas sean ignoradas).

$$T_1.\omega_1 + T_2.\omega_2 + T_3.\omega_3 = 0 \quad (2.12)$$

Combinando las Ecuaciones 2.11 y 2.12, se obtiene

$$T_3 = -(1 + i_g).T_1 = -\frac{1 + i_g}{i_g}.T_2 \quad (2.13)$$

La Ecuación 2.13 indica que los torques que actúan en el engranaje solar, T_1 y en el engranaje corona T_2 tienen siempre el mismo signo, y el torque que actúa en el engranaje porta-planetario, T_3 siempre tiene el signo opuesto.

Elemento fijo	Velocidad	Torque
Engranaje solar	$\omega_3 = \frac{i_g}{1+i_g}.\omega_2$	$T_3 = -\frac{1+i_g}{i_g}.T_2$
Engranaje corona	$\omega_3 = \frac{1}{1+i_g}.\omega_1$	$T_3 = -(1 + i_g).T_1$
Engranaje porta-planetario	$\omega_1 = -i_g.\omega_2$	$T_1 = \frac{1}{i_g}.T_2$

Tabla 2.1: Tabla de relaciones de velocidad y torque mientras un elemento es fijo

■ Motor con estator libre

Otro dispositivo usado como un acople de velocidad es un motor eléctrico con un estator libre, en el cual el estator, usualmente fijo al marco de referencia estacionario en un motor tradicional, es liberado de dicho marco para formar una máquina de dos rotores. El rotor exterior (estator), el interior y el entrehierro son tres conexiones. La energía eléctrica es convertida en energía mecánica a través del entrehierro. La velocidad del motor, en términos usuales, es la velocidad relativa del rotor interno con respecto al rotor externo. Debido al efecto de acción y reacción, los torques que actúan en ambos rotores son siempre los mismos y resultan constantes, $k_1 = 1$, y $k_2 = 1$. La relación de velocidades puede ser expresada como

$$\omega_{or} = \omega_{ir} + \omega_{io} \quad (2.14)$$

donde ω_{io} , es la velocidad relativa del rotor con respecto a la velocidad del rotor exterior (estator). La relación de torques puede ser expresada como:

$$T_{ir} = T_{os} = T_e \quad (2.15)$$

Arquitectura con modo de acople opcional

Combinando los acoples de velocidad y par, uno puede establecer una transmisión híbrida en la cual los acoples de torque y velocidad pueden elegirse de manera alternada. Dicha arquitectura se muestra en la Figura 2.7. Cuando se elige el modo de operación por acople de torque, la traba 2 actúa sobre el engranaje corona y el mismo es "desenganchado". Las potencias del ICE y del motor eléctrico suman sus torques a través de los engranajes Z_a , Z_b y el embrague 3. En este caso, el engranaje planetario es usado solo como un reductor de velocidad. La relación de transmisión entre los engranajes porta-planetario y solar, definida como ω_1/ω_3 , equivale a $(1 + i_g)$. Esta es una transmisión paralelo típica con acople por torque. Cuando se elige el modo de acople por velocidad, entonces los embragues 1 y 2 son "enganchados", mientras que el embrague 3 es "desenganchado", y las trabas 1 y 2 liberan los engranajes solar y corona. La velocidad del engranaje porta-planetario conectado a las ruedas es una combinación de las velocidades del ICE y del motor eléctrico. Los torques producidos por el ICE, el motor eléctrico y el torque en el eje de las ruedas están fijados por la relación de la Ecuación 2.13. Con la opción de elegir el modo de acople por velocidad o par, se tienen más

netario como dispositivo de acople de velocidad y un juego de engranajes de eje fijo como dispositivo de acople de torque. Un ICE es conectado al engranaje porta-planetario del engranaje planetario, y un pequeño M/G (pocos kilowatts) es conectado al engranaje solar para formar una configuración de acople de velocidad. El engranaje corona es conectado al eje de las ruedas a través de un engranaje de eje fijo (acople de torque). Mientras tanto, un motor de tracción es también conectado al engranaje de ejes fijo para formar la configuración de acople por torque.

De la Ecuación 2.11, la velocidad rotacional del engranaje corona o engranaje Z_a , que es proporcional a la velocidad del vehículo, está relacionada con la velocidad rotacional del ICE (engranaje porta-planetario) y con la del M/G (engranaje solar) y es expresada como

$$\omega_r = \frac{1 + i_g}{i_g} \cdot \omega_{ice} - i_g \cdot \omega_{m/g} \quad (2.16)$$

donde i_g es la relación de transmisión definida por la Ecuación 2.9, y ω_{ice} y $\omega_{m/g}$ son las velocidades rotacionales del ICE y del M/G respectivamente. El torque de carga, actuando en el engranaje corona del engranaje planetario Z_4 , está relacionado con el torque del ICE y el torque del M/G de la siguiente manera

$$-T_r = \frac{i_g}{1 + i_g} \cdot T_{ice} = -i_g \cdot T_{m/g} \quad (2.17)$$

Dicha ecuación, indica que el torque actuando en el engranaje solar, producido por el M/G tiene dirección opuesta al torque del ICE y la misma dirección que el torque de carga en el engranaje solar. A velocidades bajas del vehículo (baja ω_r) y a velocidades no tan bajas del ICE (mayores que la velocidad de vacío), el M/G tiene que rotar hacia la dirección positiva (misma dirección que la del ICE). Bajo esta condición, el M/G opera con potencia negativa, esto es, generando. La potencia del ICE es separada en dos partes: una parte va hacia el M/G y la otra al vehículo a través del engranaje corona. Sin embargo a altas velocidades, mientras se trata de mantener la velocidad del ICE por debajo de una velocidad dada, para tener altas eficiencias de operación, el M/G puede ser operado con velocidades negativas, esto es, rotando en la velocidad opuesta a la velocidad del ICE. En este caso, la función del M/G es la de controlar la velocidad del motor de combustión, esto es, desacoplar la velocidad del mismo de la velocidad de las ruedas. El motor de tracción agrega un torque adicional al torque de salida del engranaje corona

del engranaje planetario con un modo de acople por torque a través de los engranajes Z_c , Z_b , Z_d y Z_e , por los cuales el torque es desacoplado de la carga de velocidad.

El motor pequeño y el engranaje planetario en la Figura 2.8 pueden ser reemplazados por un motor de estator libre individual. Otra variación de esta arquitectura es la del eje único. Un diseño mas compacto de este tipo de tren de transmisión se puede conseguir integrando el motor de estator libre con el motor de tracción juntos. El diseño de los controladores puede ser mas complicado que para la estructura separada debido al vínculo del campo magnético en el entrehierro doble.

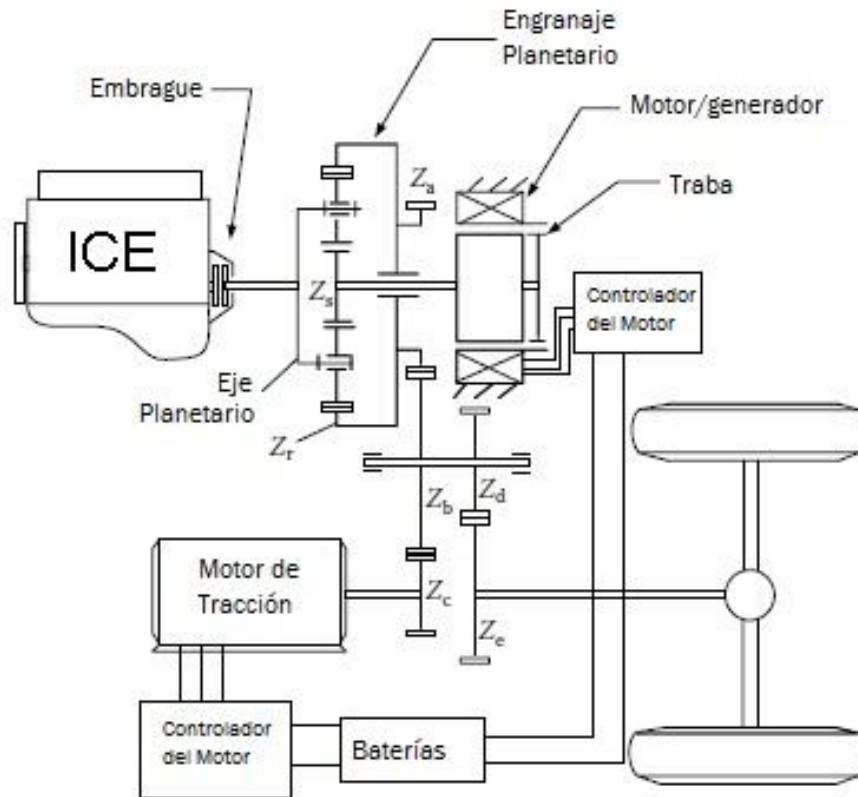


Figura 2.8: Acople integrado de velocidad y par (extraída de [2] pág. 147).

2.3. Vehículos Híbridos Enchufables

El principio de funcionamiento de estos vehículos es el mismo que los híbridos a diferencia que se conectan a la red eléctrica para cargar el banco de baterías.

Una característica muy importante de los EV y los híbridos enchufables a destacar, es que los mismos tienen la capacidad de funcionar como generadores. Estos vehículos pueden aportar al sistema eléctrico el remanente de energía acumulada en el banco de baterías, desempeñándose como generación distribuida (microgeneración) en baja tensión en la matriz energética del país.

Capítulo 3

Componentes del sistema de Propulsión - HEV y EV

3.1. Baterías: *Conceptos Básicos*

3.1.1. Componentes de Celdas y Baterías

Una batería es un dispositivo que convierte energía química contenida en sus materiales activos, directamente en energía eléctrica mediante una reacción electroquímica de oxidación-reducción (redox). En el caso de un sistema recargable, la batería se recarga mediante el proceso inverso. Ese tipo de reacción involucra la transferencia de electrones desde un material a otro a través de un circuito eléctrico. Como la batería convierte electroquímicamente energía química en energía eléctrica, no está sujeta a las mismas ineficiencias que los motores de combustión o calor. Por lo tanto, las baterías son capaces de tener altas eficiencias de conversión de energía. Mientras que usualmente se utiliza el término "batería", la unidad electroquímica básica es la "celda", la cual consta de tres componentes principales:

1. El electrolito, conductor iónico que proporciona el medio de transferencia de carga (los iones), dentro de la celda entre el ánodo y el cátodo.
2. El ánodo o electrodo negativo de la reducción o el electrodo de combustible, que cede electrones en el circuito externo y se oxida en la reacción electroquímica.

3. El cátodo, o electrodo positivo o el electrodo oxidante que acepta electrones del circuito externo y se reduce durante la reacción electroquímica.

El electrolito es típicamente un líquido, como el agua u otros solventes, con sales disueltas, ácidos o álcalis para impartir la conductividad iónica. Algunas baterías utilizan electrolitos sólidos, que son conductores iónicos a la temperatura de funcionamiento de la celda.

Las combinaciones más ventajosas de materiales de ánodo y cátodo son aquellas que sean livianas y den una alta tensión y alta capacidad.

3.1.2. Clasificación de Celdas y Baterías

3.1.2.1. Primarias

Estas baterías no son fácilmente recargables eléctricamente y, por lo tanto, una vez descargadas se descartan. Muchas celdas primarias en las que el electrolito está contenido por un material absorbente o separador (no hay electrolito libre o líquido), se denominan "celdas secas". La batería primaria es una fuente de energía conveniente, usualmente barata y liviana para dispositivos electrónicos y eléctricos portátiles, iluminación, equipos fotográficos, juguetes, memoria de respaldo y muchas otras aplicaciones, proporcionando libertad de la alimentación utilizada. Las ventajas generales de las baterías primarias son: buena conservación, alta densidad de energía para regímenes de descarga bajos a moderados, pequeño tamaño y fácil uso. Aunque se utilizan baterías primarias de gran capacidad en aplicaciones militares, señalización, alimentación de emergencia, y muchas otras, la gran mayoría de las baterías primarias son las familiares celdas cilíndricas individuales y los botones planos o baterías multicelda que utilizan estas celdas como componentes.

3.1.2.2. Celdas o baterías Secundarias o Recargables

Estas pueden ser recargadas eléctricamente, a su condición original, después de una descarga, haciendo pasar corriente a través de esta en dirección opuesta a la dirección de la corriente de descarga. Son dispositivos de almacenamiento para energía eléctrica comúnmente conocidas como baterías de almacenamiento o acumuladores. Las aplicaciones de baterías secundarias se clasifican en dos categorías principales:

1. Aquellas aplicaciones en que la batería secundaria se utiliza como dispositivo de almacenamiento de energía, generalmente siendo conectadas eléctricamente a una fuente cargada por una energía primaria y entregando su energía a la carga demandada. Ejemplos son sistemas automóbiles o de aeronaves, fuentes tipo UPS, HEVs y sistemas de almacenamiento de energía estacionario (SES).
2. Aquellas aplicaciones en que la batería secundaria se utiliza o descarga, esencialmente como una batería primaria, volviendo a cargarse después del uso en lugar de desecharla. Las baterías secundarias se utilizan en esta forma por ejemplo en electrónica de consumo portátil, herramientas eléctricas, vehículos eléctricos, etc, para bajar costos (ya que pueden ser recargadas en lugar de reemplazarlas), y en aplicaciones que requieran flujos de carga más allá de la capacidad de las baterías primarias.

Las baterías secundarias se caracterizan (además de por su propiedad de ser recargadas), por la alta densidad de potencia, altas tasas de descarga, curvas de descarga planas y buena performance a baja temperatura. Sus densidades de energía son generalmente más bajas que de las baterías primarias. Su retención de carga es además más pobre que la mayoría de las baterías primarias, sin embargo la capacidad de las baterías secundarias que se pierde en funcionamiento puede restablecerse mediante recarga. Algunas baterías, conocidas como "de tipo recargable mecánicamente", son "recargadas" mediante el reemplazo del electrodo descargado o empobrecido, usualmente el ánodo metálico, con uno nuevo. Algunas de esas baterías metal/aire son representativas de este tipo de baterías [10]

3.1.2.3. Baterías de Reserva

En estos tipos de baterías primarias, un componente clave está separado del resto de la batería antes de la activación. En esta condición, el deterioro químico o de auto-descarga es esencialmente eliminado, y la batería es capaz de almacenar energía a largo plazo. Normalmente el electrolito es el componente que está aislado. En otros sistemas, como la batería térmica, la batería está inactiva hasta que se calienta, fundiendo un electrolito sólido, que se convierte entonces en conductor. El diseño de la batería de reserva se utiliza para satisfacer requerimientos de almacenamiento extremadamente largos o ambientalmente severos que no pueden cumplirse con una batería "activa" diseñada para las mismas características de comportamiento. Estas baterías

se utilizan, por ejemplo, para entregar alta potencia por períodos de tiempo relativamente cortos, en misiles, torpedos, y otros sistemas de armas.

3.1.2.4. Celdas de combustible

Las celdas de combustible, como las baterías, son celdas electroquímicas galvánicas que convierten la energía química directamente en energía eléctrica. Se estudiará este tema en la Sección 3.2.

3.1.3. Operación de una Celda

3.1.3.1. Descarga

La operación de una celda durante la descarga se muestra esquemáticamente en la Figura 3.1. Cuando la celda está conectada a una carga externa, los electrones fluyen del ánodo, que se oxida, a través de la carga externa hacia el cátodo, donde los electrones son aceptados y el material del cátodo se reduce. El circuito eléctrico se completa en el electrolito por el flujo de aniones (iones negativos) y cationes (iones positivos) hacia el ánodo y el cátodo, respectivamente. La reacción de descarga se puede escribir como sigue, asumiendo un metal como material de ánodo y un material de cátodo como Cl_2 :

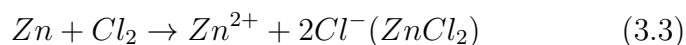
Electrodo Negativo: reacción anódica (oxidación, pérdida de electrones)



Electrodo Positivo: reacción catódica (reducción, ganancia de electrones)



Reacción total (descarga)



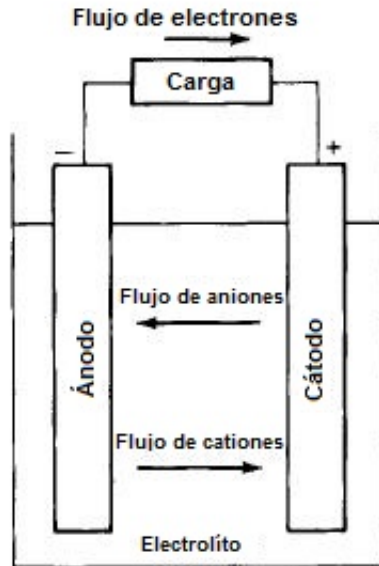


Figura 3.1: Operación electroquímica de una celda (descarga) -extraída de [10] Cap. 1.3.1-

3.1.3.2. Carga

Durante la recarga de una batería recargable o una celda de almacenamiento, el flujo de corriente se invierte y la oxidación tiene lugar en el electrodo positivo y la reducción en el electrodo negativo, como se muestra en la Figura 3.2. En el ánodo es, por definición, el electrodo donde se produce la oxidación y el cátodo es aquel en que la reducción se lleva a cabo, el electrodo positivo es ahora el ánodo y el negativo, el cátodo. En el ejemplo de la celda, Zn/Cl_2 la reacción de carga se puede escribir como sigue:

Electrodo Negativo: reacción catódica (reducción, ganancia de electrones)



Electrodo Positivo: reacción anódica (oxidación, pérdida de electrones)



Reacción total (carga)

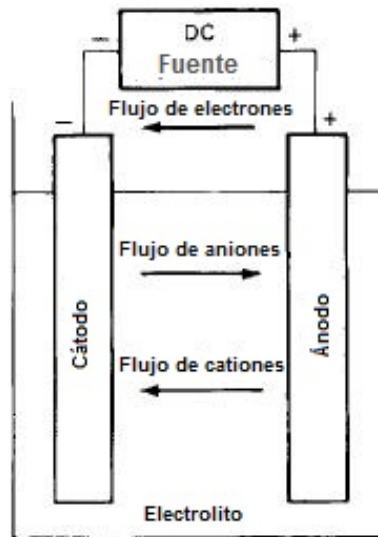
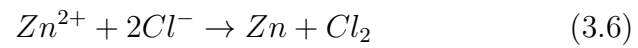


Figura 3.2: Operación electroquímica de una celda (carga) -extraída de [10]
Cap. 1.3.2-

3.1.4. Selección y Aplicación de Baterías

3.1.4.1. Conceptos previos

Capacidad de una batería

La *Capacidad* de una batería es la cantidad de carga libre generada por el material activo en el electrodo negativo y consumida por el electrodo positivo. La capacidad se mide en Ah ($1Ah = 3600Coulomb$, donde 1 C es la carga transferida por una corriente de 1A en 1 segundo).

Las celdas en una batería, típicamente se conectan en serie, y la capacidad de una batería está determinada por la capacidad de celda más pequeña.

Tasa de Descarga

La *Tasa de Descarga* es la corriente a la que la batería se descarga. Se expresa como el cociente Q/h , donde Q es la capacidad Nominal de la batería, y h es el tiempo de descarga en horas.

Por ejemplo, si la capacidad de la batería es $Q = 100Ah$ (usualmente 1 Q se denomina a la capacidad nominal de la batería). Por lo tanto,

$$\text{La tasa } Q/5 \text{ es igual a } \frac{100Ah}{5h} = 20A \quad (3.7)$$

Estado de Carga

El *Estado de carga (SOC)*, es la capacidad actual de la batería. Es la cantidad de carga que resta después de una descarga desde la condición de plena carga. Una medida de SOC se puede realizar descargando la batería a través de una carga conectada entre sus bornes y midiendo la corriente que circula por el circuito resultante. De esta forma se tiene,

$$i(t) = \frac{dq}{dt} \quad (3.8)$$

donde q es la carga que se mueve a través del circuito. El estado de carga teórico instantáneo $SOC_T(t)$, es la cantidad de carga equivalente positiva en el electrodo positivo. Si el estado de carga es Q_T en el instante inicial t_0 , entonces $SOC_T(t_0) = Q_T$. Para un intervalo de tiempo dt ,

$$dSOC_T = -dq = -i(t)dt \quad (3.9)$$

Integrando esta expresión desde un tiempo inicial t_0 a un tiempo t , la expresión para el estado de carga instantáneo, se obtiene como sigue:

$$SOC_T(t) = Q_T - \int_{t_0}^t i(\tau) d\tau \quad (3.10)$$

Energía Específica

La *Energía Específica* de una batería en términos de la energía de descarga relacionada con la descarga completa desde la condición de plena carga viene dada por,

$$SE = \frac{E}{M_B} \quad (3.11)$$

donde E es la energía que se puede extraer de la batería, y M_B es la masa total de la batería.

La unidad para la Energía Específica es Wh/kg .

Energía Teórica

La capacidad de una celda puede además considerarse respecto a una energía (watthora), considerando tanto la tensión como la cantidad de electricidad. Este valor de energía teórica es el máximo valor que puede entregar un sistema electroquímico:

$$Energia(Wa) = Tension(V).Capacidad(Ah) \quad (3.12)$$

3.1.4.2. Consideraciones importantes para la elección de una batería

Las características de cada batería disponible se deberán evaluar contra los requerimientos del equipo y la seleccionada será la que mejor satisfaga esas necesidades. Es importante que la selección de la batería sea considerada al comienzo del desarrollo del equipo en lugar de al final cuando el hardware está determinado. De esta forma, los compromisos más efectivos se pueden evaluar entre las capacidades de la batería y los requerimientos del equipo.

Las consideraciones que son importantes e influyen en la selección de la batería incluyen:

1. *Tipo de Batería*: Primaria, secundaria o sistema de reserva.
2. *Sistema Electroquímico*: Coincidencia entre ventajas, desventajas y características de la batería y requerimientos principales del equipo.
3. *Tensión*: Tensión nominal o de operación, máxima y mínima tensión permitida, regulación de tensión, perfil de la curva de descarga, tiempo de puesta en marcha, retardo de tensión.
4. *Corriente de Carga y Perfil*: Corriente constante, resistencia constante o potencia constante, u otros; valor de la corriente de carga o perfil, carga de valor único o variable.
5. *Ciclo de Trabajo*: Continuo o intermitente, programa de ciclado si es intermitente.
6. *Requerimientos de Temperatura*: Rango de temperatura sobre el que se va a operar
7. *Vida Útil*: Tiempo de operación requerido.
8. *Requerimientos Físicos*: Tamaño, forma, peso; terminales.
9. *Período de Validez*: Sistema de batería activo o de reserva; estado de carga durante almacenaje; tiempo de almacenaje en función de la temperatura, humedad y otras condiciones.
10. *Ciclo de Descarga (si es Recargable)*: Servicio de flote o ciclado; requerimientos de vida o ciclo; disponibilidad y características de la fuente de carga; eficiencia de carga.
11. *Condiciones Ambiente*: Vibración, golpe, rotación, aceleración, etc.; condiciones atmosféricas (presión, humedad, etc.).
12. *Seguridad y Confiabilidad*: Variabilidad permitida, tasas de falla; libre de fugas de gas o derrames; uso de componentes potencialmente tóxicos o peligrosos; tipo de efluentes, contenido de gases o líquidos, altas temperaturas, etc.; operación bajo condiciones extremas o potencialmente peligrosas; amigable con el ambiente.

13. *Condiciones de Operación inusuales o estrictas:* Almacenamiento, tiempo de espera u operación prolongada o en altas temperaturas; alta confiabilidad para aplicaciones especiales; activación rápida para baterías de reserva, sin retardo de tensión; envases especiales para baterías (recipientes de presión, etc.); requerimientos mecánicos especiales, e.g., alto impacto o aceleración, no magnética.
14. *Mantenimiento y Recambio:* Facilidad de adquisición, distribución accesible; facilidad de reemplazo de la batería; instalaciones de carga disponible; transporte especial, recuperación o procedimientos de deposición requeridos.
15. *Costo:* Costo inicial; costo de operación o ciclo de vida; uso de materiales críticos u exóticos (costosos).

3.1.4.3. Aplicaciones Portátiles, Industriales y en EV

Aplicaciones Portátiles. Este es un campo que se expande rápidamente dado que se está introduciendo muchos dispositivos portátiles nuevos que se diseñan para operar solo con baterías o, en algunas casos como computadores portátiles, que operan en ambos modos, con baterías o conectados a la red AC. Ambos tipos de baterías, primarias y secundarias se utilizan en equipos portátiles, dependiendo de la vida de servicio y los requerimientos de potencia, conveniencia, y otros factores.

Aplicaciones Industriales. En estas aplicaciones se utilizan baterías de gran tamaño, usualmente recargables. En muchas de estas aplicaciones, las baterías se utilizan como fuente de energía de respaldo ante eventos de falla de la energía AC. En algunos casos, como con municiones, ayudas de navegación y satélites, las baterías de reserva o primarias se utilizan donde no se dispone de una fuente de electricidad para recargas. Este es otro campo que se expande rápidamente para satisfacer las demandas de Fuentes de Energía Ininterrumpidas (UPS) para computadoras u otros sistemas sofisticados que requiera operación durante las 24 horas del día con una confiabilidad extremadamente alta.

Aplicaciones Vehiculares y de Tracción.

Las baterías han sido una importante fuente de energía para estas aplicaciones, incluyendo aplicación de arranque, iluminación y encendido (SLI)

y para fuente principal de energía para camiones elevadores, carros de golf y otros tantos vehículos. Este es inclusive un campo en crecimiento para aplicación de baterías con el objetivo de reemplazar los motores de combustión interna con fuentes de energía amigables con el ambiente o proporcionando un sistema híbrido que mejore la eficiencia de los motores de combustible fósil y reduzca la cantidad de emisiones censurables y peligrosas (gases efecto invernadero, etc.).

3.1.5. Baterías Secundarias: Tipos y características

Las características importantes de las baterías secundarias o recargables son que la carga y descarga -la transformación de energía eléctrica en energía química y nuevamente a energía eléctrica- debe hacerse suficientemente reversible, debe ser energéticamente eficiente y debe tener mínimos cambios físicos que puedan limitar el ciclo de vida. La acción química, que puede causar deterioro de los componentes de la celda, pérdidas de vida, o pérdidas de energía, debe estar ausente y la celda debe poseer las características deseables de una batería como alta energía específica, baja resistencia, y buen comportamiento en un amplio rango de temperaturas. Estos requerimientos limitan el número de materiales que pueden emplearse satisfactoriamente en un sistema de batería recargable.

3.1.5.1. Baterías de Plomo Ácido

Las baterías de Plomo Ácido tienen muchas de esas características. Los procesos de carga y descarga son esencialmente reversibles, el sistema no sufre de acción de deterioro químico, y mientras la densidad de energía y la energía específica son bajas, el comportamiento de las baterías de Plomo Ácido funcionan en un amplio rango de temperatura. Un factor clave para su popularidad y posición dominante es el bajo costo con buen comportamiento y ciclo de vida.

La batería de Plomo Ácido se diseña en varias configuraciones, desde pequeñas celdas selladas con capacidad de 1 Ah hasta grandes celdas, por encima de los 12000 Ah. Las baterías automotrices SLI son por lejos las más populares y de más amplio uso. Los avances más significativos en el diseño de baterías SLI son, la utilización de contenedores plásticos más livianos, las mejoras en la vida útil, el proceso de "carga seca", y el diseño "libre de mantenimiento". Estas últimas utilizando grillas de plomo-calcio o bajo-

antimonio, han reducido enormemente las pérdidas de agua durante la carga (minimizando la cantidad de agua agregada), y han reducido la tasa de auto descarga tanto que las baterías pueden ser almacenadas y trasladadas en un estado de carga húmedo por períodos relativamente largos. [10] Cap. 22.2

Estas ventajas son atractivas al pensar en aplicaciones de HEVs, donde la alta potencia es la prioridad. Sin embargo, las baterías de Plomo Ácido tienen varias desventajas. La densidad de energía es baja, mayormente debido al alto peso molecular del plomo. Las características de temperatura son pobres. Por debajo de 10°C , la potencia específica y la energía específica disminuyen considerablemente. Este aspecto limita notoriamente la aplicación de baterías de plomo-ácido para vehículos de tracción operados en climas fríos.

La presencia de ácido sulfúrico altamente corrosivo es un riesgo potencial a la seguridad para los ocupantes del vehículo. La liberación de hidrógeno por reacciones de auto-descarga es otro peligro potencial, ya que este gas es extremadamente inflamable incluso en pequeñas concentraciones. La emisión de hidrógeno es además un problema para las baterías selladas herméticamente. En efecto, para lograr un buen nivel de protección contra derrames, se hace necesario sellar la batería, confinando así los gases parásitos en el encapsulado. Como resultado, la presión puede aumentar en la batería, causando hinchazón y solicitaciones mecánicas en el encapsulado y el sello. El plomo en los electrodos es un problema ambiental debido a su toxicidad. La emisión de plomo como consecuencia de la utilización de baterías de plomo ácido puede ocurrir durante la fabricación de baterías, en el caso de siniestro de vehículos (derrame de electrolito a través de las grietas), o durante su disposición al final de la vida útil de la batería.

Distintas baterías de plomo ácido con sus comportamientos mejorados están desarrollándose para EVs y HEVs. Se han obtenido mejoras en las baterías de plomo-ácido selladas en cuanto a energía específica, por encima de 40Wh/kg , con la posibilidad de carga rápida. Una de esas baterías selladas de plomo ácido avanzadas es la batería Electrasource's Horizon. Esta utiliza placa de plomo de tejido horizontal y por lo tanto ofrece ventajas competitivas de alta energía específica (43Wh/kg), alta potencia específica (285W/kg), largo ciclo de vida (más de 600 ciclos para aplicaciones a EV urbanos en carretera), rápida capacidad de recarga (50 % de capacidad en 8 min y 100 % en menos de 30 min), bajo costo por EV, robustez mecánica (estructura robusta de la placa horizontal), característica "libre de mantenimiento" (tecnología de batería sellada), y amigabilidad con el ambiente. Otras tecnologías de baterías de plomo ácido avanzadas incluyen diseños bipolares y diseños de grilla

microtubular.

Las baterías de plomo-ácido avanzadas han sido desarrolladas para compensar sus desventajas. La energía específica se ha incrementado a través de la reducción de materiales inactivos tales como el encapsulado, el colector de corriente, los separadores y demás. Sin embargo el tiempo de vida se ha incrementado por encima de un 50 % -a expensas del costo. En cuanto a seguridad se ha mejorado con procesos electroquímicos diseñados para absorber las liberaciones parásitas de hidrógeno y oxígeno.

3.1.5.2. Baterías de Hidruro de Nickel-Metal

Características generales

Las baterías de Hidruro de Niquel-Metal se han convertido en la tecnología de baterías de avanzada dominante para aplicaciones en EV y HEVs por tener el mejor comportamiento en su conjunto para satisfacer los requerimientos impuestos por la USABC¹. Adicionalmente a los objetivos esenciales de comportamiento en energía, potencia, ciclo de vida y temperatura de operación, las siguientes características de las *NiMH* han establecido esta tecnología en el mercado. [10] Cap. 30.1

- Tamaños de celda flexible desde 0.3 hasta 250 Ah.
- Operación segura a altas tensiones
- Excelente potencia y energía volumétrica.
- Fácil conexión en serie o en paralelo.
- Selección de celdas cilíndricas o prismáticas.
- Seguridad en carga y descarga, incluyendo tolerancia a sobrecarga excesiva o sobredescarga.
- Libre de mantenimiento
- Excelentes propiedades térmicas.

¹US Advanced Battery Consortium, una organización en la que sus miembros, Chrysler Gropu, Ford Motor Company y General Motors Company, están buscando solicitudes de información propuesta para cuatro proyectos relacionados con el desarrollo de baterías avanzadas para vehículos eléctricos, híbridos, enchufables.

- Capacidad para utilizar energía de frenado regenerativa.
- Circuitos de carga y electrónica de control simple y barata.
- Materiales ambientalmente aceptables y reciclables.

La Asociación para los Vehículos de la Nueva Generación (PNGV-*Partnership for the Next Generation Vehicles*-), se creó para permitir a los fabricantes y al gobierno norteamericano, cumplir con una economía de combustible de 80 millas por galón de gasolina (unos 34 km/litro). Para muchos fabricantes, los esfuerzos de desarrollo se centraron en la variedad de conceptos de los HEVs, los cuales tienen muchas ventajas contra los EVs, ya que pueden funcionar sin la necesidad de tener que recargar las baterías que son transportadas a bordo del vehículo por otra fuente externa que no sea el motor de combustión. Para las configuraciones serie o paralelo, el motor eléctrico puede utilizarse para recargar las baterías. Hay una gran variedad de opciones dentro de cada enfoque de baterías como ampliadora de rango, asistencia de energía o modo dual. Es común describir un HEV como vehículo 70/30 o 90/10 donde la razón es la cantidad de energía suministrada por el ICE comparada con aquella de la unidad eléctrica y baterías.

La variedad de modos de operación para cada tipo de vehículo, conducen a tamaños de batería en un rango extremadamente amplio (cualquiera entre 0.9 y 5 kWh). Para vehículos híbridos, el tamaño de celda más pequeño utilizado es 6.5 Ah NiMH Celdas D y el tamaño mayor de celda NiMH para HEV es de alrededor de 60 Ah. En el HEV Honda Insight, el conjunto de baterías NiMH es de 900 Wh y consiste de celdas D de 6.5 Ah a 144 V. En contraste, el HEV Toyota Prius es 1.8 kWh compuesto por celdas D de 6.5 Ah a 288 V. En el HEV General Motors Precept, diseñado como 50/50 ICE sobre unidad eléctrica, se emplea una batería de NiMH de 4.2 kWh que consta de veintiocho módulos de 12 V con una capacidad de 12 Ah.

Los requerimientos de HEV incluyen:

- Densidad de potencia $> 1000\text{W/litro}$.
- Potencia específica $> 500\text{ W/kg}$ hasta más de 1000 W/kg .
- Energía Específica $> 50\text{ Wh/kg}$.
- Carga de freno regenerativo $> 500\text{ W/kg}$.
- Eficiencia de ciclo HEV $> 85\%$.

- Larga vida.
- Bajo costo.
- Sin Efecto Memoria.

3.1.5.3. Baterías Ion-Litio

Las baterías de Ion-Litio (Li-on) están compuestas por celdas que emplean compuestos de intercalación de litio como materiales positivo y negativo. Cuando la batería es ciclada, los iones de litio (Li^+) se intercambian entre los electrodos positivo y negativo. Estas baterías se denominan comúnmente baterías mecedoras debido a que los iones de litio se "mecen" de ida y vuelta entre los electrodos positivo y negativo según la celda se carga o descarga. El material de electrodo positivo es típicamente óxido metálico con estructura de capas, como el Óxido de Cobalto-Litio ($LiCoO_2$), o un material con una estructura tuneleada, como el Óxido de Manganeso-Litio ($LiMn_2O_4$), sobre un colector de papel aluminio. El material de electrodo negativo es típicamente un carbon gráfico, también un material en capas, sobre un colector de cobre. En el proceso de carga/descarga, los iones de litio son insertados o extraídos desde un espacio intersticial entre capas atómicas dentro de los materiales activos.[10] Cap. 35.1

Una desventaja de las baterías Li-ion es que se degradan cuando se descargan por debajo de los 2 V y pueden ventear cuando son sobrecargadas debido a que no poseen un mecanismo químico para manejar la sobrecarga diferente de la química acuosa de celda. Las baterías Li-ion típicamente emplean circuitería de manejo y dispositivos de desconexión mecánica para proveerle protección de sobre-descarga, sobre-carga o condiciones de sobre-temperatura. Otra desventaja de los productos Li-ion es que pierden capacidad permanentemente a temperaturas elevadas ($65^{\circ}C$), aunque a ritmo menor que la mayoría de los productos NiCd o NiMH. La Tabla 3.1, nos ofrece una comparativa entre Ventajas y Desventajas, importante a la hora de decidir si este tipo de baterías resulta adecuado para una aplicación particular.

Ventajas	Desventajas
Celdas selladas; no requieren mantenimiento	Costo inicial moderado
Ciclo de vida largo	Degradación a altas temperaturas
Amplio rango de temperaturas de operación	Necesitan circuitería de protección
Largo tiempo de conservación en venta	Pérdidas de capacidad o fuga térmica en sobrecarga
Baja tasa de auto-descarga	Venteo y posible fuga térmica al aplastarlas
Capacidad de carga rápida	El diseño cilíndrico típicamente ofrece menor densidad de energía que NiCd o NiMH
Capacidad de descarga a alta tasa y alta energía	
Alta eficiencia de carga y de energía	
Alta energía específica y densidad de energía	
No posee efecto memoria	

Tabla 3.1: Ventajas y Desventajas de las Baterías Li-ion (extraída de [10] Cap. 35.1)

Desde el primer anuncio de la batería Li-ion en 1991, la tecnología de baterías Li-ion ha crecido de una forma sin precedentes por lo que actualmente se considera como la batería recargable del futuro más promisoria. Aunque en estado de desarrollo, la batería Li-ion ya ha ganado aceptación para aplicaciones de EV y HEV.

La batería de Li-ion utiliza intercalación material de carbon litiado (Li_xC) para el electrodo negativo en lugar de litio metálico, una intercalación de óxido con transición de metal litiado ($\text{Li}_{1-x}\text{M}_y\text{O}_z$) para el electrodo positivo y una solución líquida orgánica o un polímero sólido para el electrolito. Los iones de litio están meciéndose a través del electrolito entre los electrodos positivo y negativo durante la descarga y carga. La reacción electroquímica general se puede describir como



Durante la descarga, se liberan iones de litio desde el electrodo negativo que migran a través del electrolito y son recogidos por el electrodo positivo.

Durante la carga el proceso es el inverso.

Los materiales posibles para el electrodo positivo pueden ser $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2$, $\text{Li}_{1-x}\text{NiO}_2$ y $\text{Li}_{1-x}\text{Mn}_2\text{O}_4$ que tiene las ventajas de estabilidad en el aire, alta tensión y reversibilidad de la reacción de intercalación de litio.

El tipo $\text{Li}_x\text{C}/\text{Li}_{1-x}\text{NiO}_2$, vagamente llamado C/LiNiO_2 o simplemente llamado batería Li-ion basada en níquel, tiene una tensión nominal de 4 V, una energía específica de 120 Wh/kg, una densidad de energía de 200 Wh/litro, y una potencia específica de 260 W/kg. Las basadas en cobalto, tienen energía específica y densidad de energía más altas, pero con un costo más alto e incremento significativo de tasa de auto descarga. Las basadas en manganeso, tienen el costo más bajo y su energía específica y densidad de energía se encuentra entre los valores de las basadas en cobalto y basadas en níquel.[2] Pág. 390.

3.2. Celdas de Combustible

3.2.1. ¿Que es una celda de combustible?

En 1839, William Grove descubrió el principio básico de funcionamiento de las celdas de combustible revirtiendo la electrólisis del agua para generar electricidad a partir del hidrógeno y el oxígeno. El principio que él descubrió permanece vigente aún hoy.

Una celda de combustible es un "dispositivo" electroquímico que convierte de manera continua energía química en energía eléctrica (y algo de calor) durante el tiempo en que se le provea combustible y oxidante.

Las celdas de combustible² presentan similitudes con las baterías, en cuanto a que comparten la naturaleza electroquímica del proceso de generación de energía; y con los motores – a diferencia de las baterías –, en cuanto a que consumen algún tipo de combustible de manera continua. Aquí es donde las analogías terminan. A diferencia de las baterías o los motores, una CdC no necesita ser recargada, opera tranquilamente y eficientemente, y – cuando el hidrógeno es usado como combustible – genera solo energía y agua potable.

²Se abreviará celda de combustible por CdC

Debido a ello, es que son llamados *motores de cero emisión*. Desde el punto de vista Termodinámico, la mayor diferencia es que los motores térmicos están limitados por su *eficiencia de Carnot* mientras que las CdC no.

La CdC de Grove era un recipiente frágil llenado con ácido sulfúrico diluido, en el cual eran sumergidos electrodos de platino. Desde allí hasta las tecnologías modernas de CdC ha habido un largo y tortuoso camino.[4]

3.2.2. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento básico de las CdC es simple.

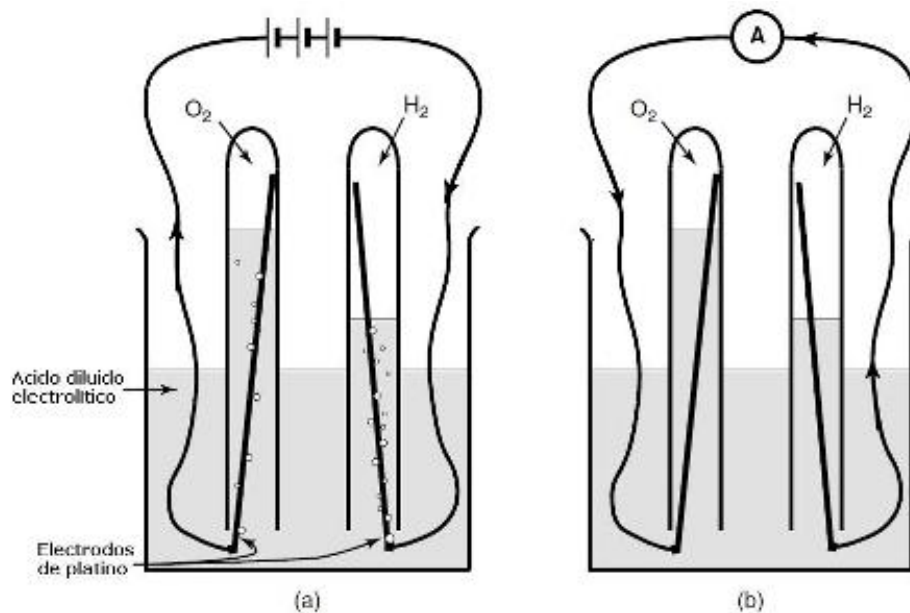


Figura 3.3: (a) La electrólisis del agua. El agua es separada en hidrógeno y oxígeno al hacerle pasar una corriente eléctrica a través de ella. (b) Una pequeña corriente fluye. El oxígeno e hidrógeno están siendo recombinaidos (extraída de [9] Pág. 1)

El experimento realizado por William Grove en 1839, Figuras 3.3(a) y 3.3(b) muestra como el agua se está llevando a la electrólisis separándose en hidrógeno y oxígeno pasando una corriente eléctrica a través de ella. En la Figura 3.3(b) la fuente de voltaje ha sido reemplazada por un amperímetro,

y una pequeña corriente está circulando. La electrólisis está siendo revertida, el hidrógeno y oxígeno están siendo recombinados, y una corriente eléctrica está siendo generada.

Otra manera de ver a las CdC, es decir que el combustible hidrógeno está siendo "quemado" en la reacción simple



Sin embargo, se produce energía eléctrica en lugar de liberarse energía en forma de calor. El experimento mostrado en las Figuras 3.3(a) y 3.3(b) presenta una demostración del principio básico de las celdas de combustible, pero las corrientes producidas son muy pequeñas. La principales razones por las cuales estas corrientes son bajas son:

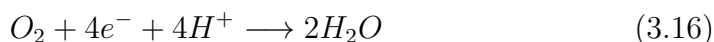
1. La pequeña superficie de contacto entre el gas, el electrodo y el electrolito.
2. La larga distancia entre los electrodos

Para solucionar estos problemas, los electrodos son usualmente contruidos chatos, con una pequeña capa de electrolito. La estructura del electrodo es porosa para que ambos, el electrolito por un lado y el gas por el otro puedan penetrarlo. Esto es para tener el mayor contacto posible entre al electrodo, el electrolito, y el gas.

Sin embargo, para entender cómo la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno produce corriente eléctrica, y dónde es que entran los electrodos, se necesita considerar por separado las reacciones que se producen en cada uno de los electrodos. Estos detalles importantes varían para diferentes tipos de CdC, pero se verá ahora el tipo mas simple, que a su vez es el mas común. En el ánodo de las CdC de ácido electrolítico, el gas hidrógeno se ioniza, liberando electrones y creando iones H^+ (o protones).



Esta reacción libera energía. En el cátodo, el oxígeno reacciona con electrones tomados desde el electrodo, y con los iones H^+ tomados desde el electrolito para formar agua.



Claramente, para que estas dos reacciones se sigan produciendo de manera continua, los electrones producidos en el ánodo deben pasar a través de un circuito eléctrico hacia el cátodo. Además, los iones H^+ deben pasar a través del electrolito. Un ácido es un fluido con iones H^+ libres, y por lo tanto sirve a este propósito muy bien. Ciertos polímeros pueden además ser fabricados para contener iones H^+ móviles. Estos materiales son llamados membranas de intercambio de protones, ya que un H^+ es un proton. Comparando las Ecuaciones 3.15 y 3.16 podemos ver que dos moléculas de hidrógeno serán necesarias por cada molécula de oxígeno si se quiere que el sistema se mantenga balanceado. Debe notarse que el electrolito solo debe permitir a los iones H^+ pasar a través de él, y no a los electrones. De otra manera, los electrones pasarían a través del electrolito, no por el circuito exterior, y todo se perdería.

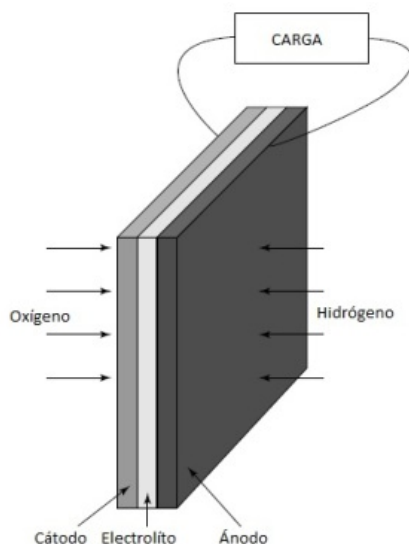


Figura 3.4: Estructura básica de una CdC cátodo-electrolito-ánodo (extraída de [9] Pág. 3)

En las CdC con electrolito alcalino, la reacción es en general la misma, pero las reacciones en cada electrodo son diferentes. En una alcalina, los iones de hidroxilo (OH) están disponibles y libres. En el ánodo, estos reaccionan con el hidrógeno, liberando energía y electrones, y produciendo agua.

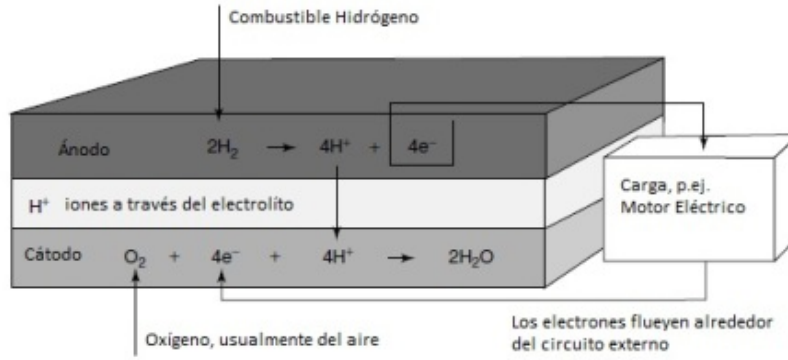
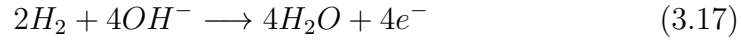


Figura 3.5: Reacciones en los electrodos y el flujo de carga para una CdC de ácido electrolítico. Notar que aunque los electrones negativos fluyen desde el ánodo hacia el cátodo, la 'corriente convencional' fluye desde el cátodo hacia en ánodo (extraída de [4] Pág. 3)



En el cátodo, el oxígeno reacciona con los electrones tomados desde el electrodo, y el agua en el electrolito, formando nuevos iones OH^- .



Para que estas reacciones se produzcan de manera continua, los iones OH^- deben poder pasar a través del electrolito, y debe haber un circuito eléctrico para que los electrones pasen desde el ánodo hacia el cátodo. Además, comparando las Ecuaciones 3.17 y 3.18 vemos que, como con el electrolito ácido, se necesita el doble de cantidad de hidrógeno que de oxígeno. Esto es mostrado en la Figura 3.6. Notar que aunque el agua es consumida en el cátodo, es creada el doble de rápido en el ánodo. Hay muchos tipos diferentes de CdCs, con diferentes electrolitos. Es posible distinguir seis grandes tipos de CdC, dependiendo del tipo de su electrolito. Estas son las celdas de membrana de intercambio de protones (PEM) o las de membrana de intercambio de polímero (PEMFCs), las celdas alcalinas (AFCs), las celdas de ácido fosfórico (PAFCs), las de carbonato fundido (MCFCs), las de óxido sólido (SOFCs), y las de metanol directo (DMFCs). Los detalles de las reacciones en los ánodos

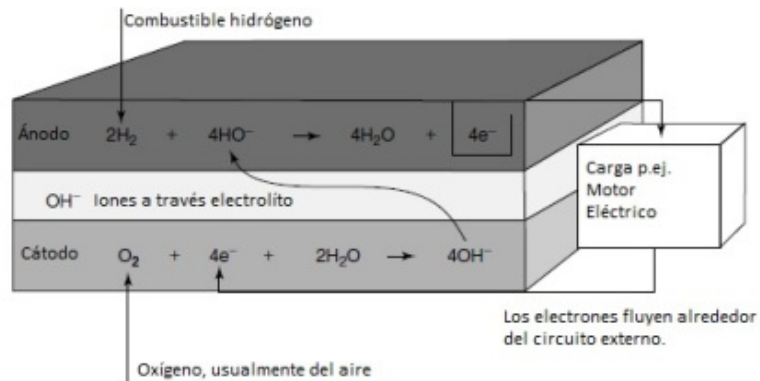


Figura 3.6: Las reacciones en los electrodos y el flujo de las cargas para una CdC alcalina. Los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo, pero la corriente convencional positiva fluye desde el cátodo hacia el ánodo (extraída de [9] Pág. 5)

y cátodos son diferentes en cada caso. Sin embargo, no es apropiado repasar cada ejemplo aquí.[9]

3.2.3. ¿Que es lo que limita la corriente?

En el ánodo, el hidrógeno reacciona, liberando energía. Sin embargo, simplemente por librar esa energía, no quiere decir que la reacción sucede a un ritmo ilimitado. La reacción tiene la "clásica" forma de energía, tal cual es mostrado en la Figura 3.7. Aunque "la energía es liberada", la "energía de activación" debe ser suministrada para poder pasar el "pico de energía". Si la probabilidad de que una molécula tenga la energía suficiente es baja, entonces la reacción se producirá de una manera lenta. Este es precisamente el caso de las reacciones en las CdCs, excepto a muy altas temperaturas.

Las tres maneras mas importantes de tratar con estos ritmos de reacciones lentas son:

1. El uso de catalizadores
2. Elevando la temperatura
3. Aumentando la superficie de contacto del electrodo

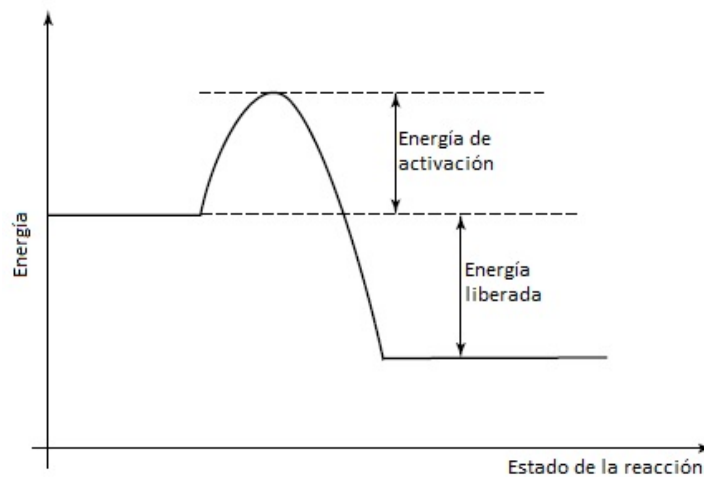


Figura 3.7: Diagrama clásico de energía para una simple reacción química exotérmica (extraída de [9] Pág. 5)

Las primeras dos pueden ser aplicadas a cualquier reacción química. Sin embargo la tercera es especial para las CdCs y es muy importante. Si se considera una reacción tal cual la de la ecuación 3.17, se ve que los iones de gas combustible OH^- son necesarios, al igual que la necesaria energía de activación. Luego, este "acercamiento" entre los iones de combustible H_2 y OH^- debe ocurrir en la superficie del electrodo, mientras los electrones producidos son eliminados. Esta reacción, que involucra combustible u oxígeno (generalmente un gas), con el electrolito (sólido o líquido) y con el electrodo es a veces llamada la fase de tres contactos. Este vínculo entre estas tres cosas es un tema muy importante en el diseño de Celdas. Claramente, el ritmo al cual estas reacciones tengan lugar será proporcional a la superficie del electrodo. Esto es muy importante. De hecho, la superficie del electrodo es un tema tan vital, que el rendimiento de un diseño de Celda es muchas veces citado en términos de corriente por centímetro cuadrado. Como ya fue mencionado, el electrodo está diseñado de manera porosa. Esto tiene el efecto de incrementar la superficie efectiva de la misma. Las celdas de combustible modernas tienen una micro-estructura que les permite tener superficies de contacto que pueden ser cientos o incluso miles de veces su ancho por alto. El diseño micro-estructurado de fabricación de una celda de un electrodo de una CdC, es por lo tanto un tema muy importante para estas. Además de

estas consideraciones de la superficie de contacto, los electrodos pueden tener que incorporar un catalizador y soportar altas temperaturas en un ambiente corrosivo.[9]

3.2.4. Conexionado de celdas en serie - La placa bipolar

Los voltajes de las CdC son bastante pequeños, alrededor de 0.7V cuando están produciendo una corriente útil. Esto quiere decir que para producir voltajes útiles, se tienen que conectar varias CdC en serie. Dicha colección de CdC en serie es conocida como "banco". La forma mas obvia de realizar esto es conectando el extremo de cada ánodo al extremo de cada cátodo de la próxima celda.

