



FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA



**HACIA UN TRANSPORTE AUTOMOTOR RACIONAL Y  
EFICIENTE: AUTOS HÍBRIDOS Y ELÉCTRICOS**

**Montevideo, Uruguay  
Año 2012**



## *Agradecimientos al equipo de trabajo*

El proyecto "Hacia un transporte automotor racional y eficiente: Autos Híbridos y Eléctricos" tuvo una duración de un año y nueve meses y fue conformado por un grupo de trabajo multidisciplinario compuesto por 21 personas de los institutos de Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Mecánica y Producción Industrial de la Facultad de Ingeniería, Facultad de Química de la Universidad de la República, por UTE, y por la Dirección Nacional de Energía.

Es momento de agradecer a todos los participantes por su colaboración en el proyecto así como también a interesados en la temática que participaron en los seminarios de divulgación realizados y que con sus aportes permitieron mejorar el producto final.

Participaron en el proyecto:

Dr. Ing. Gonzalo Casaravilla (Responsable), Dr. Ing. Mario Vignolo (Coordinador General e investigador), Ing. Diego Oroño (Coordinador e investigador), Ing. Virginia Echinope, Ing. Alfonso Gonzalez, Ing. Francisco Souza, Ing. Sergio Santana, Dr. Ing. Gabriel Eirea, Ing. Fernando Chiaramello, Ing. Pablo Toscano, Dr. Ing. Pedro Curto, Ing. Gabriel Pena, Dr. Ing. Fernando Zinola, Ing. Andrés Cardozo, Ing. Carlos Tutté, Gonzalo Hermida, Diego Bentancour, Marina Faraone, Alvaro Camargo Ing. Gastón Hernandez, Lic. Cr. Fernando Constanzo como investigadores.



# Índice general

<b>Índice general</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>11</b>
1.1. Antecedentes del proyecto . . . . .	11
1.2. Descripción del proyecto . . . . .	13
1.3. Metodología de trabajo . . . . .	15
<b>2. Historia de los vehículos eléctricos</b>	<b>17</b>
2.1. Introducción . . . . .	17
2.2. Historia de los vehículos eléctricos . . . . .	17
2.2.1. Orígenes . . . . .	17
2.2.2. Primer renacimiento del vehículo eléctrico . . . . .	19
2.2.3. El caso del EV1 . . . . .	21
<b>3. Tipologías de Vehículos Híbridos o Eléctricos</b>	<b>25</b>
3.1. Introducción . . . . .	25
3.2. Tipologías de Vehículos Eléctricos . . . . .	25
3.3. Configuraciones existentes . . . . .	25
3.3.1. Aspectos generales . . . . .	25
3.3.2. Configuraciones básicas . . . . .	27
3.4. Vehículos Híbridos (HEV) . . . . .	29
3.4.1. Arquitecturas de sistema de tracción . . . . .	30
3.5. Vehículos Híbridos Enchufables . . . . .	38
<b>4. Eficiencia y Tecnologías de motores de combustión para autos Híbridos</b>	<b>39</b>
4.1. Introducción . . . . .	39
4.2. Ciclos termodinámicos de motores de combustión interna . . . . .	40
4.2.1. Ciclo Otto . . . . .	40
4.2.2. Ciclo Diesel . . . . .	43
4.2.3. Ciclo Atkinson . . . . .	44
4.3. Modelos de pérdidas de trabajo y temperaturas del ciclo . . . . .	46
4.3.1. Trabajo considerando irreversibilidades internas . . . . .	46
4.3.2. Trabajo perdido debido a las irreversibilidades asociadas a la transferencia de calor . . . . .	49
4.3.3. Temperatura de combustión . . . . .	50
4.4. Aplicación de los modelos al cálculo de consumo . . . . .	51

<b>5. Baterías secundarias para Autos Híbridos y Eléctricos</b>	<b>55</b>
5.1. Introducción . . . . .	55
5.2. Primarias . . . . .	55
5.3. Celdas o baterías Secundarias o Recargables . . . . .	55
5.4. Baterías de Níquel - Hidruro Metálico . . . . .	56
5.4.1. Características generales . . . . .	56
5.4.2. Generalidades sobre la conformación de Níquel - Hidruros Metálicos . . . . .	58
5.5. Baterías Ion-Litio . . . . .	60
5.6. Baterías con Aleaciones Metálicas de Litio y Aleaciones de Carbón Litio . . . . .	61
5.6.1. Baterías de aleaciones de Carbón Litio [48] . . . . .	62
5.6.2. Baterías de aleaciones metálicas de Litio [48] . . . . .	62
5.6.3. Algunas comparaciones útiles . . . . .	63
5.7. Baterías de Reserva y Térmicas . . . . .	64
<b>6. Celdas de combustible para Autos Eléctricos</b>	<b>65</b>
6.1. Introducción . . . . .	65
6.2. ¿Qué es una celda de combustible? . . . . .	65
6.2.1. Principio de funcionamiento . . . . .	66
6.2.2. ¿Qué es lo que limita la corriente? . . . . .	69
6.3. Conexión de celdas en serie - La placa bipolar . . . . .	70
6.3.1. Suministro de los gases y enfriamiento . . . . .	71
6.4. Características y costo de la propia celda de combustible . . . . .	72
6.5. Aspectos de la generación de combustible . . . . .	72
<b>7. Almacenamiento de hidrógeno para Autos Eléctricos</b>	<b>75</b>
7.1. Introducción . . . . .	75
7.2. Almacenamiento de combustible . . . . .	75
7.2.1. Almacenamiento de hidrógeno comprimido en tanques cilíndricos para medios de transporte . . . . .	75
7.2.2. Almacenamiento de hidrógeno líquido para medios de transporte . . . . .	76
7.2.3. Almacenamiento de hidrógeno en hidruros de metal . . . . .	77
7.3. Análisis tecnoeconómico del almacenamiento de hidrógeno . . . . .	80
7.4. Aspectos críticos en la distribución y almacenamiento del hidrógeno [50] . . . . .	80
7.4.1. Transmisión y distribución de combustible: hidrógeno versus combustibles alternativos . . . . .	81
7.4.2. Seguridad del combustible [46] [47] . . . . .	82
<b>8. Estudio de la disposición carga/descarga de celdas de Li-ion y Ni-MH</b>	<b>85</b>
8.1. Baterías Ni-MH . . . . .	85
8.1.1. Introducción . . . . .	85
8.2. Baterías Li-ion . . . . .	86
8.2.1. Introducción . . . . .	86
8.2.2. Experimentación . . . . .	86
8.2.3. Resultados . . . . .	87
8.2.4. Discusión . . . . .	94

<b>9. Motores eléctricos para autos híbridos y eléctricos</b>	<b>97</b>
9.1. Introducción . . . . .	97
9.2. Motores de continua . . . . .	98
9.2.1. Voltaje inducido en la espira giratoria . . . . .	98
9.2.2. Par inducido inducido en la espira giratoria . . . . .	100
9.2.3. Características constructivas de los motores reales . . . . .	101
9.2.4. Operación del motor de continua. . . . .	103
9.3. Motores de inducción . . . . .	104
9.3.1. Campo magnético giratorio . . . . .	104
9.3.2. El deslizamiento y el modelo eléctrico del motor en régimen . . . . .	105
9.3.3. Potencia y par del motor de inducción . . . . .	107
9.3.4. El modelo dinámico del motor de inducción [24] . . . . .	109
9.3.5. Eficiencia del motor de inducción . . . . .	113
9.4. Motores de reluctancia variable . . . . .	113
9.4.1. Funcionamiento de un motor de reluctancia . . . . .	113
9.4.2. Características constructivas y desempeño . . . . .	114
<b>10. Convertidores</b>	<b>117</b>
10.1. Convertidores DC-DC . . . . .	118
10.1.1. Convertidor Chopper . . . . .	118
10.1.2. Convertidor Boost . . . . .	120
10.1.3. Convertidores DC-DC Bidireccionales . . . . .	122
10.2. Convertidores DC-AC . . . . .	127
10.2.1. Inversores . . . . .	127
10.2.2. PWM sinusoidal . . . . .	128
10.2.3. Control vectorial . . . . .	131
<b>11. Motor Eléctrico en Régimen Generador – Frenado Regenerativo</b>	<b>133</b>
11.1. Generador de inducción y generador síncrono . . . . .	134
11.1.1. El generador de inducción . . . . .	134
11.1.2. El generador síncrono . . . . .	135
11.2. Motores en la aplicación del frenado regenerativo . . . . .	136
<b>12. Simulación del Sistema de Propulsión Eléctrico</b>	<b>141</b>
12.1. Convertidor DC-DC . . . . .	142
12.2. Inversor y máquina eléctrica . . . . .	144
12.3. Control de frenado . . . . .	146
12.4. Simulación completa . . . . .	147
<b>13. Caracterización y evolución del parque automotor</b>	<b>153</b>
13.1. Introducción . . . . .	153
13.2. Origen de los datos . . . . .	153
13.3. Porción del parque para el estudio . . . . .	154
13.4. Período de tiempo . . . . .	154
13.5. Base de datos . . . . .	154
13.6. Evolución . . . . .	156

<b>14.Desarrollo del parque automotor a futuro</b>	<b>157</b>
14.1. Escenarios a futuro . . . . .	157
14.1.1. Variable explicativa - PIB . . . . .	157
14.1.2. Escenarios de crecimiento . . . . .	158
14.2. Evolución a futuro del parque automotor . . . . .	159
14.2.1. Evolución a futuro del parque automotor - Escenario base . . . . .	159
14.2.2. Introducción de vehículos eléctricos - Formulación de escenarios . . . . .	161
<b>15.Modelado de la demanda del parque automotor híbrido - eléctrico</b>	<b>167</b>
15.1. Introducción . . . . .	167
15.2. Características generales . . . . .	167
15.2.1. Hipótesis de Trabajo . . . . .	167
15.2.2. Vehículos utilizados . . . . .	168
15.3. Modelado de la flota de autos . . . . .	169
15.3.1. Distancias de viajes . . . . .	169
15.3.2. Cantidad de viajes por período del día . . . . .	170
15.3.3. Asignación de viajes . . . . .	170
15.3.4. Horas de salida . . . . .	170
15.4. Modelado del sistema para simulación . . . . .	170
15.4.1. Inicialización . . . . .	171
15.4.2. Cálculo de potencia . . . . .	171
15.4.3. Cálculo de transiciones . . . . .	172
15.5. Resultados . . . . .	174
15.5.1. Estabilización de las condiciones iniciales . . . . .	175
15.5.2. Carga no regulada . . . . .	176
15.5.3. Carga regulada . . . . .	176
15.5.4. Carga y descarga a la red . . . . .	177
<b>16.Impacto en la demanda de energía eléctrica asociada con la reconversión del parque de automóviles</b>	<b>181</b>
16.1. Introducción . . . . .	181
16.2. Modelado de matriz energética uruguaya . . . . .	181
16.2.1. Proyección de la demanda de energía eléctrica . . . . .	182
16.2.2. Parque generador uruguayo . . . . .	182
16.3. Escenarios de penetración de vehículos eléctricos considerados . . . . .	184
16.4. Metodología de cálculo . . . . .	185
16.5. Resultados obtenidos . . . . .	185
16.5.1. Expansión pesimista . . . . .	186
16.5.2. Expansión realista . . . . .	187
16.5.3. Expansión optimista . . . . .	189
16.5.4. Resumen de resultados . . . . .	191
<b>17.Impacto en la curva de demanda de energía asociada con la capacidad de almacenamiento de los vehículos eléctricos</b>	<b>193</b>
17.1. Introducción . . . . .	193
17.2. Motivación . . . . .	193
17.3. Aspectos sobre la simulación . . . . .	194

17.4. Algunos resultados . . . . .	195
17.4.1. Carga No Regulada . . . . .	195
17.4.2. Carga Regulada . . . . .	196
17.4.3. Carga y Descarga a la red (V2G) . . . . .	196
<b>18. Impacto en la demanda de petróleo asociada con la reconversión de parque de automóviles</b>	<b>199</b>
18.1. Introducción . . . . .	199
18.2. Datos y escenarios . . . . .	199
18.2.1. Escenarios . . . . .	199
18.2.2. Datos . . . . .	201
18.3. Resultados . . . . .	202
18.3.1. Evolución de los ahorros de nafta y gasoil . . . . .	202
18.4. Evolución del consumo energético total . . . . .	204
<b>19. Impacto en la expansión y eficiencia de las redes por la utilización de la capacidad de almacenamiento y generación distribuida de los autos eléctricos</b>	<b>211</b>
19.1. Introducción . . . . .	211
19.2. Impacto de la generación distribuida en las pérdidas de la red . . . . .	211
19.3. Impacto de la generación distribuida en el uso de la red . . . . .	213
19.4. Estimación del impacto (costos) para los escenarios de penetración simulados . . . . .	214
<b>20. Impacto en la calidad del servicio eléctrico ante la proliferación de autos eléctricos con capacidad de generación distribuida</b>	<b>217</b>
20.1. Introducción . . . . .	217
20.2. Modelado de la red de distribución de baja tensión con alta penetración de vehículos eléctricos . . . . .	218
20.2.1. Circuito eléctrico . . . . .	218
20.2.2. Cargador de baterías . . . . .	218
20.3. Circuitos y escenarios seleccionados . . . . .	222
20.3.1. Circuitos estudiados . . . . .	222
20.3.2. Escenarios seleccionados . . . . .	225
20.4. Resultados . . . . .	226
20.4.1. Resultados Carrasco . . . . .	226
20.4.2. Resultados Pocitos . . . . .	228
20.4.3. Resultados Punta Carretas . . . . .	230
20.5. Armónicos individuales de corriente . . . . .	233
20.5.1. Resolución ENRE 99/97 . . . . .	233
<b>21. Experiencias en la Conversión de un Vehículo de la Flota de UTE a Eléctrico[99]</b>	<b>237</b>
21.1. Introducción . . . . .	237
21.2. Características del vehículo . . . . .	238
21.2.1. Características técnicas . . . . .	238
21.2.2. Prestaciones de diseño . . . . .	238
21.3. Camino recorrido . . . . .	239
21.3.1. Conversión . . . . .	239
21.3.2. Compra de Baterías . . . . .	239
21.3.3. Trámites . . . . .	239

21.3.4. Lugar de trabajo del vehículo . . . . .	240
21.4. Resultados obtenidos . . . . .	240
21.4.1. Prestaciones reales relevadas . . . . .	240
21.4.2. Costos operativos . . . . .	241
21.5. Análisis de resultados . . . . .	242
<b>22. Conclusiones finales</b>	<b>243</b>
22.1. Introducción . . . . .	243
22.2. Historia de los autos eléctricos . . . . .	243
22.3. Tipologías de Vehículos Híbridos o Eléctricos . . . . .	243
22.4. Eficiencia y Tecnologías de motores de combustión para autos Híbridos . . . . .	244
22.5. Estudio de Baterías, pilas y celdas de combustible para uso vehicular . . . . .	245
22.6. Estudio de la disposición carga/descarga de celdas de Litio/Ion y Niquel/Mh . . . . .	246
22.6.1. Trabajo siguiente . . . . .	246
22.7. Motores eléctricos para autos híbridos y eléctricos . . . . .	246
22.8. Convertidores . . . . .	246
22.9. Funcionamiento del motor eléctrico como generador, frenado regenerativo . . . . .	247
22.10. Caracterización y evolución del parque automotor . . . . .	247
22.11. Modelado de la demanda del parque automotor híbrido - eléctrico . . . . .	249
22.12. Impacto en la demanda de energía eléctrica asociada con la reconversión del parque de automóviles . . . . .	249
22.13. Impacto en la curva de demanda de energía asociada con la capacidad de alma- cenamiento de los vehículos eléctricos . . . . .	249
22.14. Impacto en la demanda de petróleo asociada con la reconversión de parque de automóviles . . . . .	250
22.15. Impacto en la expansión y eficiencia de las redes por la utilización de la capacidad de almacenamiento y generación distribuida de los autos eléctricos . . . . .	251
22.16. Impacto en la calidad del servicio eléctrico ante la proliferación de autos eléctricos con capacidad de generación distribuida . . . . .	251
22.17. Experiencias en la Conversión de un Vehículo de la Flota de UTE a Eléctrico . . . . .	252
22.18. Algunas reflexiones finales . . . . .	253
<b>A. Tabla comparativa de las diferentes baterías utilizables para vehículos eléc-     tricos</b>	<b>255</b>
<b>Índice de figuras</b>	<b>257</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>262</b>

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes del proyecto

El proyecto plantea varios temas que si bien en principio son en si mismos temas relevantes, en conjunto se presentan con un alto grado de mutua potenciación. Damos por entendido que la problemática económica, social y ambiental que supone el uso masivo de combustibles fósiles en automóviles es un motor es más que suficiente para buscar alternativas sustentables. En particular para un país como Uruguay en la que la balanza comercial indica que la factura petrolera es del orden de un cuarto de las exportaciones, no deja margen para mayores elucubraciones. En particular es en el transporte (31 % de la energía neta del país) [1], y en particular en el automotor (48 % del transporte) [1], en el que se consume gran parte de dicho petróleo, hay mucho para optimizar. No queremos entrar en mayores detalles respecto a las razones que no han permitido el desarrollo de opciones más eficientes de automotores. Ya hace varios años que en el mercado hay opciones híbridas [2] (entendidas como la incorporación a un automotor clásico de motor a combustión de un combustible fósil con un complemento eléctrico de tal forma de aumentar su eficiencia). También ya hay desde unos años opciones puramente eléctricas en las que el tema fundamental a solucionar es el necesario almacenamiento de energía. En el primer caso se obtienen rendimientos francamente tentadores pasando de automóviles que van de 6.5 a 4.5 litros para hacer 100 km [3]. Esto significa que ya hoy hay en el mercado autos que suponen un ahorro de un 30 % del combustible actualmente utilizado a tal efecto. O dicho de otra manera: ¿por qué seguimos usando masivamente automóviles que consumen 44 % más combustible?

En los autos híbridos, el ahorro de combustible básicamente se obtiene por dos razones. Por una parte por el uso de motores de explosión más eficientes (por ejemplo de ciclo Atkinson) [2][3] pero que requieren la ayuda de un complemento eléctrico ya sea para lograr fuerza motriz a baja velocidad o dicho de otra manera para permitir al motor de explosión funcionar a velocidad constante óptima. Por otra parte no es despreciable el ahorro de energía por recuperación de energía cinética durante el frenado utilizando en forma inversa el dispositivo eléctrico de fuerza motriz. En la modalidad híbrida hay diversas configuraciones dependiendo qué fuerza motriz actúa sobre la transmisión. Hay opciones en que tanto el motor de explosión y el eléctrico accionan la transmisión o opciones que una sola de ellas actúa y la otra es subsidiaria [2][3]. De acuerdo a cómo se viene desarrollando el mercado, la opción más promisoría parece ser cuando un motor de explosión a velocidad constante óptima arrastra un generador que entrega tensión continua mediante un convertidor de la que se alimenta la batería y el convertidor que alimenta

a los motores eléctricos de tracción [4]. Este último sistema (motor eléctrico/convertidor) es bidireccional por lo que permite la recuperación de energía al momento de frenado.

Luego, en las opciones puramente eléctricas, la tracción es eléctrica y el problema radica en el sistema de almacenamiento de energía. En este campo se abren dos grandes caminos, que de alguna forma se tocan en algunos puntos de su recorrido. Por una parte hay ingentes estudios a nivel mundial a los efectos de desarrollar mejores baterías secundarias, con mejor eficiencia y densidad energética desde el punto del peso y del volumen. En particular en los últimos años las opciones de autos eléctricos han salido rápidamente de las legendarias baterías de plomo, pasando fugazmente por las de Nickel-Cadmium, consolidándose en las de Nickel-metal Hydride y más recientemente casi imponiéndose las de Lithium-Ion [5]. Por otra parte y desde varios años se viene trabajando muy fuerte en todas las tecnologías asociadas con las celdas de combustible. El almacenamiento del hidrógeno para su uso como combustible es uno de los puntos de mayor estudio y desarrollo en función de las limitaciones técnicas y económicas de los ya existentes. Entre ellos el más común es el método de compresión donde el mismo se almacena bajo 170 atm en cilindros de metales resistentes a su permeación. El hidrógeno constituye una opción clave en este escenario ya que es un vector energético renovable y sustentable para el medio ambiente. Sin embargo, el empleo masivo de hidrógeno en aplicaciones móviles se encuentra limitado debido principalmente a la falta de un medio seguro y eficiente para su almacenamiento. La compresión puede ser peligrosa por las fracturas o accidentes en sus válvulas y el crio-hidrógeno por ser excesivamente costoso al tener que mantenerlo a temperaturas cercanas a los  $-200^{\circ}C$ . Entre las formas más atractivas para almacenar hidrógeno en cuanto a seguridad y practicidad se halla en una matriz sólida en forma de hidruros. En los últimos años, los hidruros complejos (la unión de dos metales con hidrógeno) han ganado gran atención debido al amplio rango de capacidades de acumulación por unidad de masa, altas densidades volumétricas y a la eventualidad de modificar la estabilidad termodinámica y la cinética electroquímica del sistema mediante el agregado de un componente "desestabilizador" (tercer metal o componente) [8][9][10][11][12][13]. Es en este punto en el que se juntan los caminos referidos, ya que en si mismos las tecnologías de almacenamiento de hidrógeno en hidruros metálicos termina siendo un proceso electroquímico con alto grado de correlación con las tecnologías de baterías secundarias que se están estudiado en la actualidad.

Un aspecto que viene tomando una relevancia creciente y que ya tiene al menos 10 años de experiencias [6][7] es el concepto del usar la capacidad de acumulación de energía de los autos eléctricos y/o generación de los autos híbridos para generar energía eléctrica en modalidad Generación Distribuida. En el caso de los autos eléctricos en la medida de que se deben cargar las baterías desde la red ya se dispone del convertidor necesario. En el caso de los autos híbridos, se dispone de una planta física capaz de generar en forma autónoma energía en base a combustibles fósiles. En definitiva en ambos casos, en determinado momento y dependiendo de la tecnología se dispone de energía almacenada (en baterías, hidrógeno, hidruros o simplemente combustible fósil) que es posible volcarla a la red eléctrica. Esta posibilidad abre muchas posibilidades y problemas. Ya hace unos años se podían leer conceptos tales como "de camino a su casa un automovilista podrá dejar el auto en el estacionamiento del supermercado y cuando salga verá que vendiendo energía durante la hora de compras ganó más plata que la que gastó en las mismas"[6]. En este mismo artículo se estimaba que cada auto podría ser una unidad de generación de entre 35 a 50 kW. En Uruguay hay en la actualidad del orden de 430.000 autos/camionetas/taxis [1], por lo que con que tan solo el 5% del parque automotor tuviese la

posibilidad de generar energía en la red en ciertas horas del día (¡en el pico de la demanda!) significaría una capacidad de generación distribuida de aproximadamente 1 GW. Esta capacidad de generación distribuida sería más que suficiente para suministrar energía en el pico de la demanda, contribuir a posponer inversiones en generación, contribuir a disminuir pérdidas en los sistemas de transmisión de energía, posponer inversiones en redes de transmisión y en algunos escenarios de baja hidraulicidad contribuir a filtrar fuentes de energía de carácter aleatorio como son la eólica y solar. El caso de sustituir una parte significativa del parque automotor por unidades puramente eléctricas, habrá que aumentar la oferta de energía eléctrica y se deberá analizar el nuevo balance petrolero. Todo dependerá de la forma en que se suministre a futuro la demanda. En el caso de una fuerte componente eólica los beneficios al interactuar con un parque de autos/baterías parecen promisorios. Incluso en el caso de comparar, frente al actual rendimiento de un motor de combustión tradicional, parece más eficiente generar en centrales de mayor eficiencia, transmitir y cargar autos eléctricos para luego usar la energía en transporte.

Respecto a las restantes tecnologías presentes en un auto eléctrico como ser los convertidores de electrónica de potencia [2][7] el mayor desafío es estudiar éstos y los necesarios sistemas intrínsecos de seguridad. En el presente proyecto se estudiará la eventual fabricación de algunas partes de autos híbridos o eléctricos. En particular no es trivial el sistema de control de recuperación de energía y frenado [14][15][16][17] en los que la consigna es recuperar toda la energía posible sin perder, o en todo caso aumentar, la seguridad de los automovilistas y transeúntes. Por lo tanto de incursionar en una próxima etapa en la elaboración de un prototipo o la incorporación de alguna de las tecnologías que es posible desarrollar en el Uruguay (como ser los convertidores y el control) es imprescindible tener dominada localmente esta temática.

En definitiva de un adecuado estudio de las tecnologías que hay y que vendrán, en el marco de las necesidades de transporte y de energía del sistema nacional, el Uruguay debe apropiarse de los conocimientos necesarios como para establecer políticas de estado en los que refiere al desarrollo de un parque automotor sustentable. Asociado con el conocimiento de las tecnologías se deben sentar las bases para una metodología de abordaje sistémico de la temática en la que se analice en conjunto las múltiples aspectos a ser tenidos en cuenta como ser evolución del parque automotor, insumos de petróleo y energía eléctrica, impactos en los sistemas eléctricos, barreras y costos.

## 1.2. Descripción del proyecto

El proyecto se divide básicamente en dos grandes módulos. El primero corresponde a estudios de las diversas tecnologías involucradas en el contexto de los autos híbridos o eléctricos. En segunda instancia se abordan diversos estudios de evaluación técnico económica entre los que se incluye un estudio de alternativas de fabricación nacional de partes de automóviles híbridos o eléctricos.

En el primer módulo de estudios de tecnologías se incluyen los motores a explosión, las baterías, las celdas de combustible, el almacenamiento de hidrógeno, los motores eléctricos, los convertidores y su control. En general son estudios en los que se analiza el estado de situación de cada tecnología, se realiza una evaluación prospectiva, se generan los modelos de utilidad necesarios para las restantes etapas del proyecto y se avalúa la eventual fabricación nacional. Respecto

a los modelos de utilidad deberán ser adecuados como para ser utilizados en el SimSEE. Esto permite realizar los estudios de impacto técnico y económicos de la adopción de determinadas estrategias de introducción de los autos híbridos o eléctricos en el sistema nacional.

En algunos temas de los planteados se realizan tareas de investigación específicos. En particular en lo que refiere a métodos de almacenamiento de hidrógeno (hidruros metálicos) ya que se ha detectado por parte del grupo de trabajo asociado que hay campo de investigación posible acordes con los recursos que se destina en este proyecto a dicha temática. En el otro tema en el que se estima se podrá avanzar en el conocimiento respecto al estado del arte es en la temática del control de los convertidores y su optimización en el contexto de ser utilizado el mismo convertidor tanto para la carga de baterías, generación hacia la red o como el accionamiento del motor eléctricos del automóvil (obviamente en el último caso no estarían presentes las otras dos funciones en forma simultánea).

Un tema a ser abordado en forma transversal durante todo el proyecto y para cada una de las tecnologías analizadas, que en si mismo puede ser catalogado de tema de investigación o al menos de innovación es la integración a herramientas de planificación energética como lo es el SimSEE los modelos de autos híbridos y/o eléctricos de tal forma de su correcta evaluación al momento de realizar los diversos estudios de impacto en el sistema eléctrico etc. en el segundo módulo del proyecto.

Para cada uno de los estudios técnico económicos del segundo módulo caben algunas consideraciones particulares:

- Caracterización de la evolución del parque de automóviles.  
Vale aclarar que no va a ser un estudio prospectivo en profundidad que tenga en cuenta eventuales cambios culturales en la forma en que se transporta la gente hoy en día. Cabe resaltar que ese estudio en si mismos es no trivial y está fuertemente asociado a una política de desarrollo de un sistema nacional de transporte público. La idea, en el marco del presente proyecto, es establecer una forma de caracterizar la evolución del parque de automóviles en función del perfil de demanda pasada incorporando hipótesis a futuro que permitan caracterizar, en función de cuotas de mercado propuestas, la evolución del parque automotor.
- Impacto en la demanda de energía eléctrica asociada con la conversión de parque de automóviles con autos híbridos y/o eléctricos.  
En este caso la problemática a abordar es incorporar al SimSEE los modelos desarrollados en el estudio tecnológico previo. Las simulaciones se harán para diversos escenarios de evolución del parque automotor. En cualquier caso se deberá contemplar el parque de generación a incorporar a los efectos de contemplar la demanda asociada.
- Impacto en la demanda de petróleo asociada con la reconversión de parque de automóviles.  
Idem. Tema anterior.
- Impacto en la expansión y eficiencia de las redes por la utilización de la capacidad de almacenamiento y generación distribuida de los autos eléctricos.  
En este caso el desafío es establecer, a partir de la información de intercambio energético

resultante del SimSEE de un determinado parque de generadores distribuidos (de acuerdo a un escenario de evolución del parque automotor), el diferencial de energía que se obtiene por la no utilización de las redes que correspondan y las eventuales consecuencias en la expansión del sistema de redes asociado.

- Impacto en la expansión de la generación por la utilización de la capacidad de almacenamiento y generación de los autos eléctricos para el alisamiento de la curva de demanda. En este caso se procede al igual que los estudios anteriores pero se presta especial atención, y de hecho es parte de los que hay que proponer, a determinado perfil de utilización de los autos por parte de los usuarios. Nuevamente en este estudio no se hará una investigación asociada al comportamiento de los usuarios sino que se propondrá una forma de caracterizar esta circunstancia que permita evaluar resultados de acuerdo a las hipótesis asumidas para el comportamiento de los usuarios.
- Impacto en la calidad del servicio eléctrico ante la proliferación de autos eléctricos con capacidad de generación distribuida. En este caso se realizará un estudio clásico de penetración de generación distribuida en redes de distribución. Una ventaja que presenta el concepto de utilizar la capacidad almacenada en baterías, es que las unidades individuales pueden adaptarse a casi cualquier requerimiento por parte del distribuidor (sin superar los valores nominales de tensión y corriente) y en particular a la forma de conexión y desconexión o al comportamiento ante la ocurrencia de huecos de tensión. En todos los casos lo que se conecta a la red es un convertidor de electrónica de potencia el cual tiene la capacidad de poder responder en forma más que inmediata, incluso en el marco de que la fuente primaria de energía sea una celda de combustible.
- Identificación de barreras para el desarrollo de un parque de autos eléctricos con capacidad de generación distribuida. Este es un estudio clásico de barreras, que de alguna forma se transformará en definitiva en una propuesta de hoja de ruta a seguir a los efectos de avanzar en la eventual planificación de la reconversión del parque automotor nacional. La elaboración del mismo se realizará a lo largo de todo el proyecto como resultado del aporte de los diversos estudios del mismo.
- Factibilidad de la fabricación nacional de autos eléctricos o partes de los mismos. La elaboración del mismo se realizará a lo largo de todo el proyecto como resultado del aporte de los diversos estudios del mismo.

### 1.3. Metodología de trabajo

La metodología de trabajo es la usual de acuerdo al perfil de cada una de las tareas. Por una parte en el caso de los relevamientos y prospectivas de tecnologías, como ya se ha expresado, además de la recopilación, ordenamiento y documentación necesaria, se trabaja en la elaboración de los modelos conceptuales que permitan luego la implementación en el paquete SimSEE. A los efectos de la validación de los modelos se utilizan resultados previos ya disponibles en los diversos grupos de trabajo o los que se identifique en la bibliografía consultada. En los casos particulares en los que se debe investigar y/o experimentar con un mayor grado de detalle se procede a realizar experiencias de laboratorio que validen los modelos planteados. Caen en esta categoría el modelado de baterías secundarias de última generación y las técnicas de control de

convertidores.

Por otra parte en el caso de los estudios técnico económicos que se realizan en el proyecto se busca establecer una metodología de análisis global de las diversas temáticas que intervienen en el problema. Si bien cada uno de los estudios puede ser realizado con diversas estrategias o herramientas, este proyecto de investigación hace especial énfasis en utilizar la herramienta SimSEE para la mayoría de las evaluaciones de impacto del proyecto. La justificación de este objetivo implícito es generar un marco conceptual que permita abordar este tipo de problemas en forma sistemática permitiendo al investigado y/o técnico concentrarse en las hipótesis y el análisis de resultados dejando el trabajo de cálculo y presentación de resultados a una herramienta de fácil utilización, desarrollo y disponibilidad como el SimSEE.

# Capítulo 2

## Historia de los vehículos eléctricos

### 2.1. Introducción

Antes de poder realizar el estudio minucioso que busca este proyecto es de interés mirar brevemente hacia atrás a fin de contextualizar lo que ha sido la evolución histórica del transporte eléctrico desde sus comienzos hasta la actualidad, pasando por los diversos vaivenes que ha atravesado la industria. No es objetivo realizar un estudio profundo sino simplemente dejarle al lector una somera idea de la historia que hay detrás.

### 2.2. Historia de los vehículos eléctricos

#### 2.2.1. Orígenes

El origen del coche eléctrico hay que buscarlo incluso antes de la aparición del motor de cuatro tiempos con el que Rudolf Diesel (motor diesel) y Karl Benz (motor de gasolina sentaron las bases del automovil actual[18].



Figura 2.1: Thomas Edison y un coche eléctrico en 1913. [19]

Entre 1832 y 1839 (el año es incierto), el hombre de negocios escocés Robert Anderson, inventó el primer vehículo eléctrico puro. El profesor Sibrandus Stratingh de Groningen, en Holanda, diseñó y construyó con la ayuda de su asistente Christopher Becker vehículos eléctricos a escala reducida en 1835.

La mejora de la pila eléctrica, por parte de los franceses Gaston Planté en 1865 y Camille Faure en 1881, allanó el camino para los vehículos eléctricos. En la Exposición Mundial de 1867 en París, el inventor austriaco Franz Kravogl mostró un ciclo de dos ruedas con motor eléctrico. Francia y Gran Bretaña fueron las primeras naciones que apoyaron el desarrollo generalizado de vehículos eléctricos. En noviembre de 1881 el inventor francés Gustave Trouvé demostró un automóvil de tres ruedas en la Exposición Internacional de la Electricidad de París.

Justo antes de 1900, antes de la preeminencia de los motores de combustión interna, los automóviles eléctricos realizaron registros de velocidad y distancia notables, entre los que destacan la ruptura de la barrera de los 100 km/h, de Camille Jenatzy el 29 de abril de 1899, que alcanzó una velocidad máxima de 105,88 km/h.

Los automóviles eléctricos, producidos en los Estados Unidos por Anthony Electric, Baker, Detroit, Edison, Studebaker, y otros durante los principios del siglo XX tuvieron relativo éxito comercial. Debido a las limitaciones tecnológicas, la velocidad máxima de estos primeros vehículos eléctricos se limitaba a unos 32 km/h, por eso fueron vendidos como coche para la clase alta y con frecuencia se comercializan como vehículos adecuados para las mujeres debido a conducción limpia, tranquila y de fácil manejo, especialmente al no requerir el arranque manual con manivela que si necesitaban los automóviles de gasolina de la época [19].



Figura 2.2: Camille Jenatzy en un coche eléctrico La Jamais Contente, 1899. [19]

Los autos eléctricos se fabricaron por docenas de empresas hasta principios de la década de 1920. Su reputación de confiables, silenciosos y eficientes los hacía atractivos. A los médicos que hacían visitas a domicilio les agradaba la idea de que el auto estaba listo tan pronto se cargaba, eliminando el largo proceso de arranque de los autos de vapor o el molesto arranque de manivela en los de gasolina. Un modelo popular era el Detroit Electric, fabricado por Anderson Carriage Company de Detroit. Disponible en varios estilos de carrocería, incluyendo uno llamado el cupé del médico, la marca tuvo sus mejores ventas a fines de la década de 1910 y principios de los años veinte [20]. En la fig. 2.3 se puede apreciar un anuncio del Detroit Eléctric.



Figura 2.3: Anuncio del Detroit Eléctric. [19]

La introducción del arranque eléctrico del Cadillac en 1913 simplificó la tarea de arrancar el motor de combustión interna, que antes de esta mejora resultaba difícil y a veces peligroso. Esta innovación, junto con el sistema de producción en cadenas de montaje de forma masiva y relativamente barata implantado por Ford desde 1908 contribuyó a la caída del vehículo eléctrico. Además las mejoras se sucedieron a mayor velocidad en los vehículos de combustión interna que en los vehículos eléctricos. A finales de 1930, la industria del automóvil eléctrico desapareció por completo, quedando relegada a algunas aplicaciones industriales muy concretas, como montacargas (introducidos en 1923 por Yale), toros elevadores de batería eléctrica, o más recientemente carros de golf eléctricos, con los primeros modelos de Lektra en 1954 [19].

### 2.2.2. Primer renacimiento del vehículo eléctrico

Después de la Segunda Guerra Mundial surgió un nuevo tipo de autos eléctricos. Muchos fabricantes independientes trataron de fabricar un auto eléctrico que resultase barato y que cubriese más distancia con una sola carga. Pero el peso de la batería y la duración de la carga seguían siendo problemas.

Algunas de esas compañías ya eran parte de la industria automotriz, incluyendo la Kish Industries de Lansing, Michigan. Su anuncio del modelo Nu-Klea Starlite mostraba un auto con una cubierta transparente tipo burbuja que según las cartas enviadas a los posibles compradores en 1961, estaba por llegar al mercado.

Con un precio de \$3,950, sin radio o calefacción, el auto prometía *una carrocería bien diseñada, baterías de ácido de plomo para suministrar la energía, un alcance de unas 40 millas con velocidades de unas 40 millas por hora*. Para 1965, otra carta de Nu-Klea decía algo distinto. *Trabajamos mucho en el auto eléctrico, gastamos mucho dinero para terminarlo, y luego nos quedamos sin fondos, por lo que ha sido temporalmente descartado*. Nunca más se supo del Nu-Klea.

La Henney Motor Company de New York usó el chasis y carrocería de un Renault Dauphine



Figura 2.4: Anuncio del Nuklea. [21]

para fabricar su auto eléctrico Henney Kilowatt en 1959, que se vendía por \$3,600. Un Kilowatt que se describió como en buenas condiciones se vendió en el 2005 en una subasta en Branson, Mo. Por \$5,194.

Renaults que han sido alterados son un tema que vuelve entre los fabricantes norteamericanos de carros eléctricos. El MARS I y el MARS II, vehículos producidos en Michigan por Electric Fuel Propulsión, eran Renault Dauphines y modelos R-10, respectivamente. En 1967 el MARS II dio el impulso para una serie de cinco estaciones de carga rápida en los hoteles Holiday Inns, junto a la carretera 94 entre Chicago y Detroit. En 1979-1980, el Lectric Leopard de la empresa U.S. Electricar Corporation de Atole, Mass., tenía como base un Renault R-5 o el Le Car, como se le conocía en el mercado norteamericano.

Uno de los autos eléctricos que se vendieron mejor fue el CitiCar, fabricado desde 1974 al 1976 por la Sebring- Vanguard Company en Sebring, Florida. Básicamente un carrito de golf con corneta, luces, señales para doblar y limpiaparabrisas, el CitiCar tenía una cabina cerrada con calefacción y radio opcionales, y tenía capacidad para dos personas algo apretadas. El CitiCar fue reemplazado por el Comuta-car, un estilo idéntico con asientos para dos. En una subasta reciente, un CitiCar modelo 1975 en buenas condiciones se vendió por \$920.



Figura 2.5: Fotografía de un Citicar. [22]

Solectria, una compañía en Woburn, Mass., dice haber fabricado más de mil vehículos eléctricos. Quizás el mejor conocido es el Solectria Force, basado en el subcompacto Geo de la General Motors. En la década de 1990, Solectria ganó las carreras American Tour de Sol de la Asociación de Energía Sostenible del Noreste varias veces.

### 2.2.3. El caso del EV1

Si se quiere detenerse a analizar la historia de los vehículos eléctricos, el caso del coche EV-1 de General Motors, merece una mención aparte. Es adentrarse dentro de un ejemplo paradigmático de que por más que se realicen invenciones y proyectos, en algunos casos los mismos no perduran por existir intereses de todo tipo. Parte de esto es relatado en el documental *Who killed the electric car?*

El coche eléctrico EV-1, cuyas siglas significan vehículo experimental número 1, asemejaba en su aspecto a un coupé de dos plazas, pero dándole en su diseño un toque mucho más futurista, en la fig. 2.6, se puede observar dicho diseño. La mayor parte de su estructura estaba construida con aluminio y materiales reciclables. Contaba con un motor eléctrico con una potencia de 137 CV (100,7 kW) y una batería con la que se podían recorrer unos 200 kilómetros.



Figura 2.6: Fotografía de un EV-1. [23]

Sin embargo, General Motors decidió suspender su comercialización en 2003, después de producir algo más de 1.000 unidades. Las principales petroleras estadounidenses y los intereses económicos de la industria del automóvil y políticos provocaron la desaparición de este coche eléctrico.

En 1996 General Motors fabrica el EV1, el primer automóvil eléctrico con altas prestaciones. Esta decisión de GM estaba motivada por la Zero Emission Vehicle Mandatory del Estado de California encaminada a promover los vehículos eléctricos de emisión cero. Para ello fabricó unas 1.100 unidades de este vehículo biplaza durante dos fases de 1997 a 1999 y luego una segunda hasta 2001. Durante este período estos vehículos fueron arrendados a flotas y particulares de California y Arizona por un período inicialmente de 3 años o 30.000 millas (48.000 km). La mayor parte de estos vehículos de acuerdo con la ZEV Mandatory recibieron una ayuda de hasta 13.000 dólares de subvención que recibía el fabricante. Muchos de sus propietarios quisieron prolongar el leasing o incluso comprarlos. GM se negó en rotundo y se limitó a ejercer sus derechos legales de retirar el vehículo y destruirlo.

La práctica de destrucción de los vehículos eléctricos por parte de sus fabricantes empezó en 2004 se revocó la ZEV Mandatory por la ZEV Regulatory, que era menos restrictiva, y daba entrada a los vehículos híbridos y propulsados por gas o biocombustibles. Curiosamente, casi de forma concertada, todas las marcas que habían suministrado coches eléctricos empezaron a ejercer su derecho de retirar sus vehículos para su destrucción cuando se revocó la ZEV Mandatory. Lo curioso es que todos estos vehículos eléctricos de no más de 3 años estaban en perfecto estado y funcionando con lo cual contribuían a mantener el aire limpio.

La primera que empezó con las destrucciones sistemáticas de sus vehículos fue GM con el EV1. Sin embargo, pronto topó con la resistencia de algunos de sus propietarios que rápidamente se organizaron en el movimiento Plug In America y DontCrush.com. Desde que iniciaron sus acciones hasta la actualidad han evitado que alrededor de 1.000 vehículos de los 5.000 que han fabricado entre las diferentes empresas de automóviles no hayan sido destruidos y continúen circulando. Los vehículos eléctricos afectados por este interés de las empresas en eliminarlos eran el EV1 de GM (1997-2001), el Toyota Rav4 EV (1997-2003), el Ford Range EV (1993-2001), el Ford Think City (2001-2004), y el Nissan Pasadena Hypermini. La lucha para evitar la destrucción de vehículos eléctricos en perfecto estado empezó en 2004.

El EV1 se construyó con los mejores avances tecnológicos del momento. Este sedán de 2 plazas podía recorrer un máximo de 140 millas (225 km) con la carga eléctrica completa de una noche. Una parte del éxito de esta notable autonomía era su aerodinámica. Por ejemplo, su coeficiente de fricción era de 0,19 cuando la mayor parte de los automóviles comerciales están en 0,30. La fricción aerodinámica disminuye la velocidad y la eficiencia con lo que se incrementa el gasto de combustible o energía. Un buen coeficiente aerodinámico supone siempre un buen ahorro energético. Como coche tenía también una buena respuesta de aceleración: de 0 a 100 km en 9 segundos y disponía de las más avanzadas prestaciones típicas de los vehículos de gama media-alta: cabina equipada con aire acondicionado, eleva lunas motorizado y cerrojo centralizado, equipo de música con CD rom y radiocasette, lunas del parabrisas antireflejo solar *electriclear*, luna trasera con sistema de descongelación, avisador de la presión del neumático, dirección asistida, asientos de cuero, instrumentación centro-montada y un panel de instrumentación completo, especialmente del estado de carga.

Los EV1 de segunda generación se empezaron a fabricar en el 1999 y se equiparon con baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) desarrolladas por GM Ovonic Battery Corp. Las baterías de NiMH no se ven afectados por la el frío extremo por lo que permitían su circulación por zonas menos templadas. Para evitar problemas por el calentamiento de estas baterías se incorporaba un sistema de refrigeración específico. Para los EV1 de primera generación era imprescindible instalar el sistema de refrigeración si se cambiaba a este tipo de baterías de nueva generación y con una mayor autonomía.

En abril de 1998 en la zona sur de California había instalados unos 300 cargadores públicos, muchos de ellos localizados en los parkings de supermercados populares. En estas instalaciones gratuitas se conseguía una recarga del 20 al 80 % en tan sólo 45 minutos con el cargador de 6,6kW a 220 voltios. Los EV1 de segunda generación con baterías de NiMH conseguían la recarga del 80 % en 10 minutos con el cargador de 50 kW. El sistema de recarga eléctrico era por inducción magnética.

Los EV1 sólo se alquilaban. En el Estado de California el precio de leasing era algo más barato debido a los incentivos gubernamentales. El precio era de 399 dólares mensuales que incluía el sistema de recarga en casa y uno de portátil para poder utilizar las estaciones de recarga públicas. El arrendamiento estaba regulado para 3 años o 30.000 millas. GM nunca se mostró con claridad respecto a la posibilidad de que al final del leasing pudiera ser adquirido en propiedad (en parte debido a que los requerimientos gubernamentales que exigen el suministro de piezas durante años y además argumentaban que el rápido avance de la tecnología quizás no lo permitiría de una forma rentable). En todo momento, la mayor parte de los usuarios manifestaron su interés por adquirirlo en propiedad, deseo que nunca fue satisfecho y que terminó como en las peores películas de terror.

No obstante, la realidad actual es bien diferente y todo indica a que no se volverá a asistir a ningún otro *asesinato* de un coche eléctrico. Los avances tecnológicos realizados han sido notables. Diversos fabricantes ya están desarrollando baterías de ión-litio con más capacidad (y, por tanto, más autonomía de kilómetros) y con menos tiempo de recarga. Éste es el pilar en el que se están basando los diversos proyectos en vías de investigación. Estas baterías son las mismas que utilizan los teléfonos móviles.[23]



# Capítulo 3

## Tipologías de Vehículos Híbridos o Eléctricos

### 3.1. Introducción

En este capítulo se describen las tipologías actuales correspondientes a las distintas configuraciones de sistemas de propulsión que existen para los vehículos híbridos y eléctricos.

### 3.2. Tipologías de Vehículos Eléctricos

Los vehículos eléctricos (EV) usan un motor eléctrico para la tracción, y baterías o pilas químicas, celdas de combustible, ultra capacitores, etc, como fuente de energía. Luego de reducir la limitación tecnológica vinculada con el almacenamiento de energía, los EV tienden a ocupar un lugar importante en la plaza automotriz de diferentes países, sustituyendo en muchos casos a los vehículos convencionales basados en motores de combustión interna (ICE - ICEV). Los EV presentan un conjunto de ventajas sobre los ICEV convencionales, tales como ausencia de emisiones de gases de efecto invernadero, independencia del petróleo y una operación libre de contaminación sonora, que los hacen atractivos a la hora de ubicarse en el mercado. 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 la misma puede ir entre los 50 y los 400 kilómetros. Por último otra de las características en las que se ahondará más adelante, que potencia el desempeño de los vehículos eléctricos en el ámbito urbano, es la alta eficiencia debido a los frenos regenerativos, quienes aprovechan la energía cinética del vehículo en el momento del frenado para cargar la batería, en vez de perder esta energía en forma de calor como sucede con los vehículos convencionales.

### 3.3. Configuraciones existentes

#### 3.3.1. Aspectos generales

Antiguamente los vehículos eléctricos eran construidos básicamente a partir de un vehículo de combustión interna, reemplazando el motor y el tanque de combustible por un motor eléctrico y un banco de baterías, respectivamente, manteniendo los demás componentes como muestra

la fig. 3.1. Debido a que estos autos presentaban un alto peso, poca flexibilidad y un bajo performance este tipo de vehículos desapareció, siendo los mismos hoy en día, diseñados desde cero.

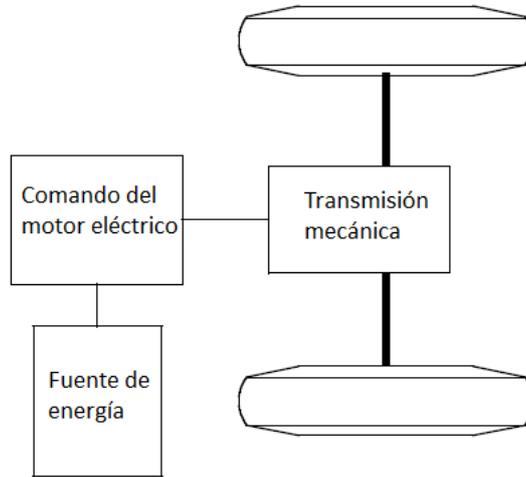


Figura 3.1: Tren de tracción primario de un vehículo eléctrico (modificado). [25]

En la fig. 3.2 se puede observar el tren de tracción para un vehículo actual, donde se observan tres sub-sistemas dos de los cuales son parte fundamental de los vehículos eléctricos de hoy en día: el sub-sistema eléctrico de propulsión, el fuente de energía, y aquel compuesto por elementos auxiliares. El primero de estos esta compuesto por el controlador del vehículo, el convertidor electrónico de potencia, el motor eléctrico, la transmisión mecánica y las ruedas. El sub-sistema fuente de energía, incluye la fuente de energía (por ejemplo banco de baterías) la unidad de gestión de la energía, y la unidad de reabastecimiento de energía. En esta unidad se encuentra el convertidor DC/DC.

Teniendo en cuenta las entradas de control impuestas por el usuario del vehículo desde los pedales (acelerador y freno), el controlador del vehículo provee las señales de control para el convertidor electrónico de potencia, quien funciona como regulador del flujo de energía entre el motor eléctrico y la fuente de energía. El flujo *inverso* o *hacia atrás* de energía es debido al frenado regenerativo del EV, y esta energía regenerada (el motor funciona como generador en esos casos) 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 ultra-capacitores poseen la habilidad de aceptar energía regenerada.