El problema con este método es que los electrones tienen que fluir a través de la cara del electrodo hasta el conector de corriente en el extremo. Los electrodos deberían ser buenos conductores, pero si cada celda está operando solo a 0.7V, entonces aún una pequeña baja de tensión es importante. Aunque es el método mas sencillo, este no es el que se usa.

Un método mucho mejor de interconexión es usando "placas bipolares". La placa bipolar sirve como medio de alimentación de oxígeno al cátodo y gas combustible al ánodo. Aunque debe haber una buena conexión eléctrica entre los dos electrodos, los dos suministros deben estar estrictamente separados. Dichas placas bipolares tienen una forma "acanalada" y son fabricadas a partir de un buen conductor como el grafito o el acero inoxidable. Tal forma "acanalada", tiene canales para que los gases puedan fluir por sobre las caras de los electrodos. Al mismo tiempo, son fabricadas de tal manera de que hagan un buen contacto eléctrico con la superficie de cada electrodo alternado. El banco de celdas, tiene canales verticales para alimentar con hidrógeno los ánodos y tiene canales horizontales para alimentar con oxígeno (o aire) a los cátodos. El resultado es un bloque sólido en el cual la corriente eléctrica pasa eficientemente, directa a través de las celdas, en lugar de pasar por las superficies de cada electrodo uno después del otro. El diseño de una placa bipolar no es nada simple, difíciles, frágiles y caras a la hora de fabricarlas.[9]

3.2.5. Suministro de los gases y enfriamiento

El arreglo mostrado en la Figura 3.8 ha sido simplificado para mostrar el principio básico de las placas bipolares. Sin embargo, el problema del su-

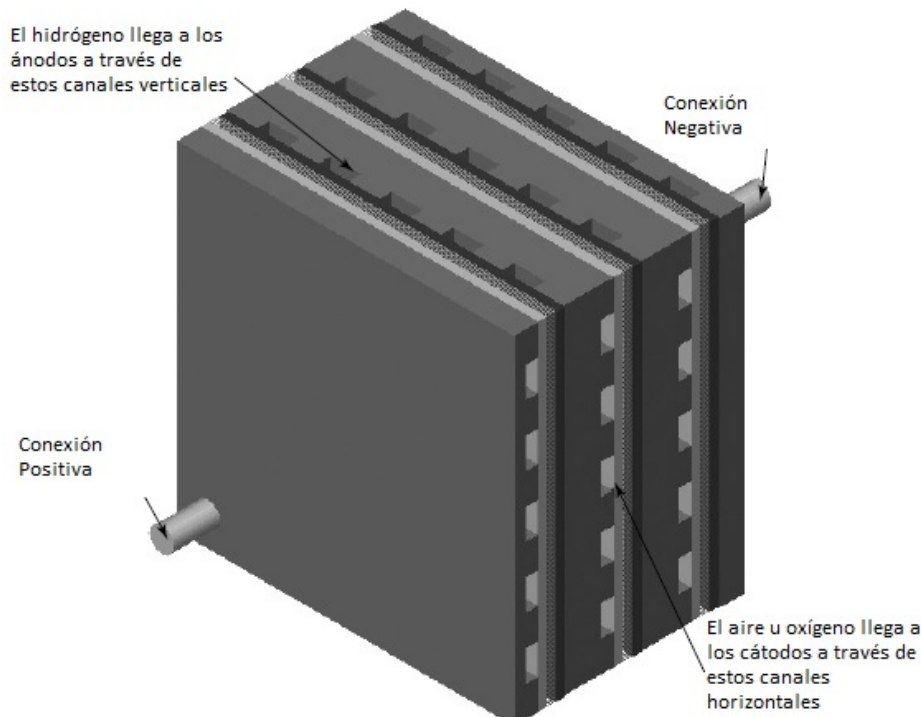


Figura 3.8: Un banco de tres celdas donde se muestra como las placas bipolares conectan el ánodo de una celda con el cátodo de su vecina (extraída de [9] Pág. 10)

ministro de gas y el cuidado de prevenir pérdidas significa un poco más de complejidad en el diseño real de bancos de celdas. Debido a que los electrodos deben ser porosos, los mismos permiten pérdidas de gas sobre sus extremos. El resultado es que dichos extremos de los electrodos deben ser sellados. El combustible y el oxígeno pueden ser suministrados a los electrodos usando colectores especiales. Debido a estos sellados, el hidrógeno debería solo entrar en contacto con los ánodos ya que es suministrado verticalmente a través del banco de CdC. Análogamente, con el oxígeno en los cátodos de manera horizontal. Este arreglo con los colectores tiene la ventaja de la simplicidad, pero sin embargo tiene dos grandes desventajas. La primera es la dificultad de enfriar el sistema. Las CdC están lejos del 100 % de eficiencia, y son generadas cantidades considerables de energía en forma de calor al igual que energía eléctrica. En la práctica estos tipos de CdC tienen que ser enfriadas

con el aire reactante pasando por los cátodos. Esto significa que el aire tiene que ser suministrado a un ritmo mayor que el que demanda la química de la Celda, a veces esto es suficiente para enfriar la celda, pero es una pérdida de energía. La segunda desventaja es que la juntura alrededor de los extremos de los electrodos no está presionada uniformemente, ya que en los puntos donde hay canales, la juntura no está presionada firmemente contra los electrodos. Esto resulta en una alta probabilidad de perdidas de gases reactivos. Un arreglo mas común, requiere unas placas bipolares mas complejas. Estas placas se fabrican mas largas en relación a los electrodos, y tienen canales extras recorriendo el banco de celdas. Entonces un banco típico de celdas tiene varias conexiones, dos para los bornes de conexión eléctrica, una para el suministro de hidrógeno, otra para el suministro de oxígeno, y otra para el suministro del refrigerante.[9]

3.2.6. Las Celdas de Combustible y los vehículos híbridos

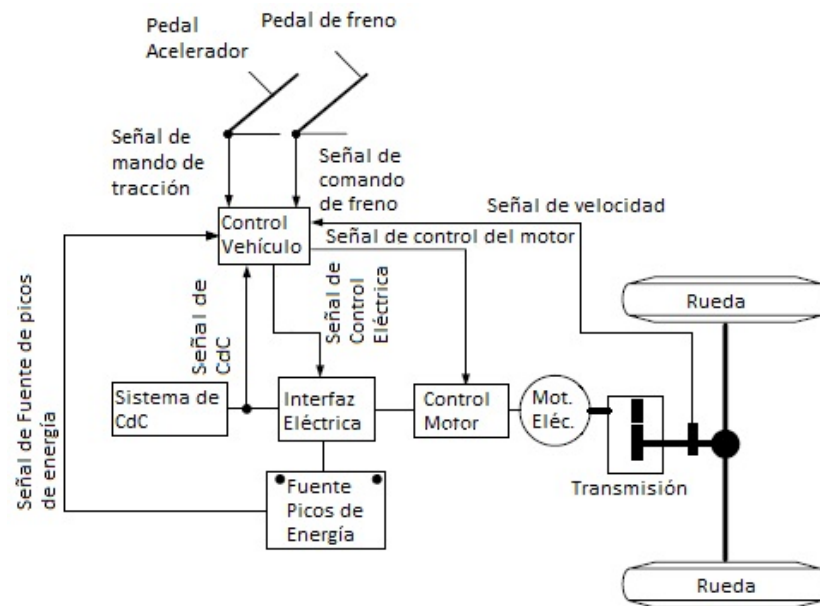


Figura 3.9: Configuración de un sistema híbrido a base de CdC típico (extraída de [2] Pág. 460)

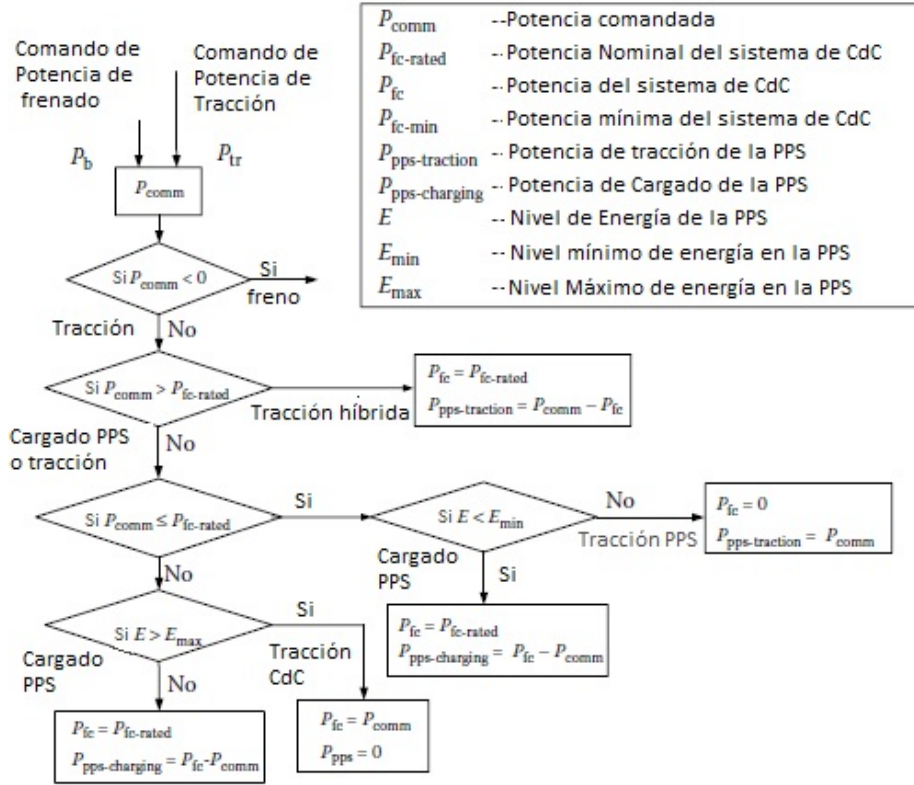


Figura 3.10: Diagrama de flujo de la estrategia de control (extraída de [2] Pág. 461)

Las CdC, son consideradas como uno de las fuentes de energía mas avanzadas para aplicaciones en el transporte. Comparándolas con los motores de combustión interna, las CdC tienen las ventajas de alta eficiencia energética y mucho menos emisiones. Esto es porque las mismas convierten la energía disponible en el combustible en energía eléctrica, sin tener que pasar por la combustión. Sin embargo, los vehículos impulsados solamente por CdC tienen algunas desventajas, tales como el gran peso y volumen causado por la baja densidad de energía del sistema de CdC, largos tiempos de arranque, y lentas respuestas de energía. Los HEV con CdC son totalmente diferentes a los vehículos convencionales con motores de combustión interna, y los vehículos híbridos basados en motores de ICE. El sistema híbrido impulsado por CdC tiene una estructura como la mostrada en la Figura 3.9. Consiste prin-

principalmente de un sistema de CdC como la fuente primaria de energía, una fuente de picos de energía³(Batería), y un motor eléctrico (y su controlador), un controlador del vehículo, y una interfaz electrónica entre las CdC y la PPS. De acuerdo al comando de torque recibido desde el acelerador o pedal de freno y otras señales de operación, el controlador del vehículo controla la salida de energía del motor (torque) y la energía que fluye entre el sistema de CdC y la PPS. Para los picos de demanda, por ejemplo en fuerte aceleración, ambos el sistema de CdC y la PPS suministran propulsión energética al motor eléctrico. En el frenado, el motor eléctrico, funcionando como generador, convierte parte de la energía de frenado en energía eléctrica y la almacena en la PPS. La PPS puede también devolver la energía que proviene del sistema de CdC cuando la carga energética es menor que la energía nominal del sistema de CdC. Además, con un diseño adecuado de una estrategia de control, la PPS nunca deberá ser cargada desde afuera del vehículo. En la Figura 3.10 se expone el diagrama de flujo típico de una estrategia de control para el sistema híbrido mostrado en la Figura 3.9.[2]

3.3. Motores de Combustión Interna (ICE)

3.3.1. Introducción

El motor de combustión interna es la planta de energía más popular para vehículos motorizados. En el futuro previsible, seguirán siendo las plantas de energía vehicular dominantes. En los HEVs, el ICE será siempre la primer elección como fuente de energía primaria. Sin embargo, la operación de un HEV difiere de la de un vehículo motorizado convencional. El ICE de un HEV arranca por un período más largo de tiempo a altas potencias y no requiere que esta energía se cambie frecuentemente. Aún no se ha desarrollado un motor diseñado y controlado específicamente para aplicaciones de HEVs.

3.3.2. 4S, ICE encendidos por chispa (bujías)

3.3.2.1. Principios de Operación

Un ICE encendido por chispa (SI -Spark-Ignited), se muestra en la Figura 3.11. Este está formado por subsistemas incluyendo alimentación (cigüeñal,

³PPS, de la sigla en inglés (Peaking Power Source)

varillas de conexión - Bielas, pistones - Émbolos y cilindros), admisión y escape (filtro de aire, acelerador, colectores de entrada y escape, válvulas de admisión y escape y cámaras de control de válvula), suministro de combustible (tanque de combustible, bomba de combustible (no mostrada) inyectores de combustible), encendido (batería, bobinas de encendido, distribuidor y bujías), refrigeración (refrigerante, bomba de agua, radiador), y lubricación.

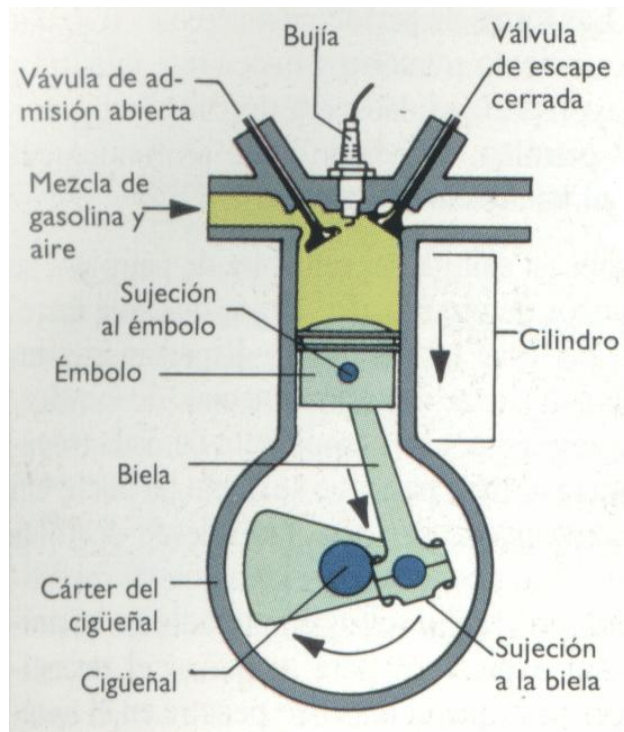


Figura 3.11: 4S, motor SI a gasolina (como aparece en http://nauticaonline.blogspot.com/2009_05_01_archive.html)

La combustión de la mezcla aire-combustible formado dentro del colector de admisión y confinado en el cilindro produce calor, tanto que la temperatura y presión en el cilindro crece rápidamente. Entonces, el pistón es forzado a moverse hacia abajo. Las varillas de conexión (Bielas) transfieren el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación del cigüeñal. Un motor SI, 4S tiene cuatro procesos intrínsecos correspondientes a los cuatro tiempos del movimiento de cada pistón (Figura 3.12). Como se aprecia en la Figura,

el proceso se da en 5 etapas llamadas Admisión, Compresión, Ignición, Expansión y Escape (se muestran de izquierda a derecha respectivamente).

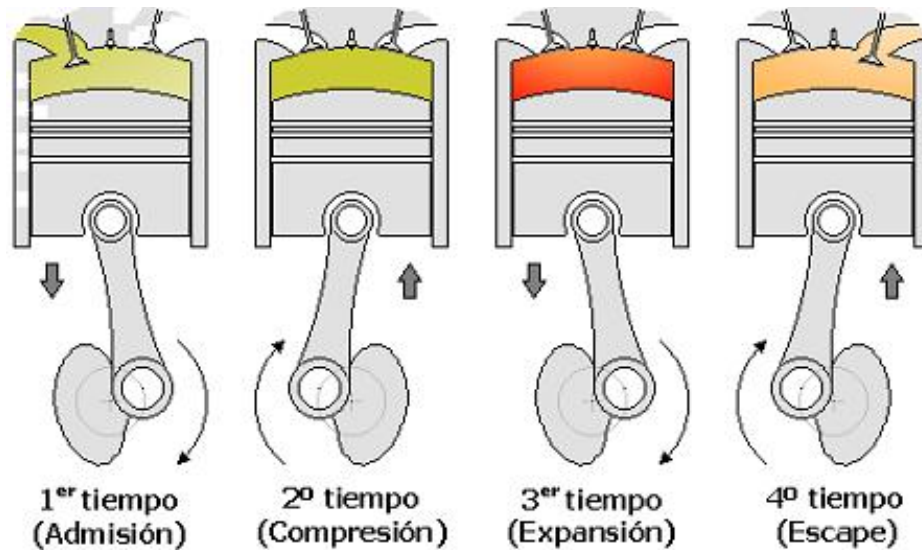


Figura 3.12: Cuatro tiempos de un ICE encendido a chispa (como aparece en www.yomecanico.com/ciclo-otto-o-de-4-tiempos)

1. *Tiempo de Admisión (proceso de llenado de cilindro)*: La válvula de admisión está abierta, la válvula de escape está cerrada, y el pistón desciende, atrayendo una carga de mezcla aire-combustible formada dentro de la válvula de admisión.
2. *Tiempo de Compresión*: Ambas válvulas, de admisión y escape, están cerradas, y el pistón sube, comprimiendo la mezcla de aire-combustible en el cilindro. A medida que el pistón se aproxima al punto muerto superior (top dead center -TDC-), la bujía produce una chispa para encender la mezcla aire-combustible.
3. *Tiempo de Expansión (producción de energía o proceso de trabajo)*: Hay una propagación de la combustión a través de la carga, incrementando la temperatura y presión dentro del cilindro, moviendo el pistón hacia abajo. Al final del golpe de expansión, la válvula de escape se abre y

la expansión irreversible de los gases de escape hace que sean expelidos por la válvula de escape, que es llamada "purga".

4. *Tiempo de escape*: La válvula de escape permanece abierta, y a medida que el pistón se mueve hacia arriba del cilindro, los gases remanentes en el cilindro son expelidos. Al final del tiempo de escape, la válvula de escape se cierra. Sin embargo, algunos gases residuales quedarán. Este escape diluye la próxima carga. Seguidamente, comienza el tiempo de admisión del próximo ciclo.

Debido a que este ciclo se completa una vez cada dos revoluciones del cigüeñal, el tren de árbol de levas (para apertura y cierre de válvulas) debe ser impulsado por el mecanismo de funcionamiento a la mitad de la velocidad del cigüeñal (velocidad del motor).

Parte de la energía del tiempo de expansión se almacena en el volante para proveer energía para los otros tres tiempos.

3.3.3. Parámetros operacionales

■ Valores Nominales de ICEs

Los parámetros más comunes para el comportamiento de ICEs son los que siguen:

Potencia Nominal Máxima: La potencia más alta que el motor puede desarrollar durante un corto período de operación.

Potencia Nominal Normal: La potencia más alta que el motor puede desarrollar en operación continua.

Velocidad Nominal: Velocidad rotacional del cigüeñal, a la que se desarrolla la Potencia Nominal.

Para aplicaciones vehiculares, el comportamiento de los motores se define más precisamente como sigue:

1. La potencia máxima (o torque máximo), disponible a cada velocidad dentro del rango operativo útil del motor.

2. El rango de velocidad y potencia por encima del cual la operación del motor es satisfactoria.[2]

El rendimiento de un motor térmico se mide mediante la eficiencia del ciclo de motor térmico, definido como la razón entre la salida de trabajo neto total por ciclo W_{net} y la transferencia de calor hacia el motor por ciclo. Otra forma de definir el rendimiento de motores térmicos es usar la Presión Efectiva Media P_{me} . La P_{me} es la presión manométrica constante teórica que, ejercida sobre el pistón durante el golpe de expansión entre el mayor volumen específico y el menor volumen, producirá el mismo trabajo neto que el producido realmente por el motor térmico. Escrito matemáticamente,

$$P_{me} = \frac{|W_{net}|}{volumen\ desplazado}$$

El análisis de rendimiento del ciclo de motor térmico se realiza a partir de la información disponible en ciertos puntos de estado convenientes en el ciclo. Los parámetros necesarios en los puntos de estado son, presión, temperatura, volumen y entropía. Si se conocen dos parámetros en dos puntos de estado, entonces se obtiene usualmente del proceso que el fluido de trabajo sigue entre los dos puntos de estado (como presión constante, isoentrópico, etc.), y las leyes de la termodinámica.

Los motores de combustión tienen una baja eficiencia del orden del 30 al 40 % debido a pérdidas térmicas, esto significa que tan solo un 30 % de la energía acumulada en el combustible puede transformarse en energía útil en el eje del motor.

3.3.4. Motores Alternantes

Los dos tipos de ICE alternantes son el Motor Encendido a chispa (SI), y el Motor encendido por compresión (CI). Los dos tipos se conocen comúnmente como motor gasolina/petróleo y motor diesel, basado en el tipo de combustible usado para la combustión. La diferencia entre los dos motores está en el método de iniciación de la combustión y en el proceso del ciclo. En un motor SI, se inyecta una mezcla de aire y combustible, y una bujía enciende la carga. La cantidad admitida se denomina *carga*. En un motor CI, se inyecta aire y es comprimido a alta presión y temperatura tal que la combustión comienza espontáneamente luego al inyectar el combustible. Los motores SI

son relativamente livianos y de más bajo costo y se utilizan como motores de baja potencia, como en los autos convencionales. Los motores CI son más aconsejables para conversión de energía en un rango de potencia mayor, como en camiones, ómnibus, locomotoras, barcos y en unidades de energía auxiliares. La economía de combustible es mejor que en los motores SI, justificando su uso en aplicaciones de más alta potencia.

De acuerdo a la Figura 3.11 bosquejo de un ICE alternante, incluyendo los términos usuales para este tipo de motores, se muestra en el Figura 3.11. La posición del pistón en la parte inferior del cilindro cuando el volumen dentro es máximo se conoce como *punto muerto inferior (BDC, bottom dead center)*. La posición del piston en la parte superior del cilindro cuando el volumen dentro es mínimo se conoce como *punto muerto superior (TDC, top dead center)*. A este volumen mínimo de cilindro cuando el pistón está en el TDC se le conoce como volumen de despeje. Un mecanismo de manivela, convierte el movimiento lineal del pistón en un movimiento de rotación y entrega la energía al cigüeñal. El volumen barrido por el pistón cuando este se mueve desde el TDC al BDC se conoce como volumen de desplazamiento, el cual es un parámetro comúnmente usado para especificar el tamaño de un ICE. La *razón de compresión* se define como la razón entre el BDC y el TDC.

El diámetro del cilindro es llamado *calibre*. El calibre en motores SI automotores se encuentra típicamente entre 70 y 100mm. Calibres demasiado pequeños no dejan lugar para las válvulas, mientras que calibres excesivamente grandes significan mayor masa y mayor tiempo de viaje de llama. Los calibres más pequeños permiten motores de más rpm (revoluciones por minuto). La distancia vertical recorrida por el pistón desde el BDC hasta el TDC se llama *golpe*. El golpe se encuentra típicamente entre 70 y 100mm.

Número de Cilindros	Arreglo de Cilindros
3	En línea
4	En línea, plano
5	En línea
6	En línea, plano, V(estrecho, 60°, 90°)
8	V(90°)
10	V(90°)
12	V,plano(para exóticos)

Tabla 3.2: Disposición de Cilindros en ICE Automotrices.

Un golpe muy corto significa que no habrá suficiente torque. El largo del golpe está limitado por las velocidades del pistón. El mínimo desplazamiento de un cilindro puede ser 250cc, mientras que el máximo puede ser más de 1000cc. Los tamaños de calibre y golpe aceptables conducen a motores de múltiples cilindros. Los cilindros múltiples se pueden colocar en configuración de línea, plano o en forma de V, dependiendo del número de cilindro. Los arreglos típicos se muestran en la Tabla 3.2.

Para un buen balance rotacional primario, los golpes de potencia de los multiples cilindros están igualmente espaciados. Los arreglos de motor que tienen un buen balance primario son En Línea 4 y 6 cilindros, 90° V 8 cilindros, y Plano 4 y 6 cilindros. Los arreglos que tienen un balance primario pobre son 90° V 6 cilindros y En Línea 3 y 6 cilindros. En los arreglos con pobre balance primario, se utilizan ejes de contra-rotación para cancelar la vibración.

La distribución de las válvulas en el cilindro se conoce como tren de válvulas. El tren de válvulas puede ser sobre la válvula (OHV -*Overhead Valve*-), cabeza de leva de válvula única (SOHC -*Single Overhead Cam*-), cabeza de leva de válvula dual (DOHC -*Dual Overhead Cam*-). El OHV tiene leva, carrete de empuje, balancín, y válvula; el SOHC tiene leva, balancín, y válvula; mientras el DOHC tiene leva, balancín, leva y válvula. Puede haber 2, 3, 4 o 5 válvulas en un cilindro. El número de válvulas elegidos depende del equilibrio entre flujo y complejidad.

3.3.5. Ciclos Prácticos Normales de Aire

Los ICE de automóviles son típicamente motores 4S (4 tiempos), en los que el pistón ejecuta cuatro golpes de cilindro cada dos revoluciones del cigüeñal. Los cuatro golpes son admisión, compresión, expansión o potencia y escape según se vio en la Sección 3.3.2.1. Las operaciones dentro de los cuatro golpes se ilustran en la Figura 3.13. Los números del uno al cinco en el diagrama representan los distintos puntos de estado entre los procesos del ciclo. La admisión es el proceso de drenaje de la carga dentro del cilindro con la válvula de admisión abierta. El fluido de trabajo se comprime en el paso de compresión, con el pistón viajando desde BDC hasta TDC. El trabajo es realizado por el pistón en el paso de compresión. En el siguiente paso, se agrega calor durante la ignición del fluido comprimido, con el respectivo proceso de ignición para motores SI y CI. El siguiente paso es el proceso de

expansión, que también es conocido como golpe de energía. En este golpe, el trabajo es realizado por la carga. El proceso de escape inicia en el BDC con la válvula de escape abriendo. El calor es rechazado desde el motor durante el proceso de escape.

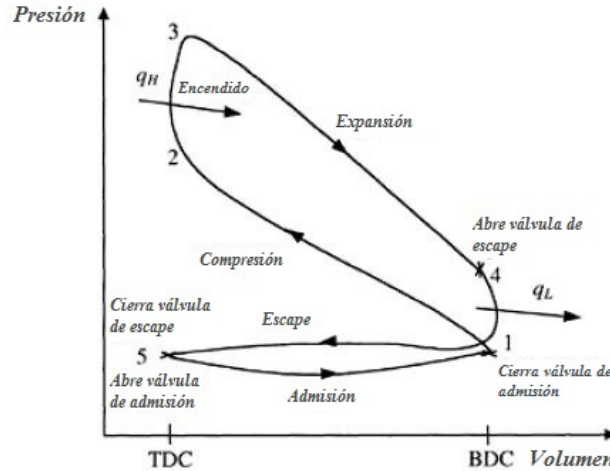


Figura 3.13: Diagrama P-V Ciclo Práctico de motor ICE de tipo alternativo (como aparece en [5])

Ciclos prácticos implican una complejidad significativa debido a las irreversibilidades asociadas a la fricción, gradientes de presión y temperatura, transferencia de calor entre gases y paredes de cilindro, y trabajo requerido para comprimir la carga y expulsar productos de combustión por lo cual se realizan hipótesis significativas acerca del comportamiento de los procesos desarrollados en el ciclo.

Estos ciclos idealizados se conocen como Ciclos Estándar de Aire. El análisis Estándar de Aire asume que el fluido de trabajo es un gas ideal, el proceso es reversible, y la combustión y el proceso de escape se reemplazan por un transferencia de calor con una fuente externa. Encontramos entonces los procesos que se conocen como Ciclo Otto, Ciclo Diesel y Ciclo Atkinson que se muestran en la Figura 3.14, Figura 3.15 y Figura 3.16, respectivamente.

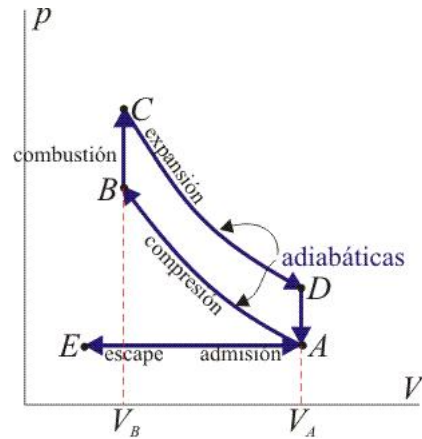


Figura 3.14: Esquema de diagrama P-V para Ciclo Otto de motor 4 tiempos (como aparece en <http://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:Ciclo-otto.png>)

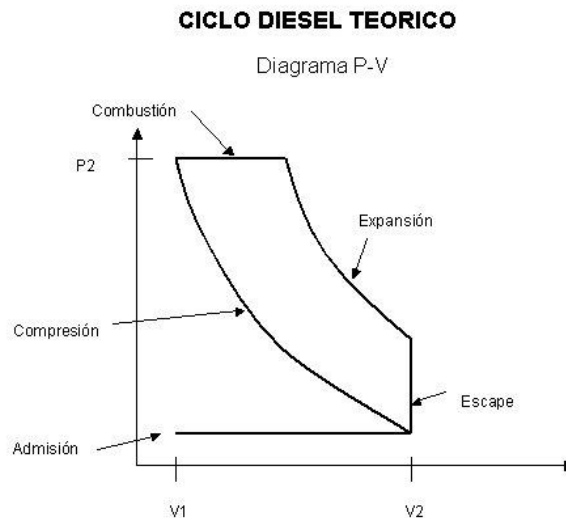


Figura 3.15: Esquema de diagrama P-V para Ciclo Diesel de motor 4 tiempos (como aparece en <http://iurbina.foroactivo.net/grupo-262-f3/ciclo-de-carnot-t2.htm>)

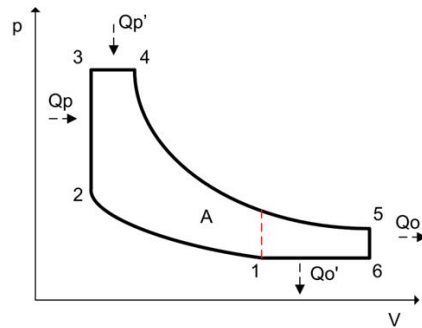


Figura 3.16: Esquema de diagrama P-V para Ciclo Atkinson de motor 4 tiempos (como aparece en <http://www.motorpasion.com/tecnologia/motor-de-ciclo-atkinson>)

3.3.6. Ejemplos de Motores ICE en HEVs

Toyota Prius

DOHC 1.5litros 16 válvulas 4 cilindros En Linea

Diámetro × Carrera - 75.0 × 84.7

Tiempo de válvula variable

75hp a 4500rpm

82 ft-lb a 4200 rpm

compresión 13:1

Corre en ciclo Atkinson con ciclo de expansión extendido y ciclo de compresión reducido; el ciclo mejora la eficiencia térmica a expensas de una salida específica

Millaje de gasolina EPA - 52(carretera)/45(ciudad) (solo para ICE)

Peso bruto - 2775lb

Honda Insight

SOHC 1.0litros 12 válvulas 3 cilindros En Linea

Diámetro × Carrera - 72.0 × 81.5

Tiempo de válvula variable y control de izaje (VTEC) - dos juegos de lóbulos de leva

67hp a 5700rpm

66 ft-lb a 4800 rpm

70CAPÍTULO 3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN - HEV Y EV

compresión 10.8:1

Carga estratégica 14.7:1 a 22:1 (más rica cerca de la bujía)

Combustión pobre a bajas rpm por más torque y eficiencia

Millaje de gasolina EPA - 70(carretera)/61(ciudad) (solo para ICE)

Peso bruto - 1940lb

Estos motores a gasolina usados en HEVs se pueden comparar con un motor diesel utilizado en un vehículo convencional, cuyas especificaciones se dan a continuación

VW Jetta TD (Turbo Diesel)

SOHC 1.9 litros 8 válvulas 4 cilindros En Linea, turbocargado

compresión 19.5:1

Diámetro $\times$ Carrera - 79.5 $\times$ 95.5

90hp a 3750rpm

155 ft-lb a 1900 rpm

Millaje de gasolina EPA - 49(carretera)/41(ciudad) (solo para ICE)

Las excelentes características del VW Jetta ICEV muestra que motores diesel pueden ser buenos candidatos para motores térmicos en HEVs[5].

3.4. Motores Eléctricos

Tradicionalmente por su tecnología "madura" y de simple control, los motores eléctricos utilizados en los sistemas de propulsión de los EV y los HEV son los motores de corriente continua. Estos motores tienen la gran desventaja de que por su principio de funcionamiento y construcción no son aptos para funcionar a altas velocidades, y requieren de un mantenimiento periódico generando un costo de operación asociado.

Debido a los avances tecnológicos y la evolución de la electrónica de potencia y de los microprocesadores, se logró implementar las complejas estrategias de control de los motores de inducción, adquiriendo dicho motor un lugar importante en los sistemas de propulsión de los EV y HEV. Comparando estos motores con los de corriente continua, tienen la ventaja de que por su principio de funcionamiento y construcción no tienen ningún costo asociado de operación, también poseen mayor potencia por unidad de volumen,

obteniendo a igual potencia un motor de volumen mas chico, característica muy importante para estas aplicaciones.

3.4.1. Motor de Continua

El principio de funcionamiento del motor de corriente continua se basa en la ley de electromagnetismo de Lorentz. Al tener un cable inmerso en un campo magnético en el que circula una determinada corriente eléctrica, se genera una fuerza perpendicular al campo magnético y al cable. Esta fuerza es proporcional a la longitud del cable, a la magnitud de la corriente eléctrica y a la densidad del campo magnético, teniendo la siguiente expresión:

$$F = BIL \quad (3.19)$$

Cuando el mencionado cable se instala en forma de bobina⁴ como se muestra en la Figura 3.17 se produce el siguiente par:

$$T = BIL \cos \alpha \quad (3.20)$$

Donde α es el ángulo entre el plano de la bobina y el campo magnético producido por un conjunto de bobina⁵ o por imanes permanentes.

En la práctica el circuito de armadura del motor se forma con un conjunto de bobinas las cuales se conectan a la fuente de continua mediante anillos colectores y escobillas, logrando que cada bobina se energice cuando se encuentra en la posición $\alpha = 0$, obteniendo continuidad de giro y par máximo.

Las ecuaciones que caracterizan al motor son las siguientes:

$$V_a = E + R_a I_a \quad (3.21)$$

$$E = K_e \phi_{(i_{exc})} \omega_m \quad (3.22)$$

$$T = K_e \phi_{(i_{exc})} I_a \quad (3.23)$$

Donde ϕ es el flujo magnético en webers, I_a corriente por el circuito de armadura en ampere, V_a voltaje de alimentación del circuito de armadura en

⁴Esta bobina forma parte del circuito de armadura del motor, denominándose bobina de armadura.

⁵Esta bobina forma parte del circuito de excitación del motor, denominándose bobina de excitación.

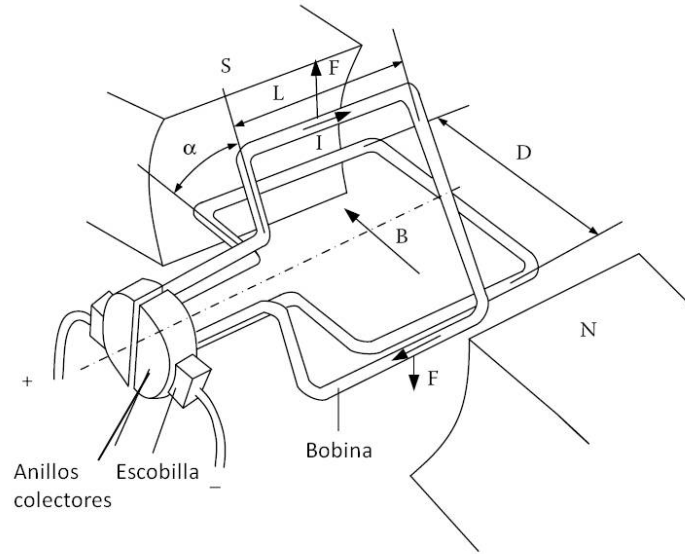


Figura 3.17: Principio de funcionamiento del Motor de Continua (extraída de [2] Pág. 155)

voltios, R_a resistencia del circuito de armadura en ohmios, ω_m velocidad de armadura en rad/s, T par que se desarrolla por el motor N.m, K_e es una constante y E tensión ficticia del modelo eléctrico del motor. En la Figura 3.18 se muestra el modelo eléctrico equivalente de un motor de corriente continua.

El rendimiento de estos motores se describe por la tensión de armadura y por la corriente que circula por el bobinado de excitación⁶ que es la encargada de generar el campo magnético.

⁶ i_{exc} denominada corriente de excitación.

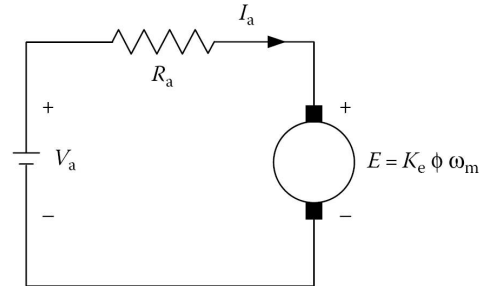


Figura 3.18: Modelo eléctrico equivalente del motor DC (extraída de [2] Pág. 156)

De acuerdo a la aplicación del motor existen tres formas de conectar el bobinado de excitación con el circuito de armadura.

- *Excitación serie*: se conecta el bobinado en serie con el circuito de armadura.
- *Excitación shunt o paralelo*: se conecta el bobinado en paralelo con el circuito de armadura.
- *Excitación independiente*: el bobinado de excitación se alimenta independientemente del circuito de armadura.

En aplicaciones de EV y HEV por su flexibilidad en el control de la velocidad y del par se utiliza una configuración de excitación independiente, obteniendo la curva par-velocidad que se muestra en la Figura 3.19. Como se observa en la figura existen dos formas de operar el motor, en el primer rango de velocidades el motor se encuentra funcionado a excitación constante obteniendo un flujo magnético constante a su valor nominal, para variar la velocidad se controla la tensión de armadura hasta llegar a una velocidad base. En el segundo tramo de velocidad, tenemos que el circuito de armadura se encuentra operando constante en condiciones nominales, para aumentar la velocidad del valor de base, se debilita el campo magnético disminuyendo la corriente de excitación llegando a la velocidad máxima de funcionamiento del motor.

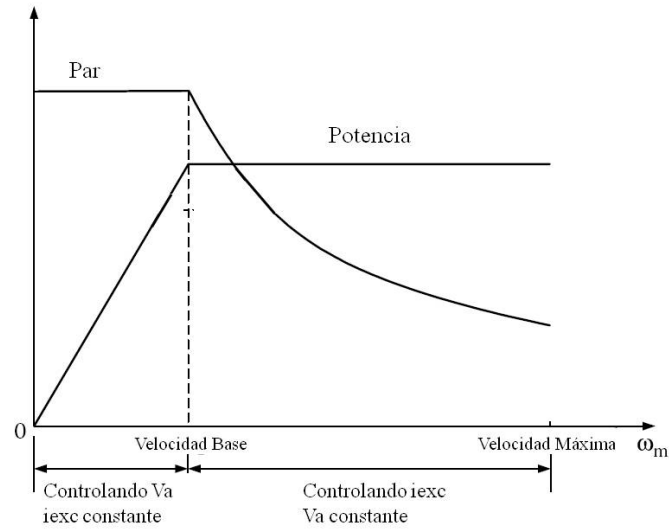


Figura 3.19: Curva Par-Velocidad del motor DC con excitación independiente (extraída de [2] Pág. 159)

Estos motores han sido ampliamente utilizados en aplicaciones que requieran buen ajuste de velocidad, frecuencia de partida de frenado y de marcha atrás. Teniendo la gran desventaja de tener un alto costo de operación, asociado al mantenimiento periódico de los anillos colectores y escobillas.

3.4.2. Motor de Inducción

Existen dos tipos de motores de inducción, los de rotor bobinado y los de rotor jaula de ardilla. Los motores con rotor bobinado tienen una serie de desventajas para estas aplicaciones en comparación con los de rotor jaula de ardilla, por ejemplo, mayor costo, necesidad de mantenimiento, etc. Por lo tanto los motores de inducción utilizados para propulsión eléctrica de los EV y los HEV son los de rotor de jaula de ardilla trifásico, debido a que los motores monofásicos tienen menor par y menor velocidad.

En la Figura 3.20 se muestra un corte transversal de un motor de inducción de dos polos. En las ranuras internas de la periferia del estator se

insertan tres bobinados de fase a - a', b - b', c - c', tal que las corrientes por las mismas produzcan una densidad de flujo magnético. Las tres bobinas se encuentran especialmente organizadas separadas 120° entre si como se muestra en la figura.

El rotor al ser de jaula de ardilla tiene embutido en la periferia barras conductoras las cuales se encuentran cortocircuitadas en su extremo mediante anillos conductores, el nombre *rotor de jaula de ardilla* es por su forma similar a las jaulas donde las ardillas corren y juegan.

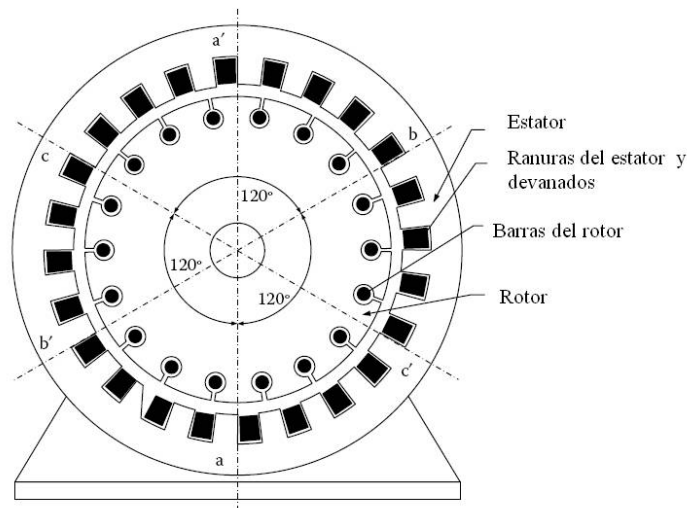


Figura 3.20: Corte transversal de un motor de inducción (extraída de [2] Pág. 169)

Las bobinas del estator se alimentan a través de una fuente alterna con una frecuencia f , trifásica y equilibrada, obteniendo en cada fase una corriente alterna equilibrada con una velocidad angular ω ⁷ y desfasada 120° entre si. Como se mencionó anteriormente, producto de la corriente, cada bobina

⁷ $\omega = 2\pi f$ donde f es la frecuencia de la fuente de alimentación del motor.

genera un campo magnético sinusoidal. Al sumar escalarmente las contribuciones de las tres bobinas y aplicando *teorema de Ferraris* obtenemos en el entrehierro un campo magnético giratorio bipolar.

Por la Ley de Faraday, el campo magnético giratorio producido en el estator $\phi(t)$ induce una tensión $e(t) = \frac{d\phi(t)}{dt}$ en las barras del rotor. Como en el rotor tenemos todas las barras cortocircuitadas se induce una corriente $I = \frac{e(t)}{R}$, donde R es la resistencia de las respectivas barras. Estas corrientes inducidas y el campo magnético que cruza a las barras generan por la Ley de Lorentz una fuerza en la mismas, produciendo un par mecánico generándose un movimiento en el rotor que tiende a seguir al campo magnético giratorio producido por el estator. Otra forma de ver como se produce el movimiento del rotor es la siguiente, la corriente inducida en el rotor genera un campo magnético, por lo tanto en la máquina se presentan dos campos magnéticos, uno proveniente del circuito del estator y otro del circuito del rotor, la interacción de estos dos campos produce el par mecánico de la máquina, tal como dos imanes permanentes cercanos entre sí experimentan un momento de torsión que los hace alinearse. Si tuviéramos la máquina en vacío y no existieran perdidas, el rotor giraría a la velocidad del campo magnético producido por el estator ω_s , la cual se denomina velocidad de sincronismo. Cuando la máquina tiene un par de polos la velocidad de sincronismo ω_s es igual a la velocidad angular de la corriente alterna por el estator ω , si el motor tiene más de dos pares de polos esta igualdad no se verifica, cumpliéndose la siguiente expresión:

$$\omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (3.24)$$

donde p es cantidad de pares de polos del motor.

Cuando en el eje tenemos un par resistente, el par motor y dicho par resistente se equilibran a una velocidad de giro ω_m menor que la velocidad de sincronismo, denominada velocidad mecánica. A partir de estas velocidades se define el deslizamiento s del motor como:

$$s = \frac{\omega_s - \omega_m}{\omega_s} \quad (3.25)$$

3.4.2.1. Modelo Estacionario del Motor de Inducción

De acuerdo al principio de funcionamiento visto, existe un campo magnético que gira a la velocidad de sincronismo ω_s respecto al estator, producido por los bobinados estatóricos. Este campo arrastra al rotor el cual llega a

una velocidad mecánica de equilibrio ω_m , con la cual el campo magnético girará respecto al rotor a una velocidad $\omega_s - \omega_m$ ó $s.\omega_s$, donde s es el deslizamiento del motor. Por lo tanto se tiene un campo magnético que gira a ω_s respecto al estator y a $s.\omega_s$ respecto al rotor, teniendo las bobinas del estator y del rotor acopladas magnéticamente. Por lo tanto se puede modelar al motor de inducción como un transformador en donde el lado primario es el estator el cual tiene una frecuencia f_s y el secundario es el rotor el cual tiene una frecuencia $s.f_s$ y esta cortocircuitado. Quedando el circuito monofásico equivalente que se muestra en la Figura 3.21, donde la frecuencia de I_e , V_e es de f_s y la de I_r , V_r es de $s.f_s$.

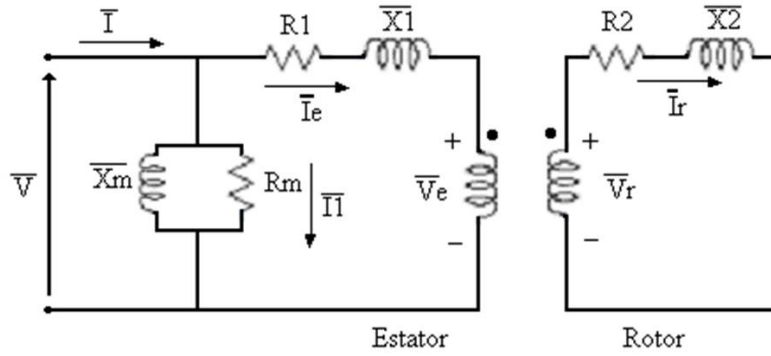


Figura 3.21: Circuito monofásico equivalente del Motor de Inducción

Debido a que se tiene diferente frecuencia en cada lado, las ecuaciones del "transformador" quedan de la siguiente forma:

$$s.V_e = n.V_r \quad (3.26)$$

$$n.I_e = I_r \quad (3.27)$$

n = relación de vueltas entre fase.

Cuando se pasa todos los parámetros del lado del rotor al estator, nos queda el circuito monofásico equivalente visto del estator, que es el modelo eléctrico estrella equivalente monofásico del Motor de Inducción ver Figura 3.22.

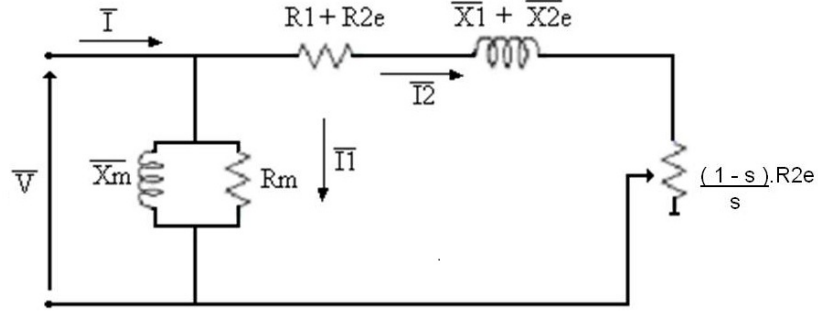


Figura 3.22: Circuito monofásico equivalente visto del estator del Motor de Inducción

Significado físico de los parámetros del circuito:

- **R_m** modela las pérdidas en el hierro, pérdida por histéresis y por corrientes de Foucault.
- **X_m** es la reactancia magnetizante, modela la permeabilidad magnética del hierro finita.
- **R_1** resistencia del bobinado del estator (R_s).
- **X_1** modela la fuga del flujo magnético en los bobinados del estator ($\omega.L_s$).
- **R_2e** resistencia del bobinado de rotor pasada al estator (R_r).
- **X_2e** modela las fugas del flujo magnético en el rotor pasado al lado del estator ($\omega.L_r$). Observación: esta inductancia queda a la misma frecuencia que la del estator.

Interpretación del parámetro $\frac{(1-s)}{s}R_{2e}$

Realizando un balance de potencia en la maquina tenemos:

$$P_{ElectricaTotal} - P_{PerdidasElectricas} = P_{MecanicasTotales} \quad (3.28)$$

$$P_{ElectricaTotal} = \frac{V^2}{R_m} + 3R_1.I_2^2 + 3R_{2e}.I_2^2 + 3.\frac{(1-s)}{s}.R_{2e}.I_{2e}^2 \quad (3.29)$$

Perdidas Eléctricas:

1. Perdidas en el hierro = $\frac{V^2}{R_m}$.
2. Perdidas Joule en el estator = $3R_1.I_2^2$.
3. Perdidas Joule en el rotor = $3R_{2e}.I_2^2$.

Entonces queda que el último parámetro es el que modela la potencia mecánica total que entrega el motor:

$$P_{MecanicasTotales} = 3.\frac{(1-s)}{s}.R_{2e}.I_{2e}^2 = P_{MecanicaUtil} + P_{PerdidasMecanicas} \quad (3.30)$$

Donde $P_{MecanicaUtil}$ es la potencia en el eje a velocidad $(1-s).n_s$ y $P_{PerdidasMecanicas}$ son la perdidas por fricción y ventilación.

El par desarrollado por el motor es determinado por la siguiente expresión:

$$T = \frac{P_{MecanicaTotal}}{\omega_m} \quad (3.31)$$

Con $\omega_m = \omega_s(1-s)$ velocidad angular mecánica, entonces:

$$T = 3.\frac{R_{2e}}{s}.\frac{I_{2e}^2}{\omega_s} \quad (3.32)$$

En la Figura 3.23 se muestra el gráfico del par-velocidad característico de un motor de inducción con voltaje y frecuencia constante. Como se observa el par aumenta de forma aproximadamente lineal con el aumento del deslizamiento hasta alcanzar su máximo en $s = s_n$, deslizamiento nominal del motor. En $s = 1$ la velocidad del rotor es cero y el par correspondiente es el par de arranque, que es menor al par en s_n . En el intervalo $0 < s < 1$ el motor

genera un par positivo con velocidad mecánica positiva región de interés para propulsión eléctrica. Cuando $s > 1$ el par del motor es positivo y disminuye a medida que aumentamos el deslizamiento, teniendo una velocidad angular de sincronismo opuesta a la velocidad mecánica del rotor, cumpliendo esta región la función de frenado. En la región $s < 0$ la velocidad del rotor es mayor que la velocidad de sincronismo y el motor produce un par negativo.

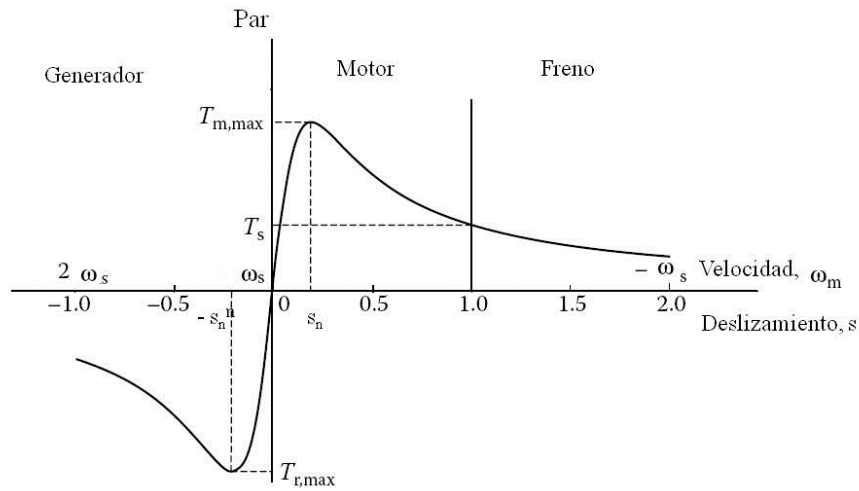


Figura 3.23: Curva Par-Velocidad del Motor de Inducción con V y f constante (extraída de [2] Pág. 174)

Los motores de inducción operados con voltaje fijo y frecuencia fija no son apropiados para aplicaciones de tracción de vehículos. Tienen bajo par de arranque, rango de velocidad limitada, son inestables en el rango de operación $s > s_n$ donde cualquier perturbación adicional en la carga lleva a que el motor se detenga a medida que disminuye el par con la velocidad. Por otro lado en el arranque se generan altas corrientes que pueden causar daños en el bobinado estático. Por lo tanto para estos motores se requieren estrategias de control mas complejas para poder lograr velocidades adecuadas y par adecuado para estas aplicaciones.