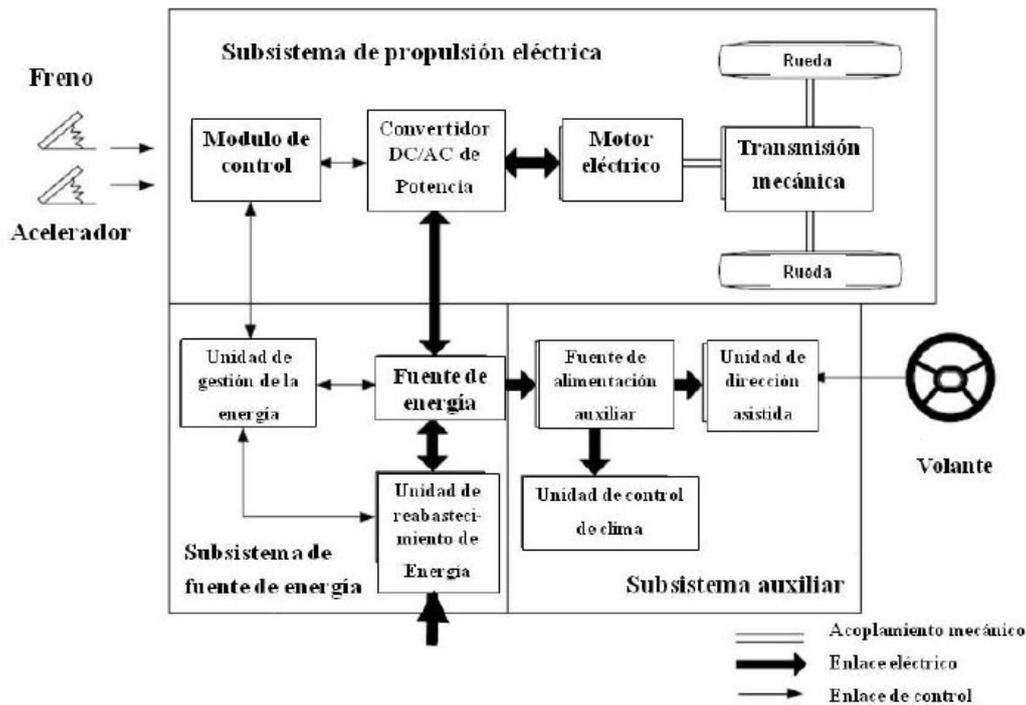


Figura 3.2: Diagrama conceptual de un tren de tracción moderno. [24]

### 3.3.2. Configuraciones básicas

Existe una gran variedad de configuraciones posibles para EV teniendo en cuenta las diferentes características de los sistemas eléctricos de propulsión y las fuentes de energía, a continuación se listan algunas de ellas que se pueden observar en la fig. 3.3.

- **Vehículo convencional con transmisión de cambios múltiples y embrague**

La fig. 3.3(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), que permite a las ruedas de ambos lados girar a diferentes velocidades cuando el vehículo circula por una curva.

- **Transmisión de un sólo cambio sin necesidad de embrague**

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 sólo reduce el tamaño y peso de la transmisión mecánica, sino que simplifica el control ya que no se necesitan cambios de engranajes.

- **Engranaje fijo integrado y diferencial**

Similar al tren de tracción del caso anterior, un motor eléctrico, el engranaje fijo y el

diferencial pueden ser integrados en una única pieza, al eje entre las ruedas.

- **Dos motores separados con un engranaje fijo**

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.

- **Engranajes directos a las ruedas con dos motores separados**

Para simplificar más aún el tren de tracción, el motor puede ser ubicado adentro de la rueda.

- **Dos motores separados, uno en cada rueda**

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 a 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.

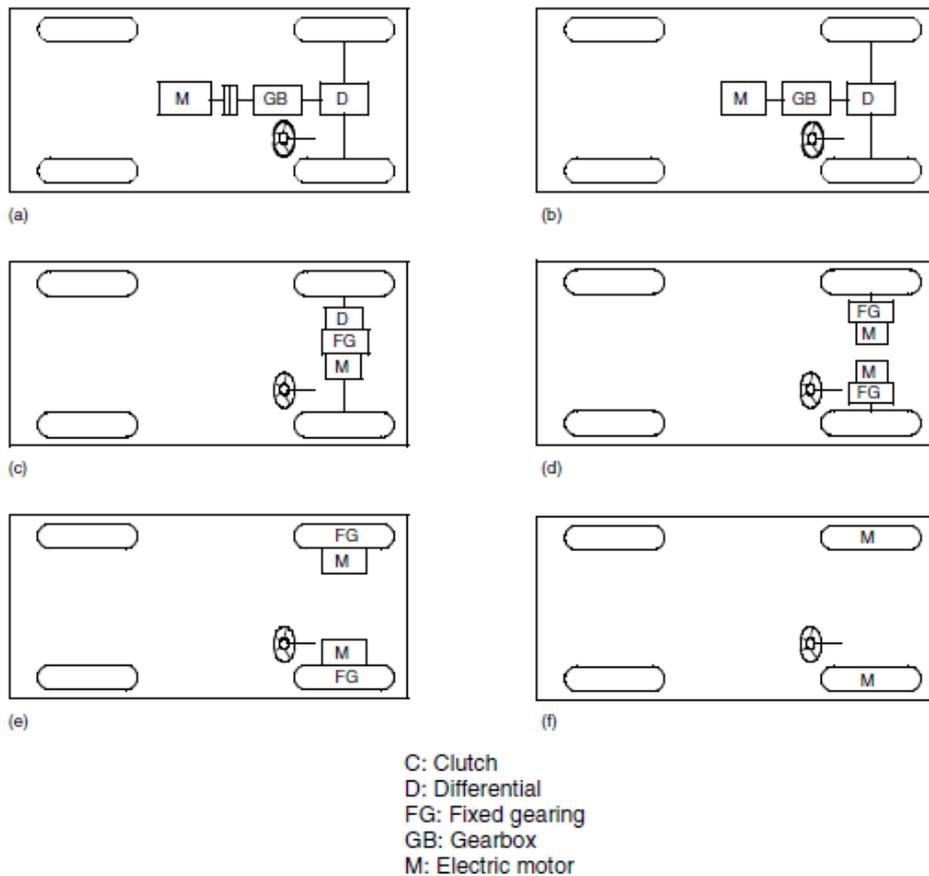


Figura 3.3: Configuraciones posibles de EV. [25]

### 3.4. Vehículos Híbridos (HEV)

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.

En la fig. 3.4 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 3.4.1 por más detalles).

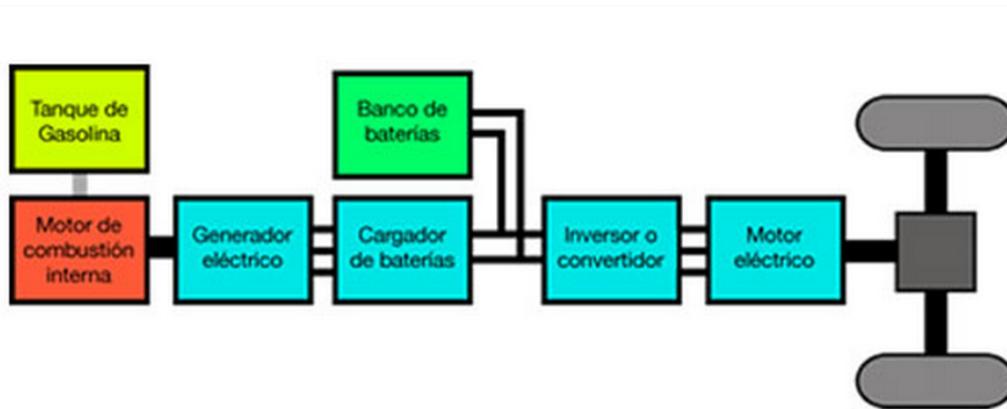


Figura 3.4: Configuración en Serie de un HEV. [26]

En esta configuración 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.

Existe un flujo de energía 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 fig. 3.5 se muestra la configuración en paralelo (ver Sección 3.4.1 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. Esta configuración también se beneficia con las ventajas que proporcionan los frenos regenerativos.

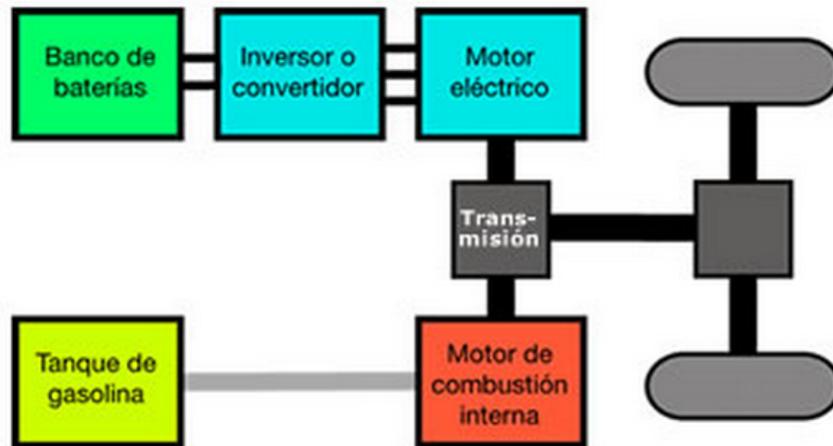


Figura 3.5: Configuración en Paralelo de un HEV. [26]

### 3.4.1. Arquitecturas de sistema de tracción

#### 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 fig. 3.4. La fuente de energía unidireccional es un tanque de combustible y el convertidor de energía unidireccional (planta de energía) es un 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 transmisión 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.

Se pueden enumerar distintos modos de operación del sistema de tracción:

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

- 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 mejorarse aún más mediante diseños especiales y tecnologías de control, que son mas fáciles 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)
- 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 tiene además algunas ventajas como: 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.
- 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:

- 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.
- El generador agrega peso y costo adicionales.
- 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.

### **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 de los motores de combustión y eléctrico se acoplan juntas mediante un acoplamiento mecánico, como se muestra en la fig. 3.5.

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:

- 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.
- 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.

## Configuración Híbrida Serie-Paralelo

Se pueden combinar las características de las configuraciones Serie y Paralelo en lo que se conoce como Configuración Híbrida Serie-Paralelo como se muestra en la fig. 3.6

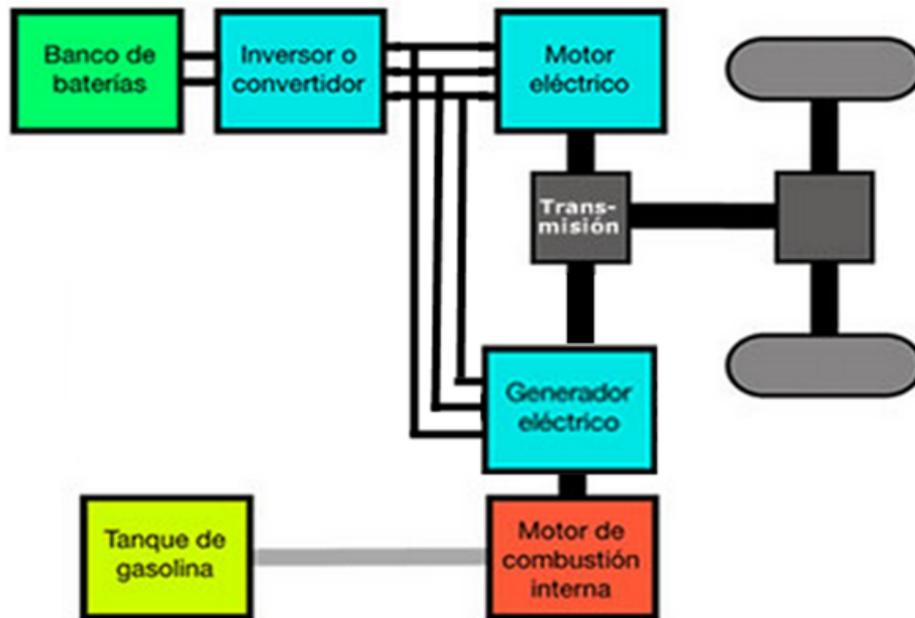


Figura 3.6: Configuración Híbrida Serie-Paralelo de un HEV. [26]

Para explicar el funcionamiento de este tipo de configuración es importante tener una idea cualitativa de los modos de acoplamiento mecánico que se utilizan habitualmente en estas aplicaciones.

### 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 fig. 3.7). Se entiende por entrada, al par que se trasmite hacia el dispositivo, y salida, al par que se trasmite 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.

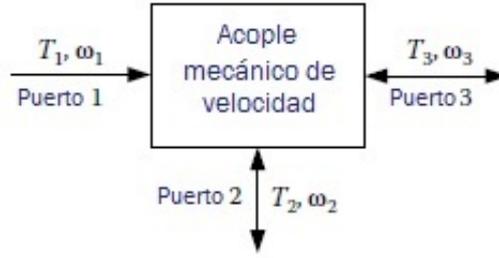


Figura 3.7: Acople de velocidad (basada en imagen extraída de [25], pág. 138).

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:

$$T_3.\omega_3 = T_1.\omega_1 + T_2.\omega_2 \quad (3.1)$$

El torque puede expresarse como:

$$T_3 = k_1.T_1 + k_2.T_2 \quad (3.2)$$

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 3.1, las velocidades angulares  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  y  $\omega_3$  están relacionadas y no pueden ser controladas independientemente, como lo expresa:

$$\omega_3 = \frac{\omega_1}{k_1} = \frac{\omega_2}{k_2} \quad (3.3)$$

- 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:

$$\omega_3 = k_1.\omega_1 + k_2.\omega_2 \quad (3.4)$$

donde  $k_1$  y  $k_2$  son constantes asociadas con el diseño estructural y geométrico. Dentro de las tres velocidades,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ , y  $\omega_3$ , 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:

$$T_3 = \frac{T_1}{k_1} = \frac{T_2}{k_2} \quad (3.5)$$

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 fig. 3.8. 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:

$$i_{1-2}^3 = \frac{\omega_2^3}{\omega_1^3} = -\frac{R_2}{R_1} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (3.6)$$

donde  $\omega_1^3$  y  $\omega_2^3$  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.

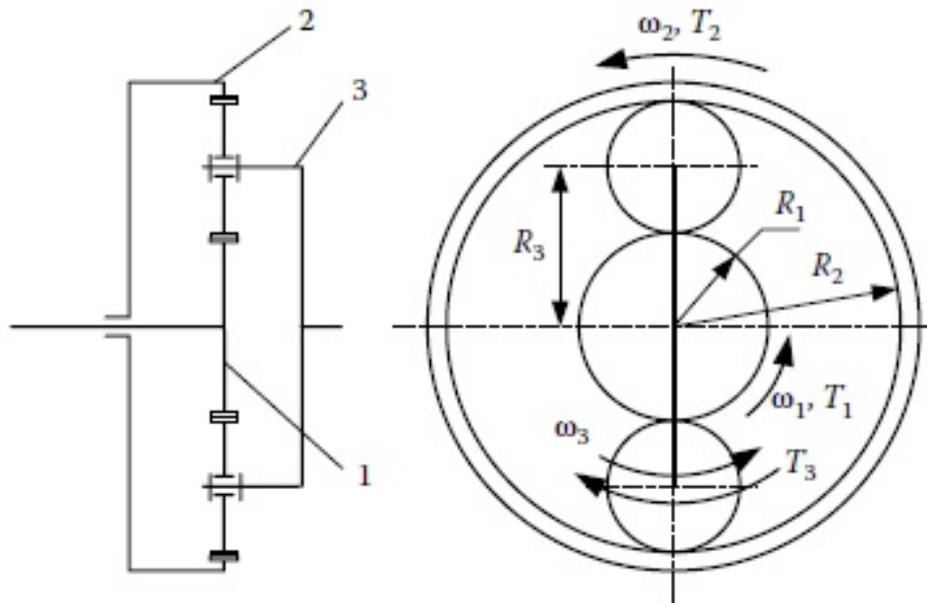


Figura 3.8: Engranaje planetario, usado para acoplamientos por velocidad (extraído de [25] pág. 139).

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,



### Arquitectura con ambos modos de acople

Agregando otra planta de energía, se puede obtener un tren de transmisión con ambos tipos de acople. Un buen ejemplo de esto es el implementado en el Toyota Prius de Toyota Motor Company. Este tipo de arquitectura está mostrado en la fig. 3.10. Esta arquitectura utiliza un engranaje planetario 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.

A bajas velocidades, 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.

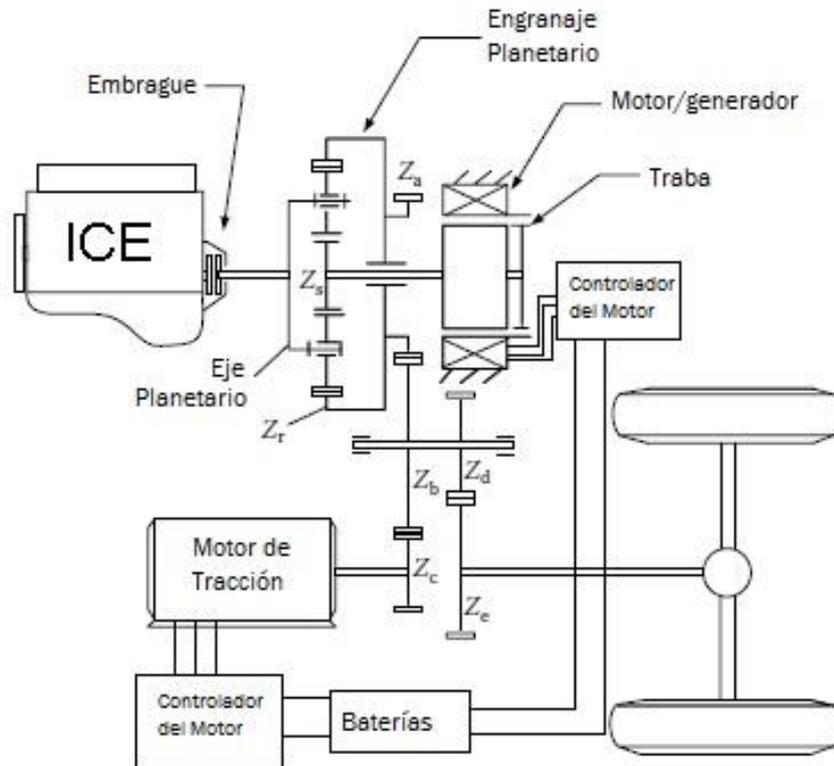


Figura 3.10: Acople integrado de velocidad y par (extraída de [25] pág. 147).

### 3.5. 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 4

## Eficiencia y Tecnologías de motores de combustión para autos Híbridos

### 4.1. Introducción

Los motores de combustión interna son quizás las máquinas térmicas más habituales y han jugado un papel dominante en el campo de la generación de potencia y de la propulsión, desde sus inicios en 1876 cuando Nikolaus August Otto (ingeniero alemán, 1832-1891) desarrolló el primer prototipo de un motor de cuatro tiempos.<sup>(1)</sup> En 1893 Rudolf Diesel (ingeniero francés, 1858-1913) desarrolló el motor que opera en el ciclo termodinámico que lleva su nombre. Desde ese entonces estos motores se volvieron muy populares al utilizarlos como medios de propulsión en vehículos de transporte. En 1900 existían 4142 coches en Estados Unidos [28] (principal país fabricante de coches en esa época), en 1997 esa cifra alcanzaba los 600 millones en todo el mundo<sup>(2)</sup> y se estima que en 30 años más, crecerá al doble. Con un crecimiento de estas características, es de esperar que la industria de la automoción sea una de las más activas en lo que se refiere a inversión y desarrollo.

El rendimiento térmico de estas máquinas trabajando de forma estacionaria suele rondar el 25-30 % para ciclos Otto y 30-40 % para ciclos diesel. Esto quiere decir que al rededor de un 70 % de la energía que entra con el combustible se pierde en el ciclo. Estos valores se incrementan cuando los motores trabajan en regímenes de funcionamiento no estacionario, que es el caso habitual de los motores utilizados en los vehículos de transporte.

En la actualidad el motor de combustión interna puede ser mucho más eficiente mediante la ayuda de un sistema de control adecuado [29]. En los últimos años los coches han incorporado una serie de componentes eléctricos y electrónicos, los cuales reducen las emisiones de especies nocivas y disminuyen el consumo de combustible, aumentan la seguridad y mejoran la manejabilidad y el confort del pasajero. Taylor (2008) menciona que el uso de vehículos híbridos con motores de combustión interna y eléctricos produce una reducción de los requerimientos de energía cercanos al 21-28 %.

---

<sup>(1)</sup>La primera propuesta de un ciclo de cuatro tiempos se asocia al ingeniero francés Alphonse Eugène Beau de Rochas, hacia 1861. Sin embargo, Otto logró hacerse con la patente y hoy en día se le reconoce como el inventor del ciclo que lleva su nombre [27].

<sup>(2)</sup>Global warming, Focus on the future, 1997, *Cars Emit Carbon Dioxide*.

Con estos valores de rendimiento surge la siguiente pregunta: ¿por qué seguir utilizando estos motores para el transporte?. Para responder la pregunta hay que tener en cuenta dos cosas. Primero, la gran capacidad que tienen los combustibles de almacenar energía en un volumen muy pequeño, la densidad energética del iso-octano es de  $44,7MJ/kg$ , esto permite una autonomía muy buena para vehículos que tienen que recorrer grandes distancias. Segundo, que la estructura de la industria automotriz ya está desarrollada y todos los actores tienen su lugar en la cadena productiva.

En el presente capítulo se presentará una descripción de los modelos termodinámicos de las diferentes tecnologías de motores que pueden ser utilizadas en autos híbridos. Estos son motores que trabajan según el ciclo de Otto (utilizando nafta como combustible), según el ciclo Diesel (utilizando gasoil como combustible) y según ciclo Atkinson-Miller (que utiliza el mismo combustible que el ciclo Otto).

Para describir la evolución termodinámica de los diferentes ciclos se utilizan modelos de Termodinámica de Tiempos Finitos (TTF). Ésta es una rama dentro de la Termodinámica Clásica del Equilibrio (TCE) que modela y optimiza las máquinas térmicas reales considerando explícitamente las principales irreversibilidades que afectan a su evolución. Se basa principalmente en modelar las ligaduras espacio-temporales asociadas a las diferentes fuentes de irreversibilidad, siempre existentes en las máquinas térmicas reales, mediante parámetros macroscópicos y optimizar una función adecuada con respecto a las variables características del problema. El modelo teórico que se desarrolla a continuación se basa en esencia en los trabajos de Angulo-Brown y otros [30, 31, 32], Calvo Hernández y otros [33, 34, 35] y Curto-Risso [36].

Al final se presentan los resultados de los modelos aplicados a diferentes ciclos de conducción, para determinar el consumo de combustible y la energía en las diferentes situaciones.

## 4.2. Ciclos termodinámicos de motores de combustión interna

### 4.2.1. Ciclo Otto

El modelo irreversible que la TTF propone para un motor de encendido por chispa, toma como punto de partida el ciclo Otto reversible. En la fig. 4.1 se representa el diagrama de la presión con respecto al volumen para un ciclo ideal superpuesto, a modo de ejemplo, con un ciclo simulado (considerado como real). El ciclo ideal está formado por dos procesos isócoros, combustión ( $2 \rightarrow 3$ ) y enfriamiento ( $4 \rightarrow 1$ ); y otros dos adiabáticos, compresión ( $1 \rightarrow 2$ ) y carrera de potencia (expansión) ( $3 \rightarrow 4$ ). Durante los procesos de admisión y escape el trabajo que el sistema ejerce se supone nulo <sup>(3)</sup>.

El ciclo puede ser caracterizado geoméricamente por la relación de compresión,  $r = V_1/V_2 = V_4/V_3 \geq 1$  y la razón entre la mínima y la máxima temperatura,  $\tau = T_1/T_3 \leq 1$ .

---

<sup>(3)</sup>Esta hipótesis es suficientemente realista, dado que la diferencia de presiones entre la admisión y el escape es muy pequeña.

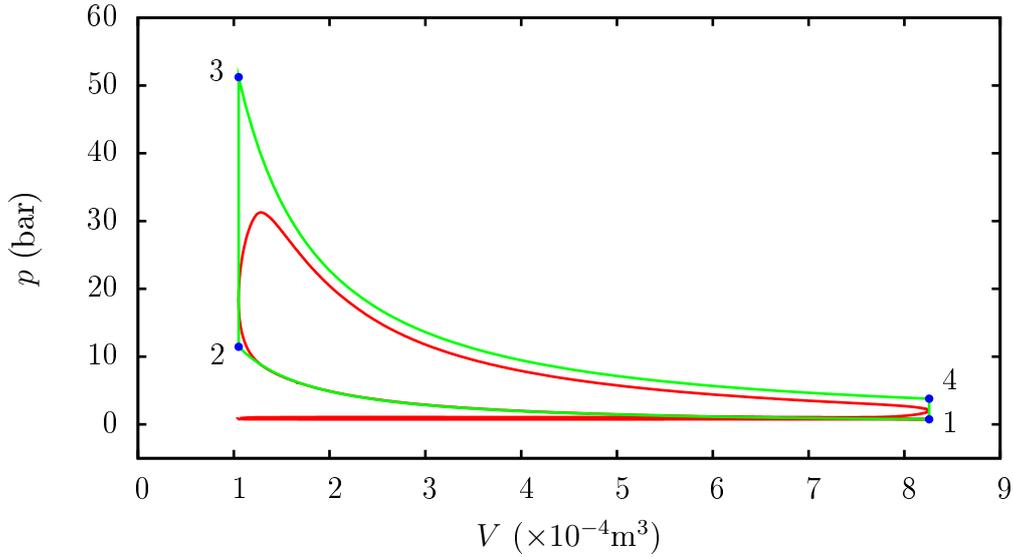


Figura 4.1: Diagrama presión-volumen, simulado (realista) e ideal, para un motor de ciclo Otto.

El trabajo del ciclo reversible se calcula, a partir de la definición de trabajo, de la siguiente manera:

$$|W_{\text{rev}}| = \oint p dV \quad (4.1)$$

Que en este caso corresponde a:

$$|W_{\text{rev}}| = \frac{p_4 V_4}{\gamma_b - 1} (r^{\gamma_b - 1} - 1) - \frac{p_1 V_1}{\gamma_u - 1} (r^{\gamma_u - 1} - 1) \quad (4.2)$$

Otra forma de calcular el trabajo reversible del ciclo es a partir del primer principio de la termodinámica aplicado al ciclo:

$$|W_{\text{rev}}| = |Q_{23}| - |Q_{41}| \quad (4.3)$$

donde  $Q_{23}$  corresponde al calor aportado al ciclo durante la combustión y  $Q_{41}$  al calor cedido durante el enfriamiento. El rendimiento termodinámico se calcula a partir del trabajo mediante la siguiente función:

$$\eta = \frac{|W_{\text{rev}}|}{|Q_{23}|} \quad (4.4)$$

Las capacidades caloríficas y los índices politrópicos son calculados a partir de un promedio sobre los intervalos de temperaturas considerados. A modo de ejemplo, tomando en cuenta la composición química de la mezcla de gases en el cilindro y denotando  $u$  para los gases previos a la combustión y  $b$  para los gases posteriores:

$$\bar{C}_{v,23} = \frac{1}{2} [C_{v,u}(T_2) + C_{v,b}(T_3)] ; \quad \bar{C}_{v,41} = \frac{1}{2} [C_{v,b}(T_4) + C_{v,u}(T_1)]$$

y

$$\bar{\gamma}_{12} = \frac{\bar{C}_{p,12}}{\bar{C}_{v,12}} = \frac{C_{p,u}(T_1) + C_{p,u}(T_2)}{C_{v,u}(T_1) + C_{v,u}(T_2)}$$

Los mismos tipos de promedios se aplican a los otros procesos.

En el presente trabajo se consideran tres fuentes de irreversibilidad:

- El trabajo de las fuerzas de rozamiento asociadas a la dinámica del pistón.
- La transferencia de calor desde el fluido de trabajo a los alrededores a través de las paredes del cilindro
- Cualquier otra clase de irreversibilidad interna asociada al fluido de trabajo (viscosidad, turbulencia, combustión, etc.) que se supone disipada directamente a los alrededores [37].

Los indicadores principales que se consideran en TTF son la potencia,  $P$  y el rendimiento,  $\eta$ . Para calcular ambos es necesario conocer previamente el trabajo real del ciclo. Si  $|W_I|$  es el trabajo efectuado por el ciclo considerando únicamente las irreversibilidades internas,  $|W_{\text{fric}}|$  el trabajo de las fuerzas de rozamiento y  $|W_Q|$  la pérdida de trabajo asociada a la transferencia de calor, el trabajo real del ciclo es,

$$|W| = |W_I| - |W_{\text{fric}}| - |W_Q| \quad (4.5)$$

Para caracterizar e identificar con más claridad los términos de las pérdidas de trabajo debidas a las diferentes irreversibilidades, la ec. (4.5) se escribe de la siguiente forma:

$$|W| = |W_{\text{rev}}| - |W_{\text{int}}| - |W_{\text{fric}}| - |W_Q| \equiv |W_{\text{rev}}| - \left| \sum W_l \right| \quad (4.6)$$

donde  $|W_{\text{int}}|$  es la diferencia entre el trabajo reversible y el trabajo con irreversibilidades internas,  $|W_{\text{rev}}| - |W_I|$ .

El rendimiento térmico del ciclo es:

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_{23}|} \quad (4.7)$$

con

$$|Q_{23}| = m(u_{s,3} - u_{s,2}) \quad (4.8)$$

donde  $u$  corresponde a la energía interna y el subíndice  $s$  representa a la componente sensible de la misma.

Nótese que según esta definición de rendimiento, la energía del combustible que no se quema y se libera a la atmósfera no afectaría al mismo. Para asignar un valor más realista se utiliza el rendimiento de conversión de combustible. Este se define como el trabajo realizado por el ciclo dividido la energía que entra al motor, que corresponde a la energía que entra con el combustible (masa de combustible,  $m_f$ , multiplicada por su poder calorífico,  $Q_p^i$ ).

$$\eta_f = \frac{|W|}{|E_f|} = \frac{|W|}{m_f Q_p^i} \quad (4.9)$$

La potencia se obtiene dividiendo el trabajo del ciclo por el tiempo de duración del mismo:

$$P = \frac{|W|}{t_{\text{ciclo}}} \quad (4.10)$$

## 4.2.2. Ciclo Diesel

Al igual que en modelo del ciclo Otto, la TTF parte de un modelo reversible para el ciclo Diesel. En la fig. 4.2 se representa el diagrama de la presión con respecto al volumen para un ciclo ideal superpuesto, a modo de ejemplo, con un ciclo simulado (considerado como real). El ciclo ideal está formado por un proceso de combustión isócara ( $2 \rightarrow 3$ ), un proceso de combustión isóbara ( $3 \rightarrow 4$ ) y enfriamiento ( $5 \rightarrow 1$ ); y otros dos adiabáticos, compresión ( $1 \rightarrow 2$ ) y carrera de potencia (expansión) ( $4 \rightarrow 5$ ). Durante los procesos de admisión y escape el trabajo que el sistema ejerce se supone nulo<sup>(4)</sup>.

El ciclo puede ser caracterizado geoméricamente por la relación de compresión,  $r = V_1/V_2 = V_4/V_3 \geq 1$  y la relación de presiones  $r_p = p_3/p_1 = p_4/p_1$ .

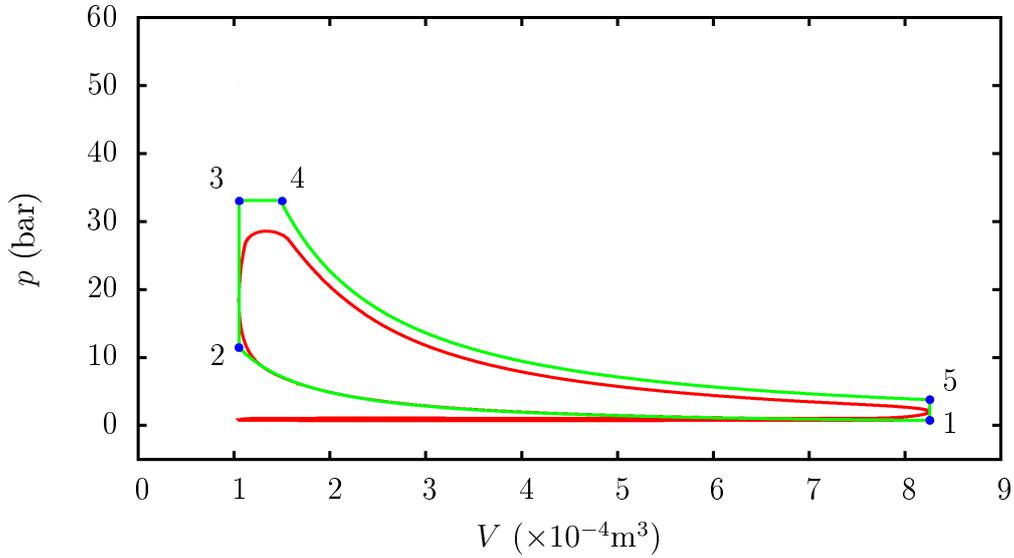


Figura 4.2: Diagrama presión-volumen, simulado (realista) e ideal, para un motor de ciclo Diesel.

El trabajo del ciclo reversible se calcula, a partir de la definición de trabajo, de la siguiente manera:

$$|W_{\text{rev}}| = \frac{p_4 V_4^{\gamma_b}}{1 - \gamma_b} (V_5^{1-\gamma_b} - V_4^{1-\gamma_b}) + p_4 (V_4 - V_3) - \frac{p_1 V_1}{\gamma_u - 1} (r^{\gamma_u - 1} - 1) \quad (4.11)$$

Otra forma de calcular el trabajo reversible del ciclo es a partir del primer principio de la termodinámica aplicado al ciclo:

$$|W_{\text{rev}}| = |Q_H| - |Q_{51}| \quad (4.12)$$

donde  $Q_{51}$  al calor cedido durante el enfriamiento y  $Q_H$  corresponde al calor aportado al ciclo durante la combustión:

$$Q_H = m_a (u_{s,4} - u_2) + p_3 (V_4 - V_3) \quad (4.13)$$

<sup>(4)</sup> Al igual que en el ciclo Otto, esta hipótesis es suficientemente realista, dado que la diferencia de presiones entre la admisión y el escape es muy pequeña.

donde  $m_a$  es la masa de aire que entra al ciclo,  $u$  es la energía interna (que tiene en cuenta la energía química y sensible) y el subíndice  $s$  representa a la componente sensible de la misma.

El rendimiento termodinámico se calcula a partir del trabajo mediante la siguiente función:

$$\eta = \frac{|W_{\text{rev}}|}{|Q_H|} \quad (4.14)$$

Las irreversibilidades consideradas en este modelo (al igual que en el modelo del ciclo Otto), se asumen proveniente de las tres fuentes mencionadas anteriormente: fricción, pérdidas de calor e irreversibilidades internas. Nuevamente los indicadores principales que se consideran son la potencia,  $P$  y el rendimiento,  $\eta$ . Para el cálculo se procede de la misma forma que para el ciclo Otto.

Para obtener el trabajo real del ciclo, se obtiene el trabajo considerando únicamente las irreversibilidades internas,  $|W_I|$  y se le restan los trabajos perdidos por fricción,  $|W_{\text{fric}}|$ , y pérdidas de calor,  $|W_Q|$ .

$$|W| = |W_I| - |W_{\text{fric}}| - |W_Q| \quad (4.15)$$

El rendimiento térmico del ciclo es:

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad (4.16)$$

y el rendimiento de conversión de combustible es:

$$\eta_f = \frac{|W|}{|E_f|} = \frac{|W|}{m_f Q_p^i} \quad (4.17)$$

La potencia se obtiene dividiendo el trabajo del ciclo por el tiempo de duración del mismo:

$$P = \frac{|W|}{t_{\text{ciclo}}} \quad (4.18)$$

### 4.2.3. Ciclo Atkinson

El ciclo Atkinson fue descubierto por James Atkinson en 1882, como alternativa para ciclo de potencia intentando esquivar las patentes de Otto para motores de gasolina. Este ciclo, si bien existe desde hace mucho tiempo no ha sido utilizado en los sistemas de transporte hasta el momento. Recientemente, en los últimos años, debido a sus características de desempeño, se ha puesto en práctica para vehículos híbridos.

Al igual que en modelos de los ciclos vistos anteriormente, la TTF parte de un modelo reversible para el ciclo Atkinson. En la fig. 4.3 se representa el diagrama de la presión con respecto al volumen para un ciclo ideal superpuesto, a modo de ejemplo, con un ciclo simulado (considerado como real). El ciclo ideal está formado por un proceso de combustión isócora ( $2 \rightarrow 3$ ), un enfriamiento isócora ( $4 \rightarrow 5$ ) y enfriamiento isóbaro ( $5 \rightarrow 1$ ); y otros dos adiabáticos, compresión ( $1 \rightarrow 2$ ) y carrera de potencia (expansión) ( $3 \rightarrow 4$ ). Durante los procesos de admisión y escape

el trabajo que el sistema ejerce se supone nulo<sup>(5)</sup>. Como se puede apreciar, el ciclo Atkinson es similar al ciclo Otto pero con la expansión más grande que la compresión. De esta manera se consigue un aumento de rendimiento a expensas de una disminución de la potencia específica (potencia dividido volumen máximo) comparado con el ciclo Otto.

El ciclo puede ser caracterizado geoméricamente por la relación de compresión,  $r_c = V_1/V_2 \geq 1$  y la relación de expansión  $r_e = V_5/V_2 = V_4/V_3$ .

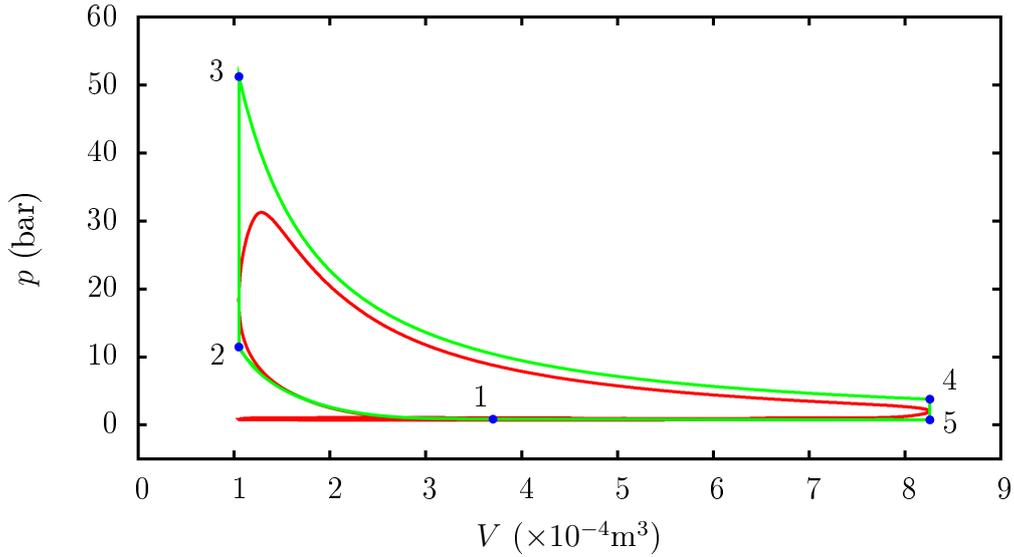


Figura 4.3: Diagrama presión-volumen, simulado (realista) e ideal, para un motor de ciclo Atkinson.

El trabajo del ciclo reversible se calcula, a partir de la definición de trabajo, de la siguiente manera:

$$|W_{\text{rev}}| = \frac{p_4 V_4}{\gamma_b - 1} (r_e^{\gamma_b - 1} - 1) - p_1 (V_5 - V_1) - \frac{p_1 V_1}{\gamma_u - 1} (r_c^{\gamma_u - 1} - 1) \quad (4.19)$$

Otra forma de calcular el trabajo reversible del ciclo es a partir del primer principio de la termodinámica aplicado al ciclo:

$$|W_{\text{rev}}| = |Q_H| - |Q_{41}| \quad (4.20)$$

donde  $Q_{41}$  al calor cedido durante el enfriamiento (tanto a volumen constante como a presión constante) y  $Q_H$  corresponde al calor aportado al ciclo durante la combustión:

$$Q_H = m (u_{s,3} - u_{s,2}) \quad (4.21)$$

donde  $m$  es la masa de aire que entra al ciclo,  $u_s$  es la energía interna sensible.

<sup>(5)</sup>Al igual que en los ciclos anteriores, esta hipótesis es suficientemente realista, dado que la diferencia de presiones entre la admisión y el escape es muy pequeña.

El rendimiento termodinámico se calcula a partir del trabajo mediante la siguiente función:

$$\eta = \frac{|W_{\text{rev}}|}{|Q_H|} \quad (4.22)$$

Las irreversibilidades consideradas en este modelo (al igual que en los modelos anteriores), se asumen proveniente de las tres fuentes mencionadas anteriormente: fricción, pérdidas de calor e irreversibilidades internas. Nuevamente los indicadores principales que se consideran son la potencia,  $P$  y el rendimiento,  $\eta$ . Para el cálculo se procede de la misma forma vista anteriormente.

Para obtener el trabajo real del ciclo, se obtiene el trabajo considerando únicamente las irreversibilidades internas,  $|W_I|$  y se le restan los trabajos perdidos por fricción,  $|W_{\text{fric}}|$ , y pérdidas de calor,  $|W_Q|$ .

$$|W| = |W_I| - |W_{\text{fric}}| - |W_Q| \quad (4.23)$$

El rendimiento térmico del ciclo es:

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad (4.24)$$

y el rendimiento de conversión de combustible es:

$$\eta_f = \frac{|W|}{|E_f|} = \frac{|W|}{m_f Q_p^i} \quad (4.25)$$

La potencia se obtiene dividiendo el trabajo del ciclo por el tiempo de duración del mismo:

$$P = \frac{|W|}{t_{\text{ciclo}}} \quad (4.26)$$

En la siguientes secciones se describe con suficiente detalle el cálculo de cada una de las contribuciones de las irreversibilidades mediante simples ecuaciones analíticas, así como también el cálculo la temperatura de combustión.

## 4.3. Modelos de pérdidas de trabajo y temperaturas del ciclo

### 4.3.1. Trabajo considerando irreversibilidades internas

Una forma de incluir las irreversibilidades internas cuando se evalúa la potencia del ciclo se basa en la idea de Özkaynak y otros [38, 39] y J. Chen [40] para ciclos de tipo Carnot. Si  $Q_L$  corresponde al calor liberado hacia una fuente externa fría a una temperatura  $T_L$  y  $Q_H$  al calor absorbido por el sistema desde una fuente externa caliente a una temperatura  $T_H$ , se puede escribir la desigualdad de Clausius como una igualdad mediante la incorporación de un término  $I_R > 1$  de la siguiente manera:

$$I_R \frac{|Q_H|}{T_H} - \frac{|Q_L|}{T_L} = 0 \quad (4.27)$$

con

$$\eta = 1 - I_R \frac{T_L}{T_H} = 1 - I_R \left( \frac{|Q_L|}{|Q_H|} \right)_{\text{rev}} = \frac{|W_I|}{|Q_H|_{\text{rev}}} \quad (4.28)$$

Por lo tanto, el trabajo realizado por el ciclo considerando irreversibilidades internas se puede escribir como  $|W_I| = |Q_H|_{\text{rev}} - I_R |Q_L|_{\text{rev}}$ . Aunque en los modelos que se vieron en las secciones anteriores la absorción y cesión de calor entre el sistema y las fuentes externas no ocurre en condiciones isothermas (como en los de tipo Carnot), esta formulación ha sido extensamente utilizada en la literatura para estos modelos, tomando siempre  $I_R$  como un parámetro constante y fenomenológico [30, 35]. Angulo-Brown y otros [31] sostienen que para los ciclos Otto no endorreversibles,  $I_R$  puede ser interpretado como el cociente entre las capacidades caloríficas a volumen constante de los productos de combustión y los reactivos,  $I_R = C_{v,b}/C_{v,u}$ , debido a que la absorción y cesión de calor se producen en condiciones isócoras.

Ciclo	$I_R$
Otto	1.20
Atkinson	1.20
Diesel	1.15

Tabla 4.1: Valores de  $I_R$  para diferentes ciclos.

Unificando la notación,  $|Q_L|_{\text{rev}} = |Q_{41}|$  para ciclos Otto y Atkinson y  $|Q_L|_{\text{rev}} = |Q_{51}|$  para ciclos Diesel, el trabajo del ciclo considerando únicamente las irreversibilidades internas es:

$$|W_I| = |Q_H|_{\text{rev}} - I_R |Q_L|_{\text{rev}} \quad (4.29)$$

donde  $|Q_L|_{\text{rev}}$  en cada ciclo se obtiene a partir de la diferencia entre el calor cedido al sistema  $|Q_H|_{\text{rev}}$  y el  $|W_{\text{rev}}|$ , según su modelo correspondiente.

Por lo tanto:

$$|W_I| = |Q_H|_{\text{rev}} - I_R (|Q_H|_{\text{rev}} - |W_{\text{rev}}|) \quad (4.30)$$

En la tabla 4.1 se presentan algunos valores aceptables para valores de  $I_R$ .

### Trabajo perdido debido a las fuerzas de fricción

No todo el trabajo transferido desde los gases contenidos en el cilindro hacia el pistón se transforma en trabajo utilizable en el motor. La porción de trabajo que no está disponible se denomina de forma genérica *trabajo de fricción*. Esta porción varía en magnitud en función, entre otras cosas, de la carga externa y del diseño del motor, en un amplio intervalo desde un 10 % en funcionamiento a plena carga a un 100 % en ausencia de carga. Estas fuerzas de fricción afectan a todos los parámetros de salida del motor, en particular al par máximo obtenido y al consumo de combustible. El trabajo de fricción se disipa en forma de calor sobre el sistema de refrigeración, cuyo diseño depende, evidentemente de como sea éste. Un conocimiento al menos básico del trabajo de fricción es necesario para poder conocer el trabajo útil obtenible.

Formalmente se define el trabajo de fricción como la diferencia entre el trabajo realizado por el gas que realiza el ciclo cuando está dentro del cilindro, es decir, en las carreras de compresión y expansión, y el trabajo útil que se comunica al cigüeñal.

Brevemente, se resumen a continuación las causas que provocan estas pérdidas de potencia:

- Introducir la mezcla en la cámara en la etapa de admisión y expulsar los residuos gaseosos en la etapa de expulsión requiere un trabajo denominado habitualmente de *bombeo*,  $W_p$ .
- El rozamiento mecánico entre todas las partes móviles del mecanismo, aunque esté lubricado, implica una pérdida de potencia,  $W_{rf}$ . Esta componente de fricción engloba el rozamiento del pistón con las paredes del cilindro, las fricciones en las válvulas, la unión del cigüeñal con la biela, etc.
- Todos los sistemas auxiliares, bombas de agua y de aceite, bomba de combustible, alternador, bombas secundarias para el control de emisiones, bomba del sistema de dirección asistida o sistema de climatización consumen una parte del trabajo realizado por el gas,  $W_a$ .

El trabajo total de fricción es la suma de los anteriores:

$$W_{\text{fric}} = W_p + W_{rf} + W_a$$

Globalmente este trabajo total depende de la carga externa y aumenta con la velocidad angular,  $N$ .<sup>(6)</sup>

Los términos asociados a la fricción entre superficies dependen de la lubricación y, en concreto, del espesor de la capa de lubricante, pero de forma global son términos lineales en  $N$ , mientras que los términos asociados al bombeo provienen del paso de fluidos a través de orificios y de las consiguientes turbulencias, con lo que suelen ser cuadráticos en  $N$ . Es usual, entonces, encontrar en la literatura [41] fórmulas empíricas para  $W_{\text{fric}}$ :

Una correlación empírica que incluye términos de bombeo y que se adapta bien al comportamiento de motores de encendido por chispa (ciclo Otto y Atkinson) con volúmenes entre 845 y 2000 cm<sup>3</sup>, de cuatro cilindros, es la proporcionada por Barnes-Moss [42]:

$$W_{\text{fric}} = V_d (C_1 + C_2 N + C_3 N^2) \quad (4.31)$$

donde  $V_d$  es el volumen máximo desplazado, en la que los coeficientes valen:

$$\begin{aligned} C_1 &= 0,97 \\ C_2 &= 0,15 \times 10^{-3} \\ C_3 &= 0,05 \times 10^{-6} \end{aligned}$$

aunque algunas componentes dependen más bien de la velocidad media del pistón en la cámara que de la velocidad angular en sí.

Para motores Diesel, la correlación que mejor aproxima a una amplia gama de motores de seis cilindros según Millington [43] es:

$$W_{\text{fric}} = V_d (C_1 + C_2 N + C_3 S_p^2) \quad (4.32)$$

---

<sup>(6)</sup>Suele utilizarse el símbolo  $N$  cuando se refiere a la velocidad de giro expresada en revoluciones por minuto, rpm.

en la que los coeficientes valen:

$$\begin{aligned}C_1 &= 75000 \\C_2 &= 48 \\C_3 &= 400\end{aligned}$$

donde es la velocidad media del pistón  $S_p = cN/60$ , con  $c$  la carrera del pistón.

En ambas correlaciones el resultado del trabajo es en *Watts*, el volumen desplazado debe estar en  $m^3$  y (para la correlación de Diesel) la carrera debe estar en  $m$ .

### 4.3.2. Trabajo perdido debido a las irreversibilidades asociadas a la transferencia de calor

La tasa de transferencia de calor desde el fluido de trabajo hacia los alrededores del motor a través de las paredes del cilindro,  $\dot{Q}_l$ , puede ser modelada de forma simple asumiendo una transferencia de calor convectiva [37]:

$$\dot{Q}_l = \pi B h \left( \frac{B}{2} + x \right) (T - T_w) \quad (4.33)$$

donde  $T$  es la temperatura instantánea del fluido de trabajo dentro del cilindro,  $B$  es el diámetro interior del cilindro,  $h$  es el coeficiente de transferencia de calor,  $x$  la altura de la cámara de combustión y  $T_w$  la temperatura de pared. Este sencillo procedimiento permite estimar las pérdidas asociadas a la transferencia de calor a partir de un conjunto reducido de parámetros, entre los cuales se incluye el tiempo de duración del ciclo.