3.4.2.2. Modelo Dinámico del Motor de Inducción

El modelo dinámico del motor de inducción se realiza tomando en cuenta las siguientes características:

- Los tres bobinados estatóricos son idénticos.
- Los tres bobinados rotóricos serán idénticos en caso de utilizar un motor de inducción de rotor devanado.
- En caso de rotor de jaula, el mismo tiene estructura simétrica y se podrá reemplazar a efectos de cálculos mediante un rotor bobinado.
- El entrehierro es considerado constante.
- Se desprecia el efecto de los armónicos espaciales.
- Se asumirá que se trabaja en zona lineal, no existiendo saturación en el núcleo.

Aplicando la Ley de Faraday en los bobinados del estator se tienen las siguientes ecuaciones:

$$v_{as}(t) = r_s i_{as}(t) + \frac{d\psi_{as}(t)}{dt} \quad (3.33)$$

$$v_{bs}(t) = r_s i_{bs}(t) + \frac{d\psi_{bs}(t)}{dt} \quad (3.34)$$

$$v_{cs}(t) = r_s i_{cs}(t) + \frac{d\psi_{cs}(t)}{dt} \quad (3.35)$$

Donde:

- $v_{xs}(t)$: tensión en la fase 'x' del estator.
- $i_{xs}(t)$: corriente en la fase 'x' del estator.
- $\psi_{xs}(t)$: flujo magnético en la fase 'x' del estator.
- r_s : resistencia del estator.

82CAPÍTULO 3. COMPONENTES DEL SISTEMA DE PROPULSIÓN - HEV Y EV

Aplicando la Ley de Faraday en los bobinados del rotor se tienen las siguientes ecuaciones:

$$v_{ar}(t) = r_r i_{ar}(t) + \frac{d\psi_{ar}(t)}{dt} \quad (3.36)$$

$$v_{br}(t) = r_r i_{br}(t) + \frac{d\psi_{br}(t)}{dt} \quad (3.37)$$

$$v_{cr}(t) = r_r i_{cr}(t) + \frac{d\psi_{cr}(t)}{dt} \quad (3.38)$$

Donde:

- $v_{xr}(t)$: tensión en la fase 'x' del rotor.
- $i_{xr}(t)$: corriente en la fase 'x' del rotor.
- $\psi_{xr}(t)$: flujo magnético en la fase 'x' del rotor.
- r_r : resistencia del rotor.

Matricialmente se expresaran las ecuaciones de acoplamiento magnético para los flujos estatórico y rotórico. Tanto las corrientes como los flujos son magnitudes instantáneas.

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{sm} & -\frac{L_{sm}}{2} & -\frac{L_{sm}}{2} \\ -\frac{L_{sm}}{2} & L_{ls} + L_{sm} & -\frac{L_{sm}}{2} \\ -\frac{L_{sm}}{2} & -\frac{L_{sm}}{2} & L_{ls} + L_{sm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rm} & -\frac{L_{rm}}{2} & -\frac{L_{rm}}{2} \\ -\frac{L_{rm}}{2} & L_{lr} + L_{rm} & -\frac{L_{rm}}{2} \\ -\frac{L_{rm}}{2} & -\frac{L_{rm}}{2} & L_{lr} + L_{rm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Donde:

- L_{ls} : Inductancia de fuga del estator.
- L_{lr} : Inductancia de fuga del rotor.
- L_{sm} : Inductancia mutua entre bobinas del estator.
- L_{rm} : Inductancia mutua entre bobinas del rotor.
- L_{sr} : Inductancia mutua máxima entre bobinas del rotor y estator.

- θ_r : Es una magnitud instantánea que representa la diferencia de fase entre el estator y el rotor.

En la práctica, para estudios y análisis, las magnitudes rotóricas del motor de inducción se refieren al estator. Multiplicando por la relación de vueltas⁸ las corrientes rotóricas (i_{ar}, i_{br}, i_{cr}), las tensiones rotóricas (v_{ar}, v_{br}, v_{cr}) y los flujos magnético rotóricos ($\psi_{ar}, \psi_{br}, \psi_{cr}$), se obtiene las corrientes, tensiones y flujos rotóricos vistos del estator respectivamente. Por otro lado multiplicando la relación de vueltas al cuadrado (n^2), por la resistencia rotórica (r_r), la inductancia mutua entre los bobinados del rotor (L_{rm}), la inductancia de fuga del rotor (L_{lr}), se obtienen las magnitudes vistas del estator. De aquí en más a los efectos de realizar de los análisis siempre se tomará en cuenta el rotor referido al estator.

De acuerdo a las ecuaciones expuestas, la dinámica del motor de inducción esta caracterizada por un sistema de primer orden de seis ecuaciones diferenciales. Además dicho sistema de ecuaciones se encuentra acoplado debido a las ecuaciones de acoplamiento magnético, que a su vez, son dependientes del tiempo a través del ángulo θ_r . Transformando este sistema al dominio Park⁹ se presentan importantes ventajas al momento de analizar la dinámico del motor.

Aplicando la transformada de Park a cada una de las ecuaciones que definen la dinámica del motor, ecuaciones de tensión y de acoplamiento magnético, se obtiene el siguiente juego de ecuaciones en el dominio de Park.

Ecuaciones de tensión del Estator:

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \psi_{qs} \quad (3.41)$$

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \psi_{ds} \quad (3.42)$$

$$V_{0s} = r_s \cdot i_{0s} + \frac{d\psi_{0s}}{dt} \quad (3.43)$$

⁸Relación de vuelta $n = \frac{N_s}{N_r}$, donde N_s es el número de vueltas del bobinado estatórico y N_r es el número de vueltas del bobinado rotórico

⁹Ver anexo.

Ecuaciones de tensión del Rotor:

$$V_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{qr} \quad (3.44)$$

$$V_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{dr} \quad (3.45)$$

$$V_{0r} = r_r \cdot i_{0r} + \frac{d\psi_{0r}}{dt} \quad (3.46)$$

Las magnitudes están referidas a un marco de referencia arbitrario girando a una velocidad ω donde los subíndice d y q son los ejes¹⁰. En las ecuaciones rotóricas, ω_r es la velocidad angular del rotor.

Ecuaciones de acoplamiento Magnético Estatóricas:

$$\psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \quad (3.47)$$

$$\psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \quad (3.48)$$

$$\psi_{0s} = L_s \cdot i_{0s} \quad (3.49)$$

Ecuaciones de acoplamiento Magnético Rotóricas:

$$\psi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (3.50)$$

$$\psi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (3.51)$$

$$\psi_{0r} = L_r \cdot i_{0r} \quad (3.52)$$

Donde:

- $L_s = L_{ls} + L_m$.
- $L_r = L_{lr} + L_m$.
- L_m : Inductancia de magnetización.

Las seis ecuaciones de tensiones y las seis ecuaciones de acoplamiento magnético encontradas en el dominio Park con un marco de referencia arbitrario, describen el modelo dinámico del motor de inducción.

¹⁰Ver anexo Transformada Park.

3.4.2.3. Control de velocidad del Motor de Inducción

El método más común de control de velocidad de los motores de inducción es el control $V/Hertz$ constante. Es un método de control escalar que consiste en variar en forma simultánea la tensión y la frecuencia. Por un lado si se controla la frecuencia de alimentación eléctrica del bobinado estatórico se puede controlar la velocidad del campo giratorio y por lo tanto la velocidad mecánica del motor. Por otro lado se tiene que el flujo magnético generado en el estator es directamente proporcional a la tensión y inversamente proporcional a la frecuencia, por lo tanto para que no se produzca saturación de hierro se tiene que variar, como se mencionó anteriormente, simultáneamente la tensión y la frecuencia tal que en todo momento se esté generando el campo magnético nominal para que no se subutilice el hierro, o sea, $V(t)/f(t) = Vn/fn$. Este método es muy utilizado en el ámbito industrial, pero en aplicaciones donde el motor se encuentra operando en condiciones dinámicas, en baja velocidad y en velocidad nula tiene bajo rendimiento.

Partiendo de las ecuaciones halladas en el dominio Park del modelo dinámico del motor, y con el objetivo de lograr un modelo matemático que permita realizar el control de par y velocidad en forma similar al de un motor de corriente continua, se desarrollará el siguiente análisis.

El motor analizado es de jaula de ardilla con neutro aislado, entonces las tensiones rotóricas y las componentes homopolares son nulas. Se reescriben las ecuaciones de tensión estatóricas y rotóricas del modelo dinámico con estas condiciones.

Ecuaciones de tensión del Estator:

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \psi_{qs} \quad (3.53)$$

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \psi_{ds} \quad (3.54)$$

Ecuaciones de tensión del Rotor:

$$0 = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{qr} \quad (3.55)$$

$$0 = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{dr} \quad (3.56)$$

Si se alinea el eje d del marco de referencia del sistema dq con el flujo magnético rotórico ψ_r como se muestra en la Figura 3.24, se obtiene el siguiente resultado.

$$\psi_r = \psi_{dr} + j \cdot \psi_{qr} \quad (3.57)$$

$$\{\psi_{dr} = \psi_r; \quad \psi_{qr} = 0 \quad (3.58)$$

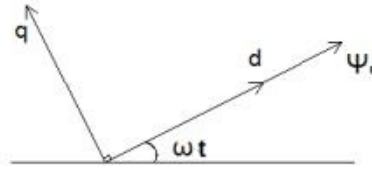


Figura 3.24: Marco de referencia dq con el flujo magnético rotórico solidario al eje d .

Combinando la relación 3.58 con las Ecuaciones 3.50 y 3.51, se obtiene:

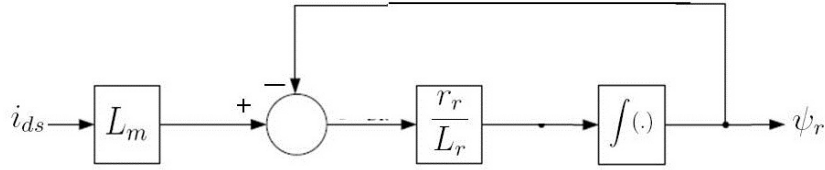
$$\psi_r = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (3.59)$$

$$0 = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (3.60)$$

Si se despeja i_{dr} de la Ecuación 3.59 y se sustituye en la Ecuación 3.55 se tiene la siguiente ecuación, donde el flujo magnético rotórico ψ_r es controlado por la corriente estática según el eje d , i_{ds} .

$$\frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{r_r}{L_r} \cdot \psi_r + L_m \frac{r_r}{L_r} \cdot i_{ds} \quad (3.61)$$

Partiendo de la Ecuación 3.61 se obtiene el siguiente diagrama de bloque, el cual muestra la dependencia del flujo magnético ψ_r con la corriente i_{ds} .

Figura 3.25: Diagrama de bloque del calculador de ψ_r

Dada la expresión del par en el dominio Park:

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\psi_{qr} \cdot i_{dr} - \psi_{dr} \cdot i_{qr}) \quad (3.62)$$

Considerando que ψ_{qr} es nulo, Ecuación 3.58, despejando la corriente i_{qr} de la Ecuación 3.60 y sustituyéndola en la Ecuación 3.62, se obtiene la ecuación del par del motor de inducción en el dominio Park con el marco de referencia definido en la Figura 3.24.

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr}(i_{ds}) \cdot i_{qs} \quad (3.63)$$

Como se observa en la Ecuación 3.63, se tiene una ecuación del par análoga a la del motor de corriente continua, Ecuación 3.23. Se controla el par del motor de inducción con magnitudes independientes entre sí, el flujo magnético rotórico que depende de i_{ds} , y la corriente i_{qs} .

3.5. Convertidores

Los convertidores eléctricos de potencia junto con el motor eléctrico y los controladores electrónicos, forman parte del sistema de propulsión de los EV y de los HEV. De acuerdo a lo requerido por el conductor los controladores electrónicos comandan al convertidor eléctrico de potencia, para que este controle el funcionamiento del motor eléctrico produciendo el adecuado par y la adecuada velocidad; en el Capítulo 5 se estudia con más detalles este funcionamiento.

En los EV o en los HEV de acuerdo al motor eléctrico que utilicen se pueden encontrar dos tipos de convertidores eléctricos de potencia. Si el auto

tiene un motor de tracción eléctrico de corriente continua tendrá un regulador, *Convertidor DC/DC*, el cual a partir de una fuente de tensión continua cambia y regula la tensión obteniendo a la salida una señal continua con el valor deseado. Por otro lado si el auto tiene un motor de tracción eléctrico de corriente alterna tendrá un inversor, *Convertidor DC/AC*, el cual a partir de una fuente de tensión continua genera a la salida una señal sinusoidal de amplitud y frecuencias controladas.

3.5.1. Convertidores DC/DC

Como se mencionó en la Sección anterior, debido a la flexibilidad en el control de velocidad y del par, la configuración de excitación elegida para los motores DC de los EV y de los HEV es la excitación independiente. Con esta configuración tenemos dos convertidores DC/DC controlados coordinadamente, uno para regular la tensión de excitación y el otro para regular la tensión de armadura del motor.

Estos convertidores tienen características distintas, en el caso del convertidor que regula la tensión de excitación tiene una capacidad de potencia menor, y el sentido de la energía es de la fuente al motor, o sea, el convertidor DC/DC es unidireccional. Mientras que el utilizado para regular la tensión de armaduras tiene una capacidad de potencia mayor y el flujo de energía es en dos direcciones, de la fuente al motor y del motor a la fuente (frenos regenerativos), por lo tanto el convertidor DC/DC es bidireccional.

Debido a su alta eficiencia, flexibilidad en el control, liviano y pequeño en dimensiones, el convertidor DC/DC unidireccional utilizado es el Chopper, el cual se observa en la Figura 3.26(a). En el circuito se tiene un diodo D_F que se conecta en paralelo con la carga, y un interruptor S (semiconductor switch). El interruptor S es un dispositivo de estado sólido, completamente controlable mediante un electrodo de comando, comúnmente se llaman "llaves apagables". En la práctica este interruptor se implementa con algunas de las siguientes llaves apagables: GTO (Gate Turn Off thyristor), transistor de efecto de campo metal-óxido-semiconductor MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) o el transistor bipolar de compuerta aislada IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).

La llave S opera regularmente en un período T en el cual conduce un tiempo δT ¹¹ y permanece abierto un tiempo $(1 - \delta)T$ obteniendo a la salida

¹¹ $\delta = \frac{t_{on}}{T}$ denominado *Ciclo de Trabajo*

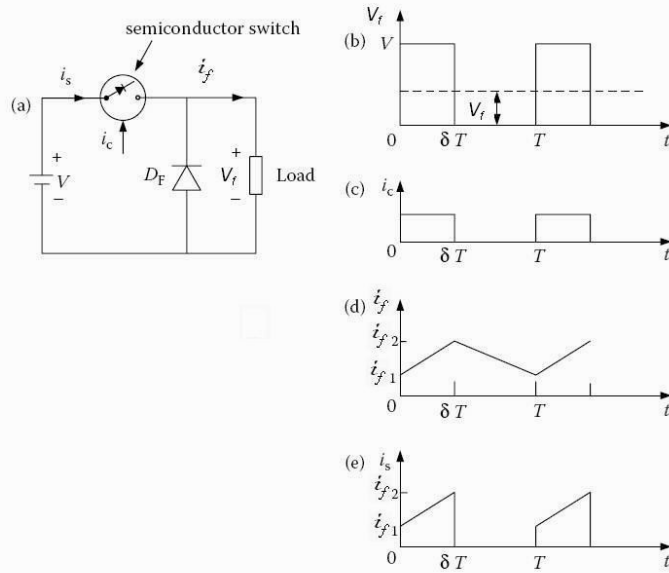


Figura 3.26: (a) Convertidor DC/DC Chopper. (b) Tensión de salida del convertidor. (c) Control del interruptor S. (d) Corriente a la salida del convertidor. (e) Corriente a la entrada del convertidor (extraída de [2] Pág. 162)

la señal que se observa en la Figura 3.26(b). También en la Figura 3.26 se pueden ver la señal de comando i_c , la corriente por la carga i_f y la corriente de la fuente i_s .

A partir de la señal V se tiene que el valor medio a la salida del convertidor es el siguiente :

$$V_F = \frac{1}{T} \int_0^T v_F dt = \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} V dt = \delta V \quad (3.64)$$

Obteniendo una tensión continua regulable entre 0 y V controlando el ciclo de trabajo δ entre 0 y 1 teóricamente.

Para obtener un auto con freno regenerativo y así aumentar su autonomía, los convertidores utilizados para regular la tensión de armadura del motor tienen que tener la capacidad de dar tensión positiva y que la corriente pue-

da circular en ambas direcciones. En las Figuras 3.27 se puede observar el convertidor con estas características.

El circuito del la Figura 3.27(a) esta formado por dos Chopper controlados en forma simultanea, la llave apagable $S1$ y el diodo $D1$ forman un Chopper y la llave apagable $S2$ y el diodo $D2$ forman el otro. Las llaves $S1$ y $S2$ se cierran alternadamente, en el período T la llave $S1$ se mantiene cerrada un tiempo δT y la llave $S2$ se mantiene cerrada de δT a T , en la Figura 3.27(b) se muestran las corrientes i_{C1} y i_{C2} señales de control de $S1$ y $S2$ respectivamente. En la práctica entre el apagado de una llave y el prendido de la otra existe un "tiempo muerto", asegurando el apagado completo de la primera llave y evitando cortocircuitar la fuente.

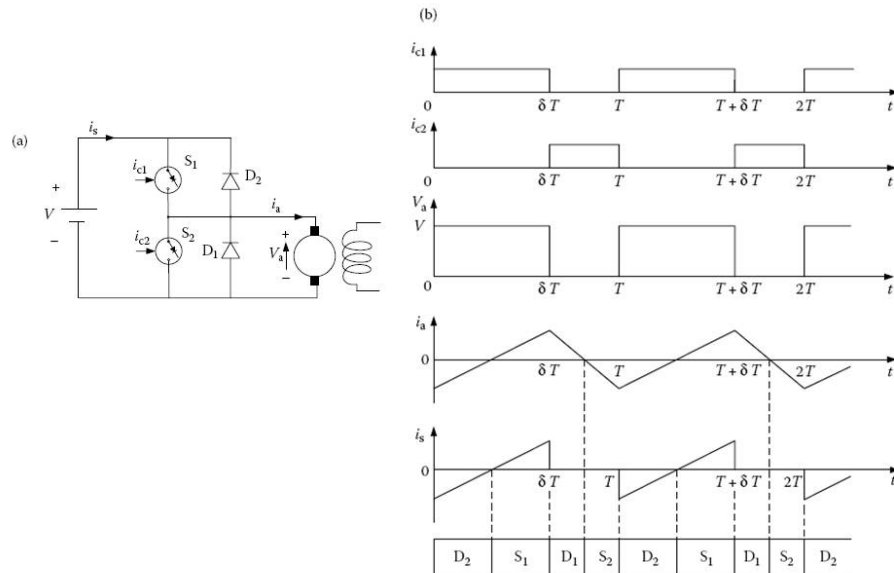


Figura 3.27: (a)Convertidor DC/DC Bidireccional.(b) Control de los interruptores $S1$ y $S2$ respectivamente - Tensión de salida del convertidor - Corriente a la salida del convertidor - Corriente a la entrada del convertidor (extraída de [2] Pág. 166)

Este convertidor tiene la particularidad de que la conducción discontinua

nunca se produce, la corriente nunca vale cero para un intervalo finito de tiempo.

Analizando el intervalo de tiempo $\delta T \leq t \leq T$ donde la llave $S1$ se encuentra abierta y la llave $S2$ cerrada, se puede ver en la Figura 3.27(b) que la corriente de armadura I_a empieza a disminuir. En un principio la corriente es positiva circulando por el diodo $D1$, cuando la corriente cae a cero "invierte" su dirección circulando por $S2$ evitando la conducción discontinua. En el intervalo $0 \leq t \leq \delta T$ donde la llave $S1$ se encuentra cerrada y la llave $S2$ abierta, también existen caminos para la corriente cuando es menor que cero, en este caso la corriente circula por $D2$ evitando nuevamente la conducción discontinua. Por lo tanto, como las conducciones discontinuas están ausentes la corriente del motor fluye todo el tiempo.

En el intervalo $0 \leq t \leq \delta T$ el circuito de armadura del motor se conecta a través de la llave $S1$ o el diodo $D2$ teniendo una tensión V ($V_a=V$), y la tasa de cambio de la corriente es positiva ya que la fuente V es mayor a E^{12} . Mientras que en el intervalo $\delta T \leq t \leq T$ el circuito de armadura del motor se cortocircuita a través del diodo $D1$ o de la llave $S2$ teniendo tensión nula ($V_a=0$), y la tasa de crecimiento de la corriente es negativa. Entonces V_a vale V entre 0 y δT y es nula entre δT y T al igual que en caso del convertidor unidireccional que se analizó anteriormente, por lo tanto al igual que en el caso anterior el valor medio de la tensión de salida del convertidor es δV .

En los terminales del motor tenemos una tensión variable variando δ al igual que el convertidor anteriormente estudiado. Teniendo presente el modelo del motor de continua y realizando mallas obtenemos que,

$$I_a = \frac{\delta V - E}{R_a} \quad (3.65)$$

Analizando la Ecuación 3.65 se tienen tres formas posibles de operar el motor. Cuando $\delta > \frac{E}{V}$ tenemos un flujo de corriente positiva, el motor realiza un par positivo, el auto avanza. Si $\delta < \frac{E}{V}$ el motor se frena de forma regenerativa obteniendo los frenos de recuperación. Si $\delta = \frac{E}{V}$ tenemos el motor operando sin realizar ningún par, el auto se encuentra detenido.

¹² E es la tensión de armadura interna del modelo del motor de continua

3.5.2. Convertidores DC/AC

Cuando los EV y los HEV tienen como motor de propulsión un motor eléctrico de corriente alterna, se utilizan *Convertidores DC/AC* denominados *inversores*, debido a que su fuente de energía es continua (baterías, celdas de combustibles, etc.).

Los inversores están constituidos por llaves apagables y diodos de potencia como se muestra en la Figura 3.28. Las llaves y los diodos se distribuyen en las tres ramas donde se alimenta el motor trifásico. En la rama donde se conecta la *fase a* se tiene las llaves y los diodos $S1, S4, D1, D4$ respectivamente, en la rama donde se conecta la *fase b* se tiene $S3, S6, D3, D6$, y la rama donde se conecta la *fase c* se tiene $S5, S2, D5, D2$.

El principio de funcionamiento del inversor es sencillo, las llaves se controlan adecuadamente tal que el motor se alimenta con una tensión positiva ($V_d/2$) cuando se cierran $S1, S3, S5$ y se abren $S4, S6, S2$, y se alimenta con una tensión negativa ($-V_d/2$) cuando se abren $S1, S3, S5$ y se cierran $S4, S6, S2$. Todos los diodos proporcionan un camino a la corriente inversa de cada fase.

Una forma simple de obtener una señal trifásica a la salida del convertidor aunque con un elevado contenido de armónicos, es comandar cada rama tal que generen una onda cuadrada completa y estén desfasada 120° entre si. Como en los motores trifásicos el único armónico que produce par mecánico efectivo es el fundamental, entonces dicho motor se movería. Esta forma de generar una señal trifásica no es del todo buena, debido a que el resto de los armónicos no producen par pero producen corrientes adicionales por las bobinas con las pérdidas en el cobre y en el hierro asociadas llevando a una subutilización del motor, el que deberá sobredimensionarse para la aplicación con tensión de alimentación con estas características.

En el control de los inversores uno de los principales objetivos es reducir o eliminar el residuo armónico. Según los requerimientos de la aplicación y las herramientas disponibles se pueden implementar dos técnicas de control, técnicas que eliminan explícitamente determinados armónicos, por ejemplo, PWM (*Pulse Width Modulation*) calculado, y técnicas de reducción del contenido armónico no deseado, por ejemplo, control por desfasaje de ondas o PWM sinusoidal.

Para el control *voltios/hertz* constante de un motor de inducción se utiliza exclusivamente la técnica de reducción de armónico *PWM sinusoidal*. En esta técnica la señal de control se genera por comparación de tres voltajes de

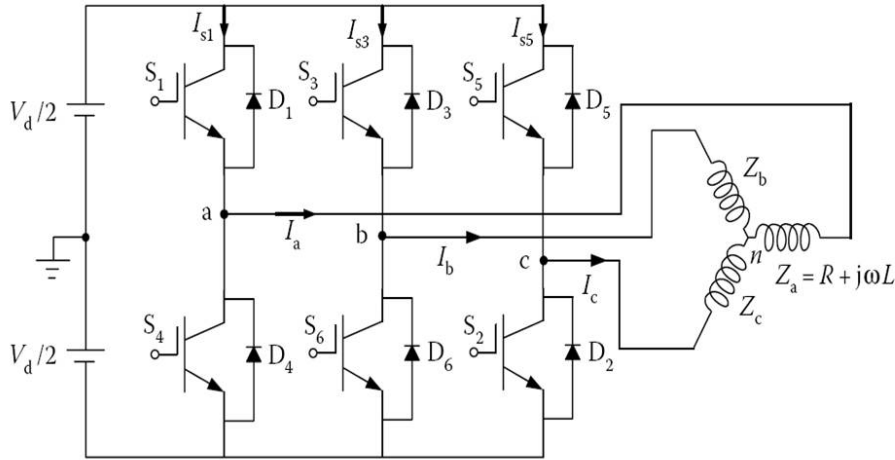


Figura 3.28: Convertidor DC/AC denominado Inversor (extraída de [2] Pág. 178)

referencia de fase V_a , V_b y V_c denominadas modulantes de amplitud variable A_a , A_b , A_c , con una onda triangular V_{tr} denominada portadora de amplitud fija, como se muestra en la Figura 3.29(a). Cuando la tensión de referencia sinusoidal V_a , V_b y V_c en un tiempo t es mayor que la señal triangular se envía una señal tal que se abren las llaves S_1 , S_3 , S_4 y se cierran las llaves S_4 , S_6 y S_2 obteniendo en las fases del motor de inducción un voltaje positivo. Por otra parte, cuando la tensión de referencia sinusoidal es menor que la señal triangular se envía una señal tal que se cierran las llaves S_1 , S_3 , S_4 y se abren las llaves S_4 , S_6 y S_2 teniendo una tensión negativa. Las tensiones de las tres fases se muestran en las Figuras 3.29(b),(c),y(d).

Si las señales de referencia tienen una frecuencia f , la señal portadora triangular tiene entonces una frecuencia $p.f$, donde p se denomina razón de frecuencia. A los efectos prácticos es conveniente que p sea impar y en este caso la onda generada tendrá simetría de segunda especie y no se generan

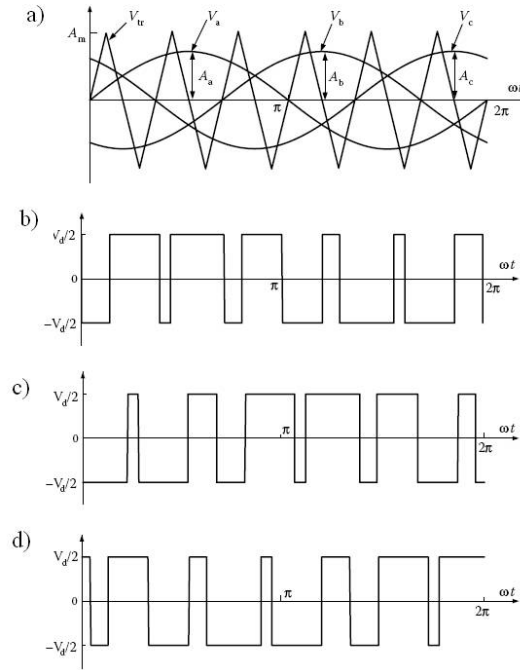


Figura 3.29: (a) Señales de referencias V_a , V_b , V_c junto con la señal portadora triangular V_{tr} . (b) Tensión *fase a*. (c) Tensión *fase b*. (d) Tensión *fase c* (extraída de [2] Pág. 178)

armónicos pares. Al aumentar p el espectro se ve desplazado hacia la derecha, apareciendo como primer armónico con valor importante el de frecuencia $p.f$ y la componente fundamental no se ve afectada. Con esta técnica de reducción de armónicos se está desplazando el espectro de energía de los armónicos superiores hacia frecuencias mayores, por lo que su incidencia en la carga se hace menos nociva.

La frecuencia de la componente fundamental de la tensión en bornes del motor es la misma que la de la referencia de tensión sinusoidal.

Por otro lado a la razón entre la amplitud de la onda de referencia y la onda portadora triangular se le denomina índice de modulación ($m = A/A_m$). Al modificar m varía el valor de la amplitud del primer armónico de tensión de salida en forma proporcional. Por lo tanto podemos variar la frecuencia y la amplitud de alimentación del motor variando las tensiones de referencia

V_a, V_b, V_c , y podemos reducir la distorsión armónica aumentando el valor de p en la onda portadora.

Capítulo 4

Modelo del vehículo

4.1. Descripción general del movimiento del vehículo

El comportamiento del movimiento de un vehículo a lo largo de una dirección está completamente determinado por todas las fuerzas actuando en esa dirección. La Figura 4.1 muestra las fuerzas que actúan en un vehículo en una subida. El esfuerzo de tracción, F_t , en el área de contacto entre las cubiertas de las ruedas y la superficie del camino impulsa el vehículo hacia adelante. Cuando el vehículo se está moviendo hay fuerzas resistivas que se oponen al movimiento. Dicha resistencia usualmente incluye la resistencia por fricción, la resistencia aerodinámica, y la fuerza ocasionada por la componente del peso al subir una colina. De acuerdo a la segunda ley de Newton, la aceleración del vehículo puede ser escrita como:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad (4.1)$$

donde v es la velocidad del vehículo, $\sum F_t$ es el esfuerzo total de tracción del vehículo, y $\sum F_r$ es la resistencia total, M es la masa total del vehículo y δ es el factor de masa equivalente que convierte las inercias rotativas de las componentes rotativas en masas traslacionales.[2]

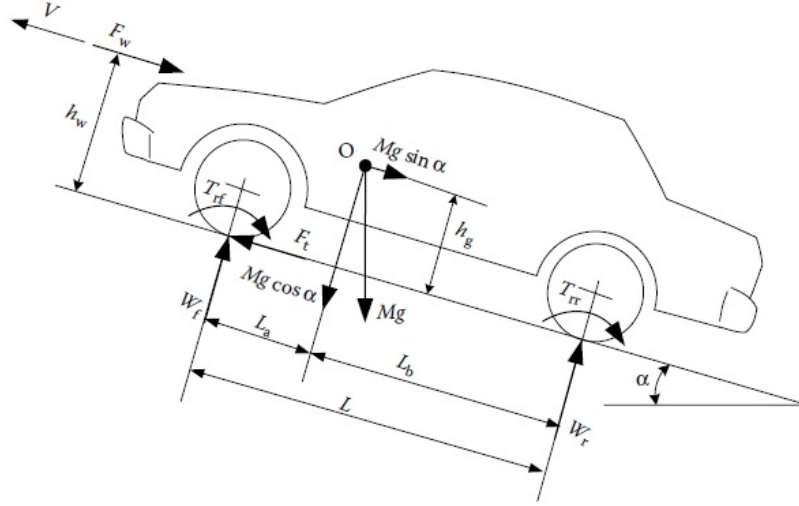


Figura 4.1: Fuerzas que actúan sobre un vehículo subiendo una colina. (extraída de [2] Pág. 20)

4.2. Resistencia del vehículo

De acuerdo a la Figura 4.1, las resistencias del vehículo son: la resistencia de rodaje causada por el rozamiento entre el suelo y las cubiertas de las ruedas, que aparecen en la figura como T_{rf} y T_{rr} , la resistencia aerodinámica F_w , y la resistencia debido a la inclinación del terreno $Mg \sin \alpha$ (componente horizontal del peso).

4.2.1. Fuerza de rozamiento

La resistencia del rodaje de las ruedas en superficies ásperas es principalmente causada por histéresis en los materiales de las cubiertas. La Figura 4.2 muestra una cubierta en estado estacionario, en la cual la fuerza, P , está actuando en el centro.

La presión en el área de contacto entre la cubierta y el suelo es distribuida simétricamente a ambos lados de la línea central y el resultado es la fuerza de reacción P_z , la cual está alineada con P . La deformación, z , contra la carga, P , en los procesos de carga y descarga se muestra en la Figura 4.3.

Cuando la cubierta está rodando, como se muestra en la Figura 4.4(a),

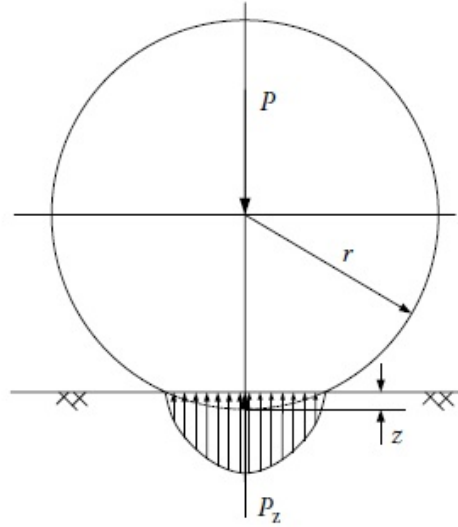


Figura 4.2: Distribución de la presión en el área de contacto. (extraída de [2] Pág. 21)

la mitad mas grande del área de contacto es la que se va cargando (hacia adelante), y la mas pequeña es la que se va descargando (hacia atrás). Como consecuencia, la histéresis causa una distribución asimétrica en las fuerzas de reacción del suelo. La presión en la mitad mas grande de área de contacto es mayor que la de la mitad mas pequeña como muestra la Figura 4.4a. Este fenómeno resulta en que la fuerza de reacción en el suelo cambia hacia adelante en algún momento.

Esta fuerza de reacción cambiando hacia adelante, con la carga normal actuando en el centro de la rueda, crea un torque, que se opone al rodaje de la rueda. En superficies blandas, la resistencia de rodaje, es causada principalmente por la deformación del suelo como se muestra en la Figura 4.4(b). La fuerza de reacción pasa completamente a la mitad mayor. El torque producido por el cambio hacia adelante de la fuerza de reacción resultante es llamado torque de resistencia de rodaje, y puede expresarse como

$$T_r = P.a \quad (4.2)$$

Para mantener a la rueda rodando, es necesaria una fuerza, F , actuando en el centro de la rueda para balancear el torque de la resistencia de rodaje.

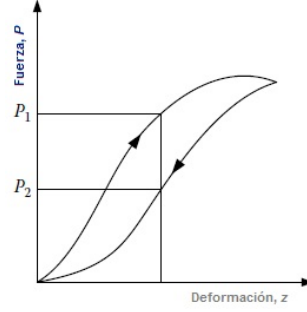


Figura 4.3: Fuerzas actuando en la cubierta contra la deformación en la carga y descarga. (extraída de [2] Pág. 21)

Esta fuerza es expresada como

$$F = \frac{T_r}{r_d} = \frac{P.a}{r_d} = P.f_r \quad (4.3)$$

donde r_d es el radio efectivo de la cubierta, y $f_r = a/r_d$ el llamado coeficiente de rozamiento. En este sentido, el torque de resistencia de rodaje puede ser reemplazado equivalentemente por una fuerza horizontal actuando en el centro de la rueda en la dirección opuesta al movimiento de la rueda. Esta fuerza equivalente es llamada fuerza de rozamiento con una magnitud de

$$F_r = P.f_r \quad (4.4)$$

donde P , es la normal del peso actuando en el centro de la rueda. Cuando el vehículo está operando en un camino con inclinación, la normal, P , debe ser reemplazada por su componente perpendicular a la superficie del camino. Esto es,

$$F_r = P.f_r.\cos \alpha \quad (4.5)$$

donde α es el ángulo del camino.

El coeficiente de rozamiento, f_r , es una función del material, estructura de la cubierta, temperatura de la cubierta, la presión de inflado de la cámara, la geometría de su superficie, la rugosidad del suelo, el material del suelo, y la presencia de líquidos. Los valores típicos de coeficientes de rozamiento para varios tipos de caminos se muestran en la Tabla 4.1. En los años recientes,

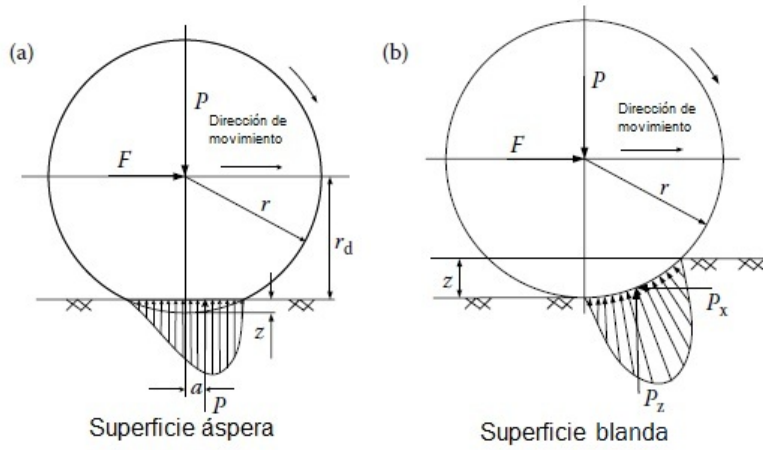


Figura 4.4: Deformación de una cubierta y resistencia de rodaje en (a) superficie áspera, y (b) superficie blanda. (extraída de [2] Pág. 22)

para el ahorro de combustible, se han desarrollado cubiertas de baja resistencia para los autos de pasajeros. Su coeficiente de rozamiento es menor que 0,01. Los valores en la Tabla 4.1 no toman en cuenta las variaciones debido a la velocidad.

Basados en resultados experimentales, se han propuesto muchas fórmulas empíricas para el cálculo de los coeficientes de rozamiento en superficies ásperas. Por ejemplo el coeficiente de rozamiento de los autos de pasajeros en un camino pavimentado puede calcularse según la siguiente ecuación:

$$f_r = f_0 + f_s \left(\frac{v}{100} \right)^{2,5} \quad (4.6)$$

Donde v es la velocidad del vehículo en km/h , y f_0 y f_s depende de la presión de inflado de la cámara de la rueda.

Se puede simplificar, y considerar el coeficiente de rozamiento como una función lineal con la velocidad. Para los rangos mas comunes de presión de inflado, para autos de pasajeros en un camino de concreto puede usarse la siguiente ecuación:

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{V}{160} \right) \quad (4.7)$$

Condiciones	Coefficiente de rozamiento
Cubiertas de auto en camino de concreto o asfalto	0.013
Cubiertas de auto en camino de grava	0.02
Camino de piedras con alquitrán	0.025
Camino sin pavimentar	0.05
Campo	0.1-0.35
Cubierta de camión en camino de concreto o asfalto	0.006-0.01
Rueda en riel de hierro	0.001-0.002

Tabla 4.1: Coeficientes de rozamiento

Esta ecuación obtiene valores aceptables de f_r para velocidades hasta 128 km/h.[2]

4.2.2. Resistencia aerodinámica

Un vehículo en movimiento, encuentra en el aire una fuerza que se resiste a su movimiento. A esta fuerza se le denomina resistencia aerodinámica. Principalmente resulta de dos componentes: de la forma del vehículo y de la fricción de la "piel" del vehículo.

Forma del vehículo: El movimiento de un vehículo empuja el aire enfrente de él. Sin embargo, el aire no puede moverse instantáneamente de lugar y en consecuencia su presión se incrementa, resultando en una alta presión de aire. Además, el aire detrás del vehículo no puede instantáneamente llenar el espacio dejado por el movimiento del vehículo. Esto crea una zona de baja presión de aire. El movimiento del vehículo crea, entonces dos zonas de presión que se oponen al movimiento empujando (alta presión en el frente) y tirando (baja presión en la parte de atrás) como muestra la Figura 4.5.

Fricción de la "piel": El aire cerca de la "piel" del vehículo se mueve casi a la velocidad del vehículo mientras que el aire lejos del vehículo se mantiene quieto. Entre medio, las moléculas del aire se mueven dentro de un rango muy amplio de velocidades. La diferencia de velocidades entre las moléculas produce una fricción que resulta en una segunda componente de resistencia

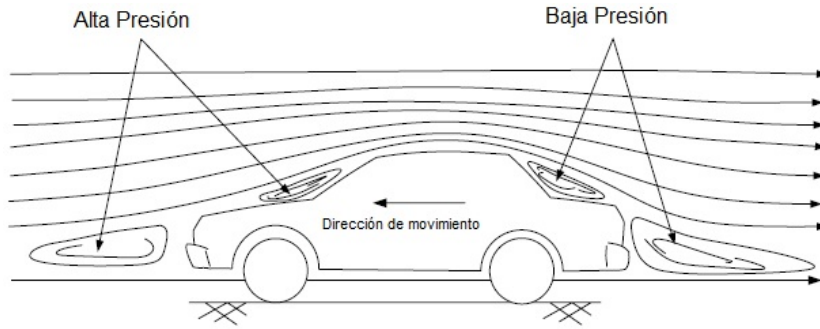


Figura 4.5: Forma del vehículo. (extraída de [2] Pág. 24)

aerodinámica.

La resistencia aerodinámica es una función de la velocidad v , área frontal del vehículo, A_f , la forma del vehículo, C_d , y la densidad del aire ρ :

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (v - v_w)^2 \quad (4.8)$$

donde C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámica que caracteriza la forma del vehículo, y v_w es la componente de velocidad del viento en la dirección de movimiento del vehículo, que tiene signo positivo cuando su componente es en la misma dirección que el movimiento del vehículo, y signo negativo cuando es en la dirección opuesta a la velocidad del vehículo. Los coeficientes de resistencia aerodinámica para formas típicas de vehículos se muestran en la Figura 4.6.[2]

4.2.3. Resistencia debido al ángulo

Cuando un vehículo sube o desciende una colina, su peso produce una componente que siempre es dirigida hacia "abajo". Esta componente o se opone al movimiento (ascenso), o ayuda al movimiento (descenso).

La fuerza ocasionada por el peso se puede expresar como:

$$F_g = M \cdot g \cdot \text{sen } \alpha \quad (4.9)$$

Para simplificar el ángulo del camino, α , es usualmente reemplazado por el valor de grado, cuando el ángulo del camino es pequeño. El grado es definido como

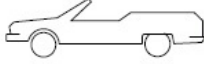
TIPO DE VEHÍCULO	Coefficiente de resistencia aerodinámica
 Convertible	0.5...0.7
 Camioneta	0.5...0.7
 Vehículo con baúl	0.4...0.55
 Lámparas, baúles, paragolpes y demás integrados a la forma aerodinámica del vehículo	0.3...0.4
 Luces, ruedas, etc cubiertas con una capa aerodinámica	0.2...0.25
 Sección de paso pequeña	0.23
 Diseño óptimo	0.15...0.20
Camiones, trenes	0.8...1.5
Omnibus	0.6...0.7
Omnibus de forma uniforme	0.3...0.4
Motos	0.6...0.7

Figura 4.6: Coeficiente aerodinámico para diferentes tipos de vehículos. (extraída de [2] Pág. 25)

$$i = \frac{H}{L} = \tan \alpha \approx \sin \alpha \quad (4.10)$$

Donde H es, si pensamos en la pendiente como un triángulo, cateto opuesto y L es el cateto adyacente del ángulo α . En algunas referencias, las resistencias debido a las fuerzas del peso y la fuerza de rozamiento, son a veces llamada resistencia del camino (road), que se expresa como

$$F_{rd} = F_f + F_g = M.g.(f_r.\cos \alpha + \sin \alpha) \quad (4.11)$$

Cuando el ángulo del camino es pequeño, la resistencia del camino puede simplificarse como

$$F_{camino} = F_f + F_g \simeq M.g.(f_r + i) \quad (4.12)$$

4.3. Ecuación dinámica

En la dirección longitudinal, las fuerzas actuando en un vehículo de dos ejes, son las mostradas en la Figura 4.1. Aparecen las fuerzas de rozamiento de las ruedas delanteras (front), F_{rf} , y de las ruedas traseras (rear), F_{rr} , que están representadas por el torque de resistencia de rodaje, T_{rf} y T_{rr} , la resistencia aerodinámica, F_w , resistencia de ascenso, F_g , y el esfuerzo de tracción de las ruedas delanteras y traseras, F_{tf} y F_{tr} .

F_{tf} es cero para un vehículo de tren trasero, mientras que F_{tr} es cero para vehículos de tren delantero. La ecuación dinámica del vehículo a lo largo de su dirección longitudinal se expresa por

$$M \cdot \frac{dv}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_w + F_g) \quad (4.13)$$

donde $\frac{dv}{dt}$ es la aceleración lineal del vehículo a lo largo de su dirección longitudinal y M es la masa del vehículo. El primer término a la derecha de la ecuación es el total de los esfuerzos de tracción, y el segundo término es el resistivo. Para predecir el máximo esfuerzo de tracción que el contacto cubierta-suelo puede soportar, tiene que determinarse la normal en los ejes delantero y trasero. Sumando todos los torques ocasionados por las fuerzas sobre el punto R , (centro del área cubierta-suelo), la normal en el eje delantero N_f puede determinarse como

$$N_f = \frac{M \cdot g \cdot L_b \cdot \cos \alpha - (T_{rf} + T_{rr} + F_w \cdot h_w + M \cdot g \cdot h_g \cdot \sin \alpha + M \cdot h_g \cdot \frac{dv}{dt})}{L} \quad (4.14)$$

De forma similar la normal actuando en el eje trasero puede expresarse como

$$N_r = \frac{M \cdot g \cdot L_a \cdot \cos \alpha + (T_{rf} + T_{rr} + F_w \cdot h_w + M \cdot g \cdot h_g \cdot \sin \alpha + M \cdot h_g \cdot \frac{dv}{dt})}{L} \quad (4.15)$$

Para vehículos de pasajeros, la altura del centro de aplicación de la resistencia aerodinámica, h_w , es asumida cercana al centro de gravedad del vehículo, h_g . Entonces se pueden simplificar las ecuaciones anteriores

$$N_f = \frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \cdot (F_w + F_g + M \cdot g \cdot f_r \cdot \frac{r_d}{h_g} \cdot \cos \alpha + M \cdot \frac{dv}{dt}) \quad (4.16)$$

y

$$N_r = \frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{h_g}{L} \cdot (F_w + F_g + M \cdot g \cdot f_r \cdot \frac{r_d}{h_g} \cdot \cos \alpha + M \cdot \frac{dv}{dt}) \quad (4.17)$$

donde r_d es el radio efectivo de la rueda. Volviendo a las ecuaciones anteriores, pueden expresarse de la siguiente forma

$$N_f = \frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \cdot (F_t - F_r \cdot (1 - \frac{r_d}{h_g})) \quad (4.18)$$

y

$$N_f = \frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{h_g}{L} \cdot (F_t - F_r \cdot (1 - \frac{r_d}{h_g})) \quad (4.19)$$

donde $F_t = F_{tf} + F_{tr}$ es el esfuerzo de tracción total del vehículo, y F_r es la resistencia total de rodaje. El primer término a la derecha de las ecuaciones anteriores es la normal estática en los ejes trasero y delantero cuando el vehículo está quieto en el suelo. El segundo término es la componente dinámica de la normal. El máximo esfuerzo de tracción que el contacto cubierta-suelo puede soportar (cualquier esfuerzo mayor causará que la cubierta gire en el suelo, *deslice*) es usualmente descrito por el producto de la normal y el coeficiente de rozamiento μ . Para un vehículo de tracción delantera

$$F_{tMAX} = \mu \cdot N_f = \mu \cdot [\frac{L_b}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha - \frac{h_g}{L} \cdot (F_{tMAX} - F_r \cdot (1 - \frac{r_d}{h_g}))] \quad (4.20)$$

y

$$F_{tMAX} = \frac{\mu \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot [L_b + f_r \cdot (h_g - r_d)] / L}{1 + \mu \cdot h_g / L} \quad (4.21)$$

donde f_r es el coeficiente de la resistencia de rodaje. Las ecuaciones para un vehículo de tracción trasera son

$$F_{tMAX} = \mu \cdot W_r = \mu \cdot [\frac{L_a}{L} \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha + \frac{h_g}{L} \cdot (F_{tMAX} - F_r \cdot (1 - \frac{r_d}{h_g}))] \quad (4.22)$$

y

$$F_{tMAX} = \frac{\mu \cdot M \cdot g \cdot \cos \alpha \cdot [L_a - f_r \cdot (h_g - r_d)] / L}{1 - \mu \cdot h_g / L} \quad (4.23)$$

En operaciones con vehículos, el esfuerzo máximo de tracción en las ruedas, transferido desde la planta de energía a través de la transmisión, no debe exceder los valores máximos que están limitados por las Ecuaciones 4.21 y 4.23. En caso contrario, las ruedas girarán en el suelo, llevando a la inestabilidad del vehículo.[2]

OBS.: Esta limitante, o fenómeno no fue considerada en el modelo implementado a la hora de las simulaciones.

4.4. Adhesion cubierta-suelo y esfuerzo máximo de tracción

Cuando el esfuerzo de tracción de un vehículo excede el límite de máximo esfuerzo de tracción debido a la capacidad de adhesión entre las cubiertas y el suelo, las ruedas girarán en el suelo. De hecho, la capacidad de adhesión entre las cubiertas y el suelo a veces es la principal limitante del desempeño del vehículo. Esto es cierto especialmente cuando el vehículo circula por caminos mojados, con hielo, cubiertos con nieve, o caminos con suelo suave. En este caso, un torque de tracción en las ruedas causará que la rueda gire significativamente en el suelo. El esfuerzo máximo en las ruedas depende de la fuerza longitudinal que puede dar la capacidad de adhesión entre la rueda y el suelo, mas que del máximo torque que el motor puede proveer. Resultados experimentales en varios tipos de suelo, muestran que, el máximo esfuerzo de tracción de las ruedas se relaciona con su deslizamiento. Esto es cierto también en un camino bien pavimentado, y seco donde el deslizamiento es muy pequeño debido a la elasticidad de la cubierta. Durante la tracción, el deslizamiento, s , de una cubierta es definido como

$$s = \left(1 - \frac{v}{r \cdot \omega}\right) \times 100 \% \quad (4.24)$$

donde v es la velocidad traslacional del centro de la cubierta, ω es la velocidad angular de la rueda, y r es el radio de la cubierta. La velocidad v , es menor que $r \cdot \omega$, por lo tanto el deslizamiento de la cubierta es un valor positivo entre 0 y 1.0. Durante el frenado, sin embargo, el deslizamiento de la cubierta puede definirse como

$$s = \left(1 - \frac{r \cdot \omega}{v}\right) \times 100 \% \quad (4.25)$$

Que tiene un valor positivo entre 0 y 1.0, similar a lo que ocurre durante la tracción. El máximo esfuerzo de tracción de una cubierta correspondiente a cierto deslizamiento usualmente se expresa como

$$F_x = P \cdot \mu(s) \quad (4.26)$$

donde P es la normal de la cubierta, y μ es el coeficiente de esfuerzo de tracción, que es una función del deslizamiento. La relación entre dicho coeficiente y el deslizamiento es la mostrada en la Figura 4.7.

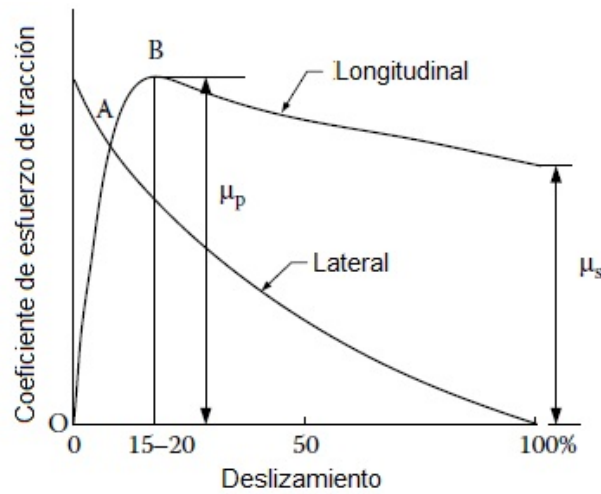


Figura 4.7: Variación del coeficiente de esfuerzo de tracción con el deslizamiento. (extraída de [2] Pág. 29)

En el rango de pequeños deslizamientos (sector OA en la Figura 4.7), el esfuerzo de tracción puede considerarse linealmente proporcional al valor de deslizamiento. Este pequeño deslizamiento es causado mas por la elasticidad de la cubierta que por el deslizamiento relativo entre la cubierta y el suelo en el área de contacto. El pico de esfuerzo de tracción se alcanza con deslizamientos del orden del 15-20 %. Aumentando más el deslizamiento se lleva el sistema a una condición inestable. El coeficiente de esfuerzo de tracción cae rápidamente desde el valor de pico. Para condiciones normales de conducción, el deslizamiento de las cubiertas debe estar limitado en un rango de 15-20 %. La Tabla 4.2 muestra valores promedio de coeficientes de esfuerzo de tracción.[2]

Superficie	Valores de pico, μ_p	Valores de deslizamiento, μ_s
Asfalto y hormigón (seco)	0.8-0.9	0.75
Hormigón (mojado)	0.8	0.7
Asfalto (mojado)	0.5-0.7	0.45-0.6
Grava	0.6	0.55
Camino de tierra (seco)	0.68	0.65
Camino de tierra (mojado)	0.55	0.4-0.5
Nieve	0.2	0.15
Hielo	0.1	0.07

Tabla 4.2: Valores promedio de coeficientes de esfuerzo de tracción para varios tipos de caminos

4.5. Trasmisión y velocidad del vehículo

Una trasmisión automotriz, como muestra la Figura 4.8, consiste en una planta de energía (motor de combustión o motor eléctrico), un embrague en transmisión manual o un convertidor de torque en una transmisión automática, una caja de cambios, el diferencial, el eje, y por último las ruedas. El embrague es usado en transmisiones manuales para acoplar o desacoplar la caja de cambios a la planta de energía. El convertidor de torque en transmisiones automáticas es un dispositivo hidrodinámico, que funciona como el embrague en transmisiones manuales con una variación de cambios continua.

El torque en las ruedas, transmitido desde la planta de energía se expresa como

$$T_w = i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t \cdot T_p \quad (4.27)$$

donde i_g es la relación de velocidades de la transmisión, definida como $i_g = N_{in}/N_{out}$ (N_{in} — velocidad angular de entrada, N_{out} — velocidad angular de salida), i_0 es la relación de velocidades de los engranajes finales, η_t es la eficiencia de la energía entregada por la planta que llega a las ruedas, y T_p es la salida de torque de la planta de energía. El esfuerzo de tracción en las ruedas, puede ser expresado como:

$$F_t = \frac{T_w}{r_d} \quad (4.28)$$

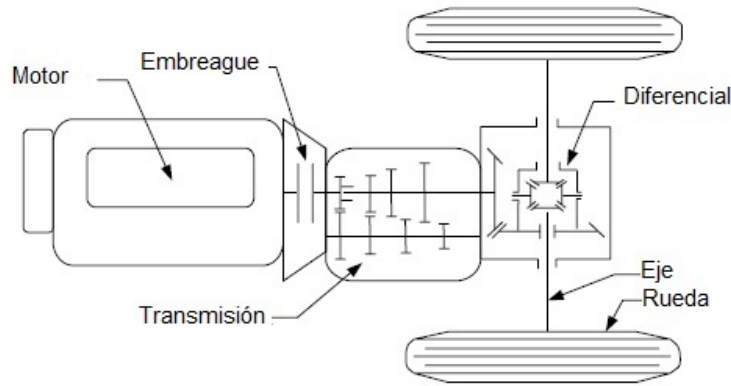


Figura 4.8: Ilustración conceptual de un tren de tracción de un automóvil. (extraída de [2] Pág. 30)

Substituyendo la Ecuación 4.28 en la Ecuación 4.27 se llega al siguiente resultado:

$$F_t = \frac{T_p \cdot i_g \cdot i_0 \cdot \eta_t}{r_d} \quad (4.29)$$

La fricción en los dientes de los engranajes crea pérdidas mecánicas en la transmisión. Los siguientes, son valores representativos de la eficiencia mecánica de varias componentes:

- Embrague - 99 %
- Cada par de engranajes - 95 – 97 %
- Juntas - 98 – 99 %

La eficiencia mecánica total de la transmisión entre la salida del motor y las ruedas es el producto de todas las eficiencias de los componentes de todo el tren. Como primera aproximación, pueden ser usados los siguientes valores promedio de eficiencia mecánica total de una transmisión con caja de cambios manual:

- Cambios directos - 85 – 90 %
- Transmisión con muy alta reducción de relación - 75 – 80 %

4.6. CARACTERÍSTICAS DE LA TRANSMISIÓN DE LA PLANTA DE ENERGÍA111

La velocidad angular (en revoluciones por minuto *rpm*) de las ruedas puede expresarse como

$$N_w = \frac{N_p}{i_g \cdot i_0} \quad (4.30)$$

donde N_p es la velocidad angular (rpm) de la transmisión, que es igual a la velocidad del motor en vehículos con transmisión manual. La velocidad traslacional del centro de la rueda (velocidad del vehículo) puede expresarse como

$$v = \frac{\pi \cdot N_w \cdot r_d}{30} \quad (m/s) \quad (4.31)$$

Substituyendo la Ecuación 4.30 en la Ecuación 4.31, obtenemos

$$v = \frac{\pi \cdot N_p \cdot r_d}{30 \cdot i_g \cdot i_0} \quad (4.32)$$

con N_p en revoluciones por minuto (rpm) o

$$v = \frac{\omega_p \cdot r_d}{i_g \cdot i_0} \quad (4.33)$$

con ω_p en radianes por segundo (rad/s).[2]

4.6. Características de la transmisión de la planta de energía

Hay dos factores que limitan el máximo esfuerzo de tracción de un vehículo. Uno es el máximo esfuerzo de tracción que el contacto cubierta-suelo puede soportar, (Ecuaciones 4.21 y 4.23) y el otro es el torque máximo que este puede entregar (Ecuación 4.29). El menor factor de estos dos determina el desempeño del vehículo. Para vehículos de carretera, el desempeño normalmente está limitado por el segundo factor.

4.6.1. Características de la planta de energía

Para aplicaciones vehiculares, la característica del desempeño ideal de una planta es una potencia de salida constante para casi todo el rango de

velocidades. Como consecuencia, el torque varía con la velocidad hiperbólicamente como muestra la Figura 4.9. Con este perfil ideal, la máxima potencia de la planta puede entregarse para cualquier velocidad, de ahí el desempeño ideal. Sin embargo, en la práctica, el torque es constante a bajas velocidades, siempre y cuando no se pase del límite permitido por la adhesión entre la cubierta-suelo. Esta característica constante de potencia provee al vehículo con altos esfuerzos de tracción a bajas velocidades cuando se acelera.

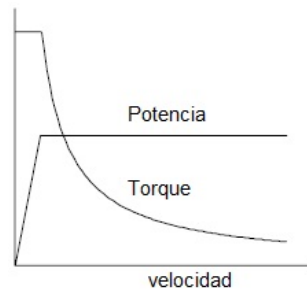


Figura 4.9: Desempeño ideal para un tren de tracción de un vehículo. (extraída de [2] Pág. 33)

El motor eléctrico es un candidato como planta de energía para el vehículo, y se está volviendo más y más importante con el rápido desarrollo de los autos eléctricos, híbridos y a base de celdas de combustible. Los motores eléctricos con un buen ajuste de control de velocidad, normalmente tienen una característica velocidad-torque que es mucho más cercana a la ideal (Figura 4.10) que para los vehículos con propulsión de combustión interna. Generalmente, el motor eléctrico arranca desde velocidad cero. A medida que la velocidad crece hacia la velocidad base, el voltaje aumenta hacia su valor nominal mientras el flujo se mantiene constante. En este rango de velocidades, desde cero a la velocidad base, el motor eléctrico produce un par constante. Mas allá de la velocidad base, el voltaje se mantiene constante y el flujo disminuye. Esto resulta en una salida constante de potencia, mientras que el torque decrece hiperbólicamente con la velocidad.[2]

4.6.2. Características de la transmisión

Los requerimientos de la transmisión dependen de las características de la planta de energía y el desempeño del vehículo. Como fue mencionado ante-

4.6. CARACTERÍSTICAS DE LA TRANSMISIÓN DE LA PLANTA DE ENERGÍA 113

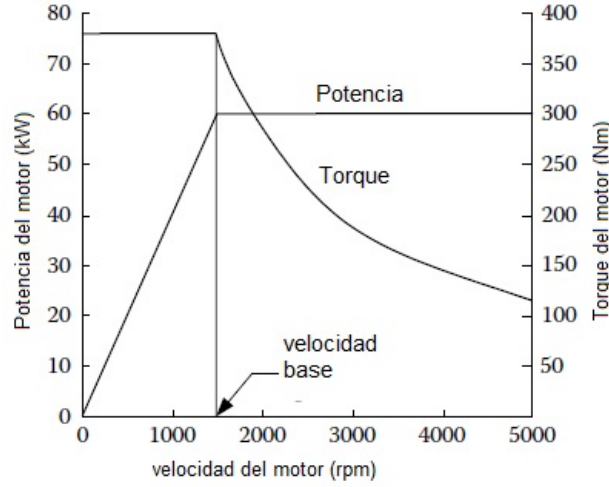


Figura 4.10: Característica típica de desempeño de trenes de tracción eléctricos. (extraída de [2] Pág. 34)

riormente, una máquina eléctrica bien controlada, como la planta de energía de autos eléctricos, puede no necesitar una transmisión de muchos "cambios". Sin embargo, un motor de combustión tiene que usar una transmisión de muchos "cambios" para multiplicar el torque a bajas velocidades, lejos del punto de operación óptimo.[2]

4.6.3. Grado de inclinación

Hay un cierto grado de inclinación que el vehículo puede superar a cierta velocidad constante. Para autos comerciales, el grado de inclinación se define usualmente como el máximo ángulo de inclinación que el vehículo puede superar para todo el rango de velocidades. Cuando el vehículo circula por un camino con un grado de inclinación relativamente pequeño a velocidad constante, el esfuerzo de tracción y la resistencia de equilibrio pueden escribirse de la siguiente manera

$$\frac{T_p \cdot i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t}{r_d} = M \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2 + M \cdot g \cdot i \quad (4.34)$$

Entonces,

$$i = \frac{T_p \cdot i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t / r_d - M \cdot g \cdot f_r - 1/2 \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2}{M \cdot g} = d - f_r \quad (4.35)$$

donde

$$d = \frac{F_t - F_w}{M \cdot g} = \frac{T_p \cdot i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t / r_d - 1/2 \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2}{M \cdot g} \quad (4.36)$$

es llamado el factor de desempeño. Cuando el vehículo circula por un camino con un alto grado de inclinación, tenemos

$$\text{sen } \alpha = \frac{d - f_r \cdot \sqrt{1 - d^2 + f_r^2}}{1 + f_r^2} \quad (4.37)$$

4.7. Modelo dinámico del vehículo implementado

4.7.1. Ecuación dinámica del bloque

El modelo que se ha implementado a la hora de las simulaciones queda determinado por la siguiente expresión:

$$a = \frac{dV}{dt} = \frac{F_t - F_f - F_w}{M \cdot \delta} \quad (4.38)$$

donde F_t es la fuerza de tracción entregada por la planta, F_f es la resistencia del camino (rozamiento, peso) y F_w es la fuerza resistiva producida por el aire. Además δ es el llamado factor rotacional de inercia, si se considera el incremento de masa equivalente debido a los momentos angulares de las componentes rotacionales. El factor de masa puede escribirse como:

$$\delta = 1 + \frac{I_w}{M \cdot r_d^2} + \frac{i_0^2 \cdot i_g^2 \cdot I_p}{M \cdot r^2} \quad (4.39)$$

donde I_w es la inercia del momento angular total de las ruedas e I_p es la inercia del momento angular total de las componentes rotativas asociadas con la planta de energía. El cálculo del factor de masa, δ , requiere conocimiento de valores de momentos de inercia de todas las componentes rotacionales. En el caso de que estos valores no son conocidos, el factor de inercia rotacional,

δ , para un vehículo de pasajeros se puede estimar usando la siguiente relación empírica:

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 \cdot i_g^2 \cdot i_0^2 \quad (4.40)$$

donde δ_1 representa el segundo término en el lado derecho de la Ecuación 4.39, con un valor estimado razonable de 0.04, y δ_2 representa el efecto de las partes rotacionales de la planta, con un valor estimado razonable de 0.0025.

Volviendo a la Ecuación 4.38, se expresa lo siguiente:

$$\dot{v} = \frac{1}{M \cdot \delta} \cdot \left(\frac{T_p \cdot i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t}{r_d} - M \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha - M \cdot g \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2 \right) \quad (4.41)$$

donde $f_r = 0,01 \cdot (1 + \frac{v}{160})$ con la velocidad en kilómetros por hora(km/h), entonces es necesario realizar la conversión a metros por segundo(m/s), resultando $f_r = 0,01 \cdot (1 + \frac{v(km/h)}{160 \times 3,6})$. Además, se considera la velocidad del viento nula $v_w = 0$ en el término de resistencia aerodinámica.

$$\dot{v} = \frac{1}{M \cdot \delta} \cdot \left(\frac{T_p \cdot i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t}{r_d} - M \cdot g \times 0,01 \cdot \cos \alpha - \frac{M \cdot g \cdot v \cdot 0,01 \times 3,6 \cdot \cos \alpha}{160} - M \cdot g \cdot \sin \alpha - \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2 \right) \quad (4.42)$$

Se debe notar que se trata de una expresión no lineal, ya que tiene término independiente y además tiene un término de segundo orden en la velocidad.

4.7.2. Parámetros utilizados

Como parámetros típicos de vehículos se han utilizado valores extraídos de la web¹ verificando la coherencia contra los datos de la bibliografía consultada, los cuales se muestran en la siguiente Tabla.

¹www.metricmind.com - Performance Simulations, vehicle data

Vehículo	<i>Honda CRX</i>	<i>Acura Integra</i>	<i>Mazda MX6</i>	<i>Toyota MR2</i>
$M(kg)$	1450	1500	1650	1550
C_D	0.29	0.34	0.31	0.35
$A_f(m^2)$	1.58	2.1	1.67	2
i_g	2.954	4.21	4.105	4.13
$r_d(m)$	0.28	0.3	0.3	0.276
i_1	3.250	3.18	3.307	3.31
i_2	1.650	1.94	1.833	1.98
i_3	1.033	1.37	1.310	1.37
i_4	0.823	1.03	1.030	1.01
i_5	0.694	0.85	0.795	0.85
$\eta_g \%$	0.95	0.95	0.95	0.95
$\eta_{mot+inv} \%$	0.85	0.82	0.84	0.82
$J_{embreague+trans} (kgm^2)$	0.11	0.11	0.11	0.13

Tabla 4.3: Valores típicos de parámetros del modelo dinámico para 4 vehículos

Capítulo 5

Control del Motor de Tracción

5.1. Estrategia de control del Motor de Inducción

El motor de inducción se controla mediante el método de control de velocidad propuesto en [3]. Este método consiste en controlar directamente la velocidad del motor e indirectamente el par del mismo. En forma cualitativa el principio de funcionamiento del control es el siguiente:

la velocidad que tiene que seguir el motor, velocidad de referencia, se compara con la velocidad real para generar las corrientes de referencia, i_a^ , i_b^* e i_c^* . Estas corrientes, se comparan con las corrientes de línea que está consumiendo el motor, i_a , i_b e i_c en el modulo de **Control Vectorial de Corriente**. El modulo de Control Vectorial de Corriente es el encargado de controlar al inversor para que le "entregue" al motor las corrientes de línea i_a^* , i_b^* e i_c^* para lograr la velocidad requerida.*

5.1.1. Descripción de los Bloques que conforman el Módulo de Control

- **Calculador i_{qs}^***

Como se observa en la Figura 5.1 al bloque entra el par eléctrico de referencia T_e^* , que se obtiene al comparar la velocidad de referencia y la real,

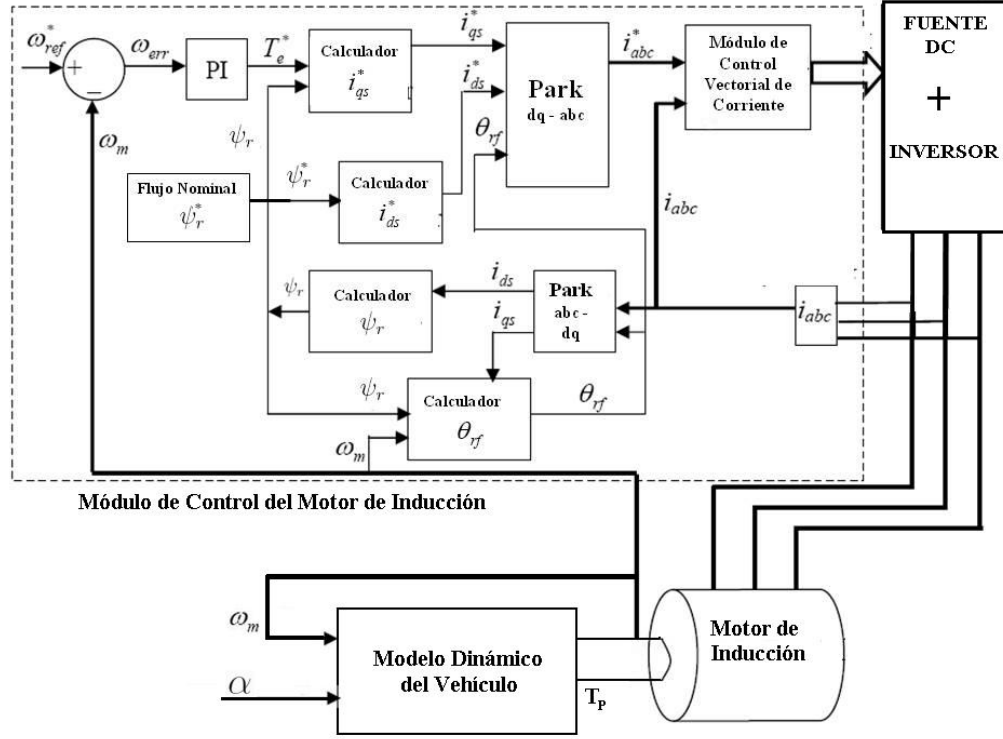


Figura 5.1: Módulo de Control del Motor de Inducción.

y el flujo rotórico del motor, que se obtiene mediante el bloque calculador de ψ_r . Con estas magnitudes y despejando de la Ecuación 3.63 se tiene que:

$$i_{qs}^* = \frac{T_e^*}{\frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \psi_r} \quad (5.1)$$

■ Calculador i_{ds}^*

Como el modelo del motor de inducción utilizado para realizar las simulaciones es lineal, no se utilizó ningún limitador de flujo. Para no subutilizar el hierro del motor se impone que el motor trabaje siempre a flujo rotórico

nominal. Despejando de la Ecuación 3.61 se obtiene la corriente de referencia i_{ds}^* .

$$i_{ds}^* = \frac{1}{L_m} \cdot \frac{L_r}{r_r} \cdot \frac{d\psi_r^*}{dt} + \frac{1}{L_m} \cdot \psi_r^* \quad (5.2)$$

Como se mencionó anteriormente el flujo rotórico nominal es constante, por lo tanto la derivada de ψ_r^* vale cero. Entonces se tiene que:

$$i_{ds}^* = \frac{1}{L_m} \cdot \psi_r^* \quad (5.3)$$

■ **Calculador ψ_r**

A partir de la corriente i_{ds} y aplicando la Ecuación 3.61 se obtiene que:

$$\frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{r_r}{L_r} \cdot \psi_r + L_m \frac{r_r}{L_r} \cdot i_{ds} \quad (5.4)$$

Por lo tanto el bloque **Calculador ψ_r** está implementado en el diagrama de bloque de la Figura 3.25.

■ **Park abc-dq y Park dq-abc**

Como el control del motor se realiza en el marco de referencia dq^1 , se implementa la transformada de Park en el bloque *Park abc-dq* para pasar del sistema trifásico *abc* al marco de referencia *dq*. Mientras que en el bloque *Park dq-abc* se implementa su inversa, que pasa del marco de referencia *dq* al sistema trifásico *abc*.

¹Por más información, ver anexo.

■ **Calculador θ_{rf}**

El ángulo θ_{rf} corresponde al ángulo de giro del marco de referencia dq .

Reescribiendo la Ecuación 3.56 se tiene que:

$$0 = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{dr} \quad (5.5)$$

Donde ω es la velocidad angular del marco de referencia dq , y ω_r es la velocidad angular del rotor.

Despejando i_{qr} de la Ecuación 3.60, sustituyéndola en la Ecuación 5.5, y realizando cuentas se obtiene que:

$$(\omega - \omega_r) = \frac{1}{\psi_{dr}} \cdot L_m \cdot \frac{r_r}{L_r} \cdot i_{qs} - \frac{1}{\psi_{dr}} \cdot \frac{d\psi_{qr}}{dt} \quad (5.6)$$

De acuerdo a la relación 3.58 se tiene que $\frac{d\psi_{qr}}{dt} = 0$ entonces:

$$(\omega - \omega_r) = \frac{1}{\psi_r} \cdot L_m \cdot \frac{r_r}{L_r} \cdot i_{qs} \quad (5.7)$$

Finalmente se obtiene que:

$$\theta_{rf} = \int \left(\frac{1}{\psi_r} \cdot L_m \cdot \frac{r_r}{L_r} \cdot i_{qs} + \omega_r \right) \quad (5.8)$$

Con

$$\omega_r = \frac{P}{2} \cdot \omega_m \quad (5.9)$$

donde P es el número de polos del motor de inducción y ω_m es la velocidad mecánica del rotor.

■ **Flujo Nominal ψ_r^***

El flujo nominal se obtuvo mediante ensayos propuesto en [7] pág.455. Estos ensayos se realizaron en forma virtual basado en simulaciones . El valor del flujo nominal es de 0.85 Wb.

■ Módulo de Control Vectorial de Corriente

El módulo de control vectorial de corriente es el encargado de controlar al inversor para alimentar al motor de inducción con las corrientes de referencias i_a^* , i_b^* e i_c^* . En la Sección 5.2 se explica detalladamente el funcionamiento de este bloque.

■ Bloque PI

Aplicando la segunda cardinal en el eje del motor se obtiene la ecuación dinámica.

$$J \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - T_p \quad (5.10)$$

Donde T_e es el par electromagnético que produce el motor, T_p es el par de carga que se le ejerce al motor, ω_m es la velocidad mecánica del rotor y J es el momento de inercia del motor.

A partir de la Ecuación 4.42, el par de carga T_p que se ejerce al motor de tracción en función de los parámetros del vehículos, la inclinación del terreno (α) en grados y la velocidad (v) en m/s es el siguiente:

$$T_p = \frac{r_d}{i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t} \cdot (\delta \cdot M \cdot \frac{dv}{dt} + M \cdot g \times 0,01 \cdot (1 + \frac{3,6}{160} \cdot v) \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot v^2 + M \cdot g \cdot \sin(\alpha)) \quad (5.11)$$

Sustituyendo en la Ecuación 5.11 la relación presentada en la Ecuación 4.33, se pasa la velocidad del vehículo en m/s a la velocidad del motor de tracción (ω_m) en rad/s , teniendo que:

$$T_p = \frac{r_d}{i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t} \cdot (\delta \cdot M \cdot \frac{r_d}{i_0 \cdot i_g} \cdot \frac{d\omega_m}{dt} + 0,01 \cdot M \cdot g \cdot (1 + \frac{3,6}{160} \cdot \frac{r_d}{i_g \cdot i_0} \cdot \omega_m) \cdot \cos(\alpha) + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot \frac{r_d^2}{i_g^2 \cdot i_0^2} \cdot \omega_m^2 + M \cdot g \cdot \sin(\alpha)) \quad (5.12)$$

Introduciendo el T_p obtenido en la Ecuación 5.10 y operando se llega a la siguiente ecuación:

$$A \cdot \frac{d\omega_m}{dt} = T_e - B(\alpha) - C(\alpha) \cdot \omega_m - D \cdot \omega_m^2 \quad (5.13)$$

Donde:

$$A = J + \delta \cdot M \cdot \frac{r_d^2}{i_0^2 \cdot i_g^2 \cdot \eta_t} \quad (5.14)$$

$$B(\alpha) = \frac{r_d}{i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t} (0, 01 \cdot M \cdot g \cdot \cos(\alpha) + M \cdot g \cdot \sin(\alpha)) \quad (5.15)$$

$$C(\alpha) = \frac{r_d}{i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t} \cdot (0, 01 \cdot M \cdot g \cdot \frac{3,6}{160} \cdot \frac{r_d}{i_g \cdot i_0} \cdot \cos(\alpha)) \quad (5.16)$$

$$D = \frac{r_d}{i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot \frac{r_d^2}{i_g^2 \cdot i_0^2} \quad (5.17)$$

El par que desarrolla el motor T_e para el control propuesto, es el que le impone el par de referencia T_e^* como se muestra en la Figura 5.1. Por lo tanto el par T_e es una entrada al sistema y se llamará T_e^* . Entonces en la Ecuación 5.13 se obtiene un sistema, donde:

- las variables de estados son: $\frac{d\omega_m}{dt}$ y ω_m ,
- las entradas son el par eléctrico de referencia T_e^* y el grado de inclinación del terreno α ,
- la salida es la velocidad mecánica del rotor ω_m .

Como se puede observar el sistema no es lineal por lo tanto para determinar los valores del controlador PI se linealiza en un punto de operación.

En regimen se tiene que $\frac{dv}{dt} = 0$ por lo tanto $\frac{d\omega_m}{dt} = 0$, entonces fijando la velocidad del vehículo y el ángulo α , queda determinado el punto de operación del sistema:

$$v = v_0 \Rightarrow \omega_m = \omega_{m0} \quad (5.18)$$

$$\alpha = \alpha_0 \quad (5.19)$$

$$\Rightarrow T_{e0}^* = B(\alpha_0) - C(\alpha_0) \cdot \omega_{m0} - D \cdot \omega_{m0}^2 \quad (5.20)$$

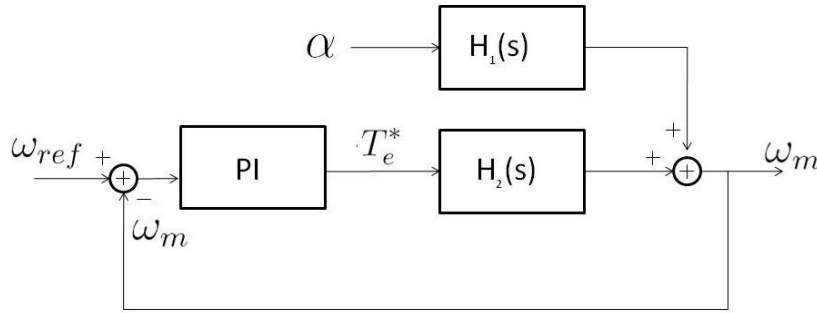
Linealizando en el punto de operación determinado se tiene que:

$$\frac{d\omega_m}{dt} = -\frac{1}{A} \cdot (C(\alpha_0) + 2D \cdot \omega_{m0}) \cdot \omega + \frac{1}{A} \cdot T_e^* - \frac{1}{A} \cdot \left(\frac{dB(\alpha_0)}{d\alpha} + \frac{dC(\alpha_0)}{d\alpha} \right) \cdot \alpha \quad (5.21)$$

Aplicando Laplace:

$$W(s) = \frac{\frac{1}{A}}{(s + \frac{C(\alpha_0) + 2D\omega_{m0}}{A})} T_e^*(s) - \frac{1}{A} \cdot \frac{(\frac{dB(\alpha_0)}{d\alpha} + \frac{dC(\alpha_0)}{d\alpha})}{(s + \frac{C(\alpha_0) + 2D\omega_{m0}}{A})} \cdot \alpha(s) \quad (5.22)$$

Finalmente se tiene que el sistema posee una entrada que se controlará de acuerdo a la velocidad que se quiere obtener (T_e^*), y otra entrada que es una perturbación al sistema (α). El sistema realimentado se muestra en el siguiente diagrama de bloques:



Donde:

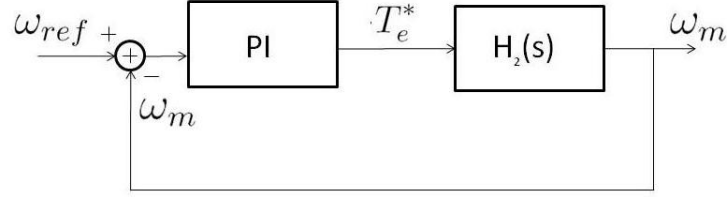
$$H_1(s) = -\frac{1}{A} \cdot \frac{(\frac{dB(\alpha_0)}{d\alpha} + \frac{dC(\alpha_0)}{d\alpha})}{(s + \frac{C(\alpha_0) + 2D\omega_{m0}}{A})} \quad (5.23)$$

$$H_2(s) = \frac{\frac{1}{A}}{(s + \frac{C(\alpha_0) + 2D\omega_{m0}}{A})} \quad (5.24)$$

$$PI = K_p \cdot (1 + \frac{1}{T \cdot s}) \quad (5.25)$$

Se eligió un controlador PI ya que además de la estabilidad que otorga la realimentación negativa dada por el control proporcional, se agrega la eliminación del error en régimen debido el control integral.

Aplicando superposición, primero se estudiará el sistema realimentado considerando la perturbación que produce el ángulo de inclinación del terreno, nula, teniendo en estas condiciones el siguiente diagrama de bloques:



El vehículo que se eligió es el HONDA CRX. En la Tabla 4.3 se describen los valores de los parámetros que modelan la dinámica del vehículo. La relación de velocidades de la transmisión que se utilizarán son:

- i_3 para medianas velocidades (régimen de conducción urbano), correspondiente a una 3^{ra} velocidad de una caja de cambios standard,
- i_5 para altas velocidades (régimen de conducción carretero), correspondiente a una 5^{ta} velocidad de una caja de cambios standard.

Para determinar los valores del controlador PI se analizará el sistema con i_3 , luego se mostrará mediante simulaciones que el control tiene un buen comportamiento al cambiar la relación de velocidades de la transmisión a i_5 .

A partir de los parámetros del vehículo y el punto de operación elegido para la linealización, $v_0 = 45 \text{ km/h}$ y $\alpha_0 = 0^\circ$ se tienen los siguientes valores:

$$\frac{1}{A} = 59,1 \times 10^{-3} \quad (5.26)$$

$$\frac{C(\alpha_0) + 2D \cdot \omega_{m0}}{A} = 4,5 \times 10^{-3} \quad (5.27)$$

Según la elección del valor de T , el cero que impone el controlador PI se ubica en el plano del lugar geométrico de las raíces del sistema como se muestran en las Figuras 5.2. Si se elige un T tal que el cero quede entre los polos del sistema (Figura 5.2(a)), para cualquier K_p elegido se tendrá un sistema con respuesta lenta debido a que la constante de tiempo es del orden de los minutos. Mientras que si se elige un T tal que el cero esté a la izquierda del polo más "rápido" del sistema (Figura 5.2(b)), de acuerdo al valor de K_p

se tendrán una constante de tiempo más rápida, del orden de los segundos. Para tener un sistema con respuesta rápida se elegirá un valor de T tal que los polos del sistema verifiquen el lugar geométrico de la Figura 5.2(b). Por otro lado en las Figura 5.2(a) y 5.2(b) se observa que el sistema es estable para cualquier valor de T y K_p .

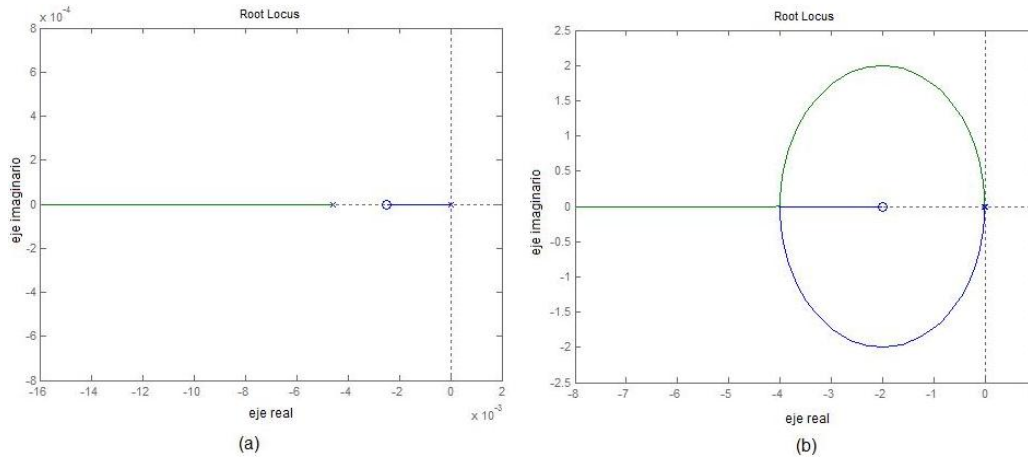


Figura 5.2: Lugar Geométrico de las Raíces (Root-Locus), según el valor de T del controlador PI.

Por la particularidad de la aplicación, los valores de entrada al sistema (velocidad de referencia), son siempre rampas de determinada pendiente (según la aceleración del vehículo) concatenado con constante (según la velocidad del mismo). Como el controlador es de primer orden y el sistema también es de primer orden, al entrar con rampas siempre va a existir un error en régimen. Aplicando el teorema del valor final se tiene que dicho error en régimen es:

$$error = \frac{4,5 \times 10^{-3}}{(59,1 \times 10^{-3}) \cdot K_p} \quad (5.28)$$

A partir de la Ecuación 5.28 se eligió $K_p = 170$ teniendo un error en régimen menor al 0,1 %.

Finalmente los valores para el control PI elegido son los siguientes:

K_p	T
170	0.5

Si bien los valores del controlador PI se obtuvieron linealizando el sistema alrededor de $v_0 = 45 \text{ km/h}$, como se muestran en las Figuras 5.3 el control tiene un buen comportamiento para diferentes rangos de velocidades. La velocidad de referencia se generó de acuerdo al ciclo de conducción urbano ECE15².

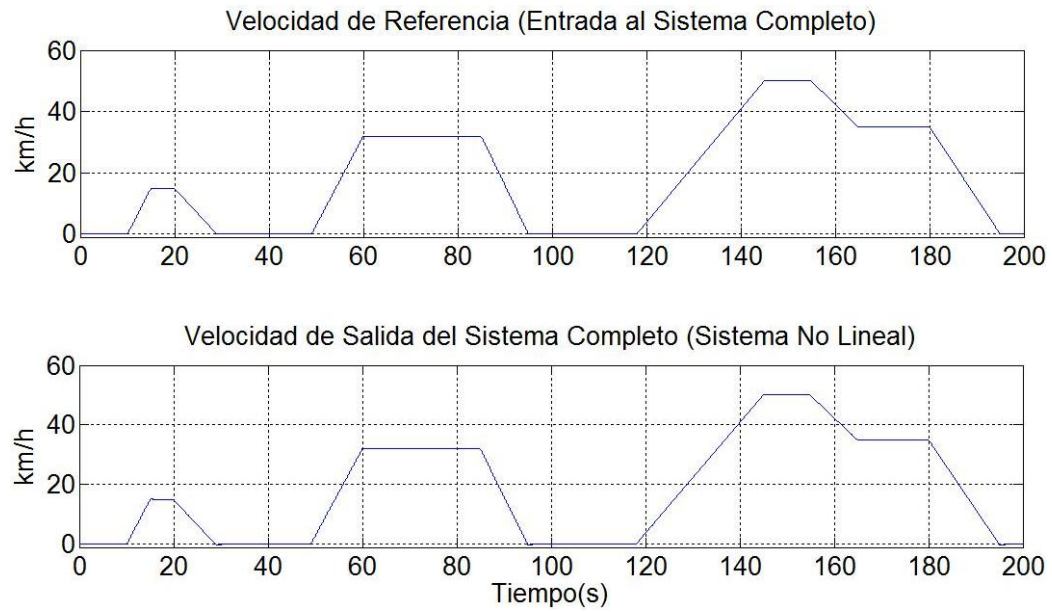


Figura 5.3: Velocidad de Referencia correspondiente al régimen de conducción urbano ECE15 (velocidades medias).

Para determinar el controlador, como se mencionó anteriormente se utilizó una relación de velocidades de la transmisión i_3 , correspondiente para régimen de conducción urbano (medianas velocidades). En la Figura 5.4 se muestra que el control PI tiene un buen comportamiento al cambiar la relación de velocidades de la transmisión a i_5 , correspondiente para régimen de conducción carretero (altas velocidades). La velocidad de referencia se generó de acuerdo al ciclo de conducción carretero EUDCL³.

²En el Capítulo 7 se describen los diferentes tipos de ciclos de conducción.

³En el Capítulo 7 se describen los diferentes tipos de ciclos de conducción.

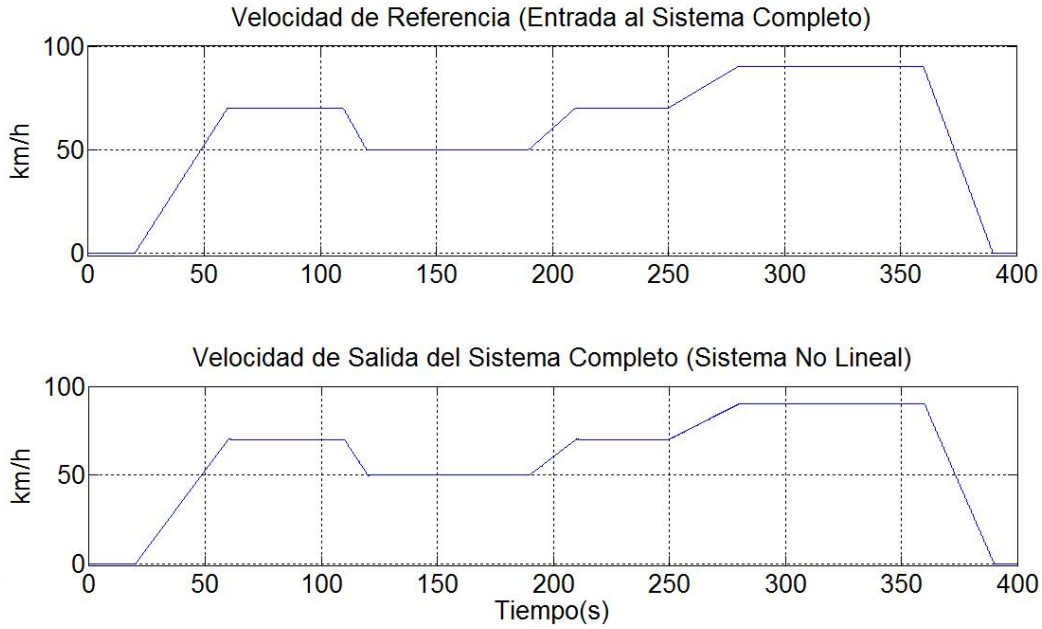


Figura 5.4: Velocidad de Referencia correspondiente al régimen de conducción carretero EUDCL (altas velocidades).

Con el control PI determinado se analizará como responde el sistema cuando se lo perturba al variar el ángulo de inclinación del terreno. Siguiendo con la teoría de superposición, ahora se estudiará el sistema dejando constante la velocidad de referencia en el punto de operación donde se linealizó ($v_0 = 45 \text{ km/h}$), y se perturbará variando el grado de inclinación del terreno α .

Como se puede ver en la Figura 5.5 el control tiene un buen desempeño cuando la inclinación del terreno varía. Como se muestra, al variar el grado de inclinación del terreno el control PI impone un par de referencia T_e^* , el motor de tracción desarrolla el par impuesto por el control con el fin de que la velocidad de salida del sistema "siga" a la velocidad de entrada del mismo (velocidad de referencia). También se puede apreciar que la velocidad de salida se "corrige" en el orden de los segundos, y "copia" a la velocidad de referencia cuando se perturba el sistema variando el grado de inclina-

ción del terreno.

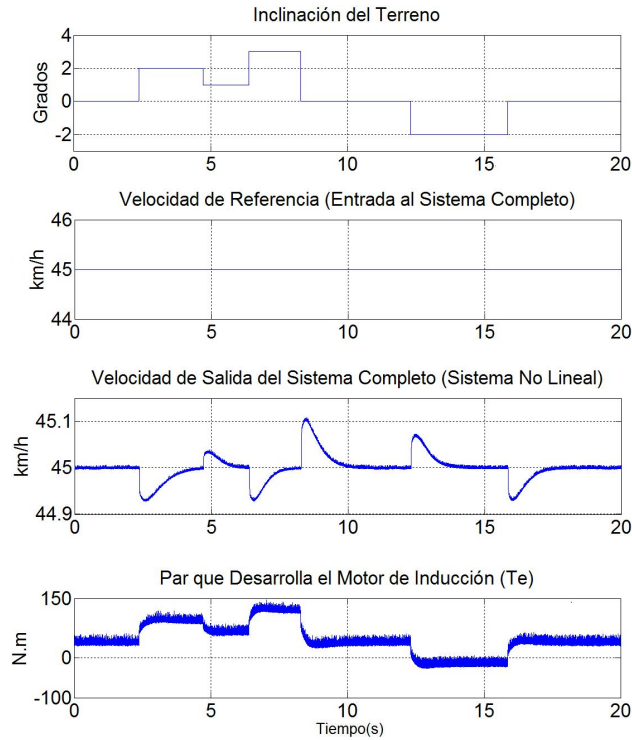


Figura 5.5: Variaciones en la velocidad de salida del sistema y del par desarrollado por el motor de inducción al variar el grado de inclinación del terreno.

OBS.: Notar que cuando el ángulo de inclinación del terreno es negativo, es decir el vehículo va descendiendo, entonces el par que desarrolla el Motor de Inducción es negativo, o sea está generando.

5.2. Control Vectorial de Corriente

5.2.1. Introducción

Se describe una de las posibles estrategias de control del convertidor, que es la llamada Control Vectorial de Corriente. Básicamente consiste en controlar las corrientes de línea a la salida del convertidor, llevándolas a

un valor deseado, i_{ref} (o lo más próximo que se pueda en el sentido que se definirá).

5.2.2. Conceptos Básicos

Para este análisis se supondrá el control de corriente en un intervalo de tiempo en que se consideran i_{ref} constantes provenientes del sistema de control del motor.

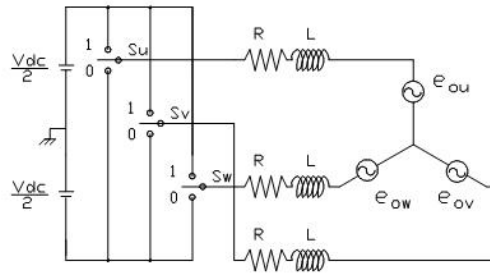


Figura 5.6: Circuito Inversor Ideal -extraída de [8] Cap. 2

La ecuación vectorial de tensión y corriente en coordenadas de fase (u,v,w) es:

$$v(k) = L \frac{di}{dt} + Ri + e_0 \quad (5.29)$$

donde

i : es el vector de corriente

e_0 : es la f.e.m del motor

$v(k)$: es la tensión a la salida del inversor

La tensión de salida puede pasar por 8 estados posibles ($k=0,1,\dots,7$) y habrá por tanto 7 valores posibles de tensión de salida del inversor. Esto se muestra en la Tabla 5.1

Por otro lado, se considera el vector de corrientes i que es medido en coordenadas de fase (x,y,z) y comparado contra el valor de referencia i_{ref} obteniéndose así un vector de "Desviación de corriente" Δi

v(k)	k=0	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6	k=7
(S_u, S_v, S_w)	000	100	110	010	011	001	101	111

Tabla 5.1: Estados posibles de tensión de salida en función de la posición de las llaves

$$\Delta i = i_{ref} - i \quad (5.30)$$

Sustituyendo esto en la ecuación 5.29 se obtiene:

$$L \frac{d\Delta i}{dt} + R \cdot \Delta i = (L \frac{di_{ref}}{dt} + R \cdot i_{ref} + e_0) - v(k) \quad (5.31)$$

Si se supone que las variaciones son rápidas, entonces $R \cdot \Delta i \ll L \cdot \frac{d\Delta i}{dt}$ por lo que se puede simplificar la expresión anterior a

$$L \frac{d\Delta i}{dt} = e - v(k) \quad (5.32)$$

donde

$$e = L \frac{di_{ref}}{dt} + R \cdot i_{ref} + e_0 \quad (5.33)$$

e es el vector de contra f.e.m en bornes del motor que permite a este llevar una corriente i_{ref} sin ninguna desviación de corriente respecto a la deseada. Como se aprecia fácilmente esto no es posible en la realidad ya que la tensión de salida del puente inversor solo puede tomar 7 valores discretos.

El término $\frac{d\Delta i}{dt}$ de la Ecuación 5.32 queda determinado por la elección de $v(k)$, y es el que determina el contenido de armónicos de la corriente en estado de régimen (variaciones rápidas de corrientes se asocian con altas frecuencias), y además está vinculado a la respuesta de corriente en estado transitorio (altos valores de $\frac{d\Delta i}{dt}$ implican respuesta rápida).

Una forma útil de representar estos parámetros es el diagrama vectorial que se muestra en la Figura 5.7

Para asegurar que el Δi baje, es necesario elegir un $v(k)$ tal que la correspondiente $\frac{d\Delta i}{dt}$ tenga sentido opuesto a Δi . Esto se puede apreciar mejor si se dibujan los vectores de diferencia $e - v(k)$ para $k=0..7$. (Ver Figura 5.8)

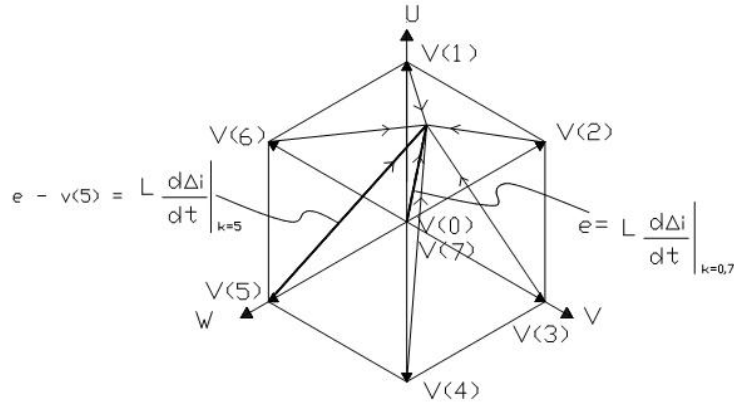


Figura 5.7: Diagrama vectorial de las Tensiones del Inversor y derivada del Error de Corriente -extraída de [8] Cap. 2

En la Figura 5.8, se muestra el sentido y dirección del Δi , pero no se debe perder de vista que el marco referencial utilizado para las corrientes (x,y,z) es diferente de aquel que se utiliza para las tensiones (u,v,w). Sin embargo se verá enseguida que se puede hacer una transformación que lleva vectores de uno en el otro, de modo de poder compararlos y elegir el valor adecuado de $\frac{d\Delta i}{dt}$.

En la Figura 5.8 se aprecia además que, con el Δi indicado al elegir $k=5$ se obtiene un vector de $\frac{d\Delta i}{dt}$ de módulo máximo y sentido opuesto a Δi , lo cual permite una respuesta transitoria rápida. Análogamente, si se desea minimizar el contenido de armónicos en corriente en régimen, se debe elegir $k=0$ o $k=7$, con lo cual se logra un vector $\frac{d\Delta i}{dt}$ de módulo mínimo y sentido opuesto a Δi .

La estrategia de control consiste pues, en lograr un vector de tensiones en bornes de la máquina lo más próximo posible a $\mathbf{e}$, que en los transitorios priorice la velocidad de respuesta, y en régimen minimize la cantidad de armónicos de corriente.

5.2.3. Algoritmo de Control

La estrategia de control adoptada selecciona el estado de las llaves según el siguiente procedimiento:

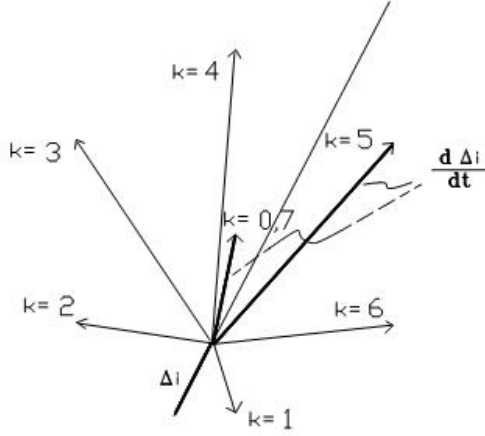


Figura 5.8: Representación vectorial de las $\frac{d\Delta i}{dt}|_{k=0,7}$ -extraída de [8] Cap. 2

1. Se miden las corrientes de fase
2. Se calcula el vector de error de corriente Δi . Observando la Figura 5.9 vemos que hay entonces tres casos posibles, según sea Δi en relación con δ y h :
 - a) Si $|\Delta i| < \delta \Rightarrow$ No se cambia de estado
 - b) Si $\delta < |\Delta i| < h \Rightarrow$ Se cambia de estado de acuerdo al criterio de minimización de armónicos en las corrientes de salida.
 - c) Si $|\Delta i| > h \Rightarrow$ Se cambia de estado de acuerdo al criterio de respuesta rápida.

Donde $|\Delta i|$ es el módulo del vector error de corriente, definiendo como módulo, el máximo valor absoluto de las componentes del vector.

5.2.3.1. Selección del modo de conmutación para minimizar armónicos

Como ya se comentó la estrategia para minimizar armónicos de corriente consiste en elegir un modo de conmutación tal que permita minimizar $\frac{d\Delta i}{dt}$, minimizando de esta forma las variaciones abruptas en la corriente.

En la Figura 5.8, para la posición indicada de Δi la elección correcta sería

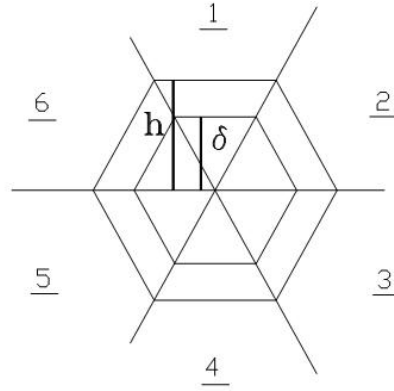


Figura 5.9: Algoritmo de Control -extraída de [8] Cap. 2

$k=0$ o $k=7$.

El próximo estado de las llaves estará limitado a los vértices del triángulo que contiene $\mathbf{e}$, como se muestra en la Figura 5.7. Esto se debe a que con esos estados se obtienen los tres vectores derivada de error de corriente más pequeños de los siete posibles. Entre los tres, el elegido será aquel que logre la disminución del error de corriente lo más rápido posible. Con $\mathbf{e}$ dentro del hexágono definido por los $\mathbf{v}(k)$ esto siempre es factible pues de los tres vectores siempre uno tiene componente en el sentido opuesto a Δi .

Siempre que $\mathbf{e}$ quede fuera del hexágono antes mencionado, la derivada del error de corriente será elevada y la estrategia a seguir será la de respuesta rápida por encima de la de minimizar el contenido armónico.

La Figura 5.10 ilustra una forma de visualizar el algoritmo. Se aprecia que si por ejemplo $\mathbf{e}$ está en la región [I], entonces el próximo estado de las llaves es elegido entre $k=0,1,2$ o 7 , según sea Δi .

5.2.3.2. Transformación entre sistemas de referencia de tensión y corriente

Se considera un sistema de ejes x,y,z desfasados 120° entre sí, los cuales son perpendiculares a los lados que forman la zona [I]. Este sistema de coordenadas se usará para ubicar la zona del vector Δi (Ver Figura 5.11)

Se observa que para las zonas [III] y [V] el sentido de los ejes (x,y,z) es el mismo que para la zona [I], mientras que para las zonas [II],[IV]y [VI], el

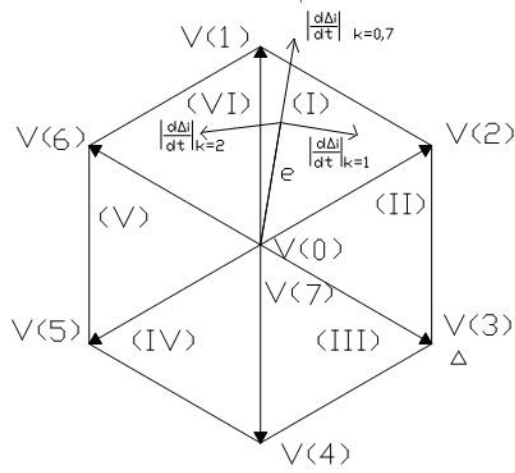


Figura 5.10: División en regiones del hexágono de tensiones -extraída de [8] Cap. 2

sentido de los ejes será el opuesto (por ejemplo para zona [II] quedan como se muestra en la Figura 5.12

Superponiendo los sistemas de la Figura 5.11 y de la Figura 5.12 se obtienen seis zonas en las que se puede encontrar el vector Δi (según Figura 5.13

Si se supone, por ejemplo, que e está en la zona [I] y que Δi está en la zona 6, el error de corriente crece en sentido opuesto a $\frac{d\Delta i}{dt}|_{k=1}$, por lo cual debe ser elegido el modo $k=1$. De esta forma se van formando los esquemas que se muestran en la Figura 5.14

La relación entre los sistemas (u,v,w) y (x,y,z) es pues una rotación de 30° en sentido horario, lo que se representa algebraicamente por la expresión:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{pmatrix} u - w \\ -u + w \\ -v + w \end{pmatrix} \quad (5.34)$$

Utilizando la Tabla 5.2 se puede determinar la zona de Δi en coordenadas (x,y,z) , a partir de los signos de Δi en coordenadas (u,v,w) . El algoritmo a utilizar entonces será:

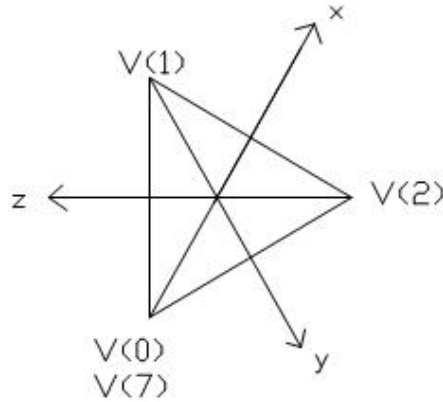


Figura 5.11: Sistema coordenado - Espacio de Corrientes para la región [I] de la Figura 5.10 -extraída de [8] Cap. 2

- Se define la zona del vector de error de corriente Δi en coordenadas (x,y,z) a partir de los signos de las componentes del mismo en coordenadas (u,v,w) Tabla 5.2
- Se calcula la derivada $\Delta i'$ del error de corriente en coordenadas (x,y,z) como $\frac{(\Delta i((m+1)T) - \Delta i(mT))}{T}$
- Con los signos de $\Delta i'_x$, $\Delta i'_y$, $\Delta i'_z$ y el estado actual $v(k)$ de las llaves, se determina la región de la fem e (Tabla 5.3)

Zona de Δi	Signo de Δi_u	Signo de Δi_v	Signo de Δi_w
1	+	-	-
2	+	+	-
3	-	+	-
4	-	+	+
5	-	-	+
6	+	-	+

Tabla 5.2: Zona en Espacio de Corrientes vs. Signo en Espacio de Tensiones

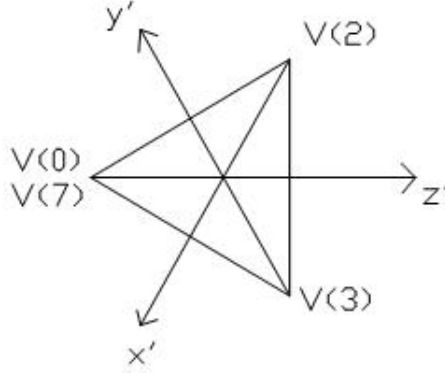


Figura 5.12: Sistema coordenado - Espacio de Corrientes para Zona [II] de la Figura 5.10 -extraída de [8] Cap. 2

- Con las regiones de Δi y $\mathbf{e}$, de la Tabla 5.4 se deduce el nuevo estado al que se enviarán a las llaves

5.2.3.3. Selección del modo de conmutación para respuesta rápida

En caso de que el error de corriente Δi corresponda a la situación 2.c es decir si $|\Delta i| > h$ se selecciona el próximo estado de las llaves del puente de acuerdo a la estrategia de respuesta rápida.