En particular para el ciclo Otto y Atkinson, asumiendo que la principal transferencia de calor tiene lugar durante el período de la carrera de potencia y tomando valores promedio para la posición del pistón,  $\bar{x}_{34}$  y la temperatura del fluido,  $\bar{T}_{34}$ , se concluye que [37]:

$$\bar{Q}_l \simeq \pi h B \left( \frac{B}{2} + \bar{x}_{34} \right) (\bar{T}_{34} - T_w) t_{34} \quad (4.34)$$

donde  $t_{34}$  es el tiempo de duración de la carrera de potencia. Desarrollando los términos, esta ecuación se convierte en:

$$|Q_l| = \frac{\pi h B t_{34} T_3}{4} \left[ B + \frac{V_0}{A_p} (1 + r_e) \right] \left( 1 + r_e^{1-\gamma} - 2 \frac{T_w}{T_3} \right) \quad (4.35)$$

donde  $A_p$  corresponde al área del pistón,  $V_0$  al volumen muerto de la cámara y  $r_e$  a la relación de volúmenes máximo y mínimo en la carrera de expansión (para el ciclo Otto, es igual a la relación de compresión,  $r$ ).

Para el ciclo Diesel, se asume, también, que la principal transferencia de calor tiene lugar durante el período de la carrera de potencia. Dado que hay dos procesos diferentes, las pérdidas se dividen en el proceso 3–4 a presión constante y el proceso 4–5 con  $pV^\gamma$  constante. Tomando valores promedio para la posición del pistón en cada proceso,  $\bar{x}_{34}$  y  $\bar{x}_{45}$ , y la temperatura media

del fluido para cada proceso,  $\bar{T}_{34}$  y  $\bar{T}_{45}$ , la transferencia de calor se pueden representar mediante la siguiente ecuación:

$$|Q_l| = \left[ 2A_p + B\pi \frac{c_{34}}{2} \right] h (\bar{T}_{34} - T_w) t_{34} + \left[ 2A_p + B\pi \frac{c_{45}}{2} \right] h (\bar{T}_{45} - T_w) t_{45} \quad (4.36)$$

donde  $c_{34}$  y  $c_{45}$  son las carreras para los procesos 3–4 y 4–5 respectivamente,  $t_{34}$  es el tiempo de duración de la carrera de potencia en el período a presión constante y  $t_{45}$  en el período adiabático.

Las pérdidas de trabajo asociadas a la transferencia de calor se pueden representar mediante la siguiente ecuación,  $W_Q = \varepsilon \bar{Q}_l$  en la cual  $\varepsilon$  es un factor introducido por Mozurkewich y Berry [37] con el objetivo de cuantificar las pérdidas de calor en términos de trabajo. Generalmente se utiliza como un parámetro constante fenomenológico con un valor cercano al 10%.

### 4.3.3. Temperatura de combustión

Los modelos más frecuentes de TTF consideran la temperatura al final de la combustión y la temperatura de entrada como parámetros preestablecidos [33, 35] o calculados a partir de considerar relaciones constantes de temperaturas durante los períodos de calentamiento y enfriamiento [44, 31, 45].

En esta sección se desarrolla el cálculo de la temperatura final de la combustión,  $T_{comb}$  considerándola como la temperatura de llama adiabática según la reacción química correspondiente. Para ello es necesario conocer la temperatura de los gases antes de la combustión,  $T_2$  que se calcula a partir de  $T_1$  (considerado como el único parámetro de entrada en lo que a temperatura se refiere) mediante la relación adiabática en el trayecto 1–2 (véase la fig. 4.1),  $T_2 = T_1 r_c^{\gamma_{u,12}-1}$ . A partir de esto se estima  $T_{comb}$  mediante la resolución numérica de la siguiente ecuación:

$$0 = U_P(T_{comb}) - U_R(T_2) \quad (4.37)$$

donde  $U_P(T)$  y  $U_R(T)$  son las energías internas (considerando la componente química) de los productos y los reactivos, respectivamente. Esto se traduce como que toda la energía interna, química y sensible, en los reactivos se transfiere a los productos. Angulo-Brown y otros [32] utilizan el mismo procedimiento para calcular  $T_{comb}$ .

Siguiendo la idea de los modelos de TTF se considera una reacción relativamente simple para la combustión de la gasolina (para el caso de motores Otto y Atkinson) y del gasoil para el ciclo Diesel. Es necesario resolver la reacción química para establecer la composición química de los gases quemados, y así poder calcular su energía interna.

## 4.4. Aplicación de los modelos al cálculo de consumo

En esta sección se presenta la aplicación de los modelos presentados anteriormente para calcular el rendimiento y consumo de energía, en diferentes ciclos de conducción (autopista, semi-urbano y urbano). El estudio se restringe a los motores de ciclo Otto y Atkinson que son los que se utilizan en tecnologías de autos híbridos.

En las secciones anteriores se presentaron los modelos para el cálculo de potencia y rendimiento para diferentes ciclos. Dada la naturaleza diferente de los motores es necesario definir diferentes variables de entrada para calcular el desempeño de los mismos.

En el caso del ciclo Otto basta con definir como variable de entrada la riqueza del combustible,  $\phi$ , la velocidad de giro,  $N$  y la relación de compresión,  $r_c$ , sin embargo, dado que en el ciclo Atkinson las carreras de compresión y expansión son diferentes, es necesario agregar como variable de entrada la relación de expansión,  $r_e$ .

En la tabla 4.2 se presenta la lista de variables de salida para los modelos del ciclo Otto y Atkinson.

$P_{ot}$	$\eta$	$W_{rev}$	$W_I$	$W_{roz}$	$W_q$
$W$	$Q_H$	$Q_L$	$x_{CO_2}$	$x_{CO}$	$x_{H_2}$
$x_{H_2O}$	$x_{O_2}$	$x_{N_2}$	$\gamma_b$	$\gamma_u$	$T_3$

Tabla 4.2: Variables de salida para el modelo del ciclo Otto y Atkinson.

En la fig. 4.4 se presenta el diagrama de funcionamiento para calcular el consumo (en  $km/l$ ), para los motores Otto y Atkinson a partir de diferentes ciclos de conducción.

La secuencia de cálculo se puede esquematizar de la siguiente manera:

- Entrada: ciclo de conducción
- Cálculo del mecanismo del vehículo para obtener la potencia al eje requerida y la velocidad de giro.
- Cálculo de la potencia entregada por el motor según la configuración especificada.
- Cálculo de la masa requerida para entregar la potencia.
- Cálculo del promedio de los kilómetros recorridos por cada litro de combustible.
- Cálculo del promedio de la energía consumida en cada ciclo.

En la fig. 4.5 se muestran los diferentes ciclos de conducción utilizados en este trabajo para el cálculo de consumo de combustible y energía.

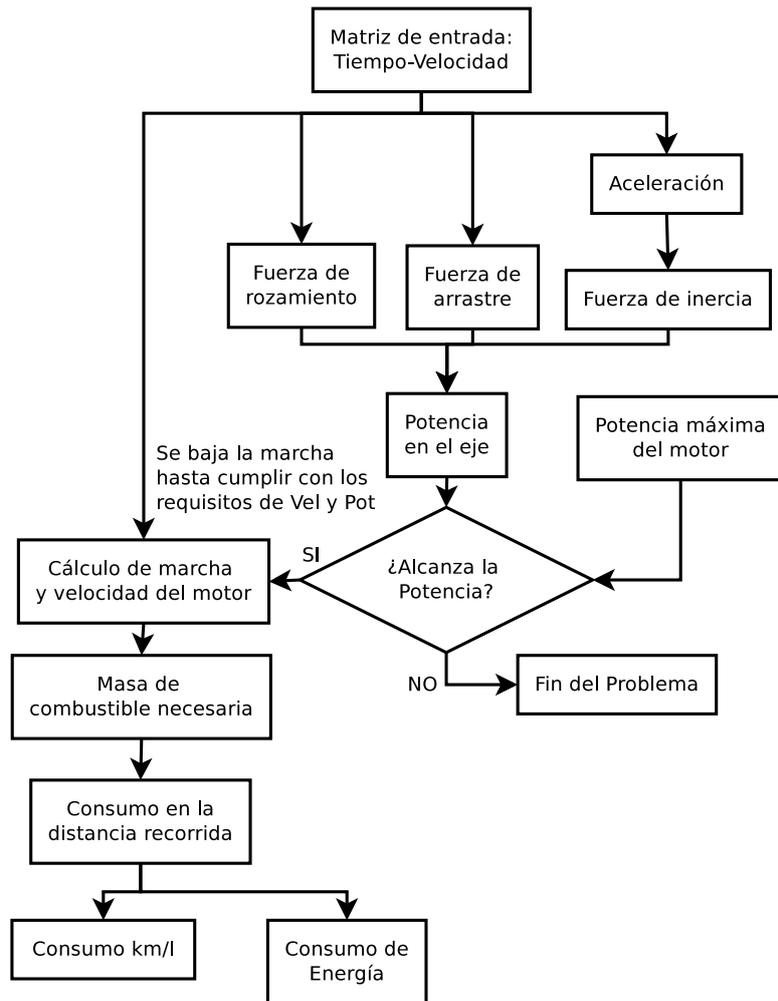


Figura 4.4: Diagrama de funcionamiento para calcular el consumo.

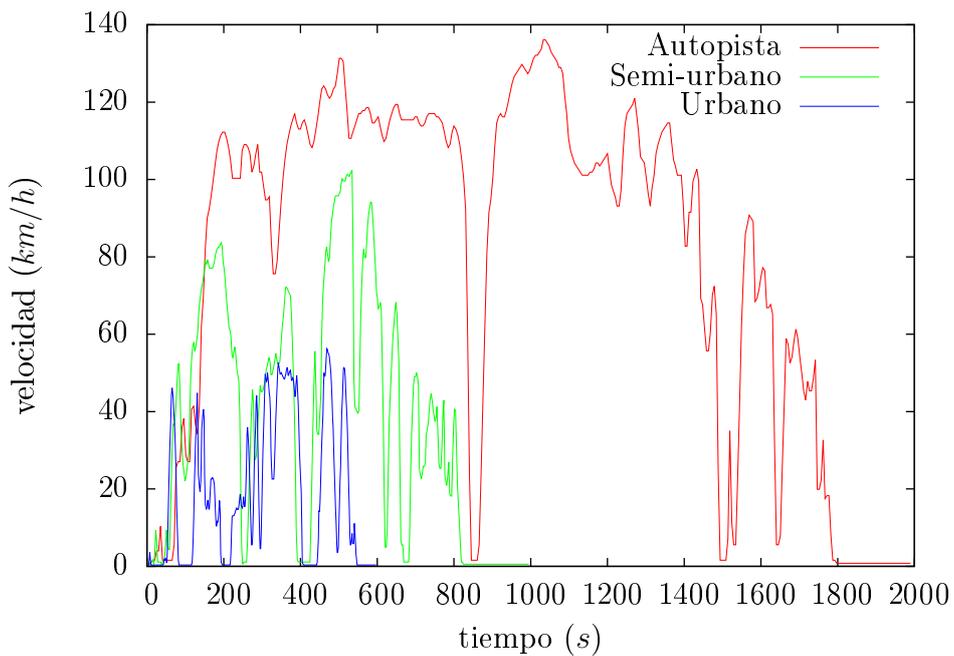


Figura 4.5: Ciclos de conducción para autopista, semi-urbano y urbano.

En la tabla 4.3 se presentan los valores de desempeño para ambos motores en un ciclo de conducción por autopista. Cabe destacar la buena aproximación del modelo para ciclos Otto. Si bien es un modelo simple, refleja valores muy cercanos a los reales.

Ciclo	Otto	Atkinson
Consumo	2,4959 kg	2,1158 kg
Distancia	43,847 km	43,847 km
Energía	111,64 MJ	94,635 MJ
Tasa de consumo	12,824 km/l	15,128 km/l

Tabla 4.3: Valores de desempeño para ciclo de conducción por autopista.

En la tabla 4.4 se presentan los valores de desempeño para ambos motores en un ciclo de conducción semi-urbano.

Ciclo	Otto	Atkinson
Consumo	0,63055 kg	0,5318 kg
Distancia	10,402 km	10,402 km
Energía	28,203 MJ	23,785 MJ
Tasa de consumo	12,042 km/l	14,279 km/l

Tabla 4.4: Valores de desempeño para ciclo de conducción semi-urbano.

En la tabla 4.5 se presentan los valores de desempeño para ambos motores en un ciclo de conducción urbano.

Ciclo	Otto	Atkinson
Consumo	0,22815 kg	0,1925 kg
Distancia	3,1544 km	3,1544 km
Energía	10,205 MJ	8,609 MJ
Tasa de consumo	10,093 km/l	11,964 km/l

Tabla 4.5: Valores de desempeño para ciclo de conducción urbano.



# Capítulo 5

## Baterías secundarias para Autos Híbridos y Eléctricos

### 5.1. Introducción

En este capítulo se presenta una clasificación de las baterías de aplicación en transporte.

### 5.2. 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.

### 5.3. 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:

- 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 autom3viles o de aeronaves , fuentes tipo UPS, HEVs y sistemas de almacenamiento de energ3a estacionario (SES).

- Aquellas aplicaciones en que la bater3a secundaria se utiliza o descarga, esencialmente como una bater3a primaria, volviendo a cargarse despu3s del uso en lugar de desecharla. Las bater3as secundarias se utilizan en esta forma por ejemplo en electr3nica de consumo port3til, herramientas el3ctricas, veh3culos el3ctricos, etc., para bajar costos (ya que pueden ser recargadas en lugar de reemplazarlas), y en aplicaciones que requieran usos de carga m3s all3 de la capacidad de las bater3as primarias.

Las bater3as secundarias se caracterizan (adem3s 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 energ3a son generalmente m3s bajas que de las bater3as primarias. Su retenci3n de carga es adem3s m3s pobre que la mayor3a de las bater3as primarias, sin embargo la capacidad de las bater3as secundarias que se pierde en funcionamiento puede restablecerse mediante recarga.

Algunas bater3as, conocidas como *de tipo recargable mec3nicamente*, son *recargadas* mediante el reemplazo del electrodo descargado o empobrecido, usualmente el 3nodo met3lico, con uno nuevo. Entre ellas, para la utilizaci3n en autos h3bridos y el3ctricos se han estudiado y desarrollado las bater3as de hidruros met3licos y las aleaciones met3licas de litio y aleaciones de carb3n litio.

## 5.4. Bater3as de N3quel - Hidruro Met3lico

### 5.4.1. Caracter3sticas generales

Las bater3as de Hidruro de N3quel-Metal se han convertido en la tecnolog3a de bater3as 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 energ3a, potencia, ciclo de vida y temperatura de operaci3n, las siguientes caracter3sticas de las bater3as NiMH se han establecido en el mercado:

- Tama3os de celda flexible desde 0.3 hasta 250 Ah.
- Operaci3n segura a altas tensiones
- Excelente potencia y energ3a volum3trica.
- F3cil conexi3n en serie o en paralelo.
- Selecci3n de celdas cil3ndricas o prism3ticas.
- Seguridad en carga y descarga, incluyendo tolerancia a sobrecarga excesiva o sobre descarga.

- Libre de mantenimiento.
- Excelentes propiedades térmicas.
- 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 pequeña 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  $1000\text{ W/kg}$ .
- Energía Especifica  $>50\text{ Wh/kg}$ .
- Carga de freno regenerativo  $>500\text{ W/kg}$ .
- Eficiencia de ciclo HEV  $>85\%$ .
- Larga vida.
- Bajo costo.
- Sin Efecto Memoria.

### 5.4.2. Generalidades sobre la conformación de Níquel - Hidruros Metálicos

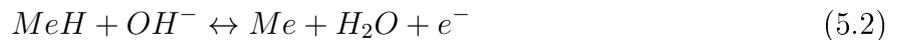
Los hidruros metálicos generalmente son usados como electrodo negativo en un amplio número de baterías en las que tienen lugar reacciones reversibles en conjunción con un electrolito acuoso y *Níquel* como electrodo positivo.

Las reacciones electroquímicas serían las siguientes:

**Cátodo** Electrodo positivo (Electroreducción)



**Anodo** Electrodo Negativo (Electrooxidación)



(Funciona como electrodo al descargarse, es decir al liberar el Hidrógeno alojado dentro de la estructura metálica)

Algunas veces cuando se aplica un exceso de carga durante la recarga, ocurre la formación de  $O_2$ , según:



El  $O_2$  difunde a través del electrolito y descarga el electrodo negativo.

Estas celdas tenían, en un principio, una energía específica de unos 54 Wh/kg y una potencia específica de 200W/kg. Con el desarrollo de las investigaciones se ha alcanzado energías específicas de 100 Wh/kg y una potencia específica de 1200 W/Kg. La densidad de energía a la que se ha llegado es de 420 Wh/L. En general son diseñadas con un exceso de capacidad del electrodo negativo. Las aleaciones metálicas que se utilizan para pequeños consumidores, están formadas por multi componentes, típicamente alrededor de un 30 % son las denominadas *tierras raras*. (lantánidos y actínidos).

Existen dos tipos importantes de aleaciones para obtener los Hidruros Metálicos. Estas pueden ser identificados con las notaciones  $AB_5$  y  $AB_2$ . El desarrollo de estas aleaciones comenzó a partir del trabajo del laboratorio de Philips en que se descubrió de forma fortuita la reacción del gas Hidrógeno con  $LaNi_5$ . La estructura cristalina de este tipo de aleaciones es básicamente de capas hexagonales de tipo  $CaCu_5$ . Las capas alternativas tendrán dos lantano y níquel, la siguiente solo níquel y otra vez dos con lantano y níquel<sup>(1)</sup>. La reacción del hidrógeno con el material puede ser escrita como:

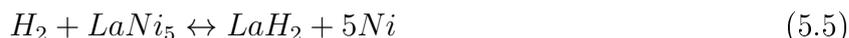


---

<sup>(1)</sup>Proyecto ANII FSE 2009-05

Los Hidrógenos van a residir en los intersticios tetraédricos de los átomos que conforman la estructura cristalina de la aleación. En ocasiones se cambia la composición de la aleación, sustituyendo parte del níquel por aluminio o magnesio y/o cobalto, también es posible cambiar la relación A/B.

A elevadas temperaturas es posible que se dé la reacción de desproporción en las aleaciones  $AB_5$  que se puede escribir como:



Otra característica que pueden presentar estas aleaciones es que la superficie tiende a contener regiones que son ricas en lantano combinado con oxígeno. Y por tanto hay grupos de níquel. Estos grupos de níquel son permeables al hidrógeno y en estas condiciones el hidrogeno puede entrar a la aleación con más facilidad.

Se ha encontrado que es necesario un proceso de activación mediante ciclado para conseguir una reacción total entre la aleación y el hidrógeno. Sin embargo a medida que el hidrogeno ingresa en la estructura, habrá un aumento del volumen de la aleación que normalmente puede causar ruptura y formación de nuevas aéreas frescas donde no hay oxígeno aun cubriéndolas. Esta ruptura sucesivamente produce un desmoronamiento y hasta puede convertir el material en polvo, proceso que se llama decrepitación.

En relación a la presión con la composición, si no hay problemas de activación y la superficie está fresca y no está cubierta con oxígeno, el  $LaNi_5$  reacciona con el Hidrogeno a bajas atmosferas de presión. Hay una diferencia entre el potencial cuando el hidrogeno es agregado y cuando es removido de la aleación. Esta Histéresis, no es muy grande, y probablemente está relacionada con la mecánica del cambio de volumen producido con la reacción y de la propia irreversibilidad del sistema al operar libremente.

La presión de equilibrio sobre la estructura del hidruro metálico va a ser mayor cuanto mayor es la temperatura y la cantidad de hidrógeno almacenado.

Las aleaciones  $AB_2$  pueden presentar dos tipos diferentes de estructura cristalina y se ha encontrado que son más aptas para el almacenamiento de hidrogeno.

Para comparar estas dos formas,  $AB_2$  y  $AB_5$ , se puede decir que los dos sistemas pueden proveer una alta densidad de carga almacenada pero puede ser en el orden de un 5 a 10 % más altas en las  $AB_2$ . Sin embargo, hay una significativa diferencia entre las características electroquímicas. En el caso de la  $AB_5$  el potencial entregado por la celda es independiente del estado de carga de la misma pero para las  $AB_2$  varia apreciablemente. El hecho de que el voltaje decrezca sustancialmente durante la descarga para este tipo de Hidruros metálicos puede ser considerado como una seria desventaja para su uso en baterías. Otra seria consideración en los materiales  $AB_2$  es la cuestión de la oxidación y posterior corrosión particularmente en los compuestos B del metal, lo que reduce la capacidad y el ciclo de vida del compuesto (5.1).

Material	Descarga (mAh/g)	H <sub>2</sub> Carga (mAh/g)
LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	371.90	366.81
MmNi <sub>3.5</sub> Co0.7Al <sub>0.8</sub> H <sub>6</sub>	393.93	388.23
(LaNd)(NiCoSi) <sub>5</sub> H <sub>4</sub>	248.80	246.51
TiMn <sub>2</sub>	509.67	500.16
(Ti,Zr)(v,Ni) <sub>2</sub>	448.78	441.39

Tabla 5.1: Datos extraídos de [48] y [46].

## 5.5. Baterías Ion-Litio

Las baterías de Ion-Litio (Li-ion) 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 tunelizada, como el Óxido de Manganeso-Litio ( $LiMn_2O_4$ ), sobre un colector de papel aluminio. El material de electrodo negativo es típicamente un carbón grafitico, 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.

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 5.5, 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	Venteo y posible fuga térmica al aplastarlas
Baja tasa de auto-descarga	El diseño cilíndrico típicamente ofrece menor densidad de energía que NiCd o NiMH
Capacidad de carga rápida	Capacidad de descarga a alta tasa y alta energía
Capacidad de descarga a alta tasa y alta energía	Alta eficiencia de carga y de energía
Alta eficiencia de carga y de energía	Alta energía específica y densidad de energía
Alta energía específica y densidad de energía	
No posee efecto memoria	

Tabla 5.2: Ventajas y desventajas de baterías Li-ion.

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 promisoría. 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 carbón litiado ( $Li_xC$ ) para el electrodo negativo en lugar de litio metálico, una intercalación de oxido con transición de metal litiado ( $Li_{1-x}M_yO_z$ ) para el electrodo positivo y una solución líquida orgánica o un polímero sólido para el electrolito. Los iones de litio están moviéndose 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  $Li_{1-x}CoO_2$ ,  $Li_{1-x}NiO_2$  y  $Li_{1-x}Mn_2O_4$  que tiene las ventajas de estabilidad en el aire, alta tensión y reversibilidad de la reacción de intercalación de litio. El tipo  $Li_xC/Li_{1-x}NiO_2$ , 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 alta, 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.

## 5.6. Baterías con Aleaciones Metálicas de Litio y Aleaciones de Carbón Litio

Es necesario utilizar aleaciones de Litio, en celdas que operan por encima del punto de fusión del mismo. Estas aleaciones metálicas pueden ser en general binarias o ternarias. También se han desarrollado con gran interés aleaciones de carbono Litio. Las aleaciones metálicas tienen la ventaja de que el electrodo tendrá un menor volumen que las de carbono y que la capacidad que se puede alcanzar será mayor a temperaturas ambiente de trabajo. A su vez, estas dos aleaciones con Litio, causaran menores problemas de seguridad que las de Litio elemental.

Mientras que las baterías de electrodos negativos de Litio tienen menor peso por unidad de carga, también generarán menor potencial. En cambio, celdas con menor actividad de Litio tienen mayores potenciales, entregando un menor potencial eléctrico y cargando con un peso mayor. Adicionalmente, algunos problemas que presentan las baterías de Litio elemental son:

- Problemas de recargabilidad
- Deposición localizada indeseada
- Cambio de forma
- Formación de dendritas
- Crecimiento filamentoso

- Runaway térmico

### 5.6.1. Baterías de aleaciones de Carbón Litio [48]

La estructura cristalina del grafito puro, consiste en láminas paralelas compuestas por hexágonos de carbonos. Las láminas paralelas se colocan unas sobre las otras de modo que los carbonos de una queden en el centro del hexágono de las láminas que tiene por encima y por debajo. Esta forma alternante de apilarse las láminas se denomina A-B-A-B-A.

El grafito es anfótero, por lo que tanto cationes como aniones pueden ser insertados en su estructura. En caso de ser cationes, toda la estructura del grafito tomara una carga negativa y viceversa si son los iones negativos los que entran a la red cristalina. La inserción del Litio en la estructura se produce en etapas ordenadas, llenándose las capas individualmente, es decir, que una vez que un Li entra, los demás Li entraran con mayor facilidad entre las dos mismas capas de carbono en que entro el primero. Esto es porque el Li que entra primero debilita las uniones de van der Waals entre las capas de carbono haciendo que sea más fácil (efecto catalítico) la entrada de los siguientes átomos. Desde luego, existen otras complicaciones sobre este comportamiento que no se mencionan aquí. Al entrar los Litios a la red del carbón, se produce un reordenamiento de la estructura y un aumento del volumen de la misma. Las capas de carbono quedan enfrentando sus carbonos, la de arriba con la de abajo, estructura A-A-A. Esto quiere decir que los hexágonos ahora quedaran concéntricos, y colocados entre ellos se encontrara el Litio alojado. No entre todos los hexágonos se aloja un litio, sino que la máxima cantidad de litio que se puede intercalar estará en la relación  $LiC_6$ .