Si $|\Delta i| > h$ entre dos instantes de muestreo, se asume que se está frente a un transitorio y se seleccionará aquel estado de las llaves que disminuya lo más rápidamente posible el error de corriente. Esto se logra eligiendo como próximo estado aquel que proporcione un vector $\frac{d\Delta i}{dt}$ de componente máxima en la dirección de Δi y de sentido opuesto al mismo.

Independientemente de la región de $\mathbf{e}$, si Δi se encuentra en el ángulo 1 de la Figura 5.13, la derivada del error de corriente se buscará en el ángulo opuesto por el vértice, es decir el ángulo 4.

Obsérvese que según la Ecuación 5.32, el vector derivada del error de corriente es proporcional al vector opuesto a $\mathbf{v}(k)$. Luego, $\mathbf{v}(k)$ se hallará en el ángulo opuesto por el vértice al ángulo 4 de la Figura 5.14, o se el ángulo 1, es decir único $\mathbf{v}(k)$ en estas condiciones es $\mathbf{v}(1)$. Análogamente para las restantes zonas de Δi , lo que se resume en la Tabla 5.5

v(k)	Sg($\Delta i'_x$)	Sg($\Delta i'_y$)	Sg($\Delta i'_z$)	$\mathbf{e}$
0,7	1	0	0	[I]
	1	1	0	[II]
	0	1	0	[III]
	0	1	1	[IV]
	0	0	1	[V]
	1	0	1	[VI]
1	-	-	1	[VI]
	-	-	0	[I]
2	-	0	-	[I]
	-	1	-	[II]
3	1	-	-	[II]
	0	-	-	[III]
4	-	-	0	[III]
	-	-	1	[IV]
5	-	1	-	[IV]
	-	0	-	[V]
6	0	-	-	[V]
	1	-	-	[VI]

$$\Delta i' = \frac{0 \text{ negativo, } 1 \text{ positivo}}{\frac{\Delta i((m+1)T) - \Delta i(mT)}{T}}$$

Tabla 5.3: Determinación de la Región de $\mathbf{e}$

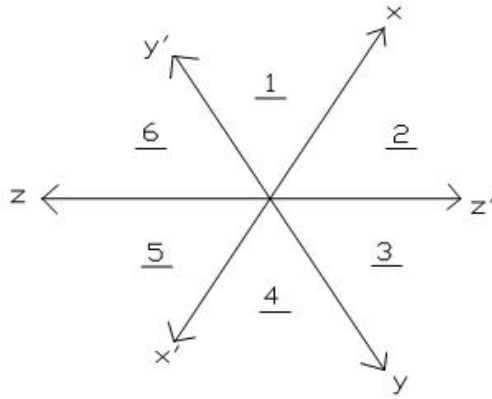


Figura 5.13: Sistema coordenado - Espacio de Corrientes -extraída de [8] Cap. 2

Región de e	Región de Δi					
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
I	1	2	2	0,7	0,7	1
II	2	2	3	3	0,7	0,7
III	0,7	3	3	4	4	0,7
IV	0,7	0,7	4	4	5	5
V	6	0,7	0,7	5	5	6
VI	1	1	0,7	0,7	6	6

Tabla 5.4: Determinación de Próximo estado de llaves del puente

Zona de Δi	$v(k)$
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6

Tabla 5.5: $v(k)$ en función de las Zonas de Δi

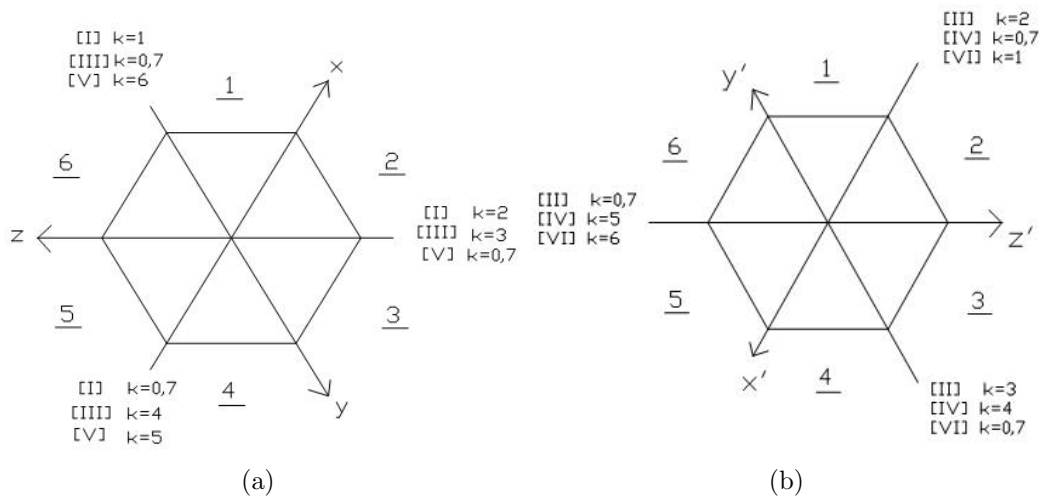


Figura 5.14: Espacio de Corrientes según Zonas de Tensión a) [I],[III] y [V];
b) [II],[IV] y [VI]

Capítulo 6

Sistemas de Propulsión Implementados

6.1. Modelo Vehículo Eléctrico

6.1.1. Modelo implementado

El esquema de bloques utilizado es el de la Figura 6.1, del cual se pasarán a describir cada uno de sus componentes.

6.1.1.1. Bloque del Motor de Inducción

6.1.1.1.1. Modelo básico. - Para las simulaciones se ha utilizado el bloque de simulink *Asynchronous Machine*, como motor de inducción. Dicho bloque opera tanto como motor, como generador. El modo de operación está dictado por el signo del torque mecánico (T_m); si el T_m es positivo, entonces la máquina actúa como motor, y si el T_m es negativo, entonces la máquina actúa como generador. La parte eléctrica de la máquina está representada por un modelo de cuarto orden y la parte mecánica por un modelo de segundo orden. Todas las variables eléctricas y parámetros están referidos al estator. Todas las magnitudes rotóricas y estatóricas están referidas en el par de ejes arbitrarios dq . [6]

- Sistema Eléctrico

El sistema eléctrico es descrito por el conjunto de ecuaciones: Tensiones del estator 3.41, 3.42, y 3.43; Tensiones del rotor 3.44, 3.45, y 3.46; Flujos

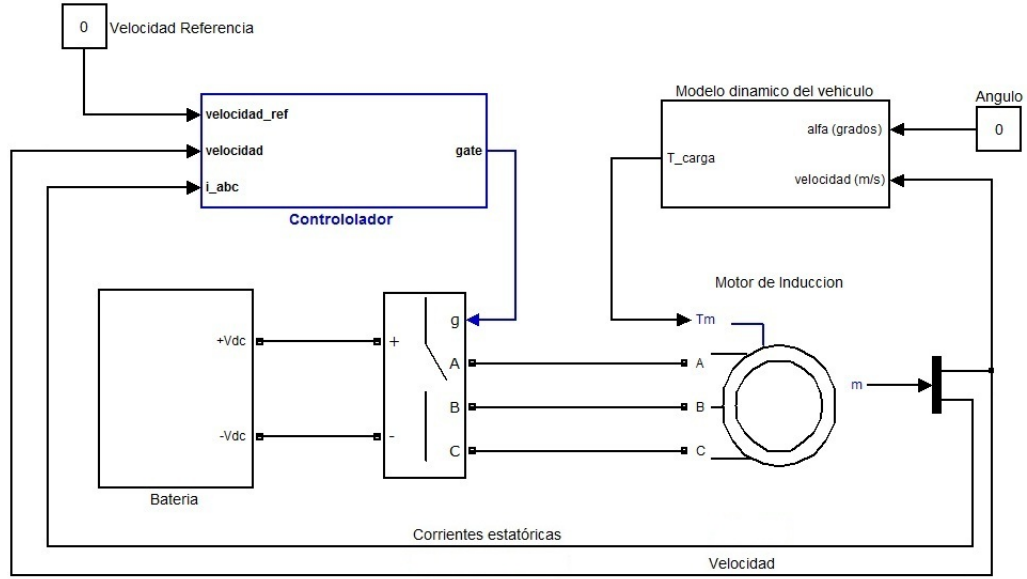


Figura 6.1: Esquema general de bloques del modelo de vehículo eléctrico implementado

del estator 3.47, 3.48, y 3.49; Flujos del rotor 3.50, 3.51, y 3.52; y por último el Par 3.62.

■ Sistema Mecánico

$$\frac{d}{dt}\omega_m = \frac{1}{2.H} \cdot (T_e - F \cdot \omega_m - T_m) \quad (6.1)$$

$$\frac{d}{dt}\theta_m = \omega_m \quad (6.2)$$

donde, ω_m , es la velocidad angular del rotor, θ_m , es la posición del rotor, T_e , es el torque electromagnético, T_m , es el torque mecánico, H , es la constante de inercia combinada del rotor y la carga, y F , es el coeficiente combinado de fricción dinámica entre el rotor y la carga.

6.1.1.1.2. Entrada mecánica. - Se puede utilizar como entrada mecánica tanto, el torque aplicado al eje, como la velocidad del rotor.

- Torque T_m

Eligiendo esta magnitud como entrada, la velocidad de la máquina es determinada por su inercia J , y por la diferencia entre el torque mecánico aplicado T_m y el torque electromagnético interno T_e . La convención de signos para el torque mecánico es la siguiente: cuando la velocidad es positiva, una señal de torque positiva indica modo motor, y una señal negativa indica modo generador.

OBS.: En las simulaciones se eligió esta magnitud como entrada para el motor de inducción.

- Velocidad ω

Eligiendo esta magnitud como entrada, la velocidad es impuesta, y la parte mecánica del modelo (Inercia J) es ignorada. Usando la velocidad como la entrada mecánica, permite modelar un acoplamiento mecánico entre dos máquinas.

6.1.1.1.3. Preferencias. - Se puede elegir el tipo de rotor, ya sea rotor bobinado o rotor tipo jaula de ardilla.

También se puede elegir el marco de referencia:

- Rotor (Transformada de Park)
- Estacionario (Transformada de Clarke, o $\alpha\beta$)
- Sincrónico

La elección del marco de referencia afecta las formas de onda de todas las variables dq . Además también afecta la velocidad de simulación y la exactitud de los resultados.

Sugerencias:

- Utilizar el sistema de referencia estacionario si las tensiones del estator son o desequilibradas o imperfectas y las tensiones del rotor están balanceadas o cortocircuitadas.

- Utilizar el sistema de referencia rotórico si las tensiones del rotor son o desequilibradas o imperfectas y las tensiones del estator están balanceadas.
- Utilizar el sistema de referencia estacionario o sincrónico si todas las tensiones son equilibradas y perfectas.

OBS.:El marco de referencia elegido para las simulaciones es el Estacionario.

6.1.1.1.4. *Parámetros.* -

Potencia Nominal, Tensión (línea-línea), Frecuencia - La potencia nominal P_n en (VA), la tensión RMS línea a línea V_n en (V), y la frecuencia f_n en (Hz)

Resistencia estatórica e inductancia - La resistencia estatórica R_s en Ω , y la inductancia de fugas L_{ls} en (H)

Resistencia rotórica e inductancia - La resistencia rotórica R_r en Ω , y la inductancia de fugas L_{lr} en (H)

Inductancia Mutua - La inductancia magnetizante L_m en (H)

Constante de Inercia, factor de rozamiento, pares de polos - El coeficiente de Inercia J en (kgm^2), el coeficiente de rozamiento viscoso F en (N.m.s), y los pares de polos p . El torque de fricción T_f es proporcional a la velocidad del rotor ω , $T_f = F.\omega$.

Condiciones Iniciales - Especifica el deslizamiento inicial s (con respecto a la velocidad nominal), el ángulo eléctrico θ_e en (grados), las corrientes estatóricas eficaces en (A), y los ángulos de fases en (grados).

Saturación - Se puede especificar si hay saturación magnética del hierro, y a su vez también definir los parámetros de la curva de saturación.

OBS.:Para el caso de las simulaciones realizadas no se consideró el efecto de Saturación.

6.1.1.1.5. Parámetros utilizados para el Motor de Inducción. -

Como modelo para la máquina de inducción se han utilizado los parámetros del motor de un vehículo Sedan. Los parámetros del mismo son los que se muestran en la Tabla 6.1.

Parámetro	Valor
Potencia Nominal P_n	30kW
Tensión Nominal U_n	280V
Número de Polos nP	4
Frecuencia Nominal f_n	60Hz
Resistencia estatórica R_s	0,087 Ω
Resistencia rotórica R_r	0,228 Ω
Inductancia estatórica L_s	0,8mH
Inductancia rotórica L_r	0,8mH
Inductancia Mutua L_m	34,7mH
Momento de inercia J	1,662kg.m ²

Tabla 6.1: Parámetros del motor de inducción utilizados. (extraídos de [3], Sección 5.1, pág. 92)

Con los parámetros de la Tabla6.1, se puede calcular entonces la corriente nominal del motor.

$$P_n = 3 \cdot \frac{(1-s)}{s} \cdot R_r \cdot I_{2e}^2 \quad (6.3)$$

$$I_{2e} = \frac{U_n}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + (2 \cdot \pi \cdot f_n)^2 \cdot (L_s + L_r)^2}} \quad (6.4)$$

Mediante estas dos ecuaciones se llega a una ecuación de segundo grado en el deslizamiento nominal

$$s^2 \cdot [P_n \cdot R_s^2 + P_n \cdot \omega^2 \cdot (L_s + L_r)^2 + U_n^2 \cdot R_r] + s \cdot [2 \cdot P_n \cdot R_s \cdot R_r - U_n^2 \cdot R_r] + P_n \cdot R_r^2 = 0 \quad (6.5)$$

Dicha igualdad es del tipo $s^2.A + s.B + C = 0$, ecuación típica de segundo grado. Puede surgir la pregunta, ¿Hay dos deslizamientos posibles? La respuesta es si, pero uno es estable y el otro no, el valor de deslizamiento estable es aquel que sea positivo, menor a la unidad y más próximo al cero.

Nota: Con los datos nominales de la máquina el deslizamiento nominal calculado es: $s_n = 0,0958$.

Entonces con el valor obtenido para el deslizamiento nominal, se obtiene la corriente nominal del motor, parámetro que nos será útil en las simulaciones para ver si el motor es sobrexigido o no.

Parámetro	Valor
Corriente Nominal I_n^{eff}	67.7 A

Tabla 6.2: Complemento de la Tabla 6.1 Parámetros del motor de inducción utilizados.

6.1.1.2. Modelo de la batería

La biblioteca SimPowerSystems de Simulink, cuenta con el bloque *Battery* que se ha utilizado para la simulación[6].

6.1.1.2.1. Características principales. - Este bloque implementa un modelo parametrizado dinámico genérico para representar las baterías recargables típicas. El circuito equivalente es el de la Figura 6.2.

Modelo Plomo Ácido

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

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Laplace^{-1}\left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)}, 0\right) \quad (6.6)$$

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

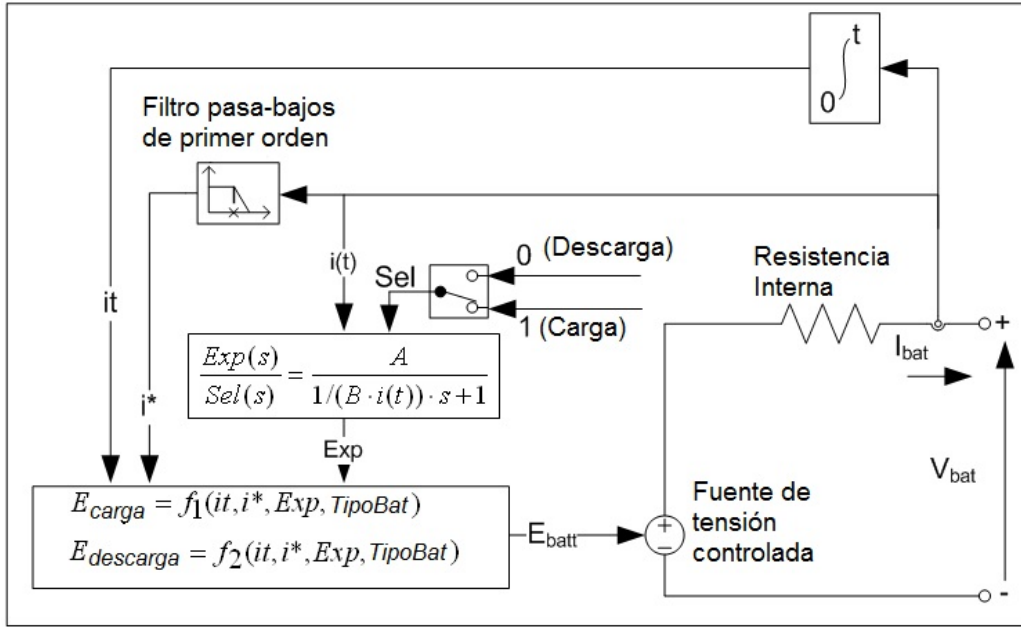


Figura 6.2: Circuito equivalente de batería bloque simulink. (extraída de [6])

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (6.7)$$

Modelo Litio-Ion

- Modelo de descarga $i^* > 0$

$$f_1(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (6.8)$$

- Modelo de carga $i^* < 0$

$$f_2(it, i^*, i) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} + A \cdot e^{-B \cdot it} \quad (6.9)$$

Modelo Nickel-Cadmio y Niquel-Metal

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

$$f_1(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} \cdot it + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)}, 0 \right) \quad (6.10)$$

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

$$f_2(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} + Laplace^{-1} \left(\frac{Exp(s)}{Sel(s)} \cdot \frac{1}{s} \right) \quad (6.11)$$

donde

E_{bat} - Tensión no lineal (V)

E_0 - Tensión constante (V)

$Exp(s)$ - Zona exponencial (V)

$Sel(s)$ - Representa el modo de la batería. $Sel(s) = 0$ durante la descarga,
 $Sel(s) = 1$ durante la carga

K - Constante de polarización $(Ah)^{-1}$ o Resistencia de Polarización (Ω)

i^* - Corriente de baja frecuencia (A)

i - Corriente de la batería (A)

it - Capacidad extraída (Ah)

Q - Capacidad máxima de la batería (Ah)

A - Tensión exponencial (V)

B - Capacidad exponencial $(Ah)^{-1}$

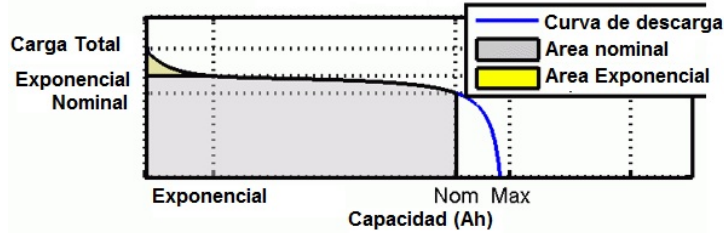


Figura 6.3: Características típicas de descarga. (extraída de [6])

6.1.1.2.2. Curvas y funcionamiento. - Los parámetros del circuito equivalente pueden ser modificados para representar tipos de baterías particulares, basadas en las características de descarga. Una curva típica de descarga está compuesta por tres secciones, como muestra la Figura 6.3.

La primera sección representa la caída exponencial de tensión cuando la batería está cargada. Dependiendo del tipo de batería, esta área es más o menos amplia. La segunda sección representa la carga que puede ser extraída de la batería hasta que la tensión caiga por debajo de la nominal. Finalmente, la tercera sección representa la descarga total de la batería, donde la tensión cae bruscamente.

Cuando la corriente de la batería es negativa, la batería se cargará siguiendo la característica de carga que muestran las Figuras 6.4 y 6.5 para los diferentes tipos de baterías.

Hay que notar que los parámetros del modelo se deducen de las características de descarga y se asumen iguales para la carga.

La función de transferencia $Exp(s)$ representa el fenómeno de histéresis de las baterías Plomo-Ácido, Níquel-Cadmio, Níquel-Metal durante los ciclos de carga y descarga. La tensión exponencial aumenta cuando la batería se está cargando, sin importar el SOC de la batería. Cuando la batería es descargada, la tensión exponencial decae inmediatamente (Figura 6.6).

6.1.1.2.3. Parámetros. - Los parámetros del bloque a definir son los siguientes:

- Tipo de Batería

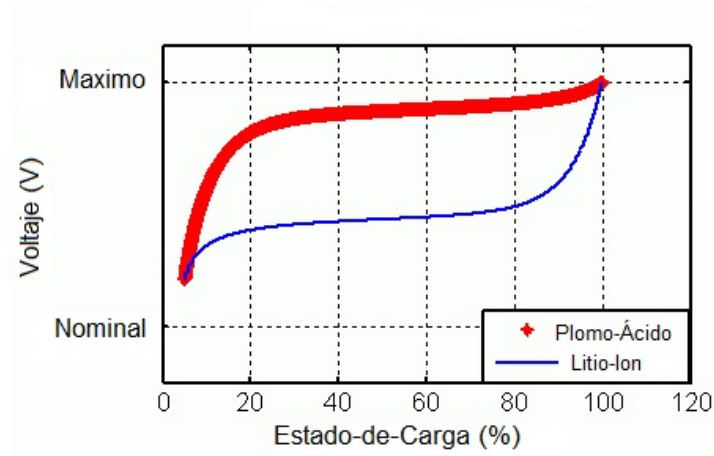


Figura 6.4: Características típicas de carga Plomo-Ácido y Litio-Ion. (extraída de [6])

Determina valores predeterminados de características de carga para cuatro tipos de baterías. Plomo-Ácido Litio-Ion Niquel-Cadmio Niquel-Metal

- Tensión Nominal (V)

Es la tensión nominal (V_{nom}) de la batería en (*volts*). Dicha tensión representa el final de la zona lineal de la característica de descarga.

- Capacidad Nominal (Ah)

Es la capacidad (Q_{rated}) de la batería en Ampere-hora. La capacidad nominal es la mínima capacidad efectiva de la batería.

- Estado de carga Inicial (%)

Es el estado inicial de carga (SOC) de la batería. 100 % indica una batería cargada totalmente, y 0 % indica una batería totalmente descargada. Este parámetro es usado como una condición inicial para la simulación y no afecta la curva de descarga.[6]

También es posible editar más parámetros cuando se quiere especificar aún más la batería y no utilizar los valores prefijados. Ellos son los siguientes:

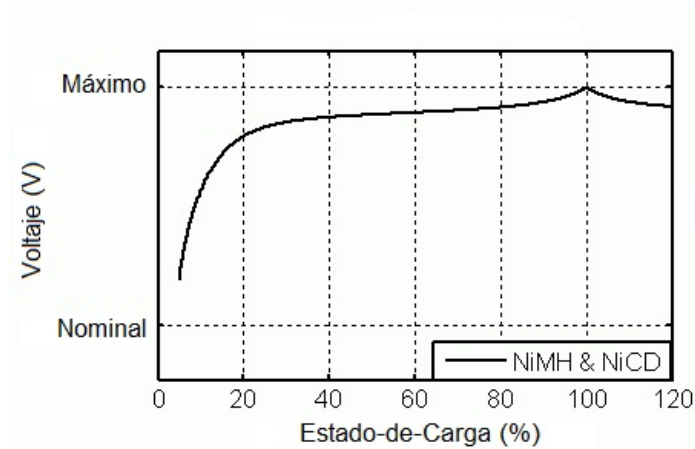


Figura 6.5: Características típicas de carga Niquel-Metal y Niquel-Cadmio. (extraída de [6])

- Capacidad Máxima (Ah)

La máxima capacidad teórica (Q), cuando ocurre una discontinuidad en la tensión de la batería. Este valor es generalmente igual a 105 % de la capacidad nominal.

- Tensión de carga completa (V)

Es la tensión cuando la batería está totalmente cargada (V_{full}), para una corriente de descarga dada. Notar que la tensión de carga completa no es igual a la tensión de vacío.

- Corriente nominal de descarga (A)

Es la corriente nominal de descarga, para la cual la curva de descarga ha sido determinada. Por ejemplo, una corriente de descarga típica para una batería NiMH de $1,5Ah$ es el 20 % de la capacidad nominal: $(0,2 \times 1,5Ah/1h = 0,3A)$

- Resistencia Interna (Ω)

Es la resistencia interna de la batería (Ω). Cuando se utiliza el modelo pre-cargado se carga un valor genérico, correspondiendo a el 1 % de la potencia nominal (tensión nominal $\times$ capacidad nominal de la batería). Se supone la resistencia constante durante los ciclos de carga y descarga y no varía con la amplitud de la corriente.

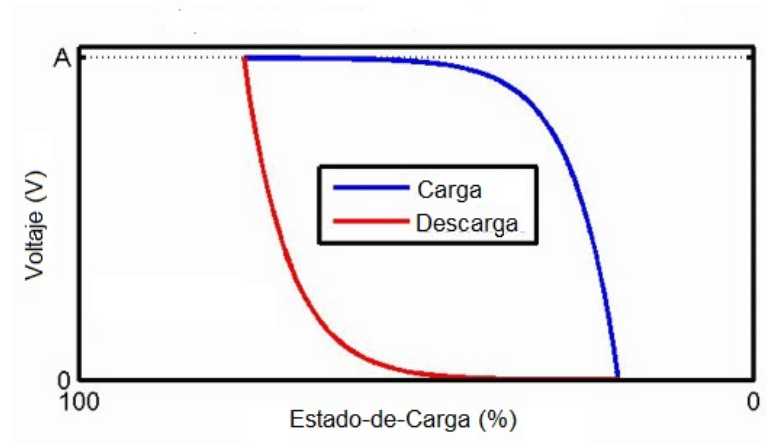


Figura 6.6: Zona exponencial para Plomo-Ácido, Níquel-Metal y Níquel-Cadmio. (extraída de [6])

- Capacidad (Ah) @ Tensión Nominal

Es la capacidad (Q_{nom}) extraída desde la batería hasta que la tensión cae por debajo de la tensión nominal. Este valor debería estar entre Q_{exp} y Q_{max} .

- Zona Exponencial [Tensión (V), Capacidad (Ah)]

Son los valores de tensión (V_{exp}) y capacidad (Q_{exp}) correspondientes al final de la zona exponencial. La tensión debería estar entre las tensiones V_{nom} y V_{full} . El valor de la capacidad debería estar entre 0 y Q_{nom} .

También es posible editar la dinámica de la batería.

- Tiempo de respuesta de la batería

Es el tiempo de respuesta de la batería (al 95 % del valor final). Este valor representa la dinámica de la tensión y puede observarse cuando se aplica un escalón de corriente (ver figura 6.7).

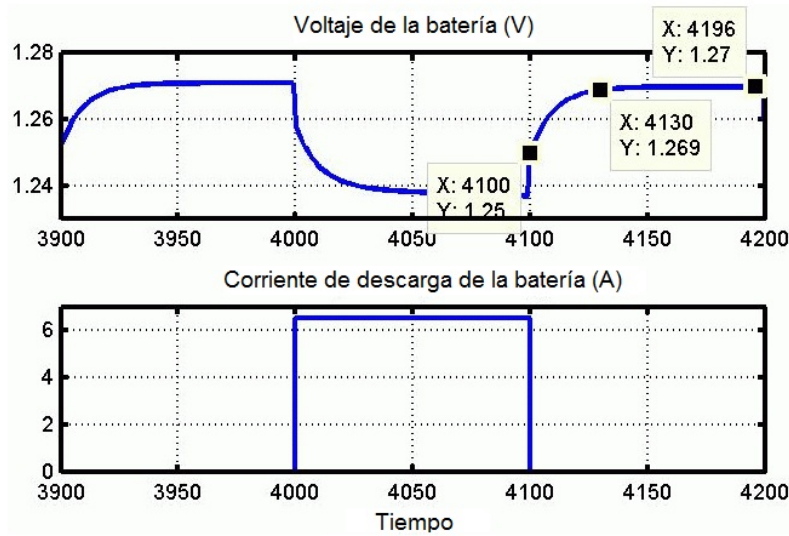


Figura 6.7: Ejemplo de tiempo de respuesta seteado en 30 segundos. (extraída de [6])

6.1.1.2.4. Celdas de baterías en serie o en paralelo. - Para modelar una combinación serie y/o paralelo de celdas basados en los parámetros de una única celda, puede usarse la siguiente definición de parámetros. Se multiplica la tensión de cada una de las celdas por el número de celdas colocadas en serie. Para el caso de celdas en paralelo se multiplica la capacidad por el número de celdas colocadas en paralelo.

6.1.1.2.5. Salidas de la batería. - La salida del bloque de la batería es un vector que contiene tres señales.

Señal	Definición	Unidad
SOC	El estado de carga de la batería $SOC = 100(1 - \frac{\int_0^t i \cdot dt}{Q})$	%
Corriente	La corriente de la batería	A
Tensión	Tensión de la batería	V

Tabla 6.3: Salidas del bloque Batería

6.1.1.2.6. *Supuestos del modelo.* -

- Se supone que la resistencia interna es constante durante los ciclos de carga y descarga y que no varía con la amplitud de la corriente.
- Los parámetros del modelo se deducen de las características de descarga y se asumen iguales para la carga.
- La capacidad de la batería no cambia con la amplitud de la corriente (no se considera el efecto Peukert).
- La autodescarga de la batería no está representada. Puede representarse añadiendo una resistencia adecuada en paralelo con los terminales de la batería.
- La batería no tiene efecto memoria.

6.1.1.2.7. *Convertidor DC/DC.* - Son comunes las fuentes de alimentación formadas por celdas de baterías en serie para conseguir una tensión más alta. Sin embargo, el apilamiento de celdas necesario no es posible en muchas aplicaciones de alta tensión debido a la falta de espacio.

Los convertidores DC/DC tipo Boost pueden aumentar la tensión y reducir el número de celdas. Una aplicación típica de convertidores DC/DC son los HEV.

El Toyota Prius HEV por ejemplo, utiliza un motor de 500 V. Sin un convertidor boost (elevador), el Prius necesitaría cerca de 417 celdas para alimentar el motor. Sin embargo, el Prius utiliza realmente sólo 168 celdas y aumenta la tensión de la batería de 202 V a 500 V.

Dicho lo anterior, entonces es complementario al modelo de batería utilizado, un convertidor DC/DC del tipo boost de tensión regulada. El convertidor adapta la baja tensión de la batería (200 V) al bus de continua que alimenta el motor de corriente alterna a una tensión de 500 V.

Dicho bloque se divide en dos sub-bloques, el bloque convertidor en si, y el bloque controlador del bus de continua. El bloque controlador del bus de continua es el que setea el ciclo de trabajo comandando las corrientes de los IGBT's del convertidor de acuerdo a la tensión de referencia, en nuestro caso 500 V. El bloque convertidor funciona accionando el chopper del convertidor de acuerdo a las correspondientes corrientes de los IGBT's.

6.1.1.2.8. *Parámetros utilizados.* - Los tipos de baterías que se utilizaron en las simulaciones fueron, Plomo-Ácido, NiMH, y Li-Ion. Para todos los tipos de baterías se usaron los parámetros de las Tablas 6.4 y 6.5.

- Vehículo Eléctrico

Parámetro	Valor
Número de Celdas en serie	28
Tensión nominal por batería	12 <i>V</i>
Capacidad	48 <i>Ah</i>

Tabla 6.4: Características del banco de baterías eléctrico

■ Vehículo Híbrido

Parámetro	Valor
Número de Celdas en serie	28
Tensión nominal por batería	7.2 V
Capacidad	6.5 Ah

Tabla 6.5: Características del banco de baterías híbrido

La elección de una u otra batería afecta el peso total del vehículo, a partir de la Tabla 6.6, se puede obtener la variación del peso para cada batería.

Batería	Energía Específica (Wh/kg)
Plomo-Ácido	35
Niquel-Metal	75
Litio-Ion	150

Tabla 6.6: Energías específicas para los diferentes tipos de baterías. (extraída de [10], página 1.13)

6.1.1.3. Controlador

Se implementó en Simulink como se muestra en la Figura 6.8, la estrategia de control descrita en la Sección 5.1.

6.1.1.3.1. Control Vectorial de Corriente Lo primero a realizar en el bloque es calcular el Δi restando las dos entradas, corriente de referencia, menos corriente medida, de acuerdo a la Ecuación 5.30. Luego se implementa un bloque que comanda un selector (*Lógica para Próximo Estado* Figura 6.9) para determinar el tipo de control que se realizará (Sección 5.2.3) en el próximo estado, ya sea *Minimización de Armónicos*, *Respuesta Rápida*, o no tomar ninguna acción. Dicha elección sobre el tipo de control se toma de acuerdo a la magnitud del Δi , en nuestro caso los valores de δ y h se han tomado como un 5 % y un 10 % del valor de la corriente nominal I_n . [8]

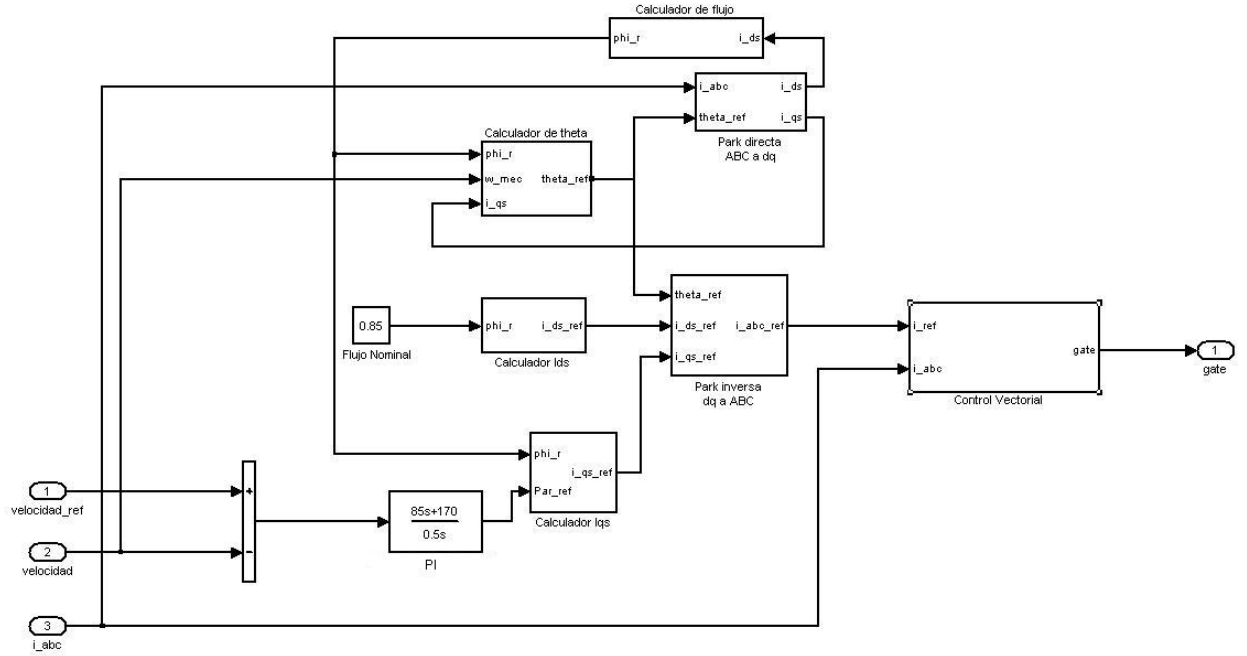


Figura 6.8: Bloque Controlador Implementado

■ Minimización de Armónicos

De acuerdo a la Sección 5.2.3.1 se calculan las derivadas de cada componente del Δi . Con esas derivadas y el estado de las llaves anterior, se calcula el sector de la tensión e en el bloque *sector de e* (Figura 6.10) de acuerdo a la Tabla 5.3. Se ha diseñado utilizando comparadores para determinar el signo de los $\Delta i'_{x,y,z}$ y operadores lógicos *AND* y *OR* para determinar todas las posibles combinaciones de estados de llaves y signos y así establecer el sector de la tensión e . Para definir el sector de los Δi 's se han utilizado operadores lógicos al igual que para el bloque anterior de acuerdo a la Tabla 5.2. Al tener los dos parámetros definidos, *sector de e* y *sector de Δi* , y agregando el estado anterior de las llaves se determina el próximo estado de las mismas, y se implementa el bloque *Tabla III* de acuerdo a la Tabla 5.4. Dicho bloque se ha construido en base a una *LookupTable*, la cual se pasa a describir.

NOTA: Por mas detalles consultar el CD adjunto.

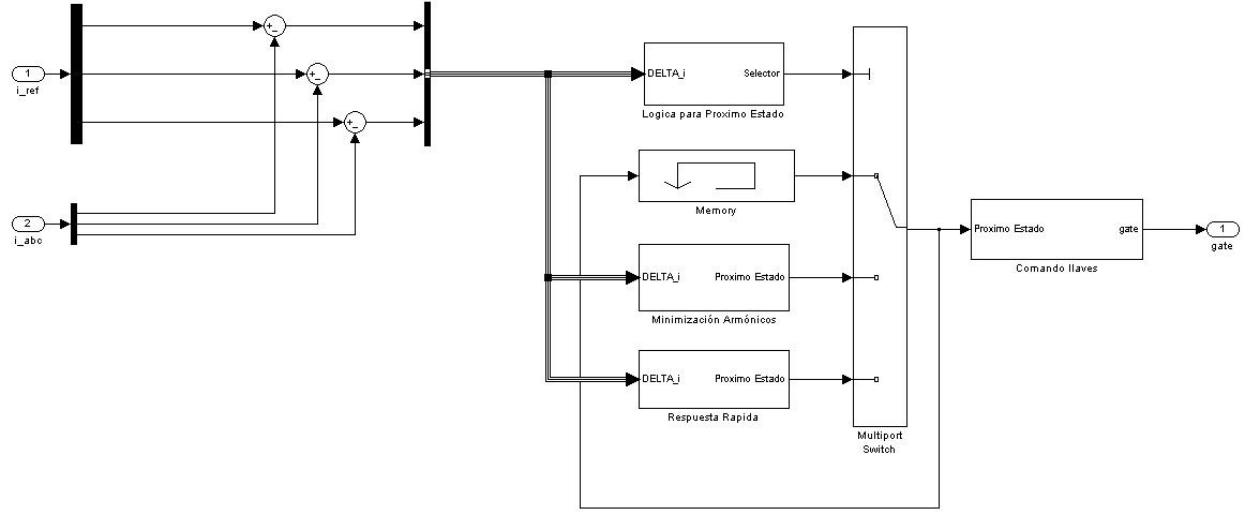


Figura 6.9: Bloque Control Vectorial Implementado

Lookup Table 2-D

Dicho bloque computa una aproximación para una función $z = f(x, y)$ dados los puntos, x , y , y z . El primer puerto de entrada corresponde a la primer dimensión de la tabla, x . La entrada de índices de filas, es un vector $1 \times m$ de datos de entrada x , la entrada de índices de columnas es un vector $1 \times n$ de datos de entrada y , y los datos de la tabla son una matriz $m \times n$ de datos z .

Los vectores columna y fila deben ser monótonos crecientes. Sin embargo, estos vectores deben ser estrictamente crecientes en los siguientes casos:

- Los datos de entrada y salida son ambos del tipo punto fijo.
- Los tipos de datos de entrada y salida son diferentes.
- El método de búsqueda (lookup) no es de Interpolación-Extrapolación.
- La matriz de valores de salida es compleja.

El bloque genera la salida basado en los valores de entrada utilizando uno de los métodos seleccionados en el método de búsqueda de la lista. Interpolación-Extrapolación, este es el método por defecto (y el que se utilizará), realiza una interpolación lineal y extrapolación de las entradas. Si las entradas coinciden con valores de columna-fila de la matriz, entonces, la salida es el valor de la intersección columna-fila (este será siempre el caso). Si los valo-

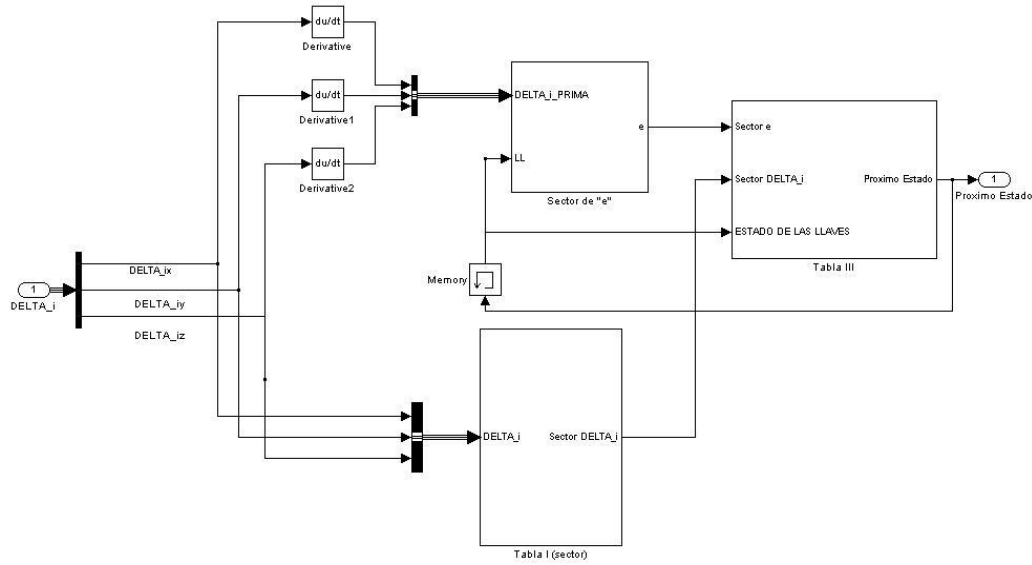


Figura 6.10: Bloque implementado para la Minimización de Armónicos

res de entrada no coinciden con valores de columna-fila, entonces el bloque genera una salida interpolando linealmente los valores apropiados de fila y columna. Si alguna, o ambas entradas del bloque son menores que el primer o mayores que el último valor de columna o fila, el bloque extrapola usando los últimos o primeros dos puntos respectivamente.

Si se vuelve a la implementación del bloque que determina el próximo estado, se observa que la Tabla 5.4 tiene lugares de la matriz, en los cuales el próximo estado puede equivaler a dos estados diferentes (todas las llaves apagadas o todas las llaves encendidas). Para ello se define ese próximo estado indeterminado, como el estado número 9 en la LookupTable, luego por otro lado se toma la decisión de a qué estado corresponde ir (0 o 7) si se toma como criterio realizar la menor cantidad de conmutaciones de las llaves. Con lo anterior mas una memoria para almacenar el estado anterior de las llaves se determina el bloque global *Minimización de Armónicos*.

■ Respuesta Rápida

Se determina la zona de los Δi 's utilizando comparadores y operadores lógicos de acuerdo a la Tabla 5.2, y luego de establecer dicha zona se imple-

menta la lógica para determinar el próximo estado de acuerdo a la Tabla 5.5.

Terminando el bloque de control vectorial, después de tener definido el próximo estado de las llaves (valor de 0 a 7), simplemente se convierte dicho valor en un vector de señales de gate para comandar las llaves del inversor (Bloque *Comando llaves*).

NOTA: Por mas detalles consultar el CD adjunto.

6.1.1.4. Bloque del Convertidor de Potencia

Para el convertidor de potencia se ha utilizado el bloque de Simulink de [6], llamado *Universal Bridge*. El cual se pasa a describir.

6.1.1.4.1. Modelo básico. - Dicho bloque implementa un convertidor trifásico universal que consiste de hasta 6 llaves de potencia conectadas en una configuración de puente. El tipo de llave de potencia y la configuración del convertidor son seleccionables. El bloque permite simular convertidores usando tanto dispositivos de conmutación natural(diodos o termistores) como de conmutación forzada(GTO, IGBT, MOSFET). El bloque universal es el bloque básico para construir convertidores de dos niveles de tensión. La numeración de las llaves es diferente si la electrónica de las mismas es naturalmente conmutada o forzadamente conmutada. Para el modelo de vehículo que se ha implementado se utilizó la configuración y numeración de la Figura 6.11, donde las llaves se consideran ideales.

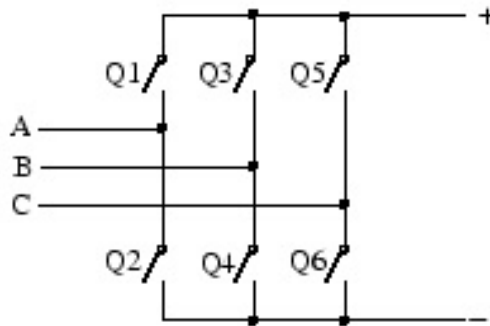


Figura 6.11: Configuración del inversor implementado

6.1.1.4.2. Parámetros. -

Numero de ramas del puente Seleccionar 1 o 2 para obtener un convertidor monofásico (2 o 4 llaves). Seleccionar 3 para obtener un convertidor trifásico conectado en la conexión de puente de Graetz.

Resistencia Snubber R_s Se pone el valor en ohms (Ω), o *inf* para eliminar los snubbers del modelo

Capacitancia Snubber C_s Se pone el valor en faradios (F), o 0 para eliminar el snubber o *inf* para obtener un snubber resistivo.

Electrónica de las llaves Selecciona el tipo de dispositivo electrónico que hace las funciones de llave.

Resistencia interna R_{on} En ohms (Ω).

Inductancia interna L_{on} Inductancia interna en Henrios (H), para los diodos o termistores.

Tensión de conducción Este parámetro es habilitado cuando se selecciona diodo o tiristor como dispositivo. Se setea en voltios (V).

Tensiones de conducción, dispositivo y diodo Este parámetro es habilitado cuando se selecciona GTO/diodo o IGBT/diodo como dispositivo. Se setean las tensiones de conducción del dispositivo y del diodo antiparalelo en voltios (V).

Tiempo de caída, y tiempo de cola Se setean en segundos (s), para los GTO o IGBT.

OBS.: Se eligió como interruptor controlable para el puente del inversor llaves ideales.

6.1.1.4.3. Entradas. -

- g

La entrada *gate* es la que controla las llaves. El orden de pulsos en el vector de señales de gate corresponde con la numeración adoptada (Figura 6.11).

6.1.1.5. Modelo Físico del Vehículo Implementado

El bloque implementado en Simulink para este modelo corresponde a la Ecuación 4.42, y los parámetros utilizados son los del Honda CRX de la Tabla 4.3. Se utilizó una eficiencia de transmisión de 0,85 de acuerdo a la Sección 4.5, correspondiente a una caja de cambios manual con cambios directos. El bloque se muestra en la Figura 6.12

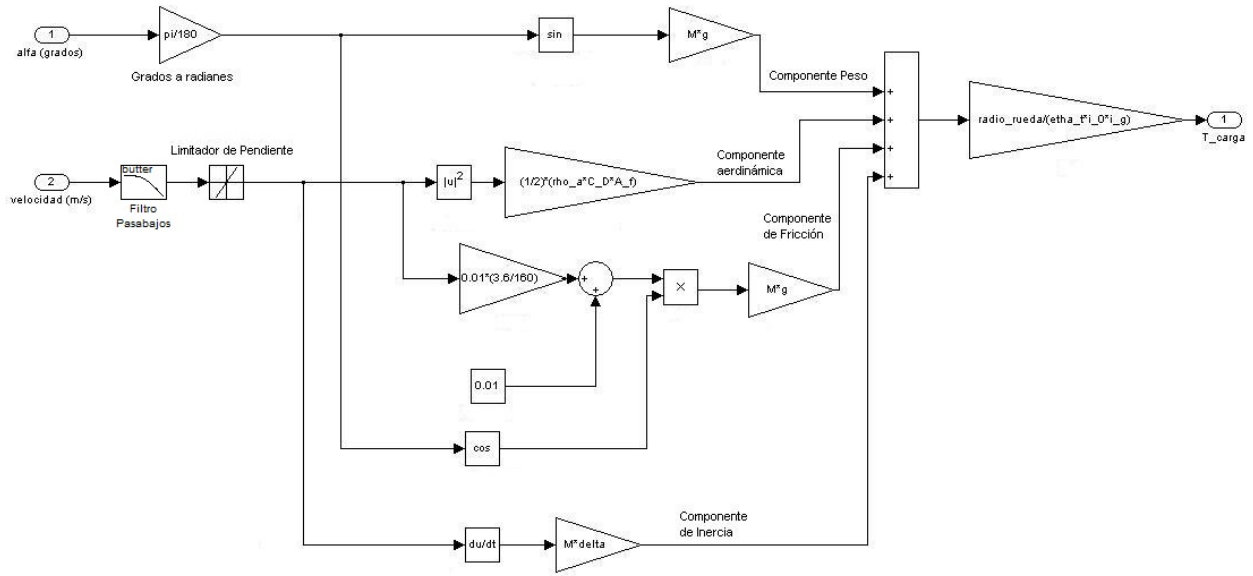


Figura 6.12: Bloque implementado para el modelo dinámico del vehículo.

OBS.: Luego de varias simulaciones, se llegó a la conclusión de que si no se limitaba la pendiente de la velocidad, Simulink tenía problemas con los cálculos de las derivadas y no terminaba las simulaciones. Por lo tanto se colocó el limitador de pendiente que se observa en la Figura 6.12. Esto es compatible con la realidad ya que todo auto tiene limitada su aceleración por distintas causas.

Para que el motor de tracción opere dentro de sus valores nominales, se utilizó una relación de transmisión correspondiente a una tercera velocidad de una caja de cambios standard i_3 , para régimen de conducción urbano. Mientras que para un régimen de conducción carretero i_5 correspondiente a una quinta velocidad de una caja de cambios standard.

6.2. Modelo Vehículo Híbrido

6.2.1. Modelo Implementado

Arquitectura

La arquitectura adoptada es la del tipo Serie (acoplamiento eléctrico) tal cual fue descrito en la Sección 2.2.1.1. El esquema de bloques se muestra en la Figura 6.13, donde todos los bloques menos el par motor-generator son los descritos en la Sección 6.1.1.

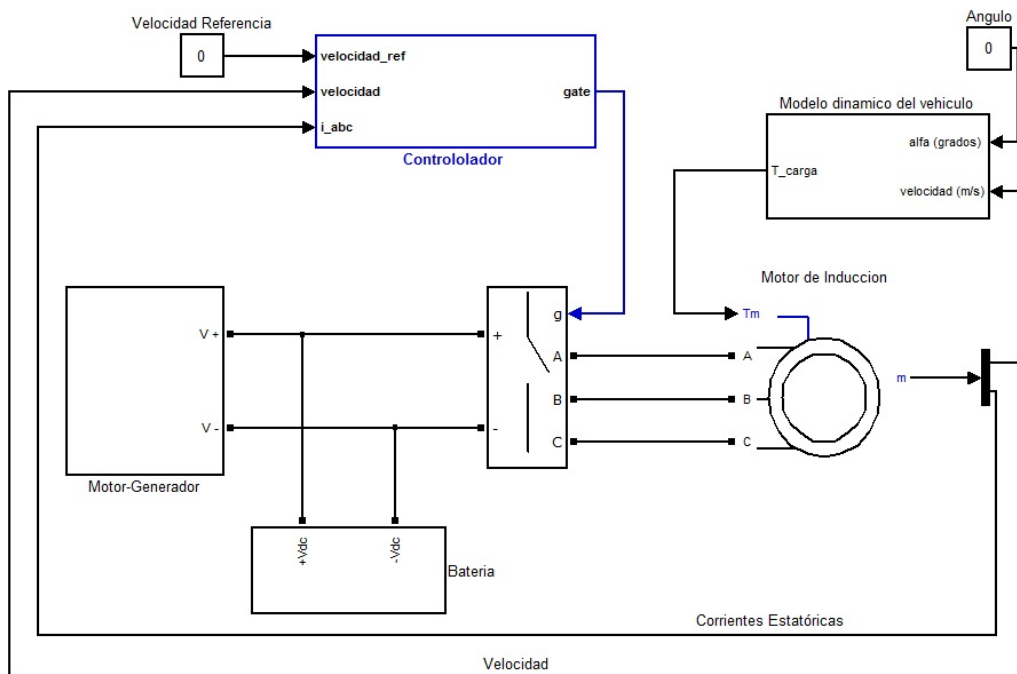


Figura 6.13: Esquema general de bloques del modelo de vehículo híbrido implementado

6.2.1.1. Motor de Combustión Interna (ICE) Modelo Simulink implementado

6.2.1.1.1. Estrategia de Control Energética Antes de describir el bloque implementado, es necesario definir la estrategia de control de energía

que se ha adoptado. En esta Sección se describen las dos estrategias de control empleadas en las simulaciones:

1. Máximo Estado de Carga de la Fuente de Energía (Max. SOC de PPS -Peaking Power Source, en este caso banco de baterías-) y
2. Encendido y apagado de motor (Motor On-Off) o del Termostato.