Una importante consideración en el uso de estos materiales carbonáceos como electrodo negativo es la observación de la pérdida de capacidad durante el primer ciclo de carga-descarga, lo cual implica colocar una extra cantidad de material en el electrodo positivo para contrarrestar esta pérdida de capacidad durante la fabricación de la batería, de modo de aportar esta cantidad de litio que permanece atrapada en la estructura. Esto implica, consecuentemente un extra peso y volumen en la celda total.

Se sabe que, electrodos con una estructura de grafito mas perfectamente ordenada, reaccionarán con el litio a potenciales más negativos y como resultado, el voltaje entregado será dependiente de este factor y del estado de carga. Para que la estructura carbonacea este más ordenada es necesario calentarla a altas temperaturas durante su producción, lo cual consume energía. El valor de la capacidad máxima teórica es de 372 mAh/g, mientras que los valores típicos que se obtienen son del rango de 300 a 350 mAh/g.

Cuando la estructura de carbono contiene una cierta proporción de Hidrógeno ocluido, se ha encontrado experimentalmente que eso deja al litio una extra capacidad que es proporcional a la cantidad de hidrogeno alojado en la estructura previamente, y que esta capacidad disminuye con cada ciclo de carga-descarga a medida que el hidrogeno va siendo desplazado.

### 5.6.2. Baterías de aleaciones metálicas de Litio [48]

Estas baterías emplean un electrodo positivo de  $FeS_2$ , un electrolito de LiCl -KCl y un contra electrodo negativo de aleación metálica de Li-Si o Li-Al. Como se menciono antes, el uso de

aleaciones, necesariamente provoca una reducción de la actividad de litio y por tanto una reducción del voltaje entregado. También presentan un peso y volumen adicional por la presencia de otras especies no involucradas directamente en las reacciones electroquímicas, comparándolas con las que usan puro litio. Además, el valor teórico máximo de la densidad de energía específica, como el de la densidad de energía, siempre son más reducidas también que el de la batería con electrodo de litio puro.

Estas baterías, están diseñadas para conservar durante largos periodos el estado de carga, a temperatura ambiente, antes de ser usadas. Esto es debido a que la cinética de descarga es muy lenta. En general estas baterías son adecuadas a temperaturas un poco más altas, en el entorno de los 400 - 450 °C.

Con el objetivo de alcanzar una densidad de corriente apreciable, manteniendo baja la carga microscópica local y la densidad de flujo de partículas, se suele producir los electrodos que están en conjunción con electrolitos puros, de forma que presenten una alta porosidad microscópica. Así, se tendrá en ellos una alta área de reacción. Esta forma constructiva, sin embargo, contrae algunas desventajas a tener en cuenta, estas son:

- Dificultad para conseguir uniformidad y reproducibilidad.
- Que la micro estructura presenta baja resistencia mecánica cuanto más porosa es.
- Diferentes cambios se acentúan en la micro estructura, como decrepitación (o desmoronamiento), que podrán ser cada vez mas marcados con el tiempo y a medida que se dan los ciclos de carga y descarga.

Además, los electrodos así construidos presentan la necesidad de un periodo de activación donde se establece la estructura reversible. Una forma de alcanzar una buena reversibilidad sería conseguir que la micro estructura tenga la habilidad de acomodar cualquier cambio de volumen que pueda resultar de la reacción que tiene lugar internamente y de esto hay interesantes estudios que involucran una modificación de la estructura del área superficial para obtener mayor espacio para que la estructura crezca y se comprima posteriormente. Desde luego, el cambio de volumen está directamente relacionado con la cantidad de litio que entrará en la estructura cristalina de la aleación.

### 5.6.3. Algunas comparaciones útiles

Batería	Densidad de energía (Wh/m <sup>3</sup> )
Plomo acido	70000
Níquel- metal	240000
Litio-ion	40000

Tabla 5.3: Densidades de energía para los diferentes tipos de baterías.

Batería	Peso (Kg)	Volumen (m <sup>3</sup> )	Eficiencia Promedio (Wh/km)
Plomo acido	461	0.2304	136.22
Níquel- metal	215	0.0672	99.45
Litio-ion	108	0.04032	104.27

Tabla 5.4: Comparación, peso, volumen y eficiencia entre las diferentes variantes propuestas.

## 5.7. Baterías de Reserva y Térmicas

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.

# Capítulo 6

## Celdas de combustible para Autos Eléctricos

### 6.1. Introducción

Los Vehículos con celdas de combustible (CVs) utilizan electricidad generada por una celda de combustible para mover un motor eléctrico. La celda de combustible permite una reacción electroquímica controlada, que transforma el combustible en electricidad y subproductos, prometiendo eficiencias interesantes y bajo ruido. Cuando se utiliza hidrógeno el subproducto es agua, que no tiene mayores efectos contaminantes. Si se utilizan alcoholes (como etanol o metanol) el subproducto será monóxido de carbono pero es de esperar una disminución comparativa de las emisiones respecto del combustible fósil, y si el alcohol es de origen orgánico, de todas maneras el balance de carbono en todo el ciclo de vida del combustible será mucho mejor que en el caso de los derivados del petróleo.

Por otro lado, los FCV serán más eficientes que los ICE, razón por la cual en toda la cadena podrán generar eficiencias energéticas importantes, además de minimizar las emisiones. No obstante, en principio los FCV son bastante menos eficientes que los BEV, cuando ambos se comparan en un contexto similar. Por ejemplo, Eaves and Eaves calculan la electricidad que se debe generar para lograr 60 kWh en las ruedas de un vehículo, y concluyen que en el caso del BEV son 79 kWh, mientras que en el FCV son 202 kWh. Otros esquemas de distribución o producción del hidrógeno que el manejo por Eaves podrían mejorar estos valores, eliminando eventualmente las pérdidas *en el caño* o sustituyendo la electrólisis, pero de todas formas estamos hablando de aproximadamente el triple de energía para lograr la misma energía en las ruedas. Esto en el entendido de que los vehículos tengan pesos y potencias similares.

### 6.2. ¿Qué es una celda de combustible?

Las celdas de combustible, como las baterías, son celdas electroquímicas galvánicas que convierten la energía química directamente en energía eléctrica.

En 1839, William Grove descubrió el principio básico de funcionamiento de las celdas de combustible revirtiendo la electrolisis del agua para generar electricidad a partir del hidrógeno y el oxígeno. El principio que él descubrió permanece vigente aun 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 combustible 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 celda de combustible no necesita ser recargada, opera tranquilamente y eficientemente, y cuando el hidrógeno es usado como combustible genera solo energía y agua potable (se abreviará celda de combustible por CdC). Debido a lo anterior, es que son llamados motores de emisión nula. 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.

### 6.2.1. Principio de funcionamiento

El principio de funcionamiento básico de las CdC es simple. El experimento realizado por William Grove en 1839, fig. 6.1(a) y 6.1(b) muestra como el agua se está llevando a la electrolisis separándose en hidrógeno y oxígeno pasando una corriente eléctrica a través de ella. En la fig. 6.1(b) la fuente de voltaje ha sido reemplazada por un amperímetro, y una pequeña corriente está circulando. La electrolisis está siendo revertida, el hidrógeno y oxígeno están siendo recombinados, y una corriente eléctrica está siendo generada.

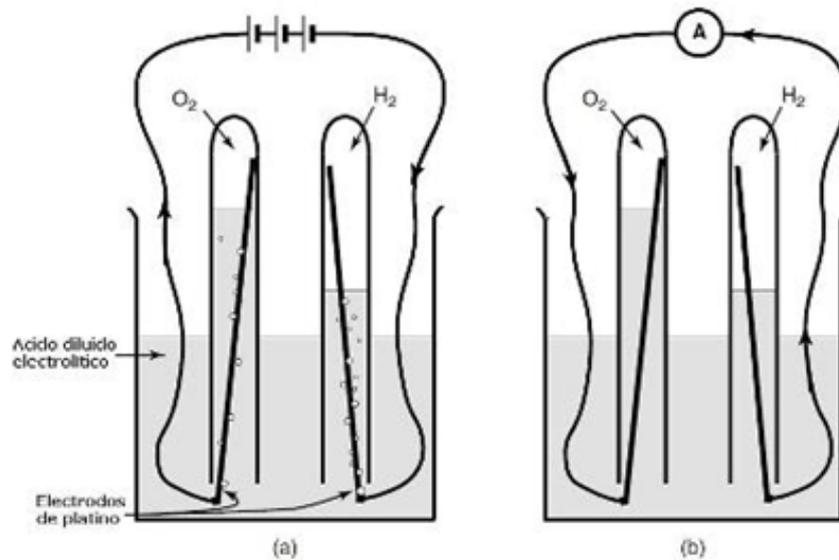


Figura 6.1: (a) La electrolisis del agua. El agua es separada en hidrógeno y oxígeno al hacerle pasar una corriente eléctrica a través de ella. (b) Una pequeña corriente fluye. El oxígeno e hidrógeno están siendo recombinados y generan energía en un proceso inverso (par galvánico o pila). [46]

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 1(a) y 1(b) presenta una demostración del principio básico de las celdas de combustible, pero las corrientes producidas son muy pequeñas. Las principales razones por las cuales estas corrientes son bajas son:

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

Para solucionar estos problemas, los electrodos son usualmente construidos 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 como la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno produce corriente eléctrica, y donde es que entran los electrodos, se necesita considerar por separado las reacciones que se producen en cada uno de los electrodos. Estos detalles importantes varan para diferentes tipos de CdC, pero se verá ahora el tipo más simple, que a su vez es el más común.

En el ánodo de las CdC de acido 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. Ciertos polímeros pueden además ser fabricados para contener iones  $H^+$  móviles (Ej. Nafion). Estos materiales son llamados membranas de intercambio de protones. Comparando las ecuaciones 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 pasaran a través del electrolito, no por el circuito exterior, y todo se perderá.

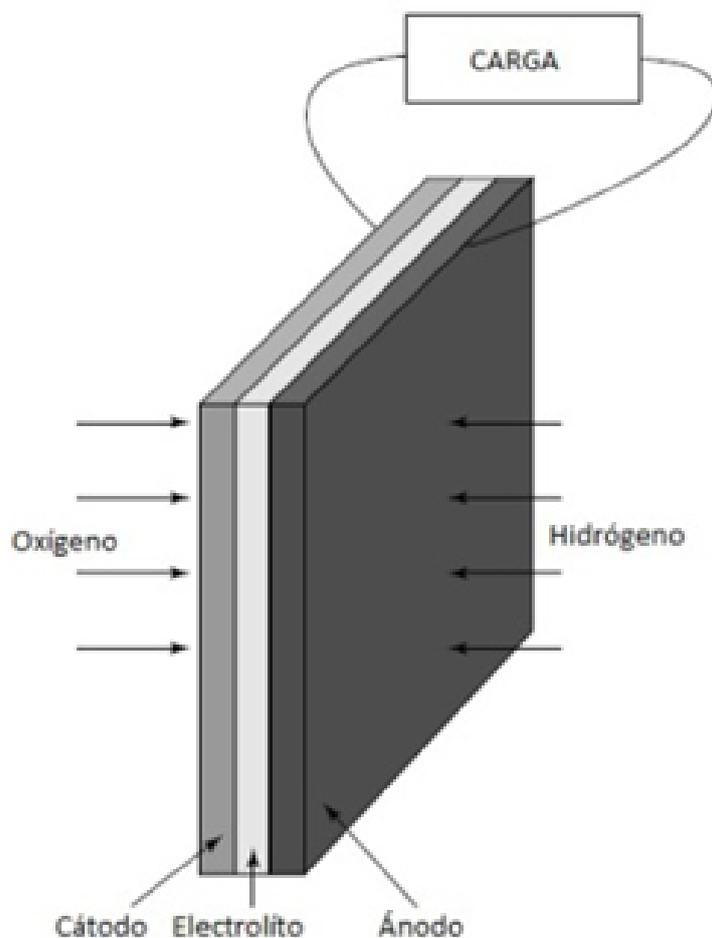


Figura 6.2: Estructura básica de una CdC cátodo - electrolito - ánodo. [46]

Figura 6.2: 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 el ánodo.

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:



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 anteriores vemos que, como con el electrolito ácido, se necesita el doble de cantidad de hidrógeno que de oxígeno. Esto es mostrado en la Figura 6.3.

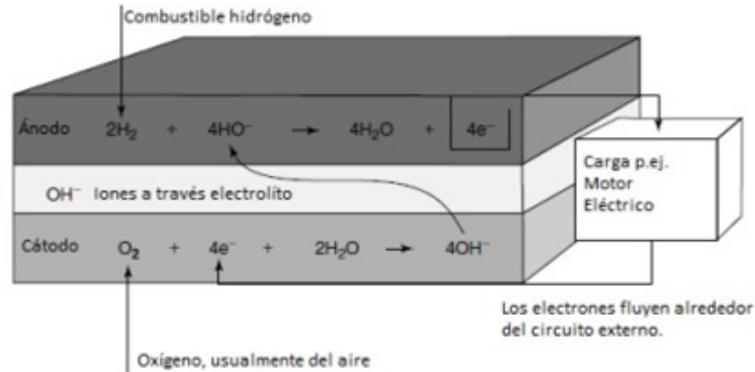


Figura 6.3: Las reacciones en los electrodos y el flujo de las cargas para una CdC alcalina. Los electrones fluyen desde el ánodo al cátodo, pero la corriente convencional positiva fluye desde el cátodo hacia el ánodo. [46]

Notar que aunque el agua es consumida en el cátodo, es creado 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 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 son diferentes en cada caso. Sin embargo, no es apropiado repasar cada ejemplo aquí.

### 6.2.2. ¿Qué 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 fig. 6.4.

Aunque *la energía es liberada* (cambio de energía libre espontáneo), la *energía de activación* (cambio de energía libre suministrado) 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 más 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.

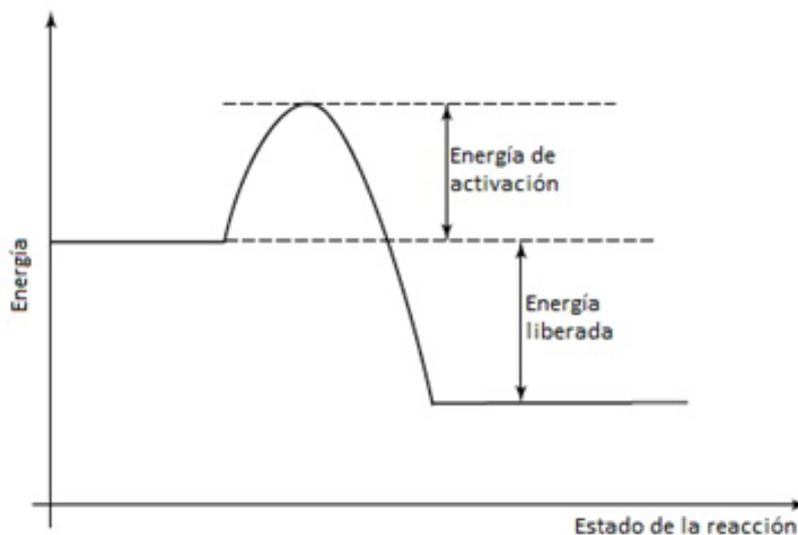


Figura 6.4: Diagrama de Energías en función de la coordenada de reacción. [46]

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 2, 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.

### 6.3. Conexión de celdas en serie - La placa bipolar

Los voltajes de las CdC son bastante pequeños, alrededor de 0.7 V 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 más 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 deberán ser

buenos conductores, pero si cada celda está operando solo a 0.7V, entonces aun una pequeña baja de tensión es importante. Aunque es el método más 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.

### 6.3.1. Suministro de los gases y enfriamiento

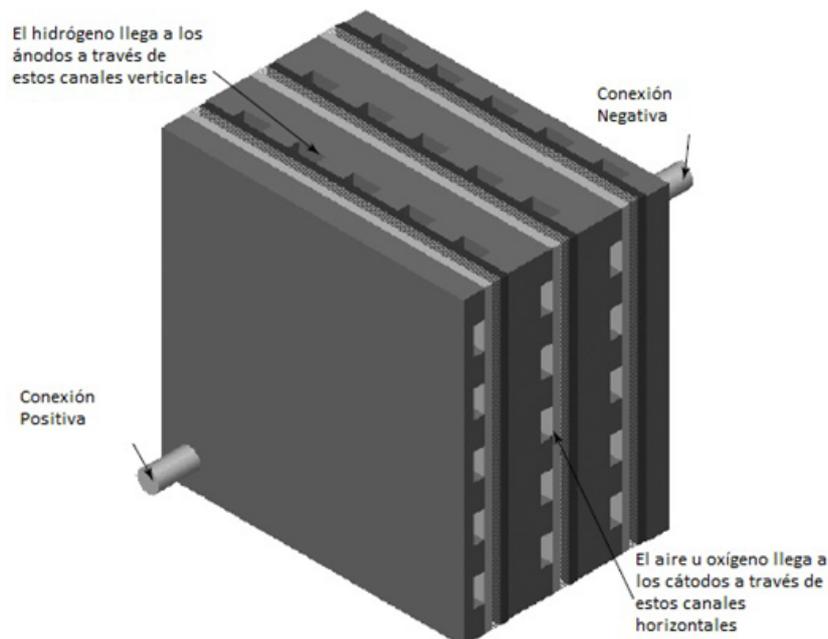


Figura 6.5: Un banco de tres celdas donde se muestra como las placas bipolares conectan el ánodo de una celda con el cátodo de su vecina. [46]

El arreglo mostrado en la fig. 6.5 ha sido simplificado para mostrar el principio básico de las placas bipolares. Sin embargo, el problema del suministro 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 deberá 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 junta alrededor de los extremos de los electrodos no está presionada uniformemente, ya que en los puntos donde hay canales, la junta no está presionada firmemente contra los electrodos. Esto resulta en una alta probabilidad de pérdidas de gases reactivos. Un arreglo más común, requiere unas placas bipolares más complejas. Estas placas se fabrican más 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.[46]

## 6.4. Características y costo de la propia celda de combustible

- El uso de metales preciosos (Pt) en los catalizadores aumenta fuertemente el costo de las celdas (FC, por Fuel Cell).
- Se requieren membranas que pueden tener problemas de agotamiento y limitan la vida útil de la celda.
- La masa total de la celda de combustible aún es importante (densidad de potencia baja) y plantea cuestionamientos fuertes sobre la viabilidad de colocarla sobre un vehículo normal, de unos 1.500 kg, que implican una limitación al peso de la celda en pocos centenares de kilos para potencias del orden de los 50 a 100 kW, lo cual hoy es una restricción importante.

## 6.5. Aspectos de la generación de combustible

- La forma más común de producir hidrógeno actualmente es a partir de hidrocarburos, que son combustibles fósiles y entonces hay que demostrar que se es más eficiente y menos contaminante por esta vía que utilizando el combustible fósil refinado directamente en la aplicación final.
- Si se apuesta a las celdas de combustible en base a alcohol, hay que tener en cuenta que los alcoholes a partir de biomasa se deben producir con las características adecuadas y los volúmenes y costos necesarios para una escala global. Los vehículos en base a etanol ya

elevaron el nivel de precios de algunos granos y productos agrícolas simplemente por un pequeño aumento de demanda en EEUU y Brasil, no está claro que existan los volúmenes adecuados con la disponibilidad de tierra agrícola necesaria.

- Se puede plantear la generación de hidrógeno a partir de la electrólisis del agua, es decir utilizar electricidad para descomponer el agua en sus componentes (hidrógeno y oxígeno), distribuir el hidrógeno y volver luego a generar agua, liberando electricidad. Como se percibe entonces, se consume electricidad en un lugar y momento para luego recuperar la electricidad en otra ubicación y oportunidad.
- El hidrógeno en este esquema no es más que un transporte y almacenamiento de energía, no es una fuente primaria, y como se vio antes en la cadena hay pérdidas en cada etapa, de manera que puede resultar relativamente costoso desde el punto de vista energético. Sin embargo, el esquema de transformar agua en hidrógeno con energía eléctrica, y luego recuperar la electricidad en otro lugar y momento genera algunos problemas, pero también oportunidades y ventajas interesantes.
- Al utilizar energía de la red eléctrica, si la matriz de generación de la región en consideración está fuertemente inclinada a combustibles fósiles (carbón y gas), como en el caso de los EEUU, tanto el consumo total de energía como las emisiones de gases de efecto invernadero aumentan en relación con los vehículos convencionales de gasolina o diesel.
- Si, en cambio se utiliza electrólisis a partir de energía eólica, hidráulica o solar, esto permite desacoplar la oferta de viento, agua o radiación solar de la demanda de energía, que es uno de los problemas críticos que limita el desarrollo de estas formas de energía primaria alternativa.
- Se pueden usar electrólisis a partir de centrales nucleares, que son muy poco agresivas desde el punto de vista de las emisiones de efecto invernadero. Incluso se puede plantear una producción directa de H<sub>2</sub> a partir de H<sub>2</sub>O a muy altas temperaturas en reactores nucleares, sin pasar por electricidad, lo cual es muy eficiente.
- Se puede usar electrólisis a partir de centrales hidráulicas que hoy no siempre pueden utilizar todo el caudal disponible por estar en línea con la demanda, y desperdician energía *dejando pasar* agua del embalse cuando sobra.



# Capítulo 7

## Almacenamiento de hidrógeno para Autos Eléctricos

### 7.1. Introducción

En este capítulo se estudian las diferentes posibilidades para almacenamiento de hidrógeno en vehículos eléctricos, presentando sus ventajas y desventajas. A su vez se realiza un análisis tecnoeconómico respecto del almacenamiento de hidrógeno. Por último se brindan algunos aspectos críticos en la distribución de hidrogeno referidas particularmente a temas de seguridad.

### 7.2. Almacenamiento de combustible

El hidrógeno puede ser almacenado como gas, líquido, sólido o combinado con otros agentes. Cada método tiene sus ventajas y desventajas. Se asume que el hidrógeno es producido a escala comercial.

#### 7.2.1. Almacenamiento de hidrógeno comprimido en tanques cilíndricos para medios de transporte

El método más común para almacenamiento de hidrógeno a escala relativamente pequeña para automóviles y ómnibus es como gas comprimido en cilindros de acero inoxidable a una presión aproximada de 130 a 150 bar. El peso del cilindro es de unos 10 kg y su volumen es de unos 40 litros. El contenido de hidrógeno es de solo 0.5 kg. Por lo tanto su energía específica y su densidad de energía son muy bajas. Se ha intentado documentar el contenido de hidrógeno mediante el uso de materiales más livianos y resistentes como fibra de vidrio reforzada con aluminio y carbono, así como usando presiones más altas (hasta 350 bar).

La energía específica y la densidad de energía aumentan por un factor de 5 veces usando materiales avanzados para los cilindros en base a titanio. El precio en energía eléctrica que se paga por compresión del hidrógeno es de un 10 % en el combustible. Ya que la vida útil de un cilindro va desde los 5 a los 10 años, hay solo un costo marginal, que puede ser sumado al costo del hidrógeno.

Método de almacenamiento	Porcentaje en peso	Contenido (vol. g/l)	Densidad energética (kJ/kg)	Poder calorífico superior (kJ/l)	Costo relativo <sup>a</sup>
		<b>Hidrógeno gaseoso</b>			
Cilindro de acero(60kg/50l/200atm)	1,5	18	2132	1003	2
Compuesto de alúmina(75kg/125l/200atm)	2,6	17	3700	1739	3
		<b>Hidrógeno líquido</b>			
Criogénico (300 m <sup>3</sup> )	12,5	71	17765	9919	1
		<b>Hidrógeno Sólido</b>			
FeTiH <sub>2</sub>	1,6	96	2278	13564	3
LaNi <sub>5</sub> H <sub>6</sub>	1,4	89	1990	12749	3
Mg <sub>2</sub> NiH <sub>4</sub>	3,2	81	4514	11474	3
		<b>Hidrógeno Combinado</b>			
N-octano	15,8	11	47652	33524	1
Metanol	12,5	150	22321	17665	1
Amoniaco	17,6	136	22363	17222	1

<sup>a</sup> Código para el costo relativo: 1 → menor costo de capital (≈ \$10/kg de H<sub>2</sub>); 5 → Mayor costo.

Tabla 7.1: Evaluaciones tecno-económicas de sistemas de almacenamiento de hidrógeno en transporte. a: Código para el costo relativo. 1: menor costo de capital (= \$10/kg de H<sub>2</sub>), 5: Mayor costo.

### 7.2.2. Almacenamiento de hidrógeno líquido para medios de transporte

El hidrógeno es el combustible más ligero en términos de energía específica y el oxígeno el oxidante más ligero. Por esto la NASA ha puesto especial interés en ellos para su aplicación en programas espaciales. En el frente terrestre, cuando se requieren transportar grandes cantidades de hidrógeno, el método criogénico parece ser el ideal. La licuefacción de hidrógeno es un proceso de alto costo energético, teóricamente requiriendo aproximadamente 3,3 kWh/kg. Sin embargo, durante la licuefacción, ocurre la conversión orto-para de hidrógeno, y esto aumenta la energía teórica a 3,8 kWh/kg. Los requerimientos energéticos son considerablemente altos, en un factor de 6 para licuadores pequeños y de 3 para licuadores grandes. El resultado neto es que se requerirán por lo menos 35 % de la energía del hidrógeno para el proceso de licuefacción.

Hay cuatro dificultades asociadas con el proceso de licuefacción (Proceso Linde -Hampsen):

1. La licuefacción de hidrógeno ocurre a una temperatura extremadamente baja, 20,4 K. (pueden introducirse impurezas).
2. La temperatura de inversión de Joule-Thompson para el hidrógeno es de 204K, menor que la temperatura ambiente. Por lo tanto será necesaria la licuefacción de un gas auxiliar como nitrógeno para disminuir la temperatura del hidrógeno por debajo de la temperatura de inversión de J-T. Esto aumenta los costos en energía.

3. El proceso de refrigeración está limitado por Carnot y la eficiencia es cero a cero K. La temperatura de licuefacción es solo 20 °C superior.
4. A temperatura ambiente la relación orto-para es 3 a 1. La forma para tiene menor energía. A la temperatura de licuefacción habrá un 99.7% de forma para. Si bien la conversión de orto a para es exotérmica, la reacción solo ocurrirá bajando la temperatura y por lo tanto los requerimientos de energía para la licuefacción serán altos.

BMW ha usado hidrógeno líquido en vehículos con motores de combustión interna. Los tanques de almacenamiento en los vehículos eran de tipo francos de Dewar (el frasco de hidrógeno líquido es inmerso en un segundo frasco de nitrógeno líquido para prevenir la absorción de calor por radiación). Las paredes son de 3cm de grueso conteniendo una lámina de aluminio entrelazado con esteras de fibra de vidrio.

Más recientemente Daimler Benz exhibió un automóvil con celda de combustible a hidrógeno líquido. La diferencia con el anterior es que la alimentación de hidrógeno de este vehículo se hace en forma gaseosa y calentado a la temperatura requerida. El calor perdido por la celda de combustible puede ser eficientemente usado con este propósito.

Económicamente, el costo del hidrógeno líquido es de aproximadamente \$12/GT para uso a gran escala. Se multiplica por un factor entre 5 y 10 para menor escala en vehículos. Sería más apropiado usar hidrógeno líquido para buques y trenes.

### 7.2.3. Almacenamiento de hidrógeno en hidruros de metal

El uso de hidruros de metal como una fuente de hidrógeno para celdas de combustible ha cobrado especial interés desde los 70s. Otras aplicaciones de los sistemas de almacenamiento incluyen su uso en bombas de calor y compresores. Hay tres tipos de hidruros de metal:

- Iónicos (hidruro de magnesio).
- Covalentes (hidruros de berilio).
- Intermetálicos (hidruros de metales de transición y tierras raras).

Para el almacenamiento, los hidruros de metales o aleaciones son los ideales ya que absorben y desorben hidrógeno reversiblemente. Las características de absorción/desorción de hidrógeno en un metal o aleación se representan en una grafica presión-composición-temperatura o desde el punto de vista electroquímico de potencial en función del tiempo (fig. 7.1).

La extensión de la absorción dependerá de la presión de equilibrio. A presiones bajas el hidrógeno adsorbido difunde y ocupa los lugares intersticiales de la red metálica y la isoterma asciende abruptamente a medida que el hidrógeno se absorbe en el metal formando una solución sólida o fase  $\alpha$ . La fase  $\beta$ , que está en equilibrio con la fase  $\alpha$ , es la fase en la cual se da la mayor absorción de hidrógeno. Según la regla de las fases la presión debería ser constante en esta región. Luego de la región de la fase  $\beta$ , la presión de equilibrio aumenta fuertemente con la cantidad de hidrógeno absorbido. Con el aumento de temperatura, la región de presión

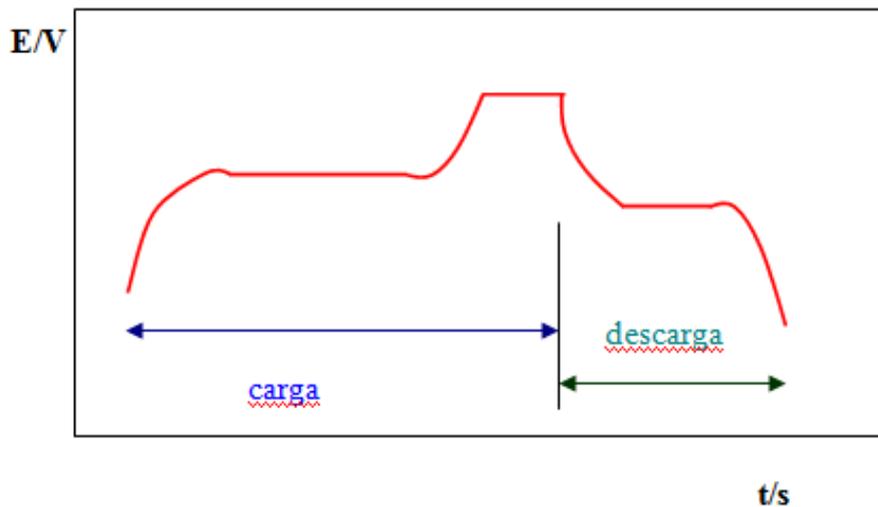


Figura 7.1: Curva de potencial vs. tiempo para la carga de hidrógeno y formación de hidruros fase  $\alpha$  y  $\beta$  y para la descarga posterior.

constante se vuelve más pequeña, por lo que la absorción de hidrógeno será menor.

El rango de presiones que son de interés para almacenamiento de hidrógeno van de 1 a 5 atm. Es necesario que la desorción de hidrógeno se dé por debajo de los  $100^{\circ}\text{C}$ . Según la fig. 7.2 las aleaciones e FeTi y VNb son las potenciales candidatas Las aleaciones  $AB_5$  son usadas predominantemente en electrodos de las baterías recargables de hidruros de Ni/metal ya que tienen la característica ideal de máxima absorción de hidrógeno (un átomo de hidrógeno por cada átomo de metal).

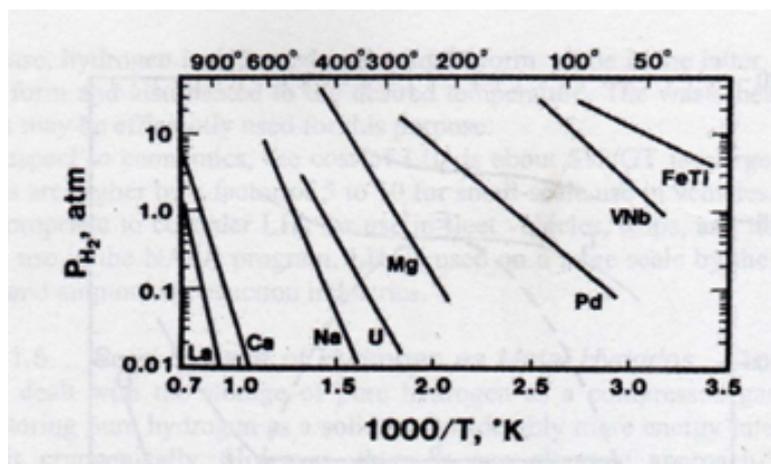


Figura 7.2: Presión de equilibrio para la absorción de Hidrógeno por algunas aleaciones metálicas, en función de la temperatura.

Toyota, Honda y Mazda han lanzado vehículos con hidrógeno almacenado como hidruros de metal. En todos los casos se utilizaron aleaciones  $AB_5$ . Por causa del bajo contenido de hidró-

geno la autonomía de los vehículos eran de aproximadamente 200 km o menos con un sistema completamente cargado.

Algunas de las desventajas de estos sistemas de almacenamiento son:

- Si bien el contenido de hidrógeno en base volumétrica es bueno, es bajo en una base de porcentaje de peso. En consecuencia, no es suficientemente competitiva con el procesamiento de hidrógeno para producir hidrógeno.
- Durante la hidruración/deshidruración hay un desgaste de la partícula. Si bien es ventajoso para la cinética de la reacción tener partículas pequeñas, estas no deberán tener tamaños menores a la micra.
- El control térmico es crítico. La hidruración es exotérmica por lo tanto la unidad de almacenamiento necesitará enfriamiento. La deshidruración, para suministro de hidrógeno, requiere calentamiento.
- La cinética de las reacciones de hidruración/deshidruración son muy sensibles a las impurezas (oxígeno, monóxido de carbono, sulfuros). El oxígeno, presente en niveles críticos, causa riesgos de incendio. Hidruros en partículas ultra pequeñas son pirofóricos.
- Del punto de vista económico, el almacenamiento de hidrógeno usando metales o aleaciones es algo caro. (\$1000/kg de hidruro de metal).

Una propuesta alternativa es el uso de hidruros iónicos como el  $NaBH_4$  y u combinación con agua para generar hidrógeno, por ejemplo:



Estas reacciones son algo exotérmicas y deben ser llevadas a cabo de manera controlada. En el caso de  $NaBH_4$ , el control de pH y el uso de catalizador son esenciales. Estos sistemas fueron propuestos para aplicaciones en transporte pero presentan algunas desventajas:

- Estos hidruros son muy estables y su regeneración desde los productos son muy caros e intensivos del punto de vista energético.
- Transportar una gran cantidad de agua es esencial para la reacción. El peso y el volumen del agua tienen que ser tenido en cuenta al determinar la densidad energética y la energía específica en el sistema de almacenamiento.
- Hay cuestiones de seguridad a tener en cuenta cuando se combinan con agua. Las reacciones deber hacerse en reactores óptimamente diseñados.
- Los productos óxidos e hidróxidos son altamente corrosivos. Esto hace que la selección del material del contenedor sea bastante desafiante.

Masa del contenedor vacío	0.26 kg
Masa del hidrógeno almacenado	0.0017 kg
Eficiencia de almacenamiento (% masa de Hidrógeno)	0.65 %
Energía específica	0.26 kWh/kg
Volumen del contenedor	0.06 L
Masa de Hidrogeno por litro	0.028 kg/L

Tabla 7.2: Detalles de un pequeño hidruro metálico utilizado como contenedor para el almacenamiento de Hidrógeno. Es utilizado en equipos electrónicos portables.

### 7.3. Análisis tecnoeconómico del almacenamiento de hidrógeno

El desarrollo de un almacenamiento de hidrógeno seguro, compacto, liviano y de bajo costo es muy importante particularmente para vehículos. También es deseable que la recarga de hidrógeno a bordo del vehículo sea rápida (menos a cinco minutos), con un relativo bajo gasto de energía, por ejemplo para compresión. En estos días el almacenamiento de hidrógeno comprimido a 350 bar satisface muchas de las metas trazadas con excepción de la densidad volumétrica de energía. La simplicidad del almacenamiento de gas comprimido lo hace atractivo, especialmente para vehículos como los ómnibus, donde la limitación de espacio no es tan rigurosa como en autos. Sin embargo la densidad volumétrica de energía es más baja para gas comprimido que para gas líquido o hidruros de metal. Para vehículos muy eficientes, la cantidad de energía en el hidrógeno almacenado es mínimamente aceptable para una autonomía de 500 km, y el volumen no podrá superar las restricciones.

El costo y performance de los sistemas de almacenamiento a bordo para vehículos con celdas de combustible fue estimada por Directed Technologies, Inc. y Ford Motor Company, asumiendo que estos sistemas son producidos en masa. Los costos de producción en masa de \$1000 por auto son estimados para cilindros avanzados de gas comprimido que pueden contener hidrógeno a 350 bar. Los costos de hidrógeno líquido se proyecta que sean de \$500 por auto. Finalmente, los costos de sistemas con hidruros de metal están menos caracterizados, ya que están algo más lejos de la comercialización, pero se proyecta que sean algunos miles de dólares por auto.

### 7.4. Aspectos críticos en la distribución y almacenamiento del hidrógeno [50]

- A presión atmosférica y temperaturas normales es un gas de bajísima densidad, y requiere altas presiones y bajas temperaturas, ya sea que se distribuya en forma de gas comprimido o de líquido muy frío, ambas cosas resultan costosas (se consume energía para comprimir y enfriar), se requieren equipos especiales y se plantean problemas de seguridad adicionales por las altas presiones y la alta inflamabilidad del  $H_2$ .
- Adicionalmente, se plantea el tema del almacenamiento de  $H_2$  a bordo del vehículo, con costosos tanques y esquemas de seguridad (además de poco denso es altamente inflamable). Sin embargo, esto es relativo ya que solamente inflama al salir del recinto.

- Un esquema de distribución de hidrógeno hasta el consumidor final requiere obras importantísimas (gasoductos, tanques de almacenamiento, estaciones de servicio alternativas que pueden ser muy particulares (se maneja gas licuado a bajas temperaturas, etc.)). En los EEUU por ejemplo, el costo de las estaciones de servicio se ha estimado entre 100 y 600 mil millones de dólares, y el de las tuberías de hidrógeno entre 0.6 y 1.4 millones de dólares por milla. En definitiva, de todas las formas de vehículos alternativos que se están manejando, los FCV son los que aún tienen varios aspectos *en desarrollo* y requieren inversiones de I+D importantes y largos tiempos para llegar al mercado. En rigor, los HEV ya están comercialmente disponibles en los mercados más desarrollados, aunque se pueda considerar que todavía no compiten masivamente con los vehículos convencionales (ICE), y los BEVs son tecnología madura aunque aún con baja autonomía, dependiendo del desarrollo de baterías avanzadas, pero los FCV no han llegado aún a esa etapa o existen experiencias más de tipo demostrativo.

#### 7.4.1. Transmisión y distribución de combustible: hidrógeno versus combustibles alternativos

Muchos estudios indican que el hidrógeno comprimido es la opción mas simple de almacenamiento a bordo en vehículos. Hay un gran número de posibilidades a considerar en temas de producción, distribución y almacenamiento a gran escala. Esto incluye:

- Hidrógeno producido a partir de gas natural en plantas de reformado con vapor y distribución en camiones como hidrógeno líquido a las estaciones de servicio.
- Hidrógeno producido a partir de gas natural en plantas de reformado con vapor y distribución de hidrógeno gas a escala pequeña por tuberías a las estaciones de servicio.
- Fuentes de hidrógeno proveniente de las industrias químicas, por ejemplo exceso de capacidad en las refinerías que hayan actualizado su capacidad de producción de hidrógeno, con distribución por tuberías a las estaciones de servicio.
- Hidrógeno producido en las estaciones de servicio a pequeña escala por reformado de gas natural con un steam-reformer.
- Hidrógeno producido a pequeña escala por electrolisis de agua en las estaciones de servicio o incluso en los hogares.

Habrá que avanzar en otros métodos como la gasificación de biomasa, residuos sólidos municipales, electrolisis potenciada por energía eólica o solar. El costo de capital de desarrollar una gran infraestructura de recarga de hidrógeno gaseoso para vehículos con celdas de combustible ha sido estimada por muchos autores, estando en el rango de cientos a miles de dólares por auto, dependiendo de la vía de suministro de hidrógeno y de la demanda. Al principio el costo de las estaciones de servicio serían considerablemente más altas que las anteriores pero luego que se hayan instalado varias el costo de capital debería decrecer. El mejor suministro de hidrógeno es específico de cada lugar, dependiendo de los costos locales de la energía, el tamaño de la demanda, y la distancia de más cercana de la fuente de hidrógeno.

El costo de crear una infraestructura para el hidrógeno ha sido comparada con la de combustibles alternativos. Análisis tecno-económicos revelaron que el costo de capital de infraestructura para hidrógeno por auto, basado en las opciones de suministro de hidrógeno a mediano plazo, es comparable con el de una infraestructura para metanol, asumiendo altos niveles de implementación y vehículos altamente eficientes. Mantener la corriente infraestructura de gasolina sería más costoso que implementar una nueva infraestructura basada en la producción de hidrógeno vía reformado de gas natural. La infraestructura basada en el carbón con secuestro de  $CO_2$  y distribución e hidrógeno se proyecta que sea más costosa que la anterior así como las rutas renovables de obtención de hidrógeno.

Método	Eficiencia de reserva gravimétrica, %masa de hidrógeno	Masa volumétrica (en Kg) de Hidrógeno por litro
Gas presurizado	0.7 – 3.0	0.015
Hidruro metálico reversible	0.65	0.028
Agua + Hidruro metálico	2.2	0.020
Líquido criogénico	15.2	0.040
Metanol reformado	13.9	0.055

Tabla 7.3: Métodos comparativos de reserva de hidrógeno combustible. La tabla se refiere al sistema completo en el que trabajan, no al material por sí mismo.

#### 7.4.2. Seguridad del combustible [46] [47]

Algunas propiedades fisicoquímicas pueden verse en la Tabla 7.3. En algunos aspectos, el hidrógeno es claramente más seguro que la gasolina. Se dispersa rápidamente en una fuga a diferencia de la gasolina que forma charcos y cuyos humos persisten aún fuera. Además la no toxicidad es otra ventaja del hidrógeno. Otros aspectos a considerar es que el hidrógeno es una molécula muy pequeña y es más propenso a fugas que otros gases. La prevención de fugas acompañado con un diseño y mantenimiento adecuado así como un confiable sistema de detección de fugas son claves para la seguridad. El hidrógeno puede causar fragilización de algunos aceros, desembocando en rupturas, fugas y fallas. Esto se puede evitar con la correcta selección de los materiales. El hidrógeno tiene un alto rango de inflamabilidad y límites de detonabilidad, como ejemplo las mezclas con aire pueden promover incendio o una explosión. En la práctica el límite inferior de inflamabilidad es el más importante y son comparables entre hidrógeno y su correspondiente en gas natural.

La energía de ignición es baja para los tres combustibles comparados con fuentes reales como chispas electrostáticas. Para el hidrógeno es de un orden inferior que para metano y gasolina bajo condiciones estequiometrias. Pero en el límite inferior de inflamabilidad, el punto donde es más probable que ocurran problemas, la energía de ignición es similar para metano e hidrógeno. Si una fuga de hidrógeno se da en un espacio cerrado, una gran variedad de mezclas pueden ocurrir, aumentando la probabilidad de encontrar una fuente de ignición. Por esta razón, que el almacenamiento de hidrógeno y la recarga se hagan en el exterior siempre que sea posible o en un sector interior bien ventilado.

Durante el mantenimiento y recarga es importante evitar producir mezclas inflamables, excluyendo el aire de los tanques de almacenamiento líneas de recarga, etc. Esto se puede lograr con cerraduras dobles en las líneas y manteniendo una presión positiva en las líneas y tanques. Si es necesario las líneas deberán purgarse con nitrógeno antes de su llenado con hidrógeno. El hidrógeno se quema con una flama invisible e irradia poco calor por lo que se utilizan detectores infrarrojo o pinturas especiales sensibles al calor en equipos de hidrógeno que permiten una rápida detección. Para asegurar el empleo y estandarización de prácticas seguras en el uso de hidrógeno, se han desarrollado códigos y estandarizaciones para hidrógeno y sistemas de celdas de combustible. El desarrollo de sensores de hidrógeno más confiables y de mas bajo costo es un área en la que se está avanzando.



# Capítulo 8

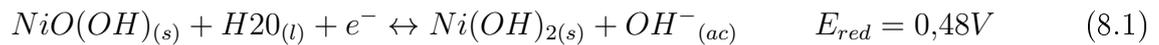
## Estudio de la disposición carga/descarga de celdas de Li-ion y Ni-MH

### 8.1. Baterías Ni-MH

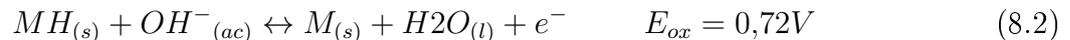
#### 8.1.1. Introducción

El funcionamiento de las baterías Ni-MH está basado en la capacidad de almacenamiento de hidrógeno que presentan los materiales que son utilizados como ánodos. Estos materiales son aleaciones metálicas compuestas con estructura cristalina del tipo  $AB_5$ . Por otra parte, tanto el material catódico como el electrolito, son generalmente iguales que en las baterías Ni-Cd, utilizándose oxi-hidróxido de Ni (8.3) e hidróxido de potasio (KOH) respectivamente. En algunos casos suele utilizarse como material anódico aleaciones metálicas de tipo  $AB_2$ .

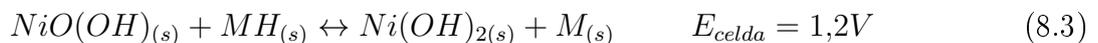
Las reacciones electroquímicas en una batería de Ni-MH son las siguientes:



en el compartimiento positivo (+),



en el compartimiento negativo (-). La reacción química global resulta entonces en:



Las baterías de NiMH alcanzan una densidad energética específica de aproximadamente el doble que las primeras baterías Ni-Cd que se fabricaron,  $70-80 WhKg^{-1}$ , y una capacidad específica de  $60-70 AhKg^{-1}$ . Es por esto, y porque además se evita el uso de componentes tóxicos, que se han sustituido a las baterías de Ni-Cd en diversas aplicaciones. [51]

## 8.2. Baterías Li-ion

### 8.2.1. Introducción

Las baterías de Li-ion están compuestas por electrodos basados en materiales en el cual pueden insertarse y de-insertarse iones litio reversiblemente durante muchos ciclos. Como material anódico se utiliza grafito u otro carbón, lo cual tiene propiedades más favorables frente al uso de Li puro como ánodo, por ejemplo la velocidad de carga, la ciclabilidad y también la seguridad se ve mejorada con el uso de ánodos basados en carbono.

Una desventaja es la autodescarga, que es mucho mayor con el uso de estos ánodos de carbono. Por otra parte, los cátodos en estas baterías pueden ser variados, por ejemplo, espinelas de manganeso ( $LiMn_2O_4$ ), aleación níquel cobalto manganeso (NCM).

El aumento en la energía específica de estas baterías se logra minimizando el peso de la celda, mientras que se maximiza la relación peso de Li, peso de la celda. Si bien este tipo de batería no reemplaza las existentes en el mercado (baterías ácidas de Pb, o Ni-Cd recargables), son muy utilizadas en dispositivos tales como cámaras digitales de video, teléfonos celulares, computadoras portátiles, etc. Esto se debe a que estas baterías no solo son más livianas que las ya mencionadas dado su alta densidad de energía específica ( $WhKg^{-1}$ ), sino que también son más pequeñas dado su gran densidad de energía volumétrica ( $Whm^{-3}$ ). [52]

### 8.2.2. Experimentación

Se evalúan tres dispositivos electroquímicos diferentes, dos baterías secundarias. Se estudia el desempeño de una batería de Ni-MH comercial de marca VIPOW 9V 6F22 de capacidad nominal de 180mAh, y de una batería comercial de Li-ion para cámara de video digital de marca Fits SON. NP-FE1, cuyo potencial y capacidad nominal son de 3.6V y 450mAh respectivamente.

Para las experiencias se utiliza el instrumento de medida potencióstato/galvanostato VOLTALAB PGZ 301 de Radiometer, de manera que los ánodos de los dispositivos actúen como electrodos de trabajo (WE) y los cátodos actúen como electrodos auxiliares (AE). Como electrodos de referencia se utilizaron los cátodos de los dispositivos y se trabajó con una referencia dinámica [53]. Las experiencias consisten (para el caso de las baterías de Ni-MH) en una estabilización mediante cicladas a una velocidad de carga y de descarga de 0.5C hasta alcanzar el límite de -1V. Por otra parte las baterías de Li-ion, también fueron testeadas y estabilizadas mediante ciclado a una velocidad de carga y de descarga de 0.2C entre los límites de 4.2-3.6V.

El estudio de Espectroscopia de Impedancia Electroquímica (EIS) se desarrolla luego de cada 10 ciclos de carga/descarga en ambas baterías (esto representan 50 horas de experiencia por batería) y para diferentes estados de carga, correspondientes al 100 % 70 %, 50 % y 30 % de Estados de Carga (SOC) y se evalúan los resultados mediante circuitos equivalentes ya propuestos en la bibliografía para tales dispositivos. La perturbación de potencial que se utiliza es de 6 mV, y la frecuencia de aplicación varía entre  $10^4 - 10^{-3}$  Hz. Todas las medidas de impedancia se realizan en un estado completamente relajado de las baterías dejando que las mismas alcancen un potencial de circuito abierto estable. Esto es necesario para obtener datos de alta calidad mediante la técnica y evitar el ruido que genera el instrumento. [54]

### 8.2.3. Resultados

Las baterías de NiMH y Li-ion estudiadas en el marco del proyecto presentan capacidades máximas de 180 y 450mAh respectivamente. En el rango de potencial establecido para las medidas en cada caso se determinaron capacidades máximas y de retención (fig. 1 y 2).

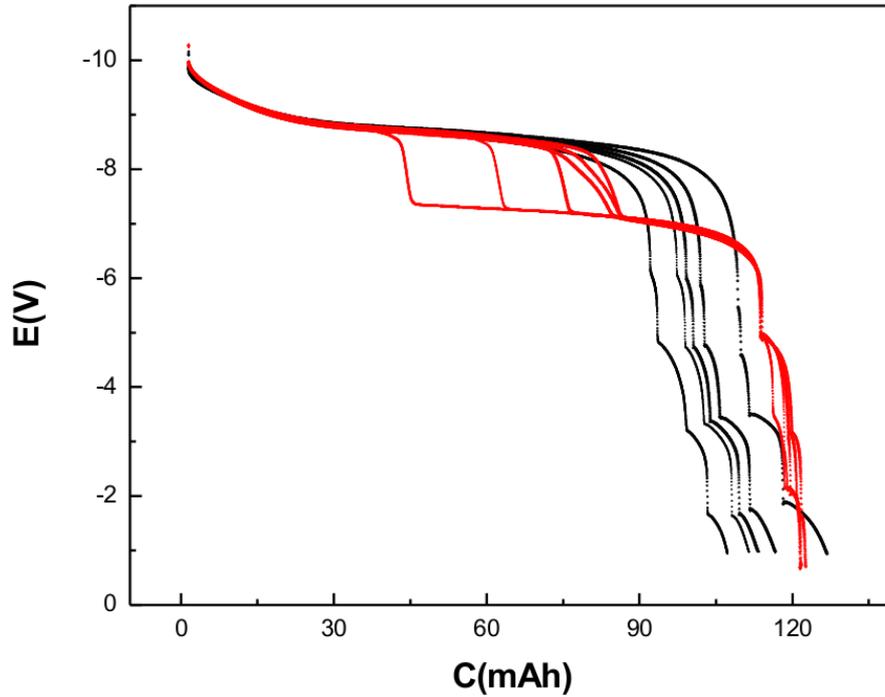


Figura 8.1: Curvas de potencial vs. capacidad de descarga de la batería de Ni-MH. Tanto la carga como la descarga se realizaron a 90mAh.