1. Estrategia de control Max. SOC de PPS - Modo Urbano

El objetivo de esta estrategia de control es satisfacer la energía demandada por el conductor y al mismo tiempo mantener el SOC de la PPS en un nivel alto. En esta estrategia el M/G actúa como fuente primaria de energía, y la PPS como fuente secundaria. Esta estrategia se considera apropiada para vehículos cuyo comportamiento (velocidad, aceleración, capacidad de ascenso, etc.), es el principal objetivo, tales como vehículos con patrones de manejo de parada y marcha frecuentes(modos urbano). Un nivel alto de SOC de la PPS garantizará un alto desempeño del vehículo en cualquier momento.

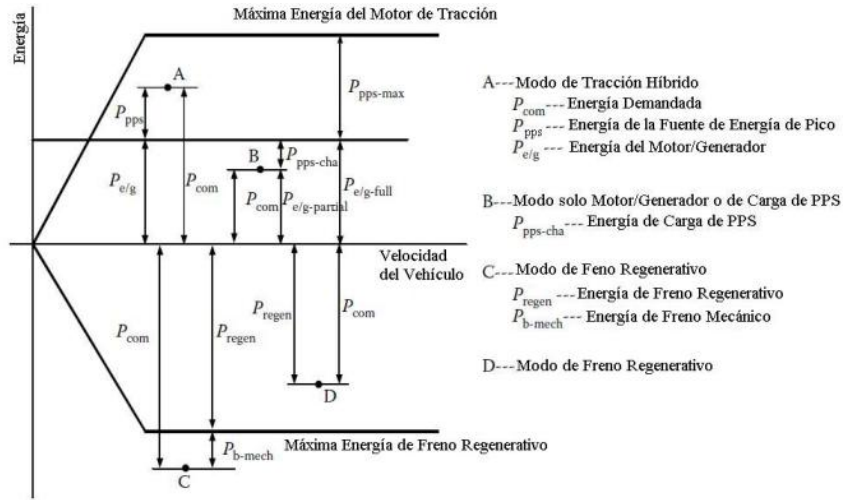


Figura 6.14: Ilustración de la estrategia de control Max. SOC de PPS (extraído de [2] Pág.257)

La estrategia de Max. SOC de PPS se ilustra en la Figura 6.14, en la que los puntos A,B C y D representan la energía que el conductor requiere

tanto en modo de tracción como en modo de frenado. El punto A representa una energía de tracción demandada que es mayor que la energía que el M/G puede producir. En este caso, la PPS podrá entregar energía para aminorar la energía que produce el M/G. El Punto B representa una energía demandada que es menor que la energía que el M/G produce cuando opera en su región de operación óptima. En este caso, se pueden utilizar dos modos de operación, dependiendo del nivel de SOC de la PPS. Si el SOC de la PPS está por debajo de cierto nivel, por ejemplo menor al 90 %, entonces el M/G es operado en plena carga (el punto de operación del M/G con plena carga depende del diseño del M/G). Parte de esta energía va al motor de tracción para impulsar el vehículo y la otra parte va a la PPS para incrementar su nivel de energía. Por otro lado, si el SOC de la PPS se encuentra en su valor máximo, se habilita el modo de solo tracción del M/G, esto es, el M/G se controla para producir una energía igual a la energía demandada, y la PPS opera en vacío. El punto C representa una energía de frenado demandada que es mayor que la energía de frenado que el motor de tracción puede producir (Máxima Energía de Freno Regenerativo). En este caso se utiliza un modo de frenado híbrido en el que el motor eléctrico produce su máxima energía de frenado y el freno mecánico produce la energía restante. El punto D representa una energía de frenado que es menor que la máxima energía que el motor puede producir. En este caso, solamente se utiliza el freno regenerativo.

2. Estrategia de Control del Motor On-Off o del Termostato - Modo Carretera

La estrategia de control de Max. SOC de PPS se centra en mantener el SOC de la PPS en un valor alto. Sin embargo, en varias condiciones de conducción, tales como el manejo por largo tiempo (con carga -mecánica- baja), en una carretera a velocidad constante, la PPS puede cargarse fácilmente a su nivel máximo, y el M/G se fuerza a operar con una salida de potencia menor a la óptima. Por lo tanto, la eficiencia de la transmisión se reduce. En este caso sería conveniente la estrategia de control denominada Motor On-Off o del Termostato. Esta estrategia de control se ilustra en la Figura 6.15. La operación del M/G se controla completamente mediante el SOC de la PPS. Cuando este alcanza un valor máximo prefijado, el M/G se apaga y el vehículo es impulsado solamente por la PPS.

Por otro lado, cuando el SOC de la PPS alcanza un valor mínimo, el M/G se enciende, entonces la PPS toma carga desde el M/G. De esta forma, el motor puede operarse siempre en su región de eficiencia óptima.

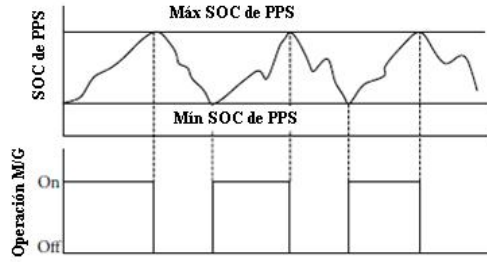


Figura 6.15: Ilustración de la estrategia de control del Termostato (extraído de [2] Pág.258)

6.2.1.1.2. Bloque implementado A los efectos de las simulaciones del sistema híbrido, el motor de combustión junto con un generador, funcionan como un par M/G que suministra energía al bus de continua del sistema híbrido, el cual se muestra en la Figura 6.16, donde V+ y V- son los bornes a conectar al bus de continua. Debido a que se tienen dos tipos de funcionamiento para el sistema global, modo *carretera* y modo *urbano*, entonces hay dos características de suministro de energía para el par motor-generador. Por lo tanto dicho bloque está compuesto por 3 sub-bloques, el bloque Modo Carretera, Modo Urbano y el bloque que calcula la energía entregada y por lo tanto (luego de realizar los cálculos necesarios) el combustible consumido.

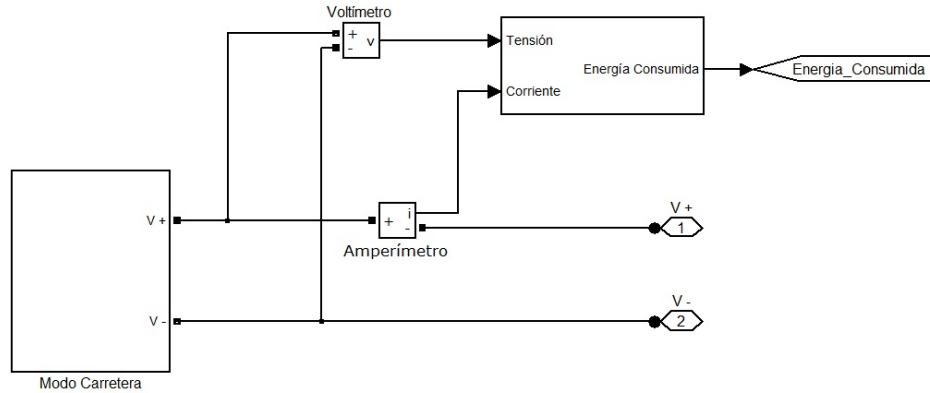


Figura 6.16: Bloque que implementa la fuente de continua correspondiente al par motor-generador

- Bloque Modo Carretera

Este bloque implementa una lógica de acuerdo a lo explicado en 6.2.1.1.1 y que se conoce como Control de Motor Generador ON-OFF o del Termostato. La banda de SOC permitidos se fijó entre $SOC_{min} = 70\%$ y $SOC_{max} = 90\%$. Este bloque además, inyecta cuando es necesario, una corriente de 3,5A en el BUS DC para cargar la batería.

NOTA: Por mas detalles consultar el CD adjunto.

- Bloque Modo Urbano

Este bloque implementa una lógica de acuerdo a lo explicado en la Sección 6.2.1.1.1 y que se conoce como Control de Max. SOC de PPS. Como se explicó, cuando el estado de energía del sistema es como el del punto A de la Figura 6.14 y el SOC de la PPS es mayor a 90 %, el M/G entrega energía operando en su región óptima y el resto de la energía es suministrada por la PPS. En el caso de que el SOC de la PPS sea menor a 90 % el motor se aparta de su región de operación óptima, para satisfacer la demanda energética del motor eléctrico y además cargar la batería. Por otro lado, si el estado de energía del sistema es como el del punto B de la Figura 6.14, también hay dos situaciones posibles. Si el SOC de la PPS está por debajo del 90 %, entonces el M/G entrega energía al motor eléctrico y además a la PPS para elevar su nivel energético, trabajando siempre en su región de operación óptima. Mientras que, si el SOC de la PPS está por encima del 90 %, entonces la demanda energética del motor eléctrico es satisfecha completamente por el M/G y la PPS se deja en vacío.

NOTA: Por mas detalles consultar el CD adjunto.

- Bloque Balance Energético

Para simular el consumo de combustible, hay que "medir" la energía, se multiplican la tensión y la corriente entregadas y se integra la potencia, obteniendo así la energía total entregada acumulada. Con la energía total acumulada se puede modelar el consumo de combustible expresando el combustible como unidades de energía por volumen.

Lo que resta simplemente es aplicar eficiencias de consumo de combustible, debido a pérdidas térmicas en el ICE. (Ver Sección 8.4)

Capítulo 7

Ciclos de Conducción

7.1. Introducción

Para impulsar un automóvil se necesita energía. Esta necesidad de energía, en la mayoría de los casos se cubre mediante conversión de energía química almacenada en un combustible fósil en energía mecánica. Para esto usualmente se utilizan motores de combustión interna (ICE). La eficiencia de esta máquina es baja y la combustión causa emisiones peligrosas. Estos hechos se han descuidado durante mucho tiempo. Sin embargo, debido al incremento del uso de automóviles junto al aumento del daño ambiental, estos puntos están en la mira. En los 70's y 80's el estado de California, EE.UU. dio impulso a la industria automotriz para desarrollar motores con eficiencias más altas y emisiones más bajas, mediante el establecimiento de leyes de emisiones. Conectado a esto surge la necesidad de procedimientos de ensayo para comparar entre muchos motores. Estos procedimientos de ensayo se denominan Ciclos de Conducción (*driving cycles*)[1].

7.2. Utilización de Ciclos de Conducción

Un ciclo de conducción es un patrón de conducción estandarizado. Este patrón se describe mediante una tabla de tiempo-velocidad. La trayectoria que debe ser cubierta se divide en saltos de tiempo, principalmente segundos. La aceleración durante salto de tiempo se asume constante y como resultado, la velocidad durante un salto de tiempo es una función lineal del tiempo. Debido a que la velocidad y la aceleración son conocidas para cada punto de

tiempo, la potencia mecánica requerida como función del tiempo se puede determinar mediante fórmulas. Integrando esta función en el intervalo del ciclo de conducción se obtiene la energía mecánica necesaria para el ciclo. Fuera de la carretera un vehículo puede ejecutar un ciclo de conducción sobre un dinamómetro. En el caso de vehículos de motor ICE, se pueden medir directamente el consumo de combustible y las emisiones. Lo mismo vale para el sistema de conversión de combustible de los HEVs. La energía primaria se puede calcular a partir del consumo de combustible. Para EV o HEV, que utilizan una fuente de electricidad externa (como la red pública), la energía eléctrica drenada desde esa fuente se contabilizará por separado. La energía eléctrica se transforma en energía primaria requerida dividiéndola entre la eficiencia de la generación de energía. Las emisiones se determinan utilizando valores de emisión que llevan las compañías proveedoras de energía. En todos los casos, la eficiencia de los sistemas de conducción se determinan dividiendo la energía mecánica calculada entre la energía primaria.

7.3. Descripción de diversos Ciclos de conducción

Los ciclos de conducción existentes se pueden dividir en tres grupos:

- Ciclos de conducción Europeos
- Ciclos de conducción de EE.UU
- Ciclos de conducción Japoneses

7.3.1. Ciclos de Conducción Europeos

Estos ciclos de conducción pertenecen a los ciclos modales. Esto significa que hay partes en estos ciclos en que la velocidad es constante. Debido a que los ciclos modales no representan patrones reales, se ha desarrollado un grupo adicional: los ciclos HYZEM. Para los Ciclos de Conducción Europeos, podemos hacer la siguiente subdivisión.

7.3.1.1. ECE15

Este ciclo representa la conducción urbana. Se caracteriza por baja velocidad de vehículo (50 km/h max.), baja carga de motor y baja temperatura de combustible de escape.

7.3.1.2. EUDC

Este ciclo describe una ruta suburbana. Al final del ciclo el vehículo acelera hasta velocidad de carretera. Tanto velocidad como aceleración son mayores que en el ECE15 pero sigue siendo un ciclo modal.

7.3.1.3. EUDCL

El UDCL es un ciclo suburbano para vehículos de baja potencia. Es similar el EUDC pero la velocidad máxima es 90 km/h.

7.3.1.4. NEDC

Este es un ciclo combinado de cuatro ciclos ECE15 seguidos por un EUDC o un EUDCL. El NEDC también es conocido como Ciclo ECE.

7.3.1.5. HYZEM

Los ciclos mencionados anteriormente son los ciclos estilísticos. Estos ciclos no pueden representar patrones de conducción reales. Los ciclos HYZEM son ciclos transitorios. Las partes en la que la velocidad es constante son mucho menores que en ciclos modales. Los ciclos HYZEM se derivan de los patrones reales de conducción en toda Europa. Por lo tanto, son una mejor representación para las condiciones de conducción que los ciclos de la norma europea. Estos ciclos se utilizan con frecuencia pero no son oficiales y consisten en un ciclo urbano, un ciclo extra-urbano y un ciclo de carretera.

7.3.2. Ciclos de conducción de EE.UU

Estos ciclos de conducción pertenecen a los ciclos transitorios. Al igual que los HYZEM estos dan una mejor representación de los patrones de conducción reales que los ciclos modales. Se puede realizar la siguiente subdivisión.

7.3.2.1. FTP 72

A comienzos de los setentas, este ciclo se desarrolló para describir una ruta urbana. El ciclo consiste en un fase de inicio fría la que es seguida por una fase transitoria con muchos picos de velocidad que comienzan del reposo midiendo las emisiones. En Estados Unidos se utilizan factores de peso para normalizar las emisiones. El FTP 72 usualmente se denomina UDDS o LA-4.

7.3.2.2. SFUDS

El SFUDS se ha desarrollado para simular una descarga y carga de batería durante un viaje con un EV. El SFUDS fue derivado para un vehículo específico, el mejorado de propulsión eléctrica doble eje. El perfil de velocidad se adaptó a este vehículo, para obtener un perfil de descarga y carga de batería que consiste en fases de potencia constante.

7.3.2.3. FTP 75

El FTP 75 es el FTP 72 con una tercera fase extra. Esta fase es idéntica a la primera fase del FTP 72 pero ejecutada con un motor en caliente.

7.3.2.4. HFEDS

Este ciclo representa una conducción extra-urbana y de carretera

7.3.2.5. IM 240

Este ciclo se utiliza con propósitos de inspección. Con este ciclo, se determinan las emisiones durante la prueba de mantenimiento periódica.

7.3.2.6. LA-92

El LA-92 representa como el FTP 72 una ruta urbana. El LA-92 se ha desarrollado en 1992, porque el existente FTP 72 resultó ser una representación no realista de los patrones de conducción urbanos. Por ejemplo el LA 92 tiene una velocidad media más alta.

7.3.2.7. NYCC

Este representa una ruta urbana a través de New York. Una característica de este ciclo es la baja velocidad media.

7.3.3. US 06

Este es también llamado ciclo de conducción agresiva. Se desarrolló para describir un patrón de conducción con altas cargas de motor.

7.3.4. Ciclos de Conducción Japoneses.

Los ciclos de conducción Japoneses pertenecen a los ciclos modales. Se puede subdividir en los siguientes ciclos.

7.3.4.1. Mode 10

Este ciclo represente una ruta urbana.

7.3.4.2. Modo 15

Este es una combinación de una ruta urbana y una extra urbana. La velocidad máxima es 70km/h.

7.3.4.3. Modo 10-15

Este es una combinación de cinco ciclos. Primero el Modo 15, después tres veces el Modo 10 y por último otra vez el Modo 15.

7.3.5. Comparación entre Ciclos de Conducción

La sección anterior proporciona una breve descripción de los ciclos de conducción más utilizados. En esta sección se separan los ciclos que son representativos de patrones reales de conducción. Desde el párrafo 7.3.1 se puede concluir que de los Ciclos de Conducción Europeos, solo los HYZEM son representativos. Para los Ciclos de EE.UU se han considerado mediante comparación de la velocidad media $\langle v \rangle$ (km/h), el máximo rango de aceleración a_{max} (m/s^2) y la máxima energía específica K_{max} (m^2/s^3). K se define como 2 x velocidad x rango de aceleración, y es una medida de la razón de

	$\langle v \rangle$ (km/h)	a_{max} (m/s ²)	K_{max} (m ² /s ³)
HFEDS	77.6	1.5	31.4
FTP 72	31.4	1.5	38.4
LA 92	39.7	4.0	74.3
NYCC	11.4	2.7	38.8
US 06	77.2	3.8	97.3

Tabla 7.1: Características de cinco Ciclos de Conducción

cambio de energía cinética del vehículo. Estos parámetros pueden verse para cuatro ciclos de conducción en la Tabla 7.1 Entre esos ciclos, los HFEDS están muy cerca de la conducción en autopistas con el menor valor de K_{max} y la velocidad media más alta. El FTP 72 es ciclo más moderado con bajos valores de $\langle v \rangle$, a_{max} , y K_{max} . El ciclo LA 92 es mucho más potente que los ciclos HFEDS y FTP 72, con valores mucho más altos de a_{max} , y K_{max} . El NYCC es el más representativo de conducción urbana que incluye señalización y congestión, con una velocidad media de solo 11.4 km/h. El ciclo US 06 es el ciclo más potente, con una velocidad media de 77.2 km/h, una aceleración máxima de 3.8m/s^2 y una energía específica máxima de $97\text{m}^2/\text{s}^3$, que es alrededor de 2.5 veces el valor correspondiente al FTP.

Los ciclos Japoneses descritos son todos ciclos modales por lo cual no son considerados ciclos representativos.

Concluyendo, se puede decir que los siguientes ciclos se consideran representativos de patrones de conducción reales:

- Todos los ciclos HYZEM
- HFEDS
- LA 92
- NYCC
- US 06

Capítulo 8

Simulaciones

8.1. Condiciones Iniciales

Como paso previo a las simulaciones, corresponde encontrar el punto de operación inicial del motor de inducción (tracción).

Se tomará como condición de régimen en cuanto al motor, que el flujo del mismo corresponderá siempre al flujo nominal de la máquina. Es decir que para nuestro sistema una de las condiciones iniciales es el flujo de la máquina, el cual será fijado al valor nominal de la misma. El mismo fue calculado como está expresado en la sección 5.1.1 (Flujo Nominal ψ_r^*).

Considerando un estado en régimen del sistema, se tiene que no hay variaciones de la velocidad, es decir su derivada es nula. Entonces a partir de la ecuación 5.10 se deduce que el par que entrega la planta T_e^* y el par de carga T_p son iguales. Por otro lado el término de la derivada de la velocidad en la ecuación 4.42 se anula. Por lo tanto el par inicial eléctrico entregado por la planta está determinado por la siguiente expresión:

$$T_{e0}^* = \frac{r_d}{i_0 \cdot i_g \cdot \eta_t} \cdot (M \cdot g \times 0,01 \cdot \cos(\alpha_0) + \frac{M \cdot g \times 0,01 \times 3,6 \cdot \cos(\alpha_0) \cdot v_0}{160} + \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot C_D \cdot A_f \cdot v_0^2 + M \cdot g \cdot \sin(\alpha_0)) \quad (8.1)$$

donde v_0 es la velocidad inicial en m/s y α_0 es el ángulo de inclinación inicial del terreno en *grados*.

Luego a partir de la ecuación 5.1 y con el torque inicial calculado se tiene:

$$i_{qs0} = \frac{T_{e0}^*}{\frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \psi_r^*} \quad (8.2)$$

Para la corriente i_{ds0} (ecuación 5.3) se tiene:

$$i_{ds} = \frac{1}{L_m} \cdot \psi_r^* \quad (8.3)$$

Para antitransformar las corrientes desde i_{ds0} e i_{qs0} a i_{a0} , i_{b0} , e i_{c0} , se consideró inicialmente θ_0 nulo. Resultando:

$$i_{a0} = \frac{2}{3} \cdot (\cos(\theta_0) \cdot i_{ds0} - \sin(\theta_0) \cdot i_{qs0}) \quad (8.4)$$

$$i_{b0} = \frac{2}{3} \cdot (\cos(\theta_0 - \frac{2\pi}{3}) \cdot i_{ds0} - \sin(\theta_0 - \frac{2\pi}{3}) \cdot i_{qs0}) \quad (8.5)$$

$$i_{c0} = \frac{2}{3} \cdot (\cos(\theta_0 + \frac{2\pi}{3}) \cdot i_{ds0} - \sin(\theta_0 + \frac{2\pi}{3}) \cdot i_{qs0}) \quad (8.6)$$

$$(8.7)$$

Como al bloque del motor implementado hay que ingresar valores eficaces, se tiene finalmente que las corrientes iniciales son:

$$I_{a\,eff0} = \frac{i_{a0}}{\sqrt{2}} \quad (8.8)$$

$$I_{b\,eff0} = \frac{i_{b0}}{\sqrt{2}} \quad (8.9)$$

$$I_{c\,eff0} = \frac{i_{c0}}{\sqrt{2}} \quad (8.10)$$

$$(8.11)$$

Como el par de ejes dq gira a la velocidad de sincronismo, a partir del cálculo de θ en la Sección 5.1.1 (Calculador θ_{rf} - Ecuación 5.7) y la velocidad inicial ω_0 se obtiene el deslizamiento inicial:

$$\omega_{S0} = \frac{L_m \cdot r_r \cdot i_{qs0}}{\psi_r \cdot L_r} + \frac{P}{2} \cdot \omega_0 \quad (8.12)$$

$$s_0 = \frac{\omega_{S0} - ((P/2) \cdot \omega_0)}{\omega_{S0}} \quad (8.13)$$

$$(8.14)$$

Sin embargo, a la hora de las simulaciones, el deslizamiento inicial que hay que ingresar en el bloque del motor de inducción es referido a la velocidad de sincronismo nominal $\omega_{Sn} = 2.\pi.f_{nom}$. Es decir:

$$s_0 = \frac{\omega_{Sn} - ((P/2).\omega_0)}{\omega_{Sn}} \quad (8.15)$$

8.2. Controlador

Como se mostró en la Sección 5.1 en las Figuras 5.3 y 5.4, el bloque *Controlador* que se implementó tiene un buen desempeño. Al entrar al sistema con un ciclo de conducción urbano ECE15, o un ciclo de conducción carretero EUDCL el sistema tiene una buena respuesta y "sigue" las velocidades de referencia.

En la Figura 8.1 se muestra el comportamiento del *Control Vectorial* implementado en el bloque *Controlador*. Como se observa, las corrientes de línea que alimentan al motor de tracción "copian" a las corrientes de referencia que impone el control, verificando su correcto funcionamiento. Como se observa en la figura las corrientes cambian de amplitud y frecuencias de acuerdo a las exigencias del motor de tracción.

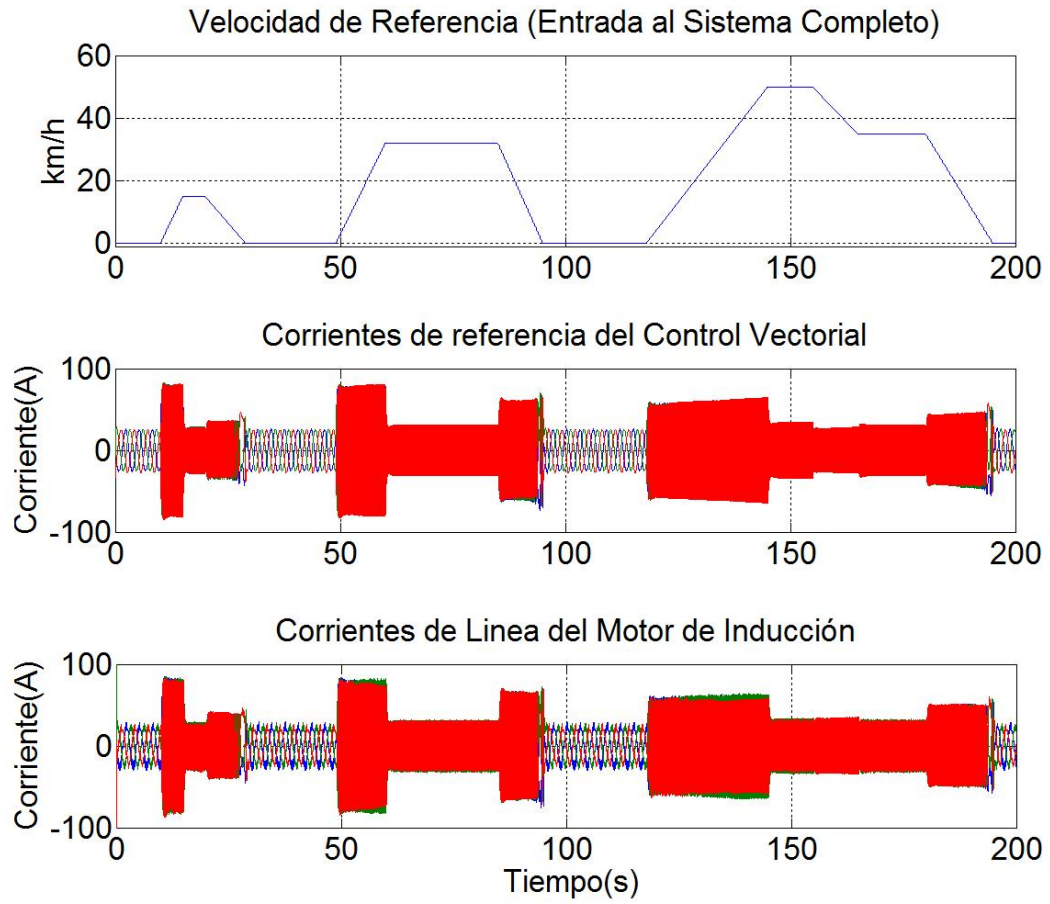


Figura 8.1: Velocidad referencia. Corrientes de referencia trifásicas que entran al bloque *Control Vectorial*. Corrientes de línea trifásicas que alimenta al motor de inducción.

8.3. Modelo Vehículo Eléctrico

Se simula el modelo del vehículo eléctrico con diferentes tipos de baterías, las cuales son utilizadas en este sistema de propulsión:

- Plomo Ácido (Lead-Acid),
- Níquel Metal (NiMH),
- Ion Litio (Li-ion).

Para cada tipo de batería se ajustó el peso del vehículo de acuerdo a su energía específica, manteniendo constante la capacidad, tensión nominal y cantidad de celdas de la batería.

Los patrones de conducción utilizados para realizar las simulaciones fueron los siguientes ciclos de conducción europeos:

- Ciclo de conducción urbano ECE15. Para este régimen de conducción se elige una relación de transmisión del vehículo correspondiente a una 3^{era} velocidad de una caja de cambios standard. Para simular por un tiempo más prolongado a los efectos del estudio energético, se configura una serie de tres ciclos ECE15 concatenados, similar a lo que se hace en el Ciclo NEDC (ver 7.3.1.4) y tal como se muestra en la Figura 8.2.

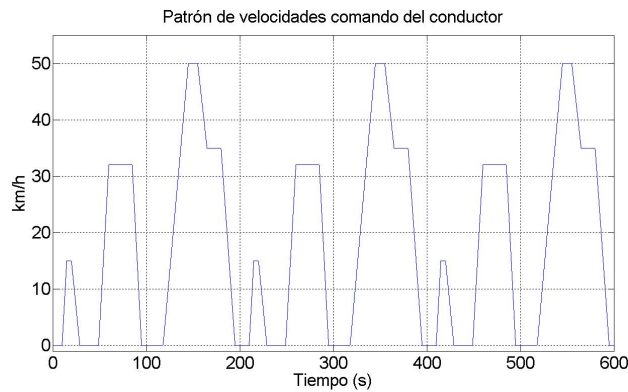


Figura 8.2: Velocidad de referencia, tres ciclos de conducción ECE15 concatenados.

- Ciclo de conducción carretero EUDCL. Para este régimen de conducción se elige una relación de transmisión del vehículo correspondiente a una 5^{ta} velocidad de una caja de cambios standard. Se muestra en la Figura 8.3 el patrón de velocidades programado.

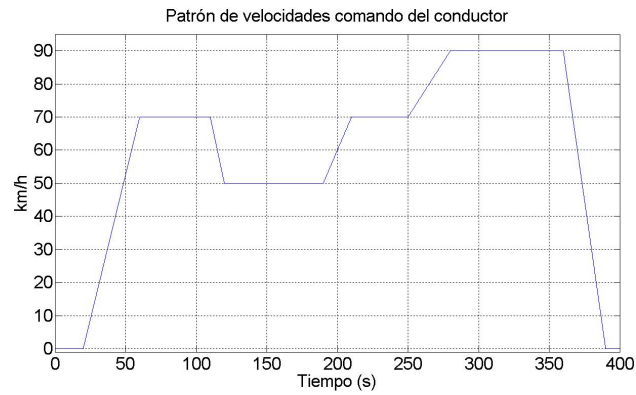


Figura 8.3: Velocidad de referencia, ciclo de conducción EUDCL.

Para ambos ciclos se supone que el vehículo se desplaza por un terreno llano.

8.3.1. Batería Plomo Ácido (Lead-Acid)

A continuación se exponen los gráficos y resultados correspondientes a los ciclos de conducción urbano ECE15, y carretero EUDCL para baterías de Plomo Ácido como fuente de energía.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	SOC inicial (%)	SOC final (%)	Consumo (Wh)	Rendimiento (Wh/km)
ECE15	600	3.086	100	97.59	388.58	125.91
EUDCL	400	6.653	100	93.95	974.91	146.54

Tabla 8.1: Simulaciones para Baterías Plomo Ácido (EV)

■ Ciclo Urbano (ECE15)

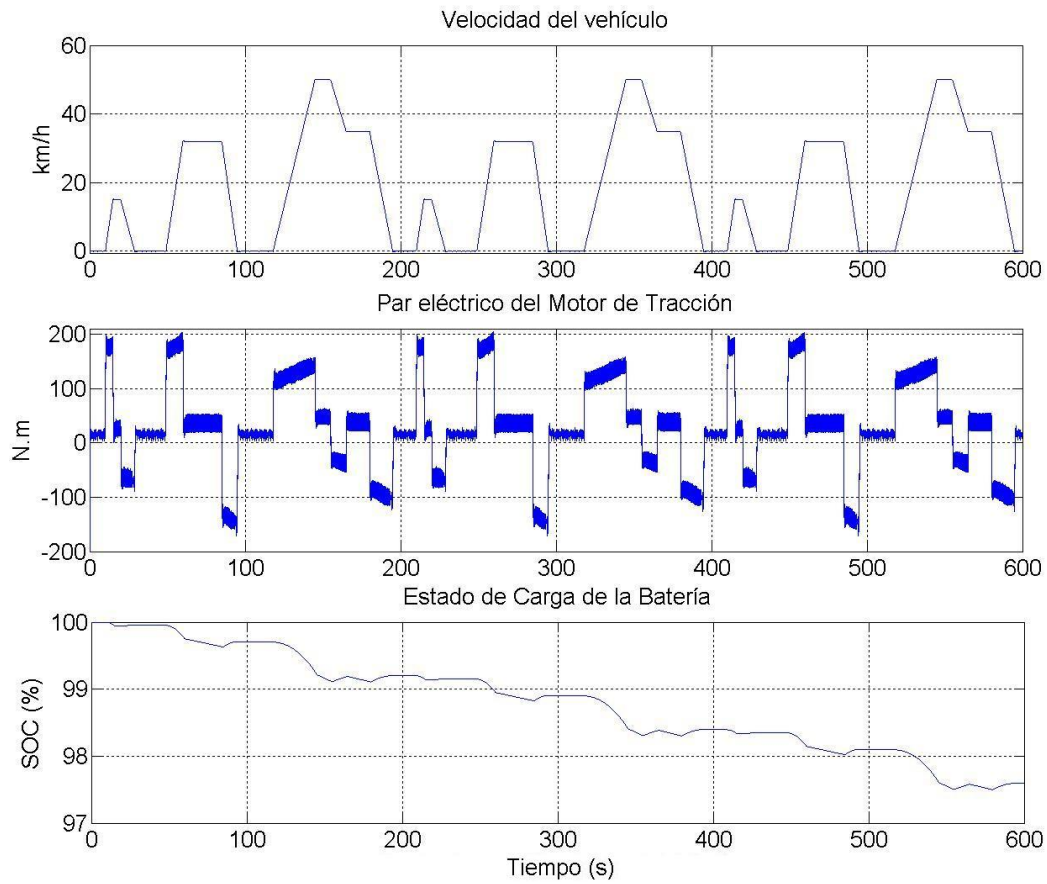


Figura 8.4: Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la Batería Plomo Ácido.

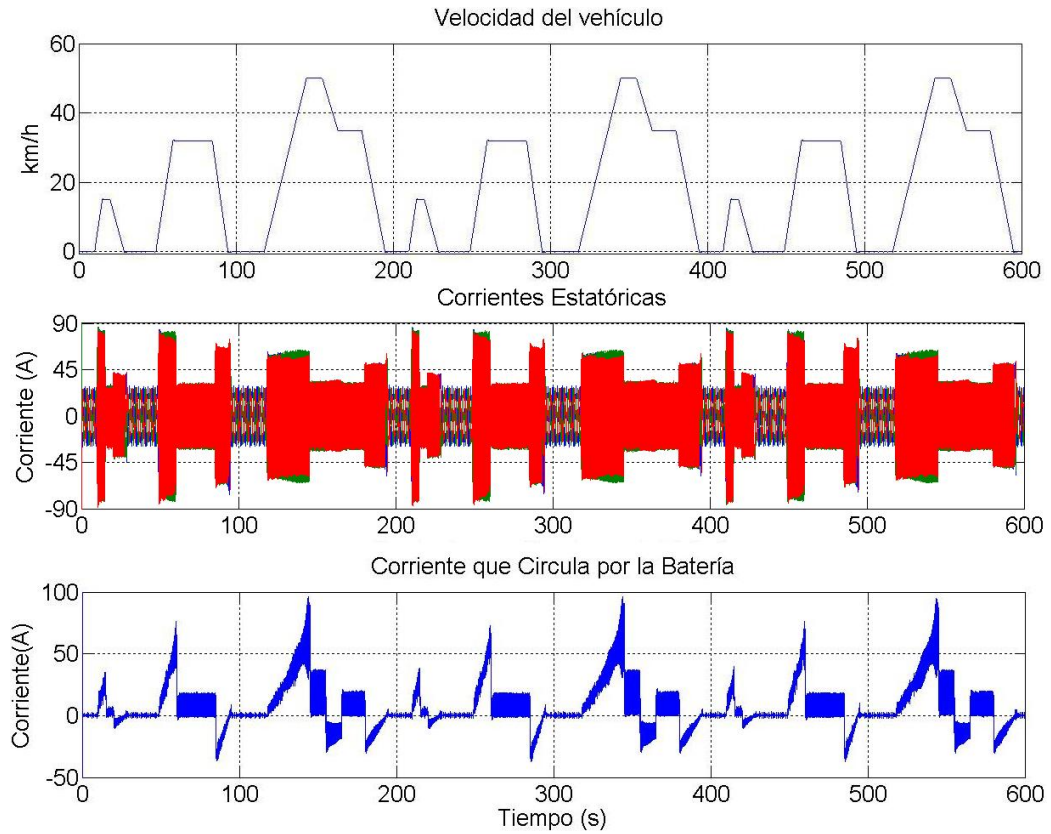


Figura 8.5: Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Corrientes de Línea que "alimentan" al Motor de Tracción. Corriente de carga de la Batería Plomo Ácido.

■ Ciclo Carretero (EUDCL)

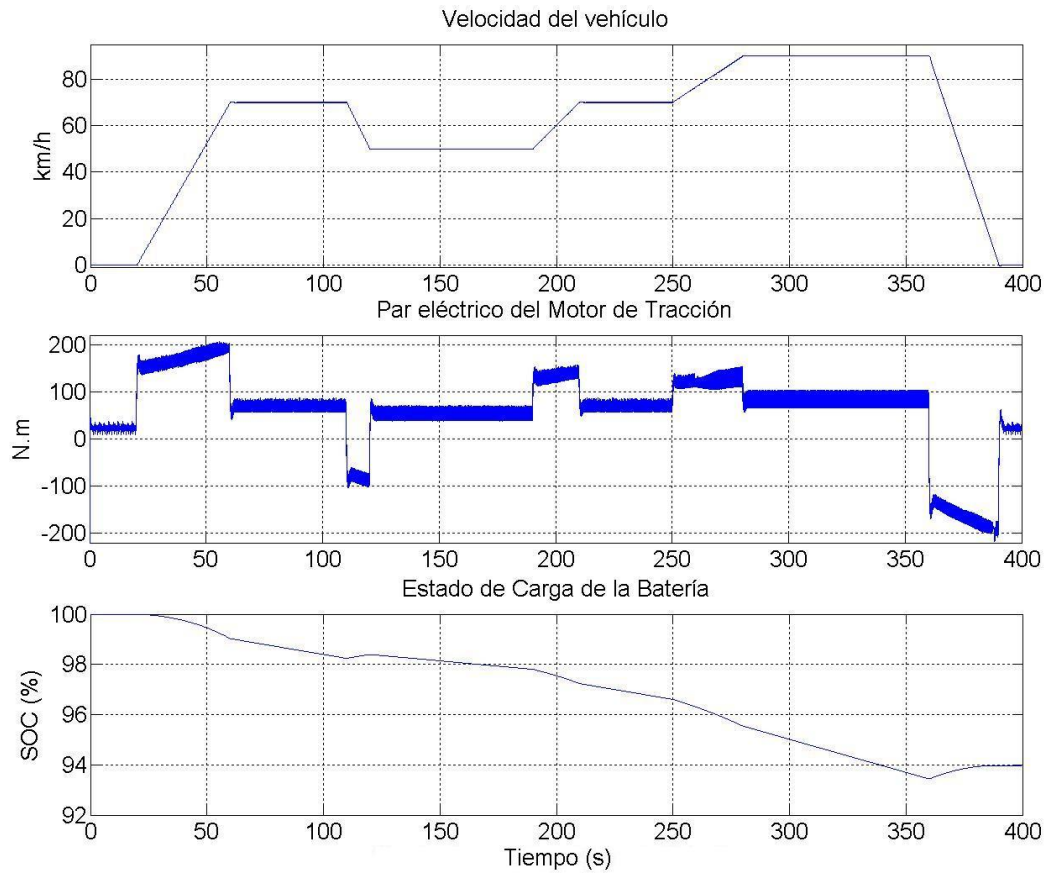


Figura 8.6: Velocidad del vehículo ciclo de conducción carretero EUDCL. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la Batería Plomo Ácido.

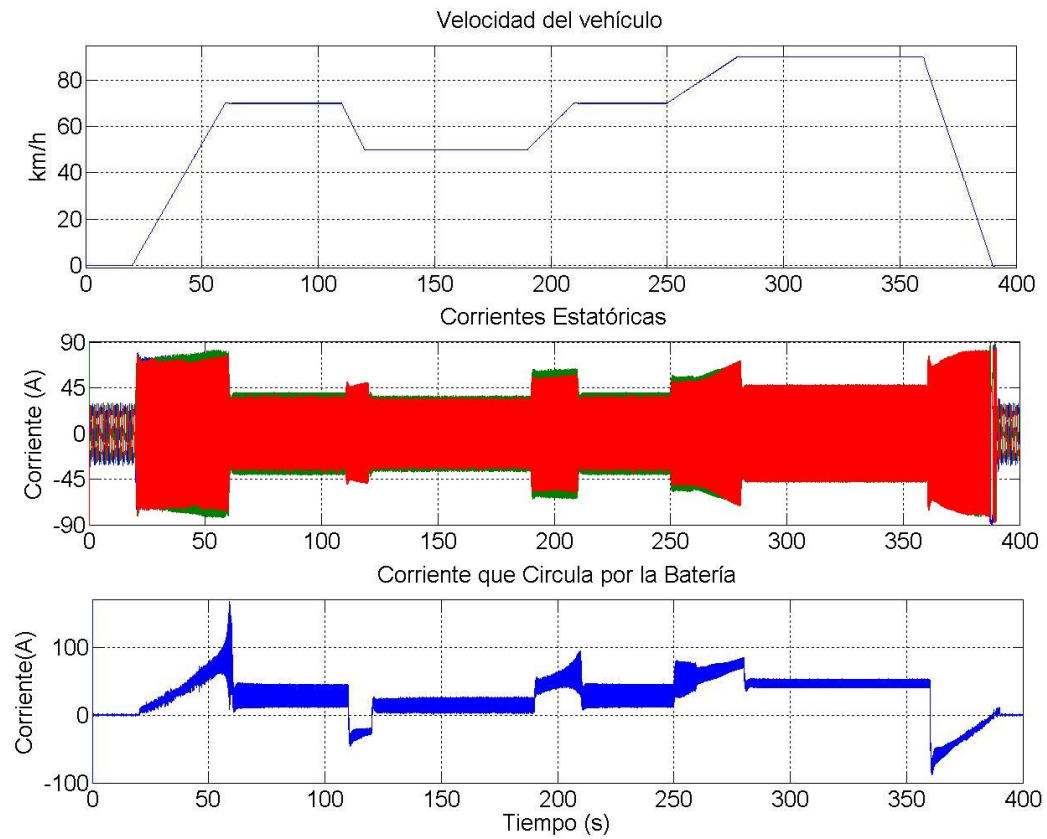


Figura 8.7: Velocidad del vehículo ciclo de conducción carretero EUDCL. Corrientes de Línea que "alimentan" al Motor de Tracción. Corriente de carga de la Batería Plomo Ácido.

8.3.2. Níquel Metal (NiMH)

A continuación se exponen los gráficos y resultados correspondientes a los ciclos de conducción urbano ECE15, y carretero EUDCL para baterías de Níquel Metal como fuente de energía.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	SOC inicial (%)	SOC final (%)	Consumo (Wh)	Rendimiento (Wh/km)
ECE15	600	3.086	100	98.27	278.21	90.14
EUDCL	400	6.653	100	95.51	723.65	108.77

Tabla 8.2: Simulaciones para Baterías Níquel Metal (EV)

■ Ciclo Urbano (ECE15)

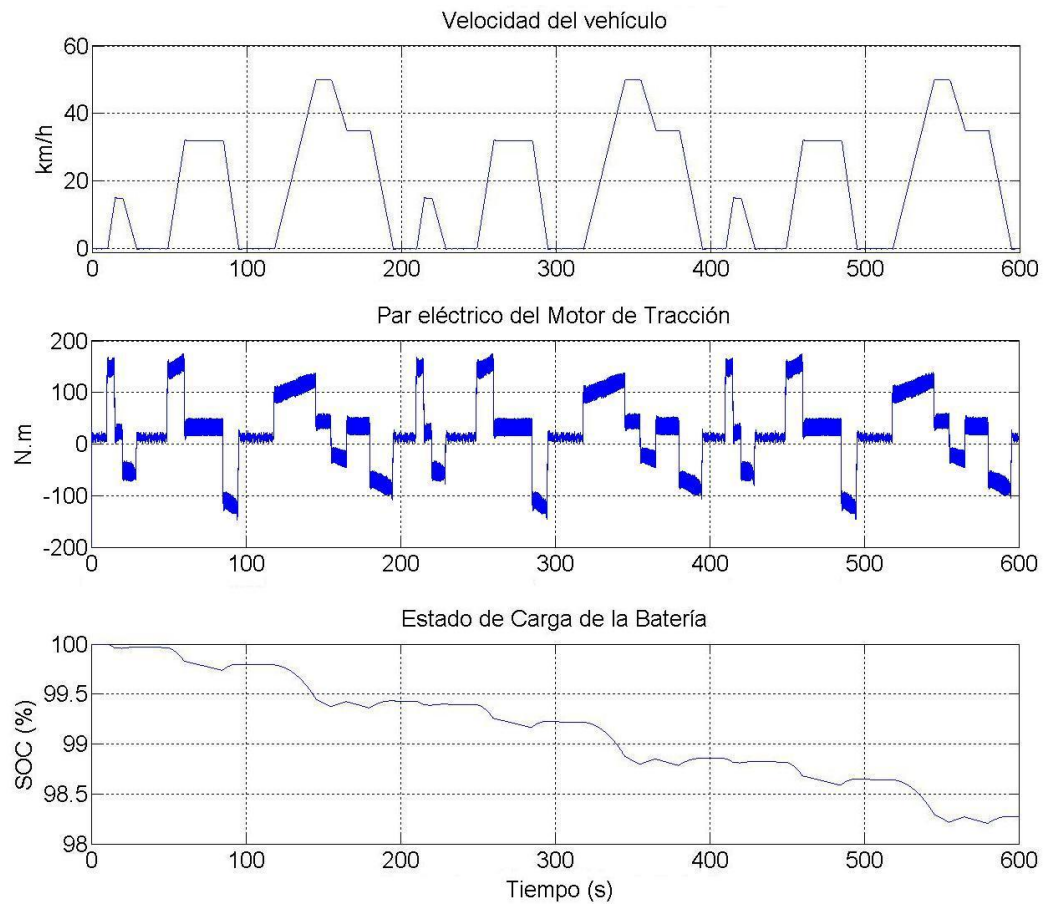


Figura 8.8: Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la batería NiMH.

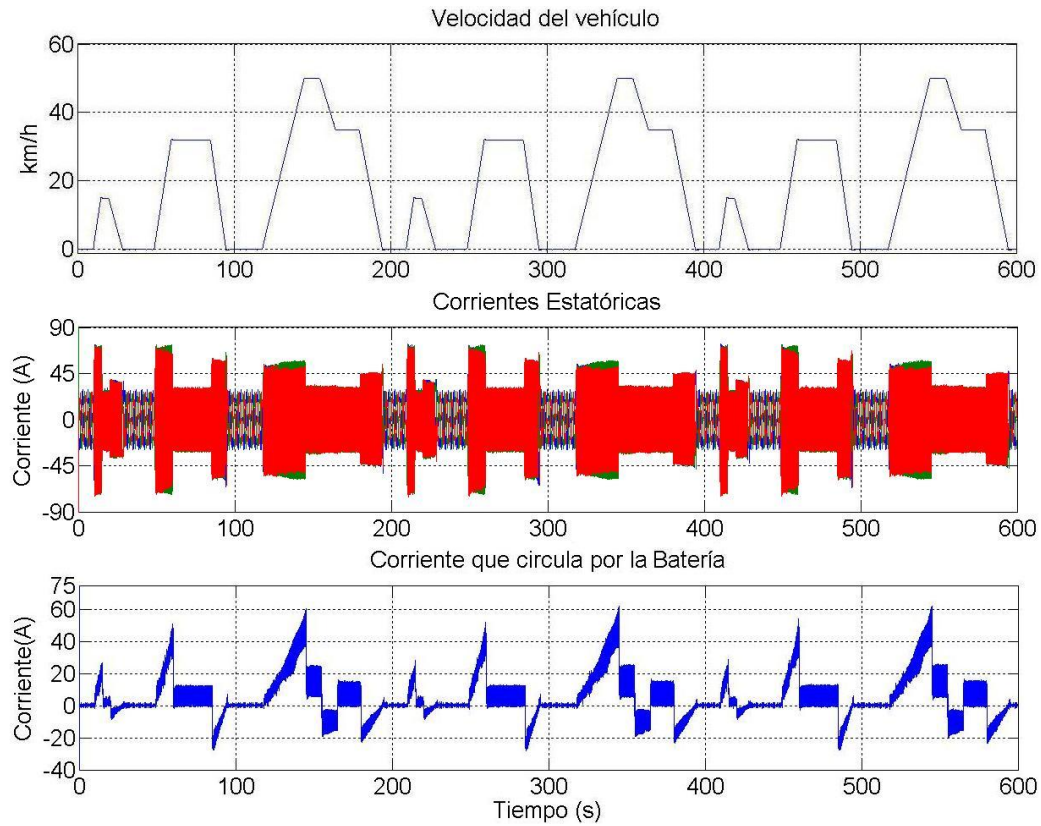


Figura 8.9: Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Corrientes de Línea que "alimentan" al Motor de Tracción. Corriente de carga de la Batería NiMH.

■ Ciclo Carretero (EUDCL)

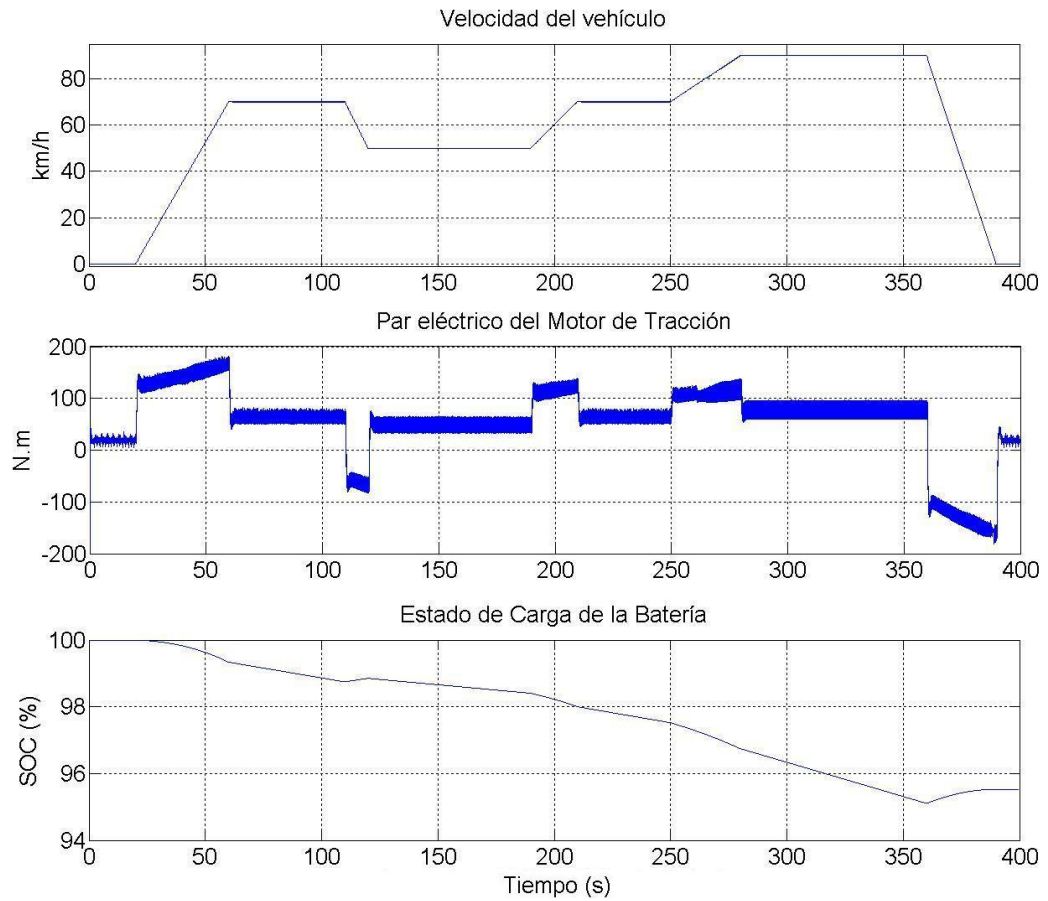


Figura 8.10: Velocidad del vehículo ciclo de conducción carretero EUDCL. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la batería NiMH.

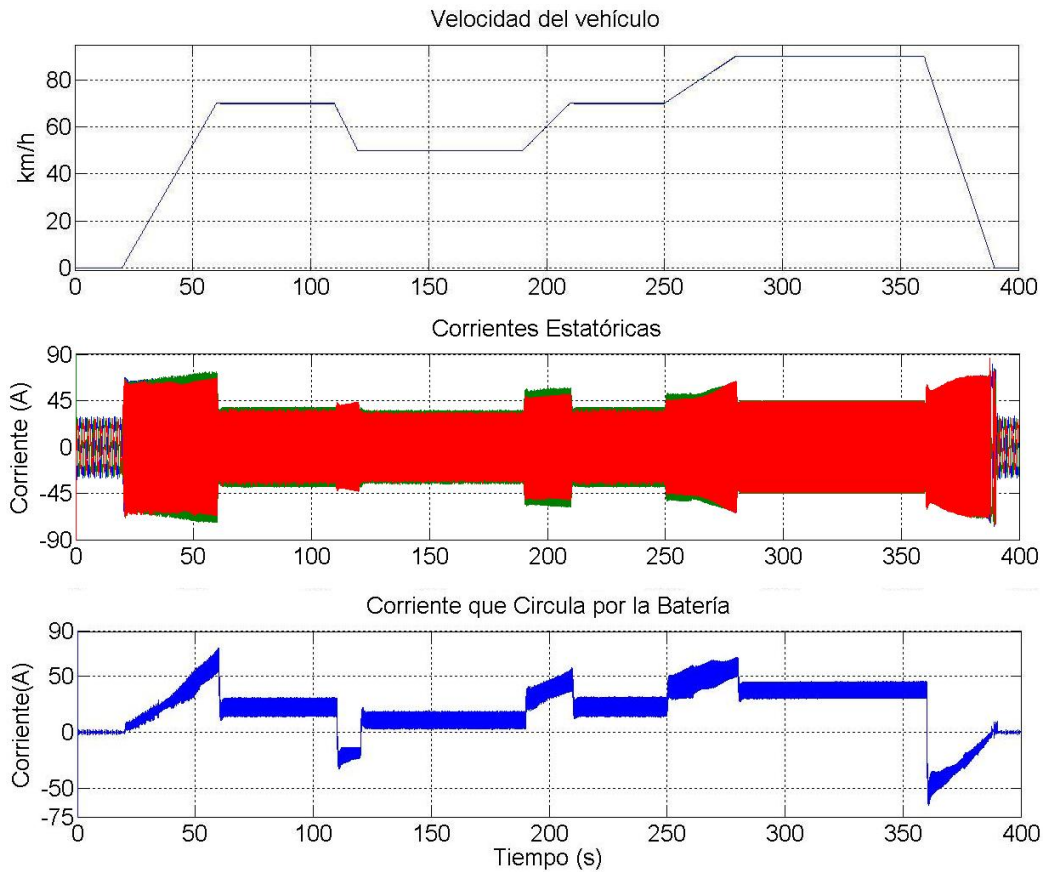


Figura 8.11: Velocidad del vehículo ciclo de conducción carretero EUDCL. Corrientes de Línea que "alimentan" al Motor de Tracción. Corriente de carga de la Batería NiMH.

8.3.3. Ion Litio (Li-ion)

A continuación se exponen los gráficos y resultados correspondientes a los ciclos de conducción urbano ECE15, y carretero EUDCL para baterías de Ion Litio como fuente de energía.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	SOC inicial (%)	SOC final (%)	Consumo (Wh)	Rendimiento (Wh/km)
ECE15	600	3.086	100	98.22	286.85	92.94
EUDCL	400	6.653	100	95.23	769.14	115.61

Tabla 8.3: Simulaciones para Baterías Litio Ion (EV)

■ Ciclo Urbano (ECE15)

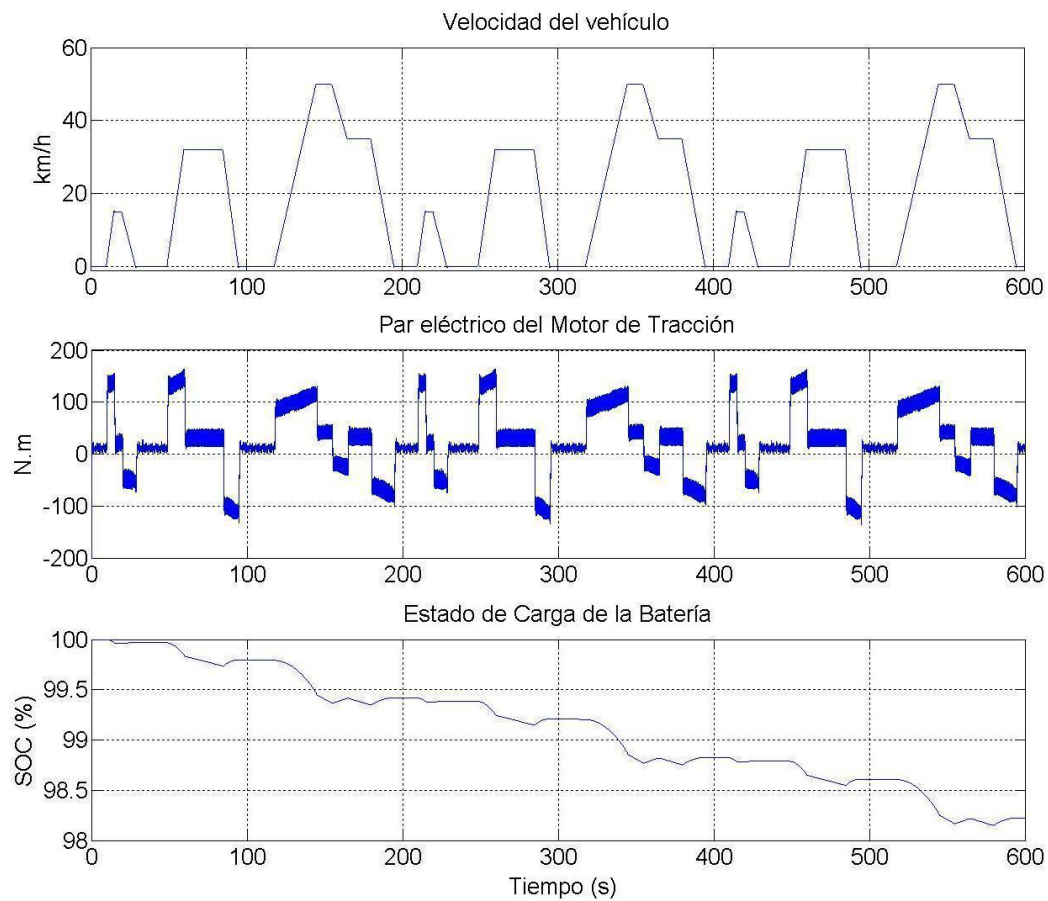


Figura 8.12: Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la batería Li-ion.

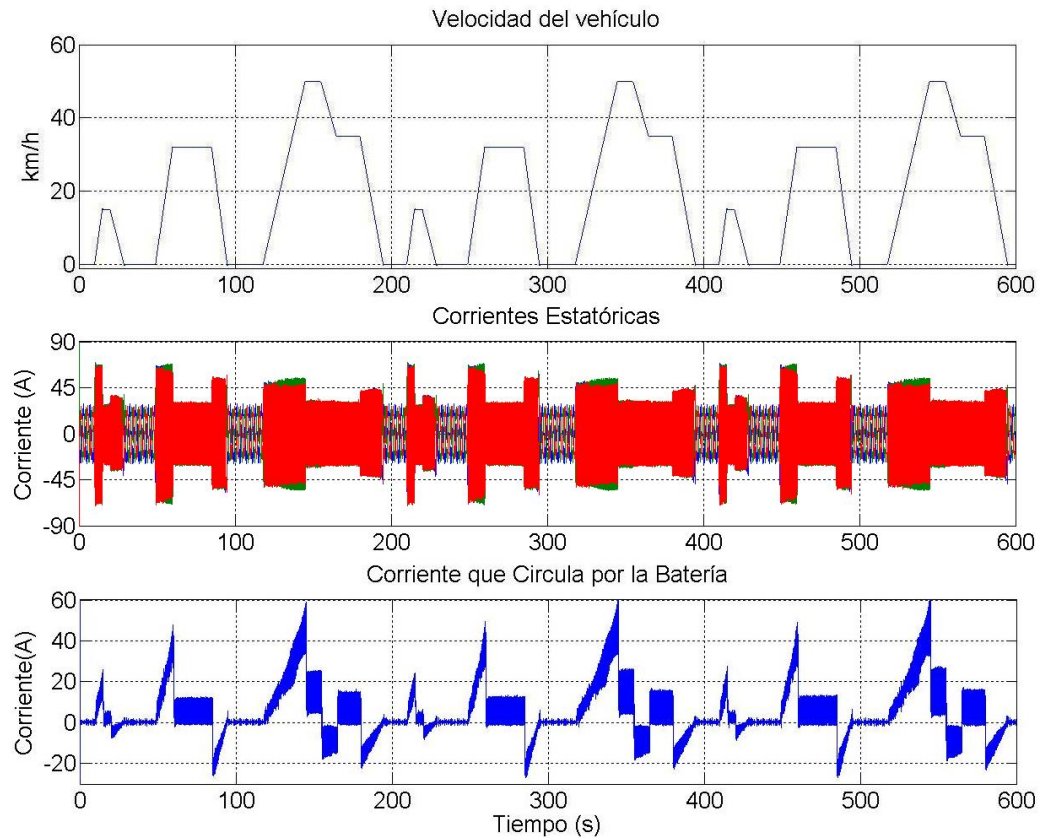


Figura 8.13: Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Corrientes de Línea que "alimentan" al Motor de Tracción. Corriente de carga de la Batería Li-ion.

■ Ciclo Carretero (EUDCL)

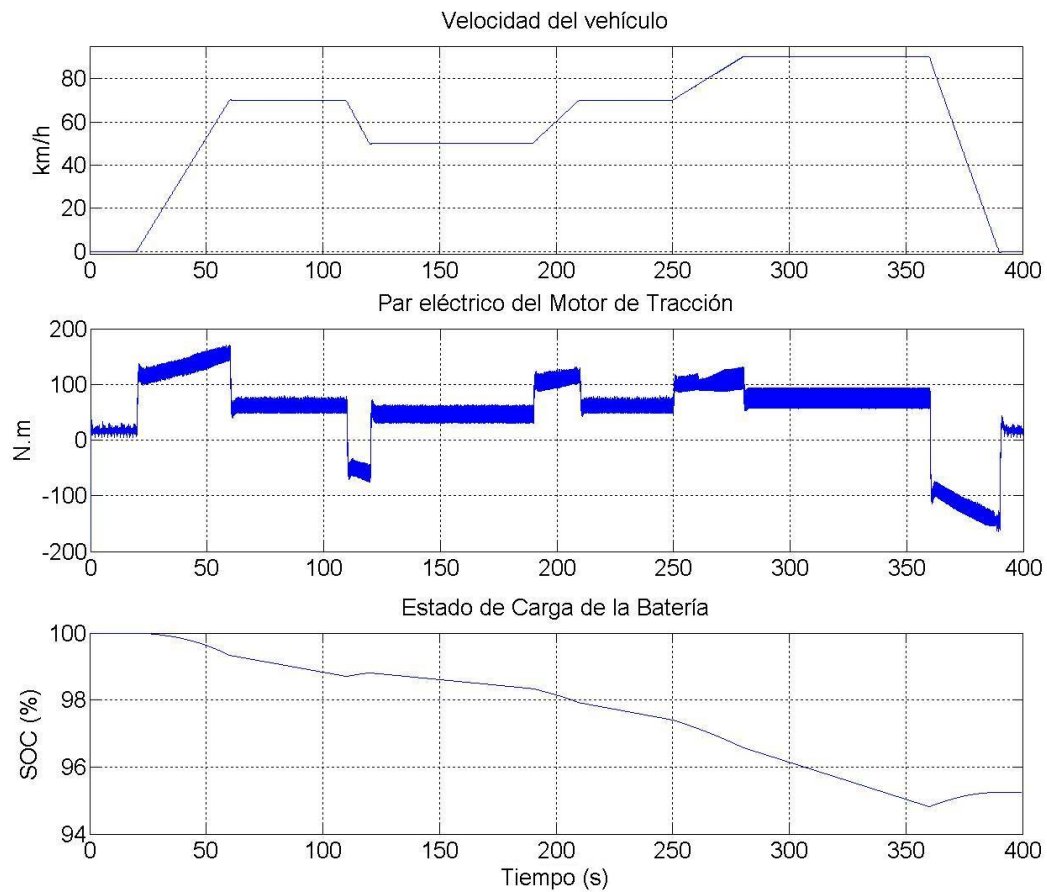


Figura 8.14: Velocidad del vehículo ciclo de conducción carretero EUDCL. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la Batería Li-ion.

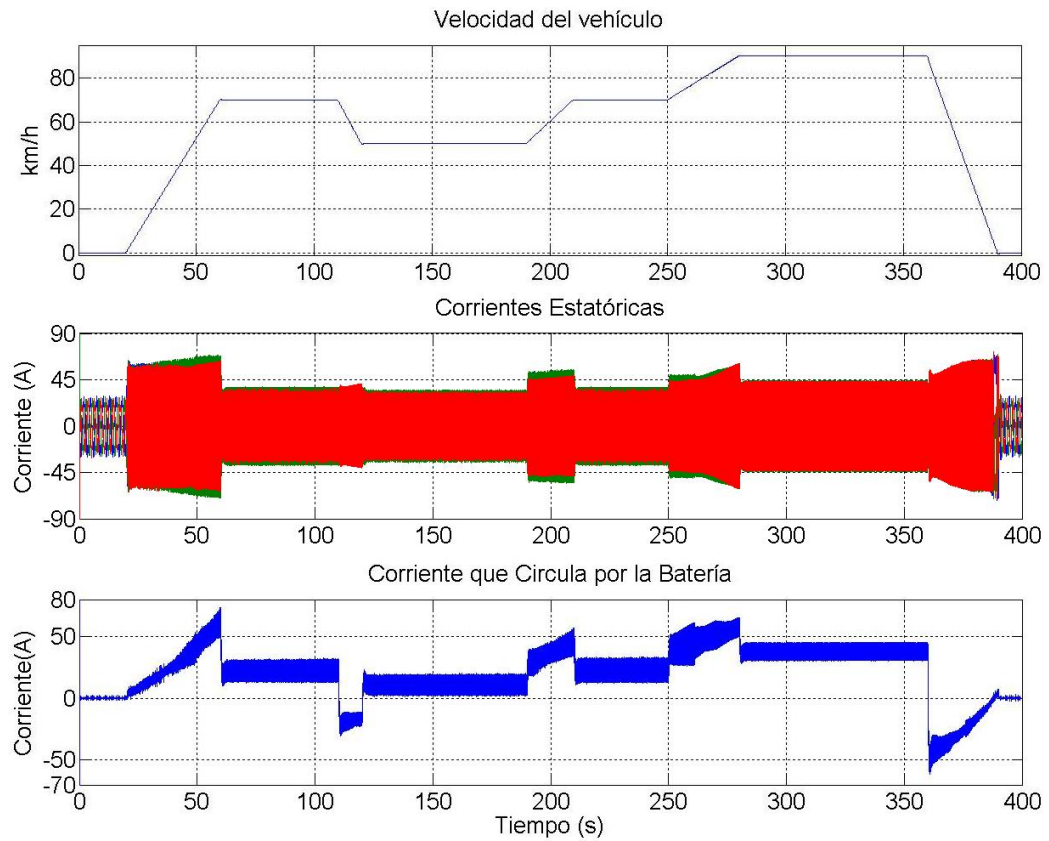


Figura 8.15: Velocidad del vehículo ciclo de conducción carretero EUDCL. Corrientes de Linea que "alimentan" al Motor de Tracción. Corriente de carga de la Batería Li-ion.

8.3.4. Análisis de Resultados

En esta Sección se analizan tanto las figuras como los resultados presentados en las tablas.

En cuanto a las figuras, es importante observar los siguientes efectos. Cuando el conductor comanda un cambio de velocidad (cambio de pendiente en el Ciclo de Conducción), ya sea creciente o decreciente, el vehículo acelera o desacelera, respectivamente, y se produce un salto en el par de carga, y por lo tanto en el par eléctrico del motor de tracción. Luego al moverse a lo largo de las pendientes de velocidad, el par comienza a subir (o bajar, cuando se está desacelerando) debido a que tiene una dependencia cuadrática con la velocidad como se muestra en la Ecuación 5.11, a esto se deben las pendientes a tramos que se observan en el par, en los instantes en que se acelera (o desacelera el vehículo). Cuando el vehículo llega a una velocidad constante, "mesetas" de velocidad, el par se estabiliza a valores constantes menores a los que se producen en las aceleraciones, ya que el término correspondiente a la derivada de la velocidad se anula.

En las figuras también se observa como es afectada la pendiente del SOC de la batería cuando se producen saltos en el par, y particularmente el efecto de freno regenerativo cuando el par es negativo. Es decir, el SOC aumenta (tiene pendiente positiva) cuando el par (al igual que la corriente por la batería) es negativo.

Por otro lado, se ve que las corrientes estatísticas no exceden el valor de la corriente nominal del motor (Ver Tabla 6.2, la amplitud de la corriente nominal de línea es $I_n^{eff} \cdot \sqrt{2} = 95,73$), por lo tanto el motor de tracción siempre se encuentra operando por "debajo" de sus condiciones nominales, sin someterlo a sobrecargas.

En cuanto a las baterías, se sabe que para las baterías de Plomo Ácido, las mismas pueden soportar corrientes de carga mayores a los 100A¹ durante tiempos muy superiores a los que se han simulado, por lo cual tampoco se está exigiendo a las baterías durante el freno regenerativo.

Como en las simulaciones se afectó la masa del vehículo para las diferentes baterías (Ver Tabla 6.6), si se mira con detenimiento las figuras se ve que el par eléctrico para las baterías plomo ácido es el más grande de las tres variantes consideradas, (Par máximo 190N.m Plomo-Ácido, 160N.m NiMH, y 150N.m Li-Ion), esto es porque las mismas son las más pesadas, tienen menor

¹OPTIMA batteries, Modelo: D25/75, carga @ 100A en 35 minutos.

energía específica. Esto demuestra una de las ventajas de la nueva tecnología de baterías frente a las tradicionales de Plomo Ácido, ya que al disminuir la masa de baterías se afecta positivamente la eficiencia del vehículo, en tanto la energía se aprovecha mejor para la tracción del vehículo.

Batería	Densidad de Energía (Wh/m^3)
Plomo-Ácido	70000
Níquel-Metal	240000
Litio-Ion	400000

Tabla 8.4: Densidades de Energía para los diferentes tipos de baterías.(extraída de [10], página 1.13)

Se muestra la siguiente tabla comparativa en cuanto al peso y volumen de los bancos de baterías simulados:

Batería	Peso (kg)	Volumen (m^3)	Eficiencia promedio (Wh/km)
Plomo-Ácido	461	0.2304	136.22
Níquel-Metal	215	0.0672	99.45
Litio-Ion	108	0.04032	104.27

Tabla 8.5: Comparación, peso, volumen y Eficiencia entre las diferentes variantes propuestas

De acuerdo a las eficiencias resultantes, se calculan las distancias que se puede recorrer para cada una de las variantes del vehículo propuesto (Tabla 8.6). Dicho calculo se realizó teniendo presente que el SOC de las baterías no puede "bajar" más de un 50 %² ya que la tensión de las mismas "cae", y entonces el convertidor DC-DC en bornes de la batería no puede elevar la tensión para alimentar al inversor, según la demanda del motor de tracción.

Nota: Recordar que todos las simulaciones se realizaron sin afectar el grado de inclinación del terreno.

²Este limite fue deducido mediante simulaciones.

Batería	Urbano	Carretero
Plomo-Ácido	64 km	55 km
Níquel-Metal	90 km	74 km
Litio-Ion	87 km	70 km

Tabla 8.6: Kilómetros que se puede recorrer según el tipo de batería y ciclo de conducción con un estado de carga inicial de 100 %

8.4. Modelo Vehículo Híbrido

Para este modelo, se utilizaron solo baterías de Níquel Metal como fuente de energía.

Se utilizaron además los mismos patrones de velocidades que para el EV, y las mismas consideraciones en cuanto a la relación de transmisión. Dichos patrones se muestran en las Figuras 8.2 y 8.3. Debido a que se incluyó un motor de combustión en el modelo, y que se disminuyó la energía específica del banco de baterías, se dejó el peso del vehículo definido igual al del EV con baterías de Plomo-Ácido (1450 kg).

Nuevamente, se supone que el vehículo se desplaza por un terreno llano.

Cálculo Previo

Para el cálculo del consumo de combustible se obtiene la Energía entregada ($E_{M/G}$) por el M/G durante el transcurso de la simulación, y luego se convierte la misma desde kWh, a litros (Combustible) de acuerdo a la siguiente expresión:

$$1 \text{ Joule} \sim 2,78 \times 10^{-4} \text{ Wh} \quad (8.16)$$

$$1 \text{ Joule} \sim 0,239 \text{ Cal} \quad (8.17)$$

$$E_{M/G}[J] = E_{M/G}[kWh] \cdot \frac{1000}{2,78 \times 10^{-4}} \quad (8.18)$$

$$E_{M/G}[kCal] = E_{M/G}[J] \cdot \frac{0,239}{1000} \quad (8.19)$$

$$\text{Combustible}[\text{litros}] = E_{M/G}[kCal] \cdot \frac{1}{\eta_T \cdot PC} \quad (8.20)$$

Donde $PC[kCal/litro] = 8419$ es el poder calorífico de la nafta super 95

SP^3 , y $\eta_T = 0,4$, es el coeficiente de rendimiento térmico típico de los ICE Atkinson.

■ Ciclo Urbano (ECE15)

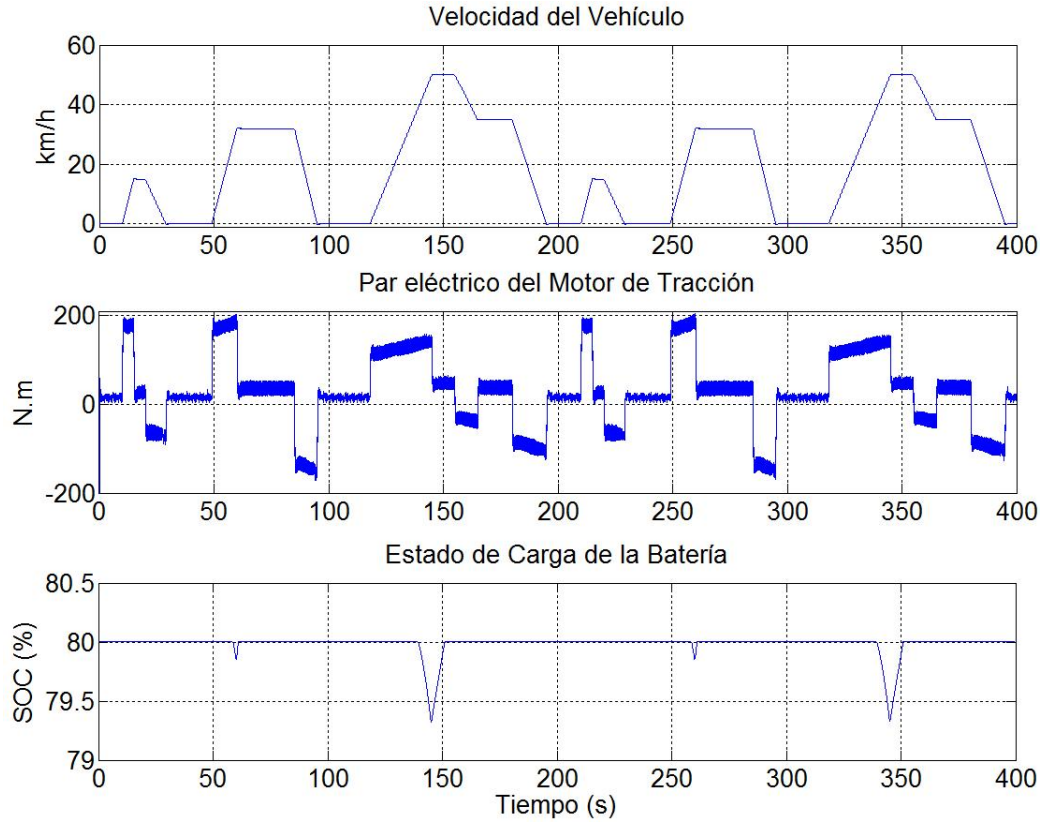


Figura 8.16: Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la batería NiMH.

³Extraído de www.miem.gub.uy - Dirección Nacional de Energía y Tecnología Nuclear - Estadísticas - Balance energético - Aspectos Metodológicos - Poderes caloríficos superiores.

■ Ciclo Carretero (EUDCL)

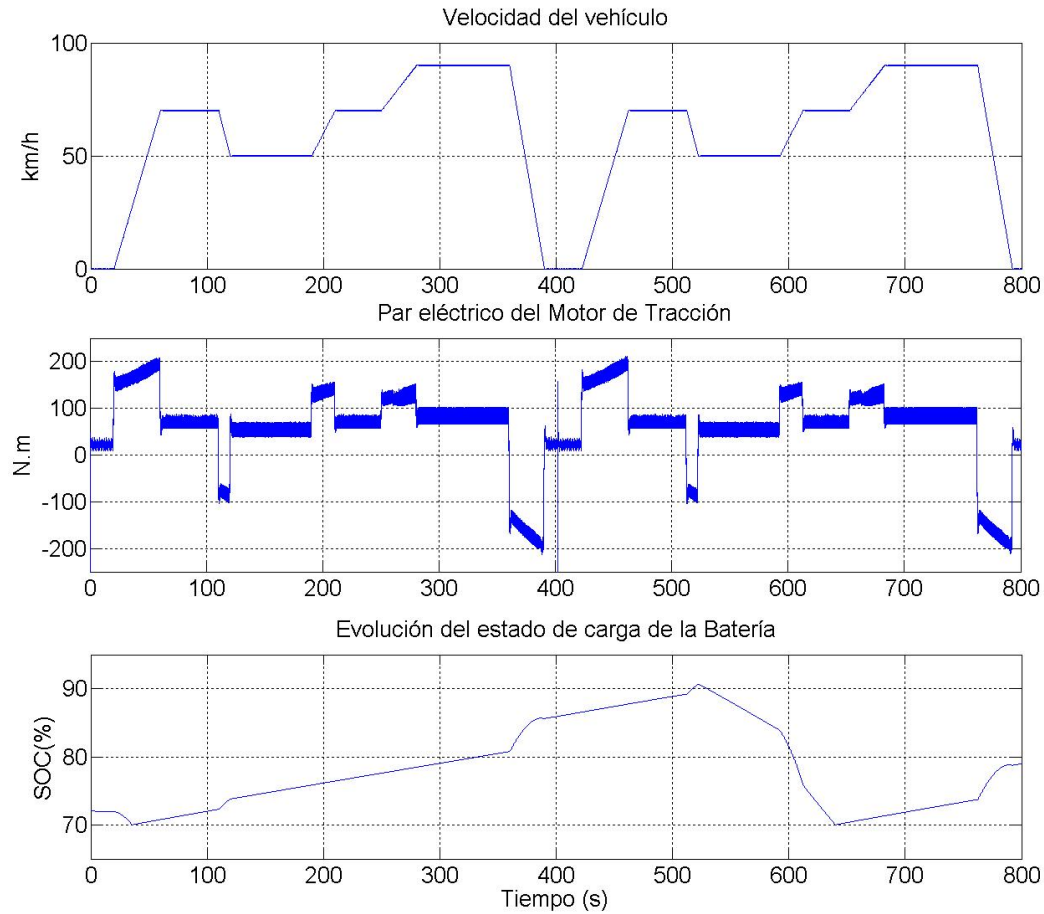


Figura 8.17: Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano EUDCL. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la batería NiMH.

8.4.1. Análisis de Resultados

■ Ciclo Urbano (ECE15)

Como se muestra en la Figura 8.16, se ve que la batería se mantiene en el nivel máximo de SOC ($\text{maxSOCPPS}=80\%$), es decir el M/G está entregando

siempre su potencia óptima (dada por el ICE), ya que la carga no sobrepasa dicha demanda de potencia. Sin embargo cuando el nivel de SOC de la batería cae, esto quiere decir que la carga está demandando mucha potencia, y se está superando el nivel óptimo, por lo tanto la batería tiene que "ayudar" al M/G a satisfacer dicha demanda, y así el M/G puede seguir operando en su región óptima. Como las características de las simulaciones son iguales que para el EV, entonces sabemos que el motor de tracción no será exigido por arriba de sus condiciones nominales.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	Energía (MJ)	Combustible (litros)	Rendimiento km/litro - litro/100km
ECE15	400	2.057	1.315	0.09	22 - 4.5

Tabla 8.7: Simulaciones para Baterías Níquel Metal (HEV) Modo Urbano

Si se compara el vehículo híbrido simulado (22km/litro) con un vehículo convencional (10km/litro), resulta que con el HEV se puede recorrer más del doble de la distancia (54 %) que con un vehículo convencional.

- Ciclo Carretero (EUDCL)

En la Figura 8.17, se puede ver como el SOC de la batería va aumentando o disminuyendo según sea el estado de encendido del M/G siempre dentro de la banda definida. Además se observan los cambios de pendiente cuando se produce un freno regenerativo, es decir cuando el par es negativo. Aquí se sabe también que el motor no será exigido por arriba de sus condiciones nominales como en el ciclo de conducción urbano.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	Energía (MJ)	Combustible (litros)	Rendimiento km/litro - litro/100km	Energía Batería kWh
EUDCL	800	6.653	7.956	0.56	11.8 - 8.49	-1.13

Tabla 8.8: Simulaciones para Baterías Níquel Metal (HEV) Modo Carretero

La energía entregada por la batería de acuerdo a la Tabla 8.8 es negativa, ya que la batería absorbe energía durante este ciclo de conducción, y termina el ciclo con un SOC más alto que al comienzo. Este remanente de energía

útil que queda en la batería, le permite al vehículo seguir circulando hasta llegar al SOC inicial (comienzo de la simulación) aunque se aya agotado todo el combustible. Lo anterior implica que el rendimiento del vehículo es en realidad un poco mayor que el obtenido.

Al igual que en las simulaciones del EV, se observa que el HEV es menos eficiente en régimen carretero que en urbano.

Capítulo 9

Conclusiones

9.1. Vehículo Eléctrico

Como se puede deducir de las Tablas 8.1, 8.2, y 8.3, los sistemas de propulsión eléctricos son mas eficientes en régimen urbano que en régimen carretero, ya que al haber gran número de desaceleraciones y paradas, el sistema puede aprovechar la energía cinética del vehículo para cargar el banco de baterías. Esto no es así en el régimen carretero ya que es un perfil de velocidades mayormente constantes y con pocas variaciones.

La fuente de energía mas eficiente (en cuanto a los kilómetros que rinde por cada Wh) de las tres comparadas, es la compuesta por bancos de baterías de Níquel Metal, sin embargo las mismas son más pesadas y ocupan más volumen que las de Litio Ion, que son un poco menos eficientes. Es aquí entonces que el fabricante debe elegir, entre eficiencia *vs* comfort (Ver Tabla 8.5), ya que si bien las baterías de Níquel-Metal son más eficientes que las de Litio Ion, las mismas ocupan más volumen quitando espacio útil en el vehículo.

Para el caso de baterías de Plomo-Ácido D25/75 de Optima Batteries (12V, 48Ah) la hoja de datos del fabricante describe que el tiempo de carga de dichas baterías con un cargador (corriente constante) de 13.8 V a 15.0 V, 10 A máximo es de aproximadamente 6 a 12 horas. Es decir, que el cargador tiene que proveer una tensión del orden del 15 % (13,8V) al 25 % (15V) por encima de la tensión nominal de las baterías y con una corriente máxima

de 10A.

Para el caso particular del banco de baterías simulado, se tienen 28 celdas de 12V cada una, sumando una tensión total de 336 V, entonces se supone que la tensión del cargador es de un 20 % mayor, o sea 403,2V, y que entrega una corriente de 10A. La potencia que hay que entregar para cargar el vehículo es de 4 kW aproximadamente durante 6 horas, entonces se necesitan 24kWh para cargar el vehículo. Por lo tanto de acuerdo a la Tabla 8.6, uno puede recorrer 64 km dentro de la ciudad o 55 km en ruta, pero luego tiene que detener el vehículo por 6 horas (y consumir 24kWh) para poder cargarlo. Si se supone que un vehículo convencional en régimen urbano tiene un rendimiento de 10km/l aproximadamente, entonces se pueden evaluar los costos de transporte entre uno y otro vehículo.

Vehículo Eléctrico - Baterías Plomo-Ácido

Para recorrer 64 km se tiene que cargar el vehículo con 24kWh, el costo de la energía para un suministro residencial de acuerdo a la Tarifa Residencial Simple ¹, es de 4.743 \$/kWh IVA incluido, por lo tanto \$113 en total.

Vehículo Convencional - Nafta

Para recorrer los mismos 64 km que el vehículo eléctrico se requieren 6.4 litros aproximadamente de nafta, y si se considera el precio del litro de nafta \$28.80 (al momento de escribir este documento), entonces se tiene un costo total \$184.

Entonces, se obtiene un ahorro del 38 % aproximadamente de costo de transporte con baterías Plomo-Ácido. Haciendo el mismo análisis para las otras baterías consideradas, se tiene un 56 % de ahorro para Níquel-Metal y un 55 % de ahorro para Litio-Ion.

La gran desventaja que se presenta es que si bien con un vehículo convencional, se puede cargar combustible en una estación de servicio y en 15 minutos retomar el camino y recorrer otros 64 km, en un vehículo eléctrico se tendrá que esperar al menos 6 horas para poder recorrer de nuevo 64 km.

¹Pliego Tarifario de UTE vigente desde 01/02/2010 - Tarifa Residencial Simple considerando el segundo escalón entre 101kWh a 600kWh mensuales

Sin embargo, si el vehículo realiza un recorrido por día menor o igual a 64 km (en el caso de las baterías de Plomo-Ácido), el vehículo deberá salir con las baterías totalmente cargadas para tener un buen desempeño durante el día, y regresar al hogar sin ningún problema desde el punto de vista energético. Con este régimen de operación, el vehículo eléctrico se tendría que cargar durante la noche para que al otro día esté con el banco de baterías cargado. En estas condiciones la tarifa más adecuada para el hogar es la Tarifa Inteligente² ya que la misma tiene un costo de 2.289 \$/kWh IVA incluido durante la noche. Con este costo de energía la carga del vehículo saldrá \$55, y se obtendrá por tanto un ahorro del 69 % si se consideran baterías de Plomo Ácido, 79 % si se consideran baterías de Níquel Metal y por último un 78 % si se trata de batería Litio Ion.

Debido a que ya está en puerta la microgeneración en nuestro país, es interesante ver el siguiente análisis para el caso de las baterías de Plomo-Ácido. Si se supone que un vehículo recorre una media de 30 km por día, entonces se tendrá aproximadamente un 25 % de SOC para entregar a la red, esto es $28 \times 12V \times 48Ah \times 0,25 = 4,03kWh$ por vehículo.

Antes de continuar con el razonamiento es necesario verificar si es posible para el inversor y para las baterías entregar dicha cantidad de energía en una hora. Si se toman los 4,03kWh y se dividen entre la tensión del banco de baterías se obtiene la capacidad (Ah) necesaria para entregar dicha energía. $\frac{4,03kWh}{12 \times 28V} = 12Ah$. Como la batería es de $48Ah > 12Ah$ resulta que las baterías soportan dicha demanda de energía. Si se supone que se entregan los 4,03kWh en una hora a potencia constante, entonces la potencia máxima es 4,03kW que es menor que la potencia del inversor (determinada por la potencia del motor de tracción 30kW).

De acuerdo a los datos estadísticos provistos por la Dirección Nacional de Transporte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas mostrados en la Figura 9.1, y tomando solo los datos correspondientes a Autos y Camionetas, se obtiene lo siguiente:

Total Autos y Camionetas

Nafta 382.525

Gasoil 165.256

²Pliego Tarifario de UTE vigente desde 01/02/2010 - Tarifa Doble Horario Residencial-

Transporte por Carretera**Infraestructura y
vehículos
de transporte**

Parque vehicular;
por tipo de vehículo
según Departamento
(en vehículos)
2006

(a) - La fuente no discrimina entre las
categorías indicadas.

(b) - Incluye trailers para autos y
camionetas.

(99) - Información correspondiente al
año 1999.

(00) - Información correspondiente al
año 2000.

(01) - Información correspondiente al
año 2001.

(02) - Información correspondiente al
año 2002.

(03) - Información correspondiente al
año 2003.

(04) - Información correspondiente al
año 2004.

(05) - Información correspondiente al
año 2004.

(06) - Información correspondiente al
año 2004.

(07) - Información correspondiente al
año 2004.

(08) - Información correspondiente al
año 2004.

(09) - Información correspondiente al
año 2004.

(10) - Información correspondiente al
año 2004.

(11) - Información correspondiente al
año 2004.

(12) - Información correspondiente al
año 2004.

(13) - Información correspondiente al
año 2004.

(14) - Información correspondiente al
año 2004.

(15) - Información correspondiente al
año 2004.

(16) - Información correspondiente al
año 2004.

(17) - Información correspondiente al
año 2004.

(18) - Información correspondiente al
año 2004.

(19) - Información correspondiente al
año 2004.

(20) - Información correspondiente al
año 2004.

(21) - Información correspondiente al
año 2004.

(22) - Información correspondiente al
año 2004.

(23) - Información correspondiente al
año 2004.

(24) - Información correspondiente al
año 2004.

(25) - Información correspondiente al
año 2004.

(26) - Información correspondiente al
año 2004.

(27) - Información correspondiente al
año 2004.

(28) - Información correspondiente al
año 2004.

(29) - Información correspondiente al
año 2004.

(30) - Información correspondiente al
año 2004.

(31) - Información correspondiente al
año 2004.

(32) - Información correspondiente al
año 2004.

(33) - Información correspondiente al
año 2004.

(34) - Información correspondiente al
año 2004.

(35) - Información correspondiente al
año 2004.

(36) - Información correspondiente al
año 2004.

(37) - Información correspondiente al
año 2004.

(38) - Información correspondiente al
año 2004.

(39) - Información correspondiente al
año 2004.

(40) - Información correspondiente al
año 2004.

(41) - Información correspondiente al
año 2004.

(42) - Información correspondiente al
año 2004.

(43) - Información correspondiente al
año 2004.

(44) - Información correspondiente al
año 2004.

(45) - Información correspondiente al
año 2004.

(46) - Información correspondiente al
año 2004.

(47) - Información correspondiente al
año 2004.

(48) - Información correspondiente al
año 2004.

(49) - Información correspondiente al
año 2004.

(50) - Información correspondiente al
año 2004.

(51) - Información correspondiente al
año 2004.

(52) - Información correspondiente al
año 2004.

(53) - Información correspondiente al
año 2004.

(54) - Información correspondiente al
año 2004.

(55) - Información correspondiente al
año 2004.

(56) - Información correspondiente al
año 2004.

(57) - Información correspondiente al
año 2004.

(58) - Información correspondiente al
año 2004.

(59) - Información correspondiente al
año 2004.

(60) - Información correspondiente al
año 2004.

Nota: N - Gasolina
G - Gasóleo

Fuente: Intendencias Municipales

Departamento	Autos y Camionetas		Vehículos de Carga				Ómnibus, Micro y Miniómnibus		Taxis y Remises		Motos y Ciclomotores
	N	G	Camiones	Tractores	Remolques	Semi-remolques	N	G	N	G	
Artigas	8 931	3 463	903	102	787 (b)		0	99	0	121	15 453
Canelones	50 748	28 639	10 811	442	6 242	1 450	11	922	10	331	99 156
Cerro Largo	8 692	4 188	984	95	78	294	4	161	16	140	22 180
Colonia	16 988	5 871	2 979	203	889	361	17	254	7	123	40 724
Durazno	7 582	6 253	845	103	155	178	0	107	7	65	15 297
Flores (99)	4 774	2 563	873	167	287	242	0	43	0	32	6 209
Florida	9 831	3 456	1 224	301	480	200	0	67	0	81	18 283
Lavalleja	8 462	4 295	1 579 (a)		1 383 (a)		4	182	14	82	17 260
Maldonado	43 225	22 992	3 145	241	487	150	10	478	10	171	52 915
Montevideo	136 171	40 959	19 571	505	5 757	1 081	56	3 266	1	3 333	67 496
Paysandú (04)	17 162	6 288	2 542	207	444	249	2	124	0	147	30 403
Río Negro (03)	4 665	2 593	810	86	215	119	0	62	9	83	11 174
Rivera (03)	4 846	2 312	816 (a)		1 080 (a)(b)		0	128	12	119	7 556
Rocha (05)	9 459	4 759	1 121 (a)		192 (a)		0	133	8	136	14 329
Salto	12 908	5 846	1 357	100	306	103	3	213	0	56	32 120
San José (04)	18 112	11 563	2 209	110	810	230	0	367	0	39	22 733
Soriano	10 967	5 797	1 763	115	465	6	5	102	12	53	32 145
Tacuarembó (03)	5 100 (a)		1 086	139	1 023	78	161 (a)		123 (a)		22 307
Treinta y Tres (00)	5 432	1 889	580	23	...	...	5	63	2	80	8 480

Transporte por Carretera/ 7

Figura 9.1: Parque vehicular del Uruguay (extraída del Anuario estadístico de Transporte 2007 del MTOP, DNT Pág. 12)

Nota: En el departamento de Tacuarembó se supuso un 30 % de vehículos a gasoil y un 70 % de vehículos a nafta.

Si se considera por ejemplo que un 5 % de estos vehículos son eléctricos que pueden entregar energía a la red, entonces:

$$E_{TOT} = (382525 + 165256) \times 0,05 \times 4,03 kWh = 110 MWh \quad (9.1)$$

Si se compara el resultado anterior con los datos de la demanda eléctrica del Uruguay, por ejemplo para el 15 de julio de 2010 con un pico de demanda de 1600MW a las 20 hs³ se puede concluir que se puede disminuir en un 6 % el pico de demanda.

³extraída de los datos expuestos en la página web de la Administración Nacional del Mercado Eléctrico

Debido a que aun no está acordado el precio al cual UTE pagará los kWh de microgeneración, se utilizan los valores la Tarifa Doble Horario Residencial para el siguiente cálculo. Si se descarga a la red los 4.03kWh a la hora pico de demanda, se cobrará unos $\$6,258 \times 4,03kWh = \$25,22$ IVA incluido, y si se cargan los 4.03kWh durante la noche, se tendrá que pagar unos $\$2,289 \times 4,03kWh = \$9,22$, por lo tanto se estaría ganando unos \$ 16 diarios, o sea unos \$5840 anuales.

9.2. Vehículo Híbrido

De acuerdo a las simulaciones realizadas, los vehículos híbridos configuración serie no presentan ventajas significativas si se los compara con vehículos convencionales; ya que en régimen carretero el rendimiento es menor. Este resultado puede explicar que las tecnologías de los vehículos híbridos serie, que fueron las primeras en implementarse en la industria automotriz debido a su simpleza, estén hoy en día casi obsoleta.

Capítulo 10

Mejoras Futuras y Agradecimientos

De acuerdo a los resultados obtenidos y al análisis de los mismos, se cree conveniente para futuros trabajos profundizar en los siguientes puntos.

- Implementar caja de cambios.
- Implementar frenos mecánicos.
- Implementar el modelo dinámico del ICE.
- Estudiar otras arquitecturas de los HEV.

Por otro lado, se desea agradecer a las siguientes personas por haber colaborado o servido de guía a lo largo de este proyecto.

- Gonzalo Casaravilla - Tutor General del Proyecto.
- Fernando Berrutti - Co-Tutor del Proyecto.
- Alejandro Pascual - Docente del Curso Introducción a la Teoría de Control.
- Mario Richino - Gerente Técnico de Ajax (Toyota) - Uruguay.

Capítulo 11

Anexo

11.1. Transformadas

11.1.1. Transformada de Clark

La transformación de Clarke es una transformación lineal que proyecta tres magnitudes instantáneas de un sistema trifásico abc , en tres magnitudes instantáneas perpendiculares entre sí, marco de referencia $\alpha\beta 0$.

Colocando el marco de referencia $\alpha\beta 0$ tal que coincida el vector a del sistema trifásico con el vector α , se obtiene el diagrama de la figura 11.1 .

Realizando la proyección de los ejes abc sobre los ejes perpendiculares $\alpha\beta 0$ se obtienen la matriz transformada de Clark $[T_{\alpha\beta 0}]$, y su inversa $[T_{\alpha\beta 0}]^{-1}$ al invertir la matriz encontrada.

$$[T_{\alpha\beta 0}] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (11.1)$$

$$[T_{\alpha\beta 0}]^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (11.2)$$

Es importante recalcar que el sistema ortogonal definido por el marco de referencia $\alpha\beta 0$ es estacionario, y que las magnitudes descritas no se toman en términos de fasores, sino como magnitudes instantáneas.

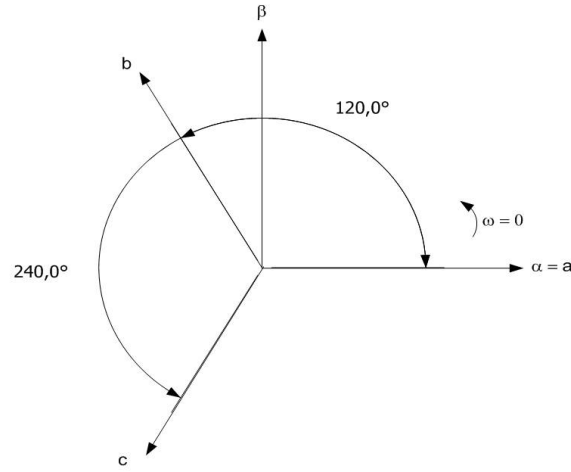


Figura 11.1: Sistema trifásico abc en el marco de referencia $\alpha\beta 0$

11.1.2. Transformada de Park

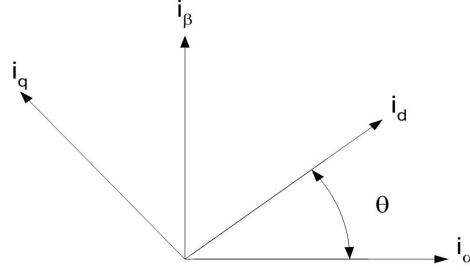
La transformación de Park es una transformación lineal que proyecta tres magnitudes instantáneas de un sistema trifásico abc , en tres magnitudes instantáneas perpendiculares entre sí, marco de referencia $dq0$. Este nuevo marco de referencia gira a una determinada velocidad angular respecto al marco estacionario de Clark.

Los ejes d y q giran en sentido antihorario con velocidad ω estando los ejes α y β en reposo, por lo cual se está proyectando una magnitud eléctrica referida en ejes estáticos, sobre ejes que están girando a una velocidad ω . Colocando los sistemas de referencias de acuerdo a la figura 11.2 el ángulo existente entre los ejes α y d es $\theta = \omega t$, teniendo la siguiente relación¹:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (11.3)$$

Utilizando la transformada de Clark (ecuación 11.1) sin la componente de secuencia cero en la relación 11.3 se tiene que:

¹La magnitud eléctrica tomada para ejemplificar es la corriente referida al marco de referencia dq y al marco de referencia $\alpha\beta$.

Figura 11.2: Sistema de referencia dq en el marco de referencia $\alpha\beta$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \times \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11.4)$$

Operando e introduciendo la componente de secuencia cero para descripción de sistemas no balanceados se obtiene la siguiente relación.

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (11.5)$$

Por lo tanto de acuerdo a la disposición de los ejes α y β de la figura 11.2, y al ángulo existente θ entre d y α se define la transformada de Park $[T_{dq}(\theta)]$, y su inversa $[T_{dq}(\theta)]^{-1}$ al invertir la matriz encontrada.

$$[T_{dq}(\theta)] = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (11.6)$$

$$[T_{dq}(\theta)]^{-1} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (11.7)$$

11.2. CD adjunto

En el CD adjunto a esta documentación, se encuentran todos los modelos de EV que se implementaron para las diferentes tipos de batería, y diferentes ciclos de conducción (urbano, carretero); y los modelos de HEV implementados, máximo PPS ciclo urbano y On-Off ciclo carretero.

Para cada modelo existen dos archivos: `parametros.m` y `resultados.m`. En los archivos `parametros.m` se encuentran todos los parámetros del modelo del vehículo implementado, por lo tanto si se desea correr el modelo previamente se tendrá que ejecutar este archivo. En los archivos `resultados.m` se encuentran todas las gráficas y resultados expuestos en la documentación. Si se desea ver los gráficos y resultados se ejecuta este archivo y se cargan los datos `BATERIA.mat` Y `MOTOR.mat` para el caso del EV, y `BATERIA.mat`, `MOTOR.mat` y `EnergíaConsumida.mat` para el caso del HEV.

También en el CD se encuentra este documento en formato digital, como a su vez la bibliografía consultada.

Bibliografía

- [1] Autor desconocido, *Metric mind corporation-driving cycles*, <http://www.metricmind.com/data/cycles.pdf>, 2002.
- [2] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, and Ali Emadi, *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles-fundamentals theory and design*, 2nd ed., CRC Press LLC, New York, 2009.
- [3] S.M. Nayeem Hasan, *Hybrid electric vehicle powertrain: On-line parameter estimation of an induction motor drive and torque control of a pm bldc starter-generator*, The Graduate Faculty of the University of Akron, 2008.
- [4] Gregor Hoogers, *Fuel cell technology handbook*, CRC Press LLC, Florida, 2003.
- [5] I. Husain, *Electric and hybrid vehicles design fundamentals*, New York, 2005.
- [6] The MathWorks, *Ayuda de bloques de matlab*, Product Help, 2009.
- [7] Chee-Mun Ong, *Dynamic simulation of electric machinery*, Prentice Hall PRT, New Jersey, 1998.
- [8] D. Cohn R Méndez, A. del Pino, *Control vectorial de un motor de inducción*, IIE, FIng, UdelaR, 1999.
- [9] James Larminie y Andrew Dicks, *Fuel cell systems explained*, John Wiley and Sons, 2003.
- [10] D.Linden y Thomas B. Reddy, *Handbook of batteries*, 3rd ed., McGraw-Hill, 2002.

Autos Híbridos y Eléctricos

Proyecto Fin de Carrera 2009-2010

Gastón Hernández Acosta
gas_her@hotmail.com

Martín Mora Lemes
mtinchomora@gmail.com

Sergio Santana Negrín
snsrgio@gmail.com

Universidad de la República
Facultad de Ingeniería
Instituto de Ingeniería Eléctrica
Herrera y Reissig 959, Montevideo, Uruguay

Resumen

En este documento se presenta el Proyecto de Grado Autos Híbridos y Eléctricos correspondiente a la carrera de Ingeniería Eléctrica, en el que se investigan desde el punto de vista energético las nuevas tecnologías de autos híbridos y eléctricos.

1. Introducción

En la actualidad existen tres tipos de sistemas de propulsión para tracción de vehículos con el fin de disminuir o eliminar la dependencia del petróleo y la emisión de gases de efecto invernadero, los mismos son:

- vehículos eléctricos (EV),
- vehículos híbridos (HEV),
- vehículos híbridos enchufables.

El sistema de propulsión de los vehículos eléctricos está formado por un banco de baterías, convertidores electrónicos de potencia, controladores y motor de tracción eléctrico. Mientras que en los vehículos híbridos el sistema de propulsión está compuesto además por un motor de combustión interna. Los sistemas de propulsión de los vehículos híbridos enchufables, son similares a los que poseen los vehículos híbridos convencionales, con la variante de que el banco de baterías se puede cargar además, a través de la red eléctrica.

En el presente trabajo se realizan estudios del sistema de propulsión eléctrico, y del sistema de propulsión híbrido configuración serie. En los sistemas de propulsión eléctricos se analiza de acuerdo al régimen de conducción (urbano o carretero), el rendimiento para diferentes bancos de

baterías (Plomo Ácido, Níquel Metal, Litio-Ion), y se compara energéticamente con vehículos convencionales. Mientras que para el sistema de propulsión híbrida se analiza el desempeño para diferentes regímenes de conducción (urbano, carretero), y también se compara energéticamente con los vehículos convencionales.

2. Arquitecturas

2.1. Vehículo Eléctrico

El tren de tracción para un vehículo eléctrico (como se muestra en la Figura 1), está formado básicamente por dos subsistemas: el eléctrico de propulsión, y la fuente de energía. El subsistema eléctrico de propulsión está compuesto por el controlador del vehículo, el convertidor electrónico de potencia, el motor eléctrico, la transmisión mecánica y las ruedas. El subsistema Fuente de Energía, incluye el banco de baterías y el convertidor DC/DC.

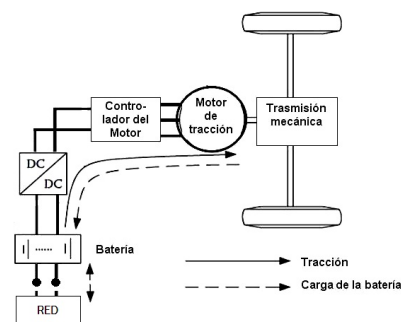


Figura 1. Configuración de un vehículo eléctrico (basada en imagen extraída de [1], pág. 128)

2.2. Vehículo Híbrido Serie

Una transmisión híbrida serie es aquella en la que dos fuentes de energía eléctrica alimentan una planta eléctrica simple (motor eléctrico) que impulsa el vehículo. La configuración que se utiliza más comúnmente es la que se muestra en la Figura 2. La fuente de energía unidireccional es un tanque de combustible y el convertidor de energía unidireccional (planta de energía) es un Motor de Combustión Interna (ICE), acoplado a un generador eléctrico. La salida del generador eléctrico se conecta a un bus de potencia DC a través de un convertidor electrónico controlable (inversor bidireccional). La fuente de energía bidireccional es un banco de baterías conectado al bus de potencia DC mediante un convertidor electrónico de potencia (convertidor DC/DC), controlable.

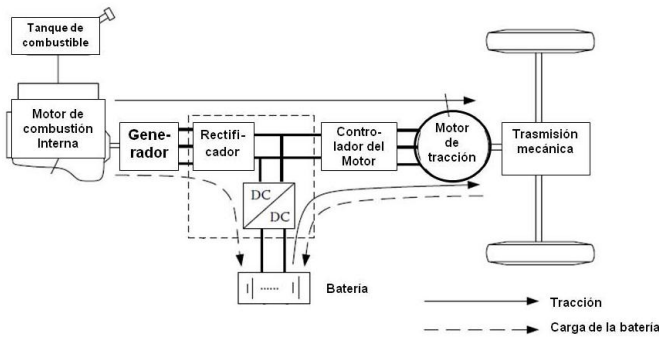


Figura 2. Configuración en serie de un híbrido con propulsión eléctrica (basada en imagen extraída de [1], pág. 128)

3. Componentes

3.1. Baterías

• Vehículo Eléctrico

Se simula el modelo del vehículo eléctrico con diferentes tipos de baterías, las cuales son utilizadas en este sistema de propulsión:

- Plomo Ácido (Lead-Acid),
- Níquel Metal (NiMH),
- Ion Litio (Li-ion).

El banco de baterías está compuesto por 28 celdas en serie de 12V cada una y tiene una capacidad de 48Ah. Para cada tipo de batería se ajustó el peso del vehículo de acuerdo a

Batería	Energía Específica (Wh/kg)
Plomo-Ácido	35
Níquel-Metal	75
Litio-Ion	150

Tabla 1. Energías específicas para los diferentes tipos de baterías. (extraída de [3], página 1.13)

su energía específica, manteniendo constante la capacidad, tensión nominal y cantidad de celdas de la batería.

• Vehículo Híbrido

El banco de baterías está compuesto por 28 celdas en serie de 7.2V cada una y tiene una capacidad de 6.5Ah. Para este caso solo se simula baterías de Plomo Ácido de tracción.

3.2. Convertidores Electrónicos de Potencia

• Convertidor DC/DC

Son comunes las fuentes de alimentación formadas por celdas de baterías en serie para conseguir una tensión más alta. Sin embargo, el apilamiento de celdas necesario no es posible en muchas aplicaciones de alta tensión debido a la falta de espacio.

Los convertidores DC/DC tipo Boost pueden aumentar la tensión y reducir el número de celdas.

El convertidor adapta la baja tensión de la batería (200V), al bus de continua que alimenta el motor de corriente alterna a una tensión de 500V.

• Convertidor DC/AC

Cuando los EV y los HEV tienen como motor de propulsión un motor eléctrico de corriente alterna, se utilizan *Convertidores DC/AC* denominados *inversores*, debido a que su fuente de energía es continua (baterías, celdas de combustibles, etc.). Los inversores están constituidos por llaves apagables y diodos de potencia como se muestra en la Figura 3. El principio de funcionamiento del inversor es sencillo, las llaves se controlan de manera tal que el motor se alimenta con una tensión positiva ($V_d/2$) cuando se cierran $S1$, $S3$, $S5$ y se abren $S4$, $S6$, $S2$, y se alimenta con una tensión negativa ($-V_d/2$) cuando se abren $S1$, $S3$, $S5$ y se cierran $S4$, $S6$, $S2$. Todos los diodos proporcionan un camino a la corriente inversa de cada fase.

Ambos convertidores (Boost e Inversor), son bidireccionales. Esto significa que admiten flujo de energía en dos direcciones: Dirección Fuente-Carga (vehículo en modo Tracción), y Dirección Carga-Fuente (vehículo en modo Freno Regenerativo).

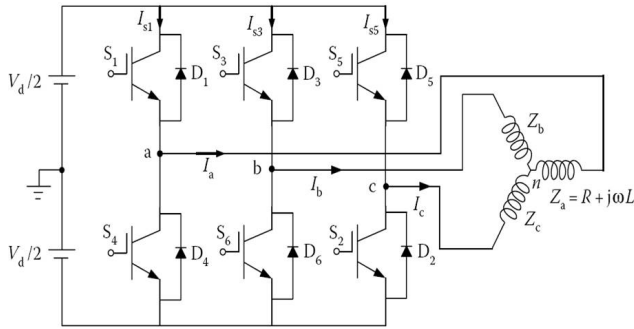


Figura 3. Convertidor DC/AC denominado Inversor (extraída de [1] Pág. 178)

3.3. Motores Eléctricos

Tradicionalmente por su tecnología "madura" y de simple control, los motores eléctricos utilizados en los sistemas de propulsión de los EV y los HEV son los motores de corriente continua. Estos motores tienen la gran desventaja de que por su principio de funcionamiento y construcción no son aptos para funcionar a altas velocidades, y requieren de un mantenimiento periódico generando un costo de operación asociado.

Debido a los avances tecnológicos y la evolución de la electrónica de potencia y de los microprocesadores, se logró implementar las complejas estrategias de control de los motores de inducción, adquiriendo dicho motor un lugar importante en los sistemas de propulsión de los EV y HEV. Comparando estos motores con los de corriente continua, tienen la ventaja de que por su principio de funcionamiento y construcción no tienen ningún costo asociado de operación, también poseen mayor potencia por unidad de volumen, obteniendo a igual potencia un motor de volumen mas chico, característica muy importante para estas aplicaciones.

3.4. Motores de Combustión Interna (ICE)

El motor de combustión interna es la planta de energía más popular para vehículos motorizados. En el futuro previsible, seguirán siendo las plantas de energía vehicular dominantes. En los HEVs, el ICE será siempre la primer elección como fuente de energía primaria. Sin embargo, la operación de un HEV difiere de la de un vehículo motorizado conven-

cional. El ICE de un HEV funciona siempre en su región óptima de operación. Usualmente los motores ICE elegidos para aplicaciones de HEV son los denominados Ciclo Atkinson los cuales se caracterizan por variar las longitudes de los tiempos de expansión y compresión respecto a los motores convencionales (Ciclo Otto, por ejemplo), logrando así un aumento de la eficiencia térmica.

4. Control del Motor de Tracción

El motor de inducción se controla mediante el método de control de velocidad propuesto en [2]. Este método consiste en controlar directamente la velocidad del motor e indirectamente el par del mismo. En forma cualitativa el principio de funcionamiento del control es el siguiente (según se muestra en la figura 4) : la velocidad que tiene que seguir el motor, velocidad de referencia, se compara con la velocidad real para generar las corrientes de referencia, i_a^* , i_b^* e i_c^* . Estas corrientes, se comparan con las corrientes de línea que está consumiendo el motor, i_a , i_b e i_c en el modulo de **Control Vectorial de Corriente**. El modulo de Control Vectorial de Corriente es el encargado de controlar al inversor para que le "entregue" al motor las corrientes de línea i_a^* , i_b^* e i_c^* para lograr la velocidad requerida.

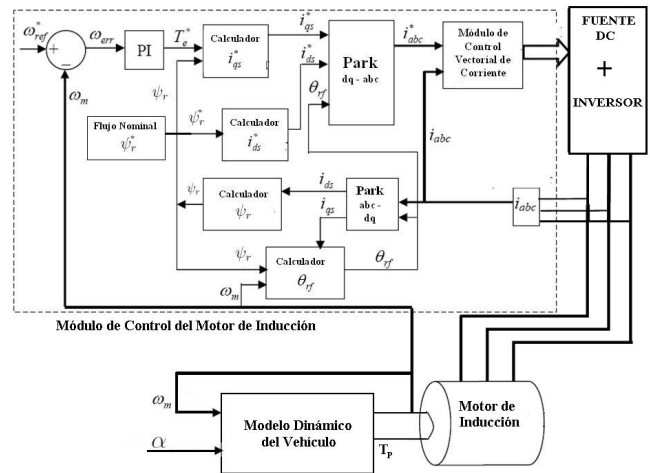


Figura 4. Módulo de Control del Motor de Inducción.

El Bloque "Modelo Dinámico del Vehículo" que aparece en la Figura 4, representa el modelo matemático de la física que interviene durante el movimiento del vehículo. Donde la entrada α es el ángulo de inclinación del terreno en que se mueve el vehículo, la entrada ω_m es la velocidad angular del motor de tracción, y la salida T_p es el par de carga que se ejerce al motor de tracción.

5. Sistemas de Propulsión Implementados

La herramienta de Software utilizada para las simulaciones es el Paquete Simulink de MATLAB. Cada uno de los componentes descritos con sus características se programaron en diversos bloques, para luego conformar las estructuras de bloques que se muestran en las Figuras 5 y 6.

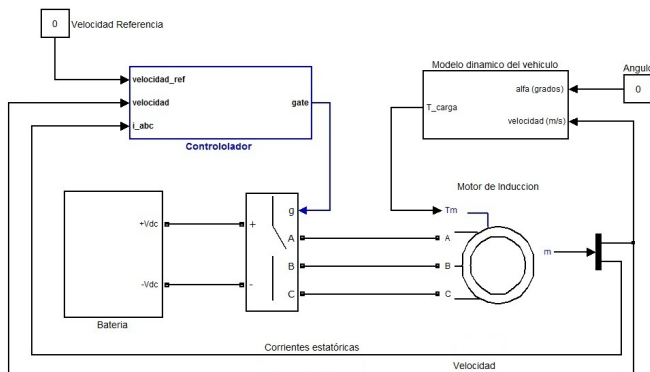


Figura 5. Esquema general de bloques del modelo de vehículo eléctrico implementado

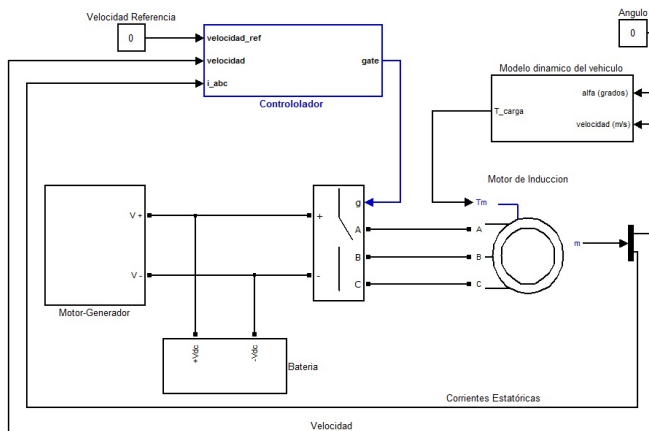


Figura 6. Esquema general de bloques del modelo de vehículo híbrido implementado

En el modelo de vehículo híbrido se implementó una estrategia de control energético para comandar las fuentes de energía (Motor Generador y Batería). Estas son:

- Max. SOC de PPS - Modo Urbano.

El objetivo de esta estrategia de control es satisfacer la energía demandada por el conductor y al mismo tiempo mantener el SOC de la PPS en un nivel alto. En esta estrategia el M/G actúa como fuente primaria de energía, y la PPS como fuente secundaria. Esta estrategia se considera apropiada para vehículos cuyo comportamiento (velocidad, aceleración, capacidad de ascenso, etc.), es el principal objetivo, tales como vehículos con patrones de manejo de parada y marcha frecuentes (modo urbano).

- Motor On-Off o del Termostato.

La estrategia de control de Max. SOC de PPS se centra en mantener el SOC de la PPS en un valor alto. Sin embargo, en varias condiciones de conducción, tales como el manejo por largo tiempo (con carga -mecánica-baja), en una carretera a velocidad constante, la PPS puede cargarse fácilmente a su nivel máximo, y el M/G se fuerza a operar con una salida de potencia menor a la óptima. Por lo tanto, la eficiencia de la transmisión se reduce. En este caso sería conveniente la estrategia de control denominada Motor On-Off o del Termostato.

6. Ciclos de Conducción

Un ciclo de conducción es un patrón de conducción estandarizado. Este patrón se describe mediante una tabla de tiempo-velocidad. La trayectoria que debe ser cubierta se divide en saltos de tiempo, principalmente segundos. La aceleración durante salto de tiempo se asume constante y como resultado, la velocidad durante un salto de tiempo es una función lineal del tiempo. Debido a que la velocidad y la aceleración son conocidas para cada punto de tiempo, la potencia mecánica requerida como función del tiempo se puede determinar mediante fórmulas. Integrando esta función en el intervalo del ciclo de conducción se obtiene la energía mecánica necesaria para el ciclo.

Los patrones de conducción utilizados para realizar las simulaciones fueron los siguientes Ciclos de Conducción europeos:

- Ciclo de Conducción Urbano ECE15

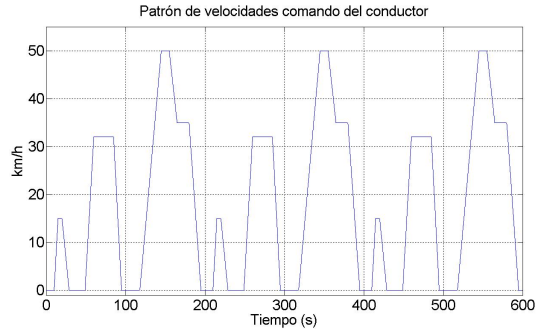


Figura 7. Velocidad de referencia, tres ciclos de conducción ECE15 concatenados.

- Ciclo de Conducción Carretero EUDCL

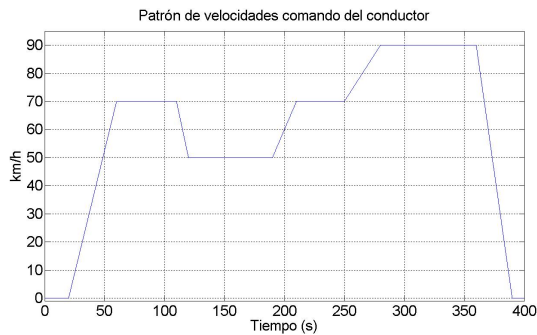


Figura 8. Velocidad de referencia, ciclo de conducción EUDCL.

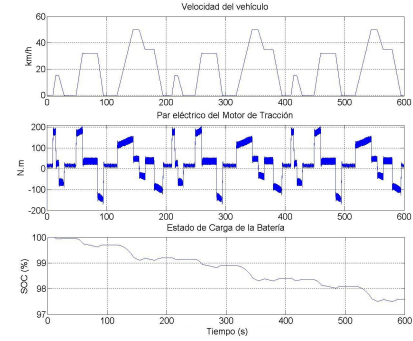


Figura 9. Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la Batería Plomo Ácido.

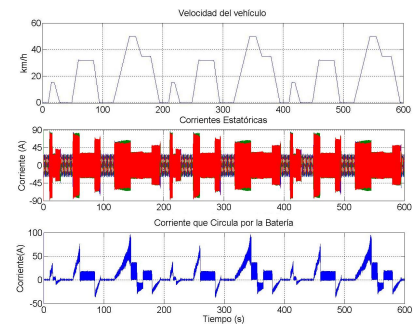


Figura 10. Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Corrientes de Línea que "alimentan" al Motor de Tracción. Corriente de carga de la Batería Plomo Ácido.

7. Simulaciones y Resultados

7.1. Vehículo Eléctrico

Las simulaciones se realizaron para tres tipos de baterías (como se comentó anteriormente). La forma general de los gráficos de estas simulaciones se muestran en las Figuras 9, 10, 11 y 12, que corresponden a Baterías de Plomo Ácido y se utilizan para ejemplificar.

En cuanto a las figuras, es importante observar los siguientes efectos. Cuando el conductor comanda un cambio de velocidad (cambio de pendiente en el Ciclo de Conducción), ya sea creciente o decreciente, el vehículo acelera o desacelera, respectivamente, y se produce un salto en el par de carga, y por lo tanto en el par eléctrico del motor de tracción. Luego al moverse a lo largo de las pendientes de velocidad, el par comienza a subir (o bajar, cuando se

está desacelerando) debido a que tiene una dependencia cuadrática con la velocidad. A esto se deben las pendientes a tramos que se observan en el par, en los instantes en que se acelera (o desacelera el vehículo). Cuando el vehículo llega a una velocidad constante,"mesetas" de velocidad, el par se estabiliza a valores constantes menores a los que se producen en las aceleraciones, ya que el término correspondiente a la derivada de la velocidad se anula. En las figuras también se observa como es afectada la pendiente del SOC de la batería cuando se producen saltos en el par, y particularmente el efecto de freno regenerativo cuando el par es negativo. Es decir, el SOC aumenta (tiene pendiente positiva) cuando el par (al igual que la corriente por la batería) es negativo. Como en las simulaciones se afectó la masa del vehículo para las diferentes baterías (Ver Tabla 1), el par eléctrico para las baterías plomo ácido es el más grande de las tres variantes consideradas, (Par máximo 190N.m Plomo-Ácido, 160N.m NiMH, y

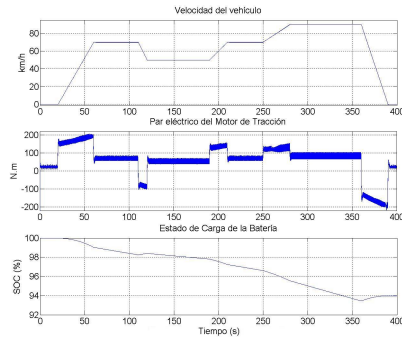


Figura 11. Velocidad del vehículo ciclo de conducción carretero EUDCL. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la Batería Plomo Ácido.

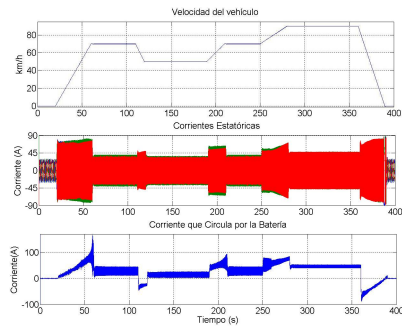


Figura 12. Velocidad del vehículo ciclo de conducción carretero EUDCL. Corrientes de Línea que "alimentan" al Motor de Tracción. Corriente de carga de la Batería Plomo Ácido.

150N.m Li-Ion), esto es porque las mismas son las más pesadas, tienen menor energía específica. Esto demuestra una de las ventajas de la nueva tecnología de baterías frente a las tradicionales de Plomo Ácido, ya que al disminuir la masa de baterías se afecta positivamente la eficiencia del vehículo, en tanto la energía se aprovecha mejor para la tracción del vehículo. De acuerdo a las eficiencias resultantes, se calculan las distancias que se puede recorrer para cada una de las variantes del vehículo propuesto (Tabla 5). Dicho calculo se realizó teniendo presente que el SOC de las baterías no puede "bajar" más de un 50%¹ ya que la tensión de las mismas "cae", y entonces el convertidor DC-DC en bornes de la batería no puede elevar la tensión para alimentar al inversor, según la demanda del motor de tracción.

¹Este limite se dedujo mediante simulaciones.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	SOC inicial (%)	SOC final (%)	Consumo (Wh)	Rendimiento (Wh/km)
ECE15	600	3.086	100	97.59	388.58	125.91
EUDCL	400	6.653	100	93.95	974.91	146.54

Tabla 2. Simulaciones para Baterías Plomo Ácido (EV)

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	SOC inicial (%)	SOC final (%)	Consumo (Wh)	Rendimiento (Wh/km)
ECE15	600	3.086	100	98.27	278.21	90.14
EUDCL	400	6.653	100	95.51	723.65	108.77

Tabla 3. Simulaciones para Baterías Níquel Metal (EV)

7.2. Vehículo Híbrido

Para este modelo, se utilizaron solo baterías de Níquel Metal como fuente de energía.

Se utilizaron además los mismos patrones de velocidades que para el EV, y las mismas consideraciones en cuanto a la relación de transmisión. Dichos patrones se muestran en las Figuras 7 y 8. Debido a que se incluyó un motor de combustión en el modelo, y que se disminuyó la energía específica del banco de baterías, se dejó el peso del vehículo definido igual al del EV con baterías de Plomo-Ácido (1450 kg).

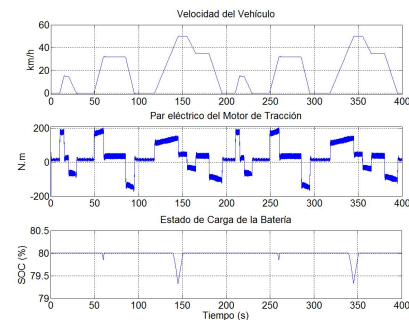


Figura 13. Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano ECE15. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la batería NiMH.

Como se muestra en la Figura 13, se ve que la batería se mantiene en el nivel máximo de SOC (maxSOCPPS=80 %), es decir el M/G² está entregando siempre su potencia óptima (dada por el ICE), ya que la carga no sobrepasa dicha demanda de potencia. Sin embargo cuando el nivel de SOC de la batería cae, esto quiere

²Se abrevia así para referirse al par Motor-Generador.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	SOC inicial (%)	SOC final (%)	Consumo (Wh)	Rendimiento (Wh/km)
ECE15	600	3.086	100	98.22	286.85	92.94
EUDCL	400	6.653	100	95.23	769.14	115.61

Tabla 4. Simulaciones para Baterías Litio Ion (EV)

Batería	Urbano	Carretero
Plomo-Ácido	64 km	55 km
Níquel-Metal	90 km	74 km
Litio-Ion	87 km	70 km

Tabla 5. Kilómetros que se puede recorrer según el tipo de batería y ciclo de conducción con un estado de carga inicial de 100 %

decir que la carga está demandando mucha potencia, y se está superando el nivel óptimo, por lo tanto la batería tiene que "ayudar" al M/G a satisfacer dicha demanda, y así el M/G puede seguir operando en su región óptima. Como las características de las simulaciones son iguales que para el EV, entonces sabemos que el motor de tracción no será exigido por arriba de sus condiciones nominales.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	Energía (MJ)	Combustible (litros)	Rendimiento km/litro - litro/100km
ECE15	400	2.057	1.315	0.09	22 - 4.5

Tabla 6. Simulaciones para Baterías Níquel Metal (HEV) Modo Urbano

Si se compara el vehículo híbrido simulado (22km/litro) con un vehículo convencional (10km/litro), resulta que con el HEV se puede recorrer más del doble de la distancia (54 %) que con un vehículo convencional. En la Figura 14, se puede ver como el SOC de la batería va aumentando o disminuyendo según sea el estado de encendido del M/G siempre dentro de la banda definida. Además se observan los cambios de pendiente cuando se produce un freno regenerativo, es decir cuando el par es negativo. Aquí se sabe también que el motor no será exigido por arriba de sus condiciones nominales como en el ciclo de conducción urbano.

La energía entregada por la batería de acuerdo a la Tabla 7 es negativa, ya que la batería absorbe energía durante este ciclo de conducción, y termina el ciclo con un SOC más alto que al comienzo. Este remanente de energía útil que queda en la batería, le permite al vehículo seguir circulando hasta

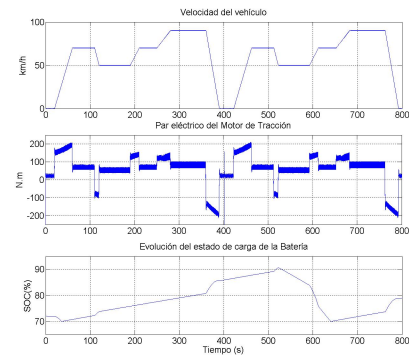


Figura 14. Velocidad del vehículo ciclo de conducción urbano EUDCL. Par eléctrico del motor de tracción. Estado de carga de la batería NiMH.

Ciclo	Tiempo (s)	Distancia (km)	Energía (MJ)	Combustible (litros)	Rendimiento km/litro - litro/100km	Energía Batería kWh
EUDCL	800	6.653	7.956	0.56	11.8 - 8.49	-1.13

Tabla 7. Simulaciones para Baterías Níquel Metal (HEV) Modo Carretero

llegar al SOC inicial (comienzo de la simulación) aunque se aya agotado todo el combustible. Lo anterior implica que el rendimiento del vehículo es en realidad un poco mayor que el obtenido.

Al igual que en las simulaciones del EV, se observa que el HEV es menos eficiente en régimen carretero que en urbano.

8. Conclusiones

8.1. Vehículo Eléctrico

Como se puede deducir de las Tablas 2, 3, y 4, los sistemas de propulsión eléctricos son mas eficientes en régimen urbano que en régimen carretero, ya que al haber gran número de desaceleraciones y paradas, el sistema puede aprovechar la energía cinética del vehículo para cargar el banco de baterías. Esto no es así en el régimen carretero ya que es un perfil de velocidades mayormente constantes y con pocas variaciones.

La fuente de energía mas eficiente (en cuanto a los kilómetros que rinde por cada Wh) de las tres comparadas, es la compuesta por bancos de baterías de Níquel Metal, sin embargo las mismas son más pesadas y ocupan más volumen que las de Litio Ion, que son un poco menos

eficientes. Es aquí entonces que el fabricante debe elegir, entre eficiencia *vs* confort, ya que si bien las baterías de Níquel-Metal son más eficientes que las de Litio Ion, las mismas ocupan más volumen quitando espacio útil en el vehículo.

Para el caso de baterías de Plomo-Ácido D25/75 de Optima Batteries (12V, 48Ah) la hoja de datos del fabricante describe que el tiempo de carga de dichas baterías con un cargador (corriente constante) de 13.8 V a 15.0 V, 10 A máximo es de aproximadamente 6 a 12 horas. Es decir, que el cargador tiene que proveer una tensión del orden del 15 % (13,8V) al 25 % (15V) por encima de la tensión nominal de las baterías y con una corriente máxima de 10A.

Para el caso particular del banco de baterías simulado, se tienen 28 celdas de 12V cada una, sumando una tensión total de 336 V, entonces se supone que la tensión del cargador es de un 20 % mayor, o sea 403,2V, y que entrega una corriente de 10A. La potencia que hay que entregar para cargar el vehículo es de 4 kW aproximadamente durante 6 horas, entonces se necesitan 24kWh para cargar el vehículo. Por lo tanto de acuerdo a la Tabla 5, uno puede recorrer 64 km dentro de la ciudad o 55 km en ruta, pero luego tiene que detener el vehículo por 6 horas (y consumir 24kWh) para poder cargarlo. Si se supone que un vehículo convencional en régimen urbano tiene un rendimiento de 10km/l aproximadamente, entonces se pueden evaluar los costos de transporte entre uno y otro vehículo.

Vehículo Eléctrico - Baterías Plomo-Ácido

Para recorrer 64 km se tiene que cargar el vehículo con 24kWh, el costo de la energía para un suministro residencial de acuerdo a la Tarifa Residencial Simple ³, es de 4,743 \$/kWh IVA incluido, por lo tanto \$113 en total.

Vehículo Convencional - Nafta

Para recorrer los mismos 64 km que el vehículo eléctrico se requieren 6.4 litros aproximadamente de nafta, y si se considera el precio del litro de nafta \$28.80 (al momento de escribir este documento), entonces se tiene un costo total \$184.

Entonces, se obtiene un ahorro del 38 % aproximadamente de costo de transporte con baterías Plomo-Ácido. Haciendo el mismo análisis para las otras baterías consideradas, se tiene un 56 % de ahorro para Níquel-Metal y un 55 % de ahorro para Litio-Ion.

La gran desventaja que se presenta es que si bien con un

³Pliego Tarifario de UTE vigente desde 01/02/2010 - Tarifa Residencial Simple considerando el segundo escalón entre 101kWh a 600kWh mensuales

vehículo convencional, se puede cargar combustible en una estación de servicio y en 15 minutos retomar el camino y recorrer otros 64 km, en un vehículo eléctrico se tendrá que esperar al menos 6 horas para poder recorrer de nuevo 64 km.

Sin embargo, si el vehículo realiza un recorrido por día menor o igual a 64 km (en el caso de las baterías de Plomo-Ácido), el vehículo deberá salir con las baterías totalmente cargadas para tener un buen desempeño durante el día, y regresar al hogar sin ningún problema desde el punto de vista energético. Con este régimen de operación, el vehículo eléctrico se tendría que cargar durante la noche para que al otro día esté con el banco de baterías cargado. En estas condiciones la tarifa más adecuada para el hogar es la Tarifa Inteligente⁴ ya que la misma tiene un costo de 2,289 \$/kWh IVA incluido durante la noche. Con este costo de energía la carga del vehículo saldrá \$55, y se obtendrá por tanto un ahorro del 69 % si se consideran baterías de Plomo Ácido, 79 % si se consideran baterías de Níquel Metal y por último un 78 % si se trata de batería Litio Ion.

Debido a que ya está en puerta la microgeneración en nuestro país, es interesante ver el siguiente análisis para el caso de las baterías de Plomo-Ácido. Si se supone que un vehículo recorre una media de 30 km por día, entonces se tendrá aproximadamente un 25 % de SOC para entregar a la red, esto es $28 \times 12V \times 48Ah \times 0,25 = 4,03kWh$ por vehículo.

Antes de continuar con el razonamiento es necesario verificar si es posible para el inversor y para las baterías entregar dicha cantidad de energía en una hora. Si se toman los 4,03kWh y se dividen entre la tensión del banco de baterías se obtiene la capacidad (Ah) necesaria para entregar dicha energía. $\frac{4,03kWh}{12 \times 28V} = 12Ah$. Como la batería es de 48Ah > 12Ah resulta que las baterías soportan dicha demanda de energía. Si se supone que se entregan los 4,03kWh en una hora a potencia constante, entonces la potencia máxima es 4,03kW que es menor que la potencia del inversor (determinada por la potencia del motor de tracción 30kW). De acuerdo a los datos estadísticos provistos por la Dirección Nacional de Transporte del Ministerio de Transporte y Obras Públicas, y tomando solo los datos correspondientes a Autos y Camionetas, se obtiene lo siguiente:

Total Autos y Camionetas

Nafta 382.525

Gasol 165.256

⁴Pliego Tarifario de UTE vigente desde 01/02/2010 - Tarifa Doble Horario Residencial-

Nota: En el departamento de Tacuarembó se supuso un 30 % de vehículos a gasoil y un 70 % de vehículos a nafta.

Si se considera por ejemplo que un 5 % de estos vehículos son eléctricos que pueden entregar energía a la red, entonces:

$$E_{TOT} = (382525 + 165256) \times 0,05 \times 4,03 kWh = 110 MWh \quad (1)$$

Si se compara el resultado anterior con los datos de la demanda eléctrica del Uruguay, por ejemplo para el 15 de julio de 2010 con un pico de demanda de 1600 MW a las 20 hs⁵ se puede concluir que se puede disminuir en un 6 % el pico de demanda.

Debido a que aun no está acordado el precio al cual UTE pagará los kWh de microgeneración, se utilizan los valores la Tarifa Doble Horario Residencial para el siguiente cálculo. Si se descarga a la red los 4.03 kWh a la hora pico de demanda, se cobrará unos $\$6,258 \times 4,03 kWh = \$25,22$ IVA incluido, y si se cargan los 4.03 kWh durante la noche, se tendrá que pagar unos $\$2,289 \times 4,03 kWh = \$9,22$, por lo tanto se estaría ganando unos \$ 16 diarios, o sea unos \$5840 anuales.

8.2. Vehículo Híbrido

De acuerdo a las simulaciones realizadas, los vehículos híbridos configuración serie no presentan ventajas significativas si se los compara con vehículos convencionales; ya que en régimen carretero el rendimiento es menor. Este resultado puede explicar que las tecnologías de los vehículos híbridos serie, que fueron las primeras en implementarse en la industria automotriz debido a su simpleza, estén hoy en día casi obsoleta.

Referencias

- [1] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, and Ali Emadi, *Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles-fundamentals theory and design*, 2nd ed., CRC Press LLC, New York, 2009.
- [2] S.M. Nayeem Hasan, *Hybrid electric vehicle powertrain: On-line parameter estimation of an induction motor drive and torque control of a pm bldc starter-generator*, The Graduate Faculty of the University of Akron, 2008.
- [3] D.Linden y Thomas B. Reddy, *Handbook of batteries*, 3rd ed., McGraw-Hill, 2002.

⁵extraída de los datos expuestos en la página web de la Administración Nacional del Mercado Eléctrico

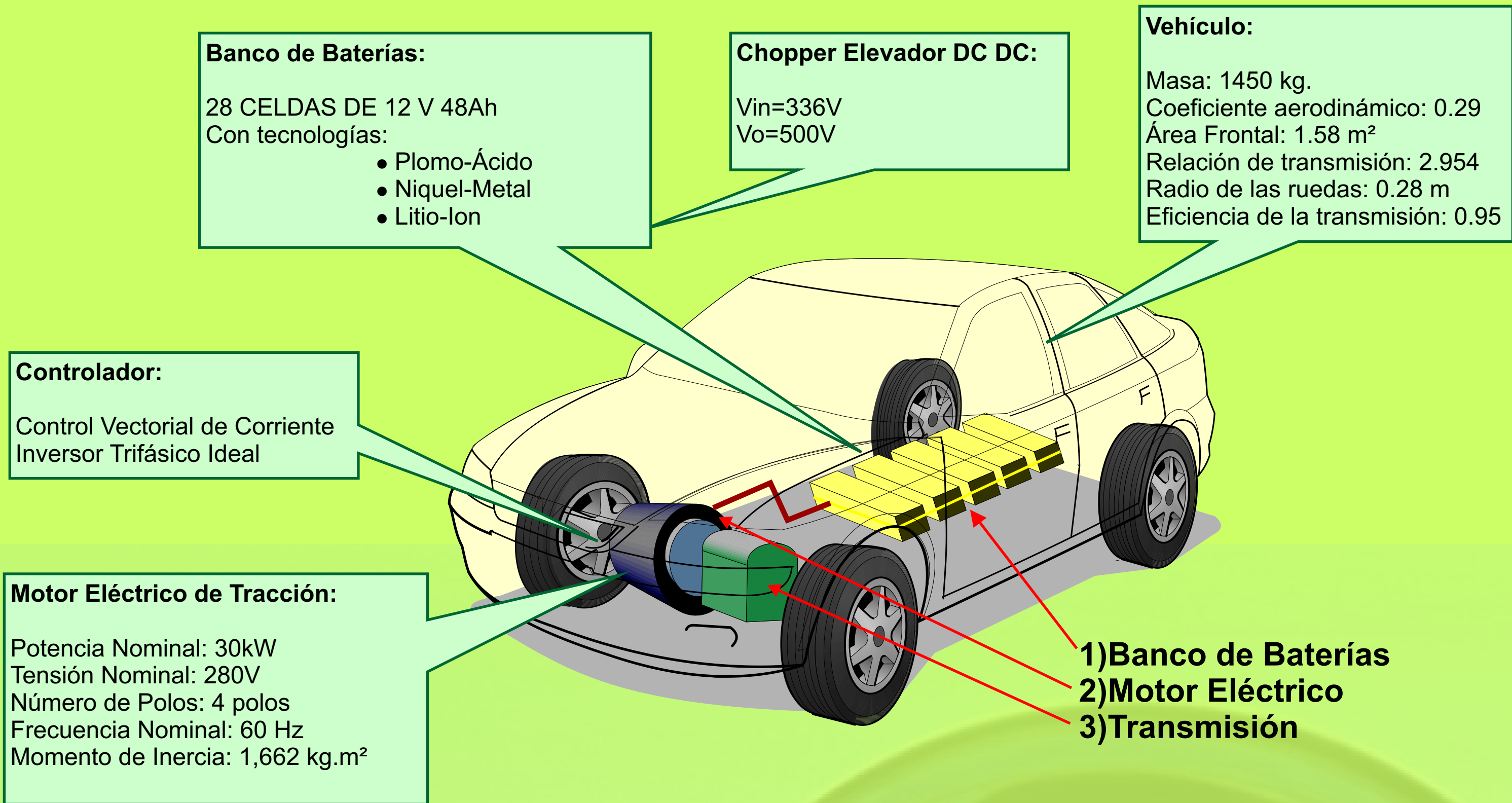
AUTOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS

CONTEXTO

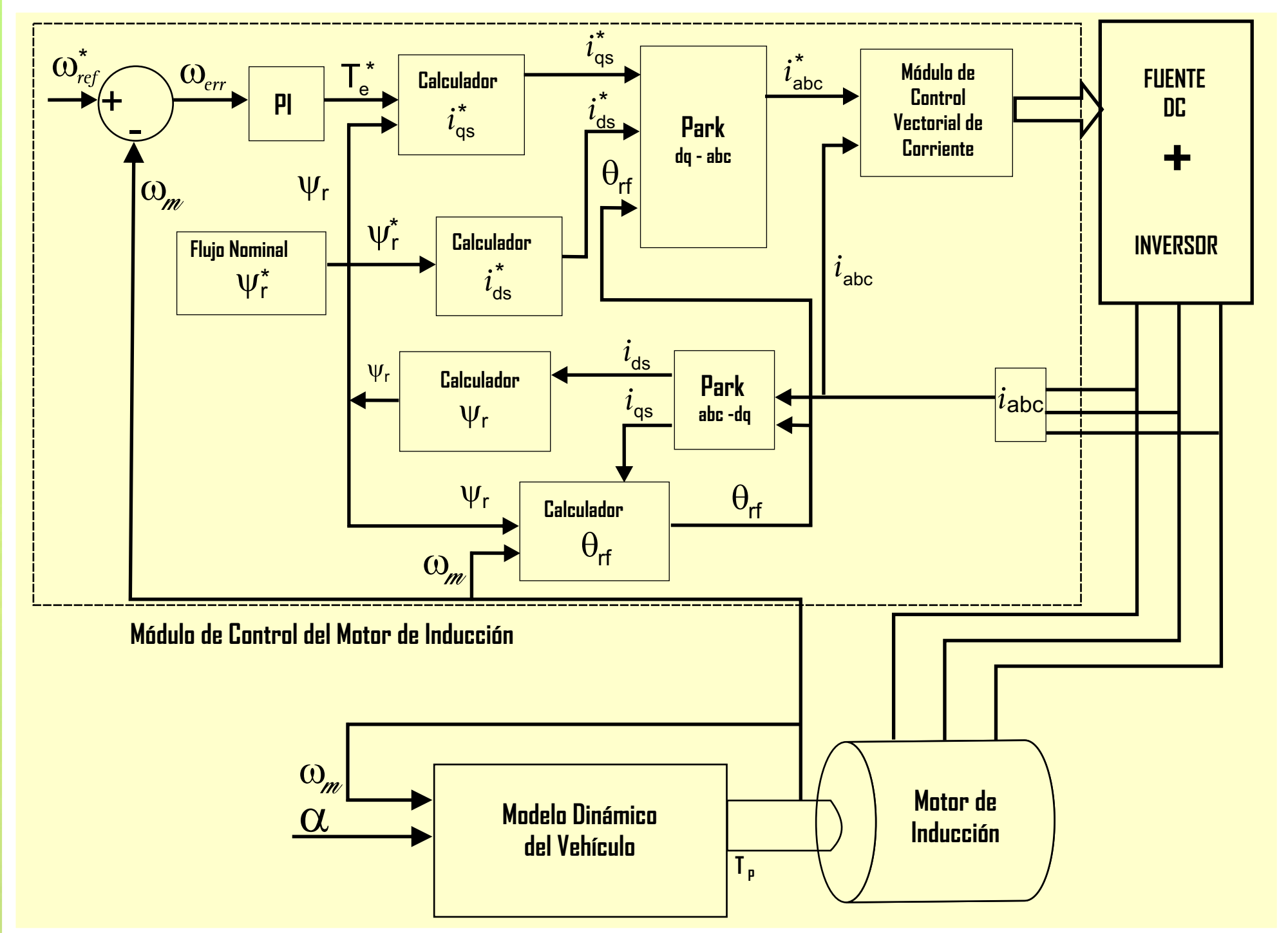
El desarrollo de la industria automotriz y el número cada vez mayor de automóviles en todo el mundo están causando graves problemas para el medio ambiente. El deterioro de la calidad del aire, los problemas del calentamiento global, y el agotamiento de los recursos del petróleo, se están convirtiendo en una seria amenaza induciendo a todos los países a la investigación, la financiación y el fomento de tecnologías "limpias", "amigables" con el medio ambiente. Dentro de estas nuevas tecnologías se encuentran los vehículos de propulsión eléctrica e híbrida.

VEHÍCULO ELÉCTRICO (EV)

Está formado por dos subsistemas: el eléctrico de Propulsión, y la Fuente de Energía. El subsistema eléctrico de Propulsión está compuesto por el Controlador del vehículo, el Convertidor Electrónico de Potencia, el Motor Eléctrico, la Transmisión Mecánica y las Ruedas. El subsistema Fuente de Energía, incluye el Banco de Baterías y el Convertidor DC/DC.

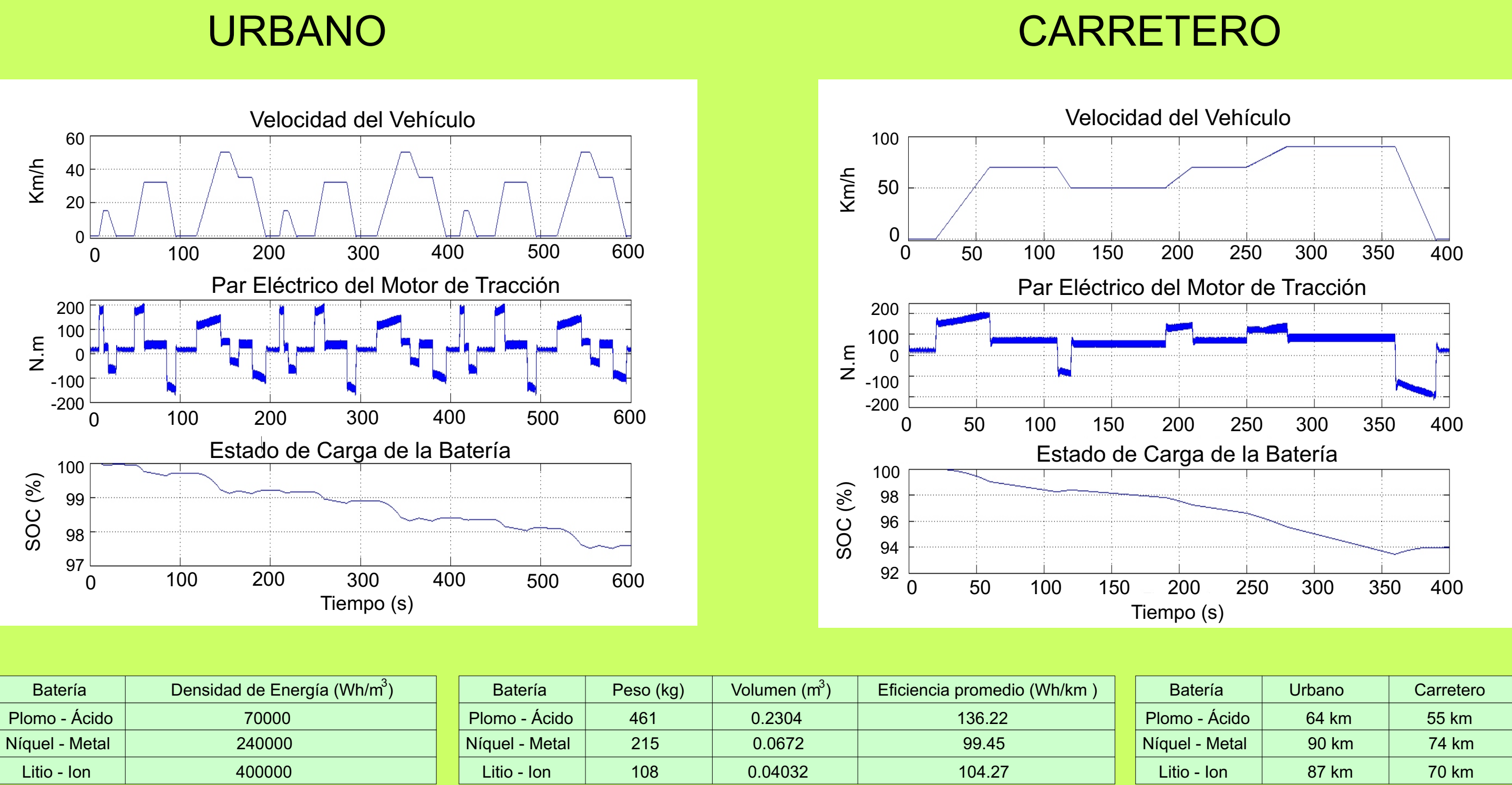


ESTRATEGIA DE CONTROL DEL MOTOR DE TRACCIÓN



SIMULACIONES EV:

Se simuló el vehículo para dos regímenes de conducción, Urbano y Carretero. Además se simuló para las tres tecnologías de baterías mencionadas.

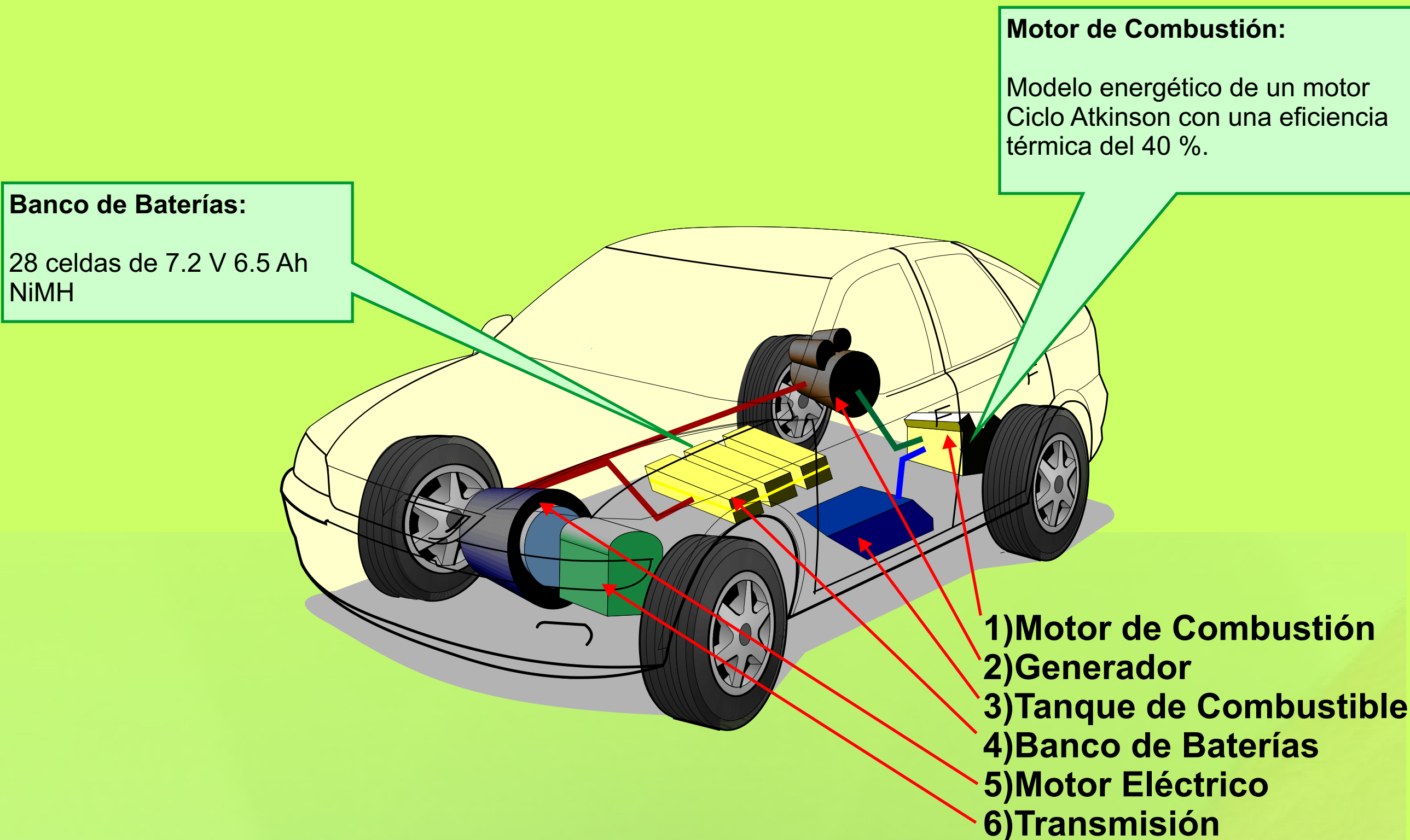


CONCLUSIONES

- ☞ Los sistemas de propulsión eléctricos son mas eficientes en régimen urbano que en carretero, ya que al haber gran número de desaceleraciones y paradas, el sistema puede aprovechar la energía cinética del vehículo para cargar el banco de baterías. Esto no es así en régimen carretero, ya que el perfil de velocidades, en este régimen, presenta pocas variaciones.
- ☞ La fuente de energía con mayor rendimiento, de las tres comparadas, es la compuesta por el banco de baterías de Níquel-Metal, sin embargo estas son más pesadas y ocupan más volumen que las de Litio-Ion.
- ☞ Comparando los costos del combustible en los vehículos convencionales contra el costo de energía eléctrica necesaria para cargar los vehículos eléctricos se obtiene un ahorro del 69% para Plomo-Ácido, 79% para Níquel-Metal y 78% para Litio-Ion.
- ☞ Suponiendo que un 5% de la cantidad de vehículos de la plaza automotriz del país fueran EVs capaces de entregar energía a la red funcionando como microgeneradores, se podría disminuir el pico de demanda diario en un 6% considerando el mayor pico registrado en el año 2010.
- ☞ De acuerdo a las simulaciones realizadas, los vehículos híbridos configuración serie no presentan ventajas significativas con respecto a los vehículos convencionales.

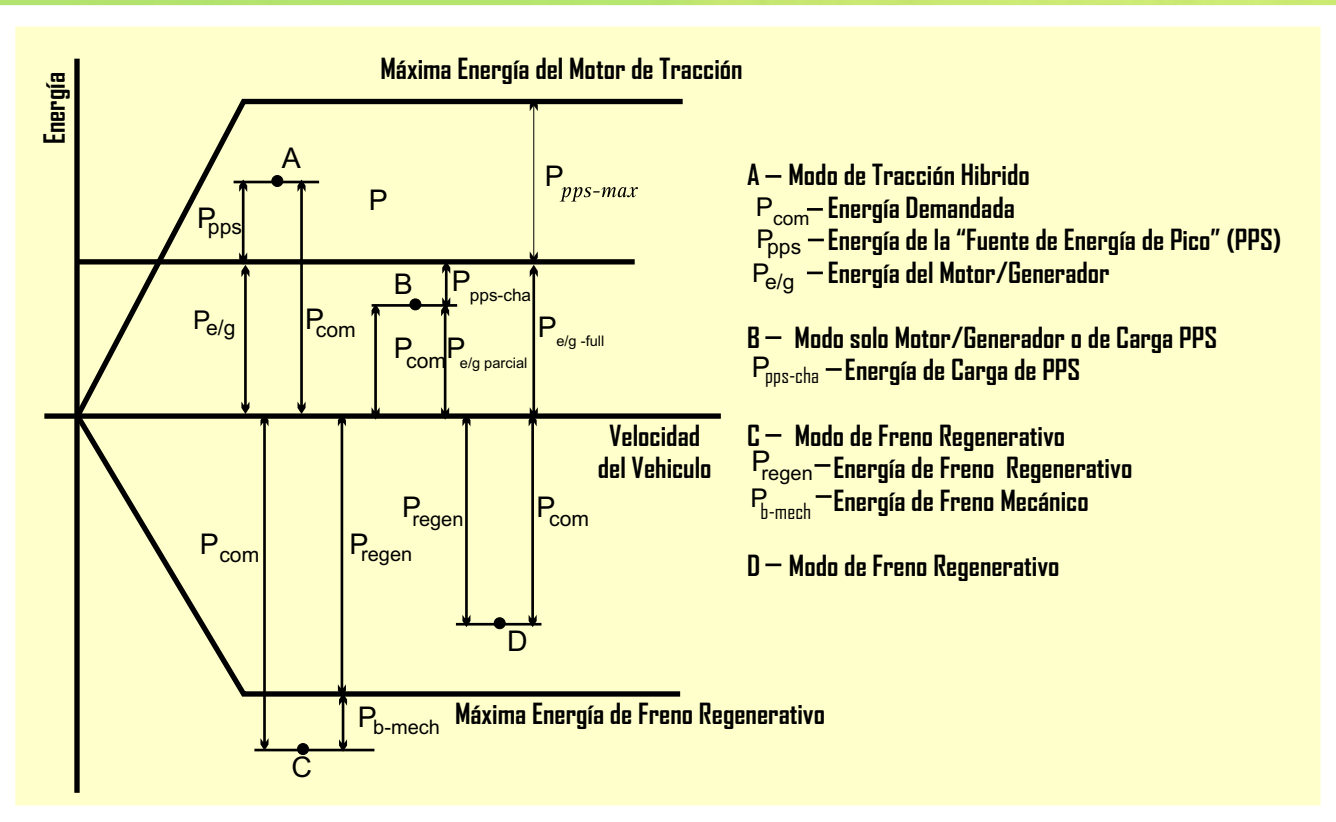
VEHÍCULO HÍBRIDO (HEV)

Está formado por dos fuentes de energía eléctrica que alimentan una planta eléctrica simple (Motor Eléctrico) que impulsa el vehículo. La fuente de energía unidireccional es un Tanque de Combustible y el convertidor de energía unidireccional (planta de energía) es un Motor de Combustión Interna, acoplado a un Generador Eléctrico. La salida del Generador Eléctrico se conecta a un Bus de Potencia DC a través de un Convertidor Electrónico Controlable (Inversor bidireccional). La fuente de energía bidireccional es un Banco de Baterías conectado al Bus de Potencia DC mediante un Convertidor Electrónico de Potencia Controlable (Convertidor DC/DC).

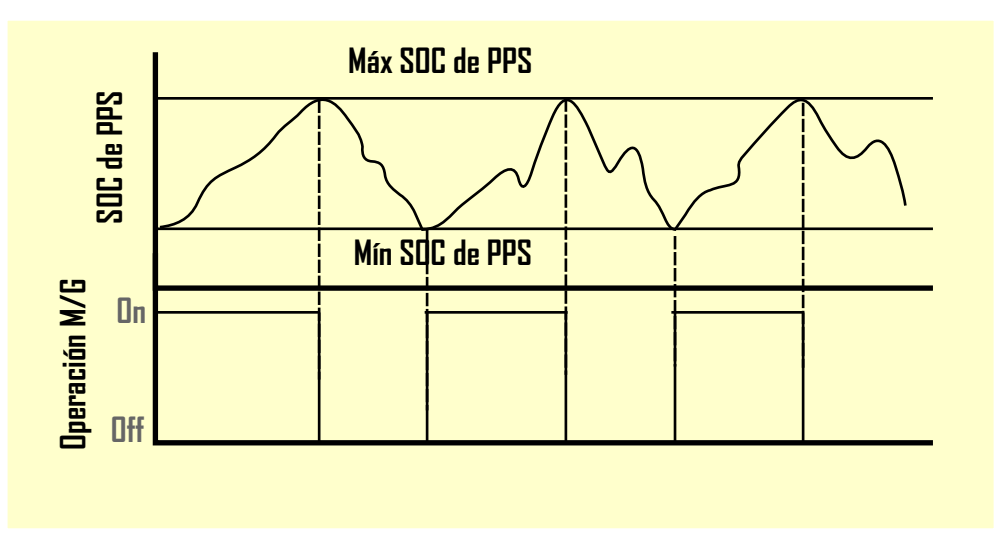


ESTRATEGIA DE CONTROL DEL MOTOR DE COMBUSTIÓN

URBANO - MAX SOC PPS



CARRETERO - ON-OFF



SIMULACIONES HEV:

Se simuló el vehículo implementado de acuerdo a las dos estrategias de control implementadas para régimen Urbano y Carretero.