De la fig. 1 se desprende que la capacidad máxima y la capacidad de retención para la batería son de 126.8mAh y 96,7%, respectivamente.

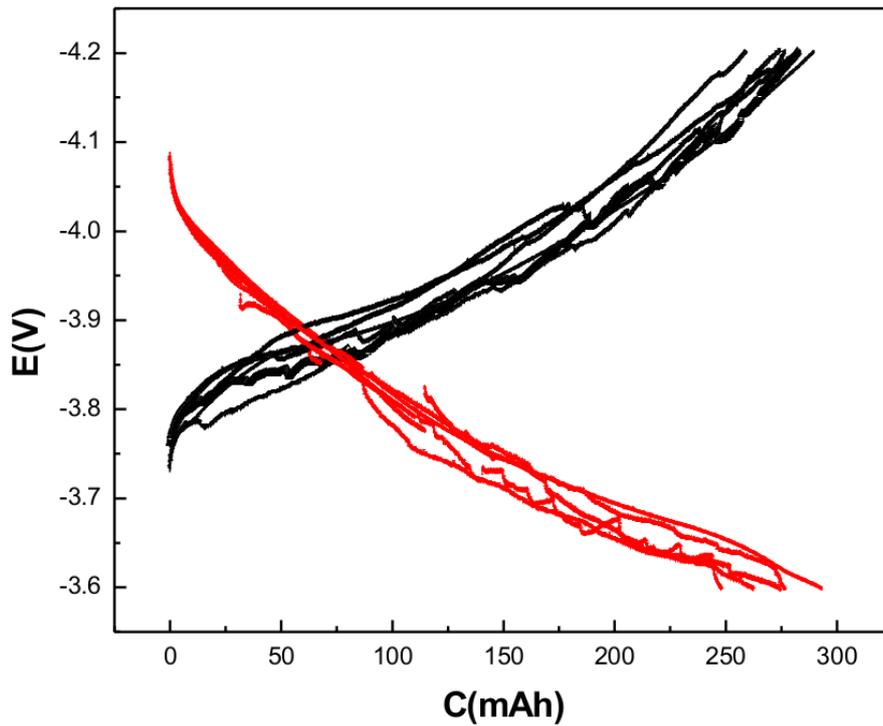


Figura 8.2: Curvas de potencial vs. capacidad de descarga para batería de Li-ion. Tanto la carga como la descarga se realizaron a 125mA.

La capacidad máxima de carga y descarga en el rango de potencial de trabajo así como también la capacidad de retención de la batería de Li-ion, resultan en 289.55mAh, 276.52mAh y 94,8 % respectivamente.

Pendiente $dE/dC$ (NiMH)	Pendiente $dE/dC$ (Li-ion)
$j_{\text{carga}} = -90\text{mA}$ ,	$j_{\text{carga}} = -125\text{mA}$ ,
$j_{\text{descarga}} = 90\text{mA}$	$j_{\text{descarga}} = 125\text{mA}$
6.73	1.88

Tabla 8.1: Valores de las pendientes halladas a través de curvas de descarga (E vs. C) de NiMH y Li-ion, expresadas en  $m\Omega h^{-1}$ .

Sistema	$\Delta E_{\text{carga-descarga}}$ (V)	$\Delta G_{\text{carga-descarga}}$ (KJ mol <sup>-1</sup> )
Ni-MH	0.322	31.07
Li-ion	0.227	21.90

Tabla 8.2: Valores de las diferencias en el estado de carga y descarga para la curva de caídas de potencial (cronopotenciometrías) (E vs. C) para Ni-MH y Li-ion en potenciales y energías.

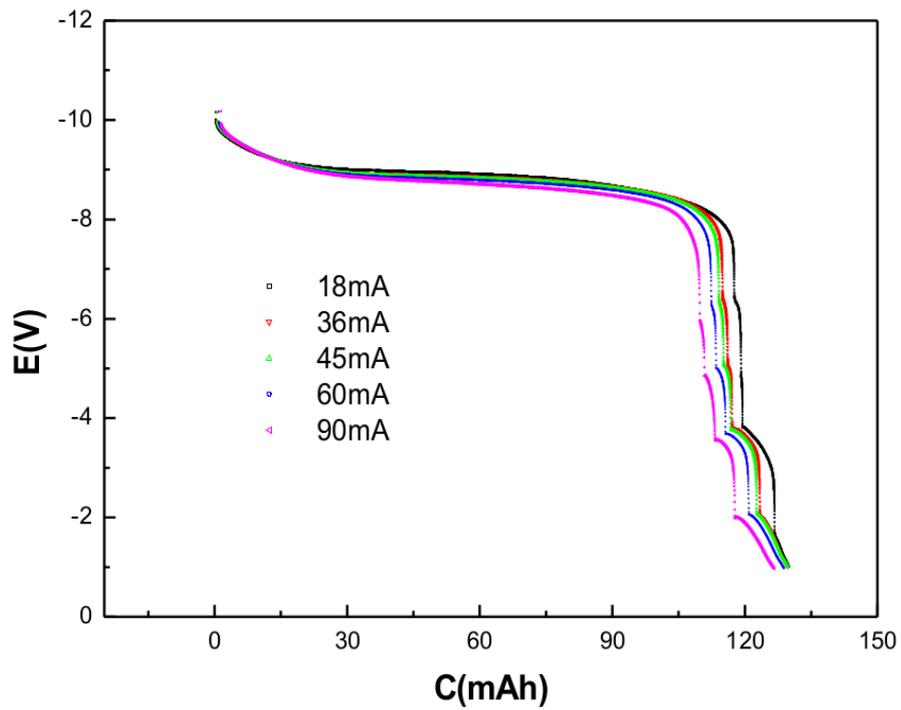


Figura 8.3: Curvas de descarga para batería de Ni-MH a diferentes velocidades.

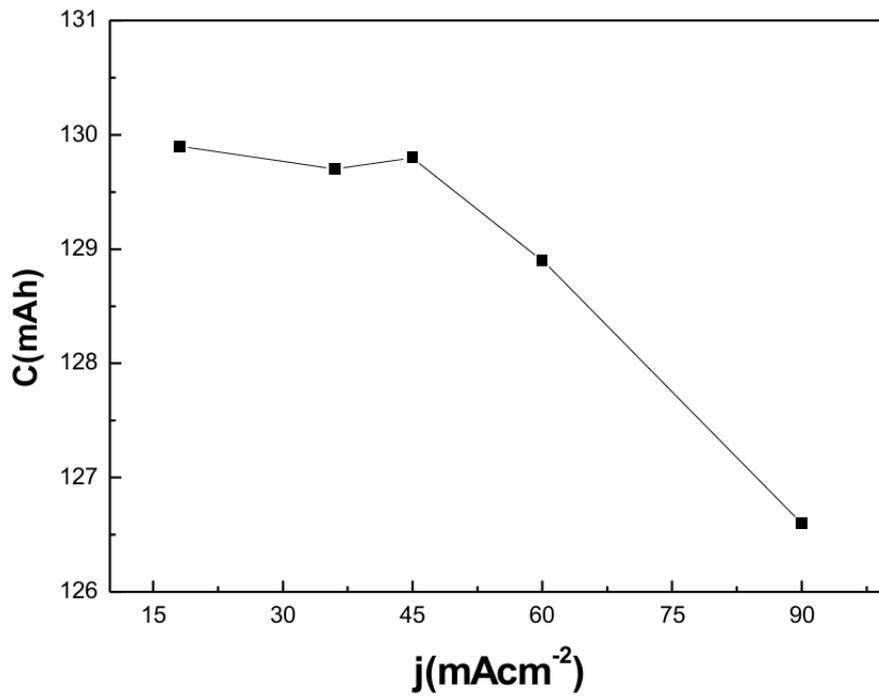


Figura 8.4: Dependencia de la Capacidad con la densidad de corriente para la batería de Ni-MH.

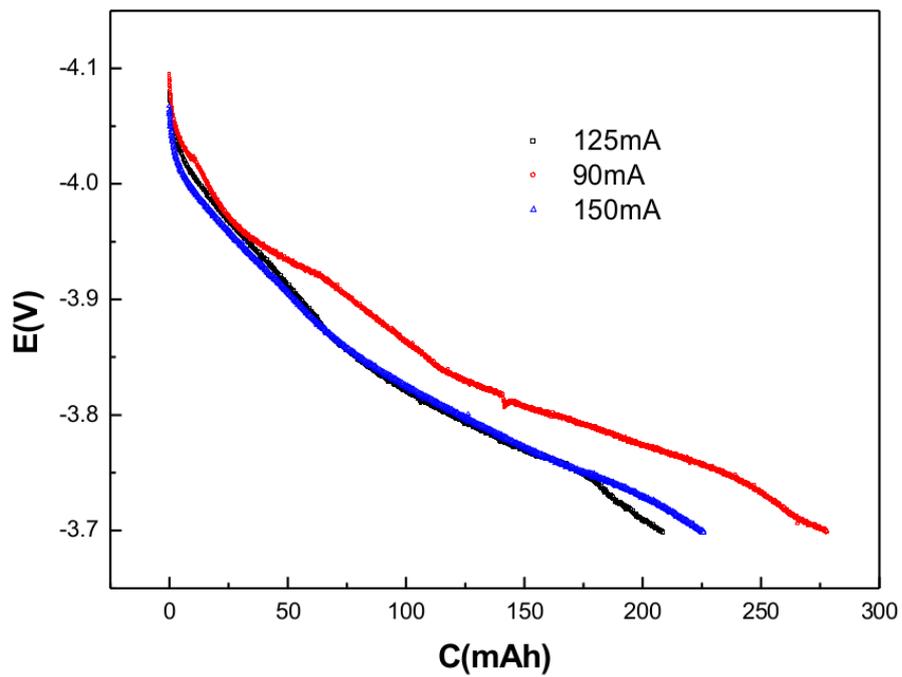


Figura 8.5: Curvas de descarga para batería de Li-ion a diferentes velocidades.

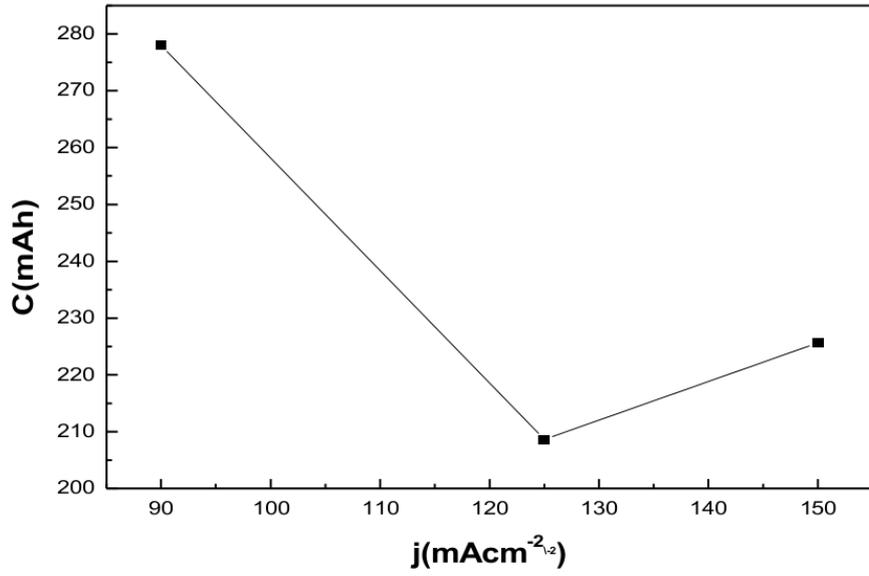


Figura 8.6: Dependencia de la Capacidad con la densidad de corriente para la batería de Li-ion.

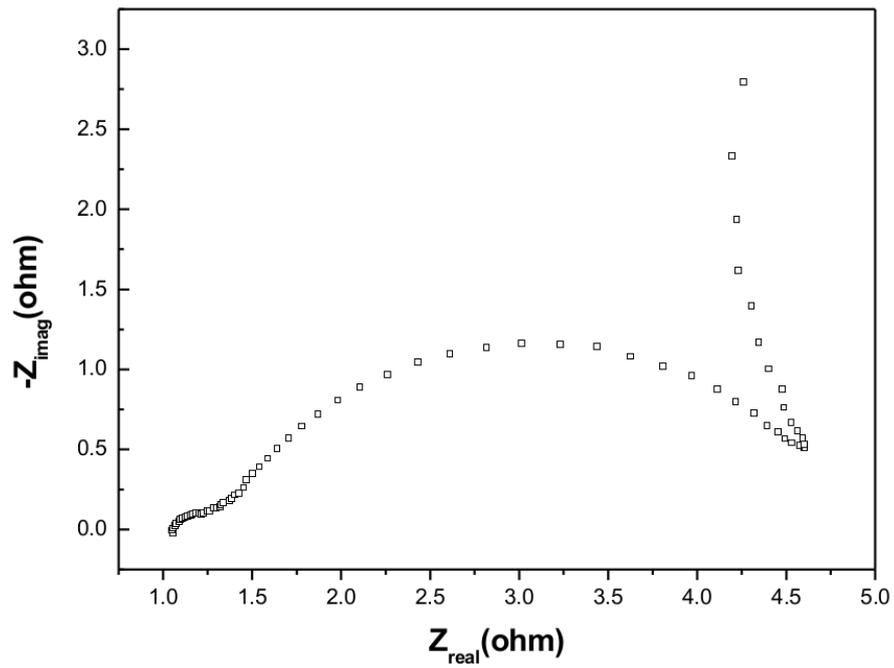


Figura 8.7: Diagrama de Nyquist, batería de Ni-MH 70% SOC.

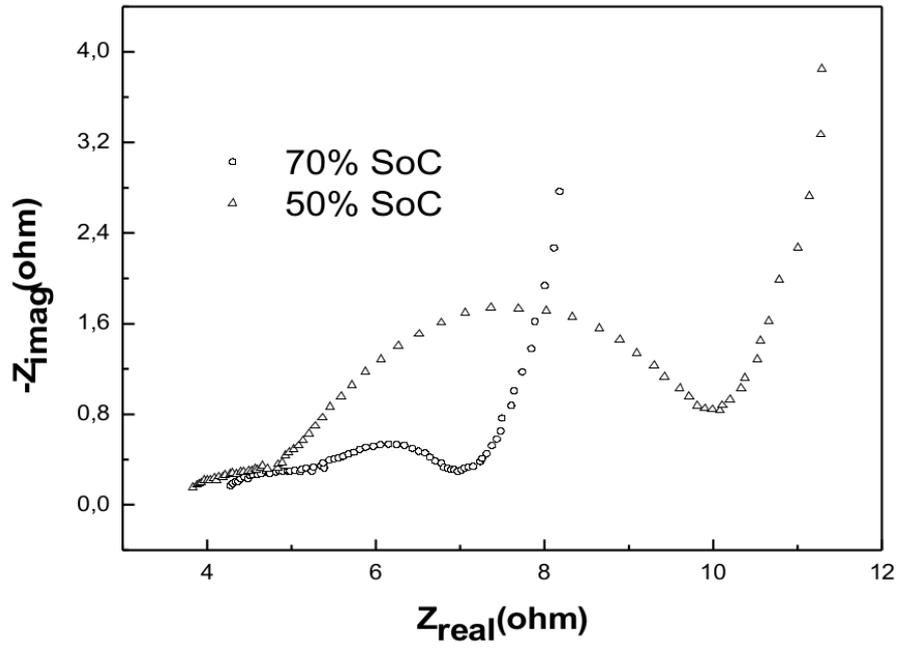


Figura 8.8: Diagramas de Nyquist para batería de Ni-MH a 70 y 50 % de SOC.

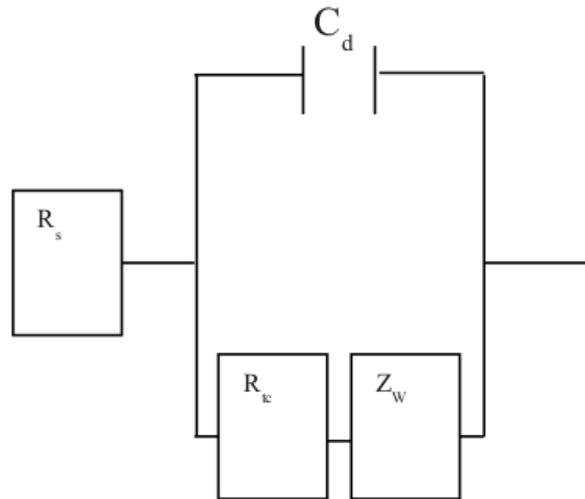


Figura 8.9: Circuito equivalente para sistemas Ni-MH.

	$C_d(F)$	$R_t(\text{ohm})$	$R_s(\text{ohm})$
Ciclo 10 (fig.3) 70%SOC	0.75	3.51	1.2
Ciclo 20 (fig.4) 70% SOC	0.33	4.0	3.85
Ciclo 20 (fig.4) 50% SOC	0.605	6.65	3.8

Tabla 8.3: Parámetros obtenidos mediante el ajuste con el circuito equivalente para el sistema Ni-MH.

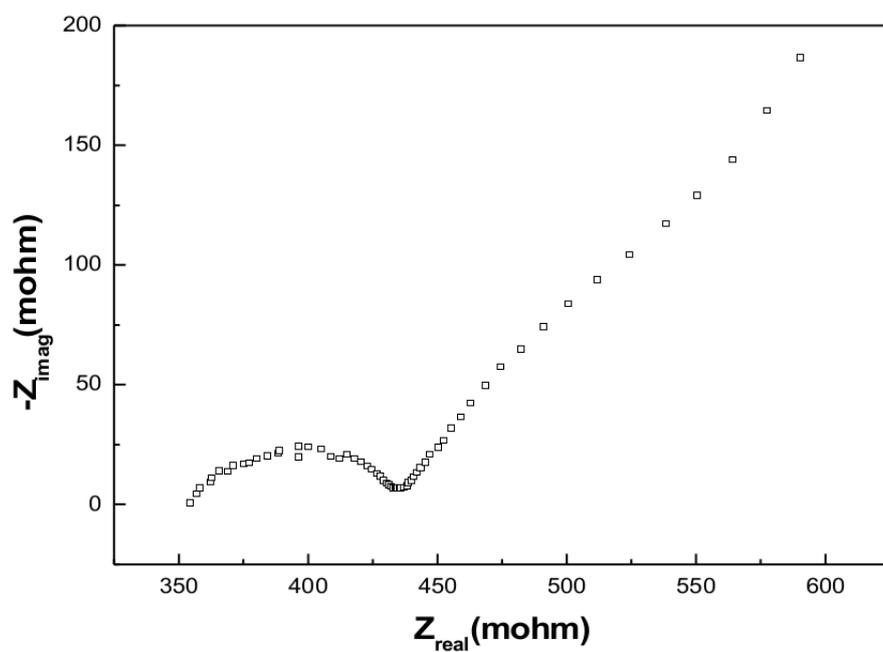


Figura 8.10: Diagrama de Nyquist, batería de Li-ion 100 % SOC.

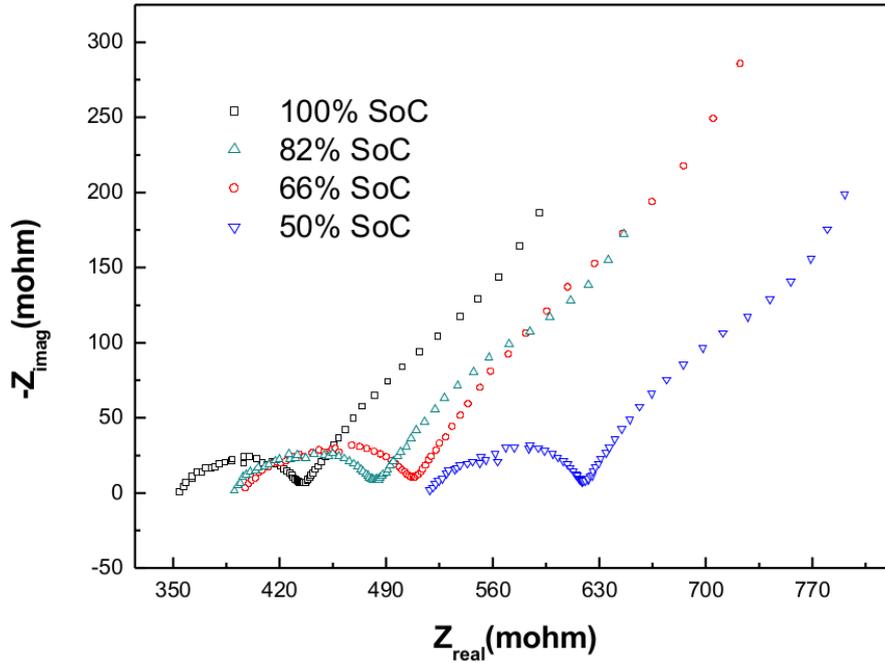


Figura 8.11: Diagramas de Nyquist para batería de Li-ion a 100, 82, 66 y 50 % de SOC.

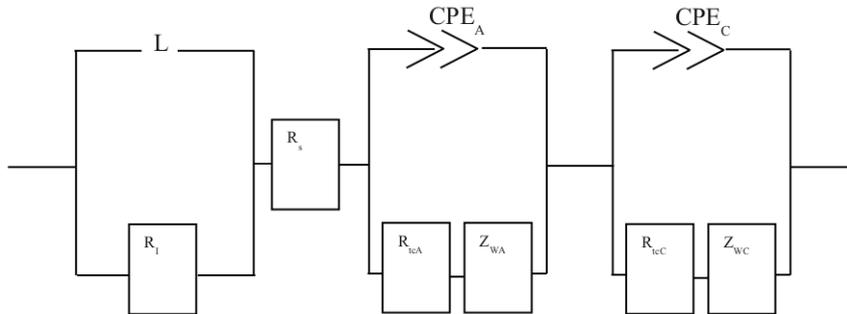


Figura 8.12: Circuito equivalente para sistemas LIB.

### 8.2.4. Discusión

Las curvas en color negro de la fig. 1 representan las descargas del ciclo 1 al 10 (se muestran los ciclos 1,3,4,6 y 10) y en rojo las descargas del ciclo 10 al 20 (se muestran los ciclos 11,13,14,16,18 y 19). La capacidad de descarga lograda en el intervalo de potenciales de trabajo representa el 70.4% de la capacidad teórica de la pila. El perfil E vs. t (cronopotenciometrías) durante las primeras diez descargas tiene el mismo comportamiento y la capacidad máxima se observa en el ciclo 9. Mientras que en los segundos diez ciclos ocurre un cambio en el perfil de las descargas y se alcanzan siempre capacidades levemente menores a las del ciclo 9, aunque estas son, siempre mayores que las obtenidas en todos los demás ciclos del 1 al 10.

SOC	CPE <sub>A</sub>	CPE <sub>C</sub>	R <sub>A</sub> (ohm)	R <sub>C</sub> (ohm)	R <sub>s</sub> (ohm)
100%	0.87	0.15	0.06	0.013	0.158
82%	0.79	0.12	0.079	0.02	0.169
66%	0.78	0.10	0.082	0.029	0.175

Tabla 8.4: Parámetros obtenidos mediante el ajuste con el circuito equivalente para el sistema Li-ion.

La pérdida de capacidad de descarga en baterías Ni-MH se relaciona con la formación de una capa fina de  $Ni(OH)_2$  en soluciones básicas según la reacción de electrodo (8.1).

El grosor de ésta capa aumenta con el número de ciclos y actúa bloqueando la superficie del cátodo, y por tanto también disminuye la capacidad global de la batería. [55] Se define entonces la capacidad de retención de la batería se define como la capacidad remanente luego de n-ciclos, y se expresa mediante la siguiente formula:  $C_n/C_{max} \times 100$  [56]. En el caso de las baterías de litio, se alcanza una capacidad máxima para el rango de potenciales de trabajo que representa el 65 % de la capacidad máxima teórica. La resistencia eléctrica por unidad de tiempo denotado por la pendiente de las curvas de descargas (Tabla 3), es un indicador de la facilidad con la cual el material puede liberar el hidrogeno almacenado en forma de hidruro. El valor más bajo y por ende el mejor, se obtiene para la batería de Li-ion, cuando la descarga se realiza a una densidad de corriente de 125mA.

Las fig. 3 y 4 muestran el comportamiento del sistema Ni-MH con la densidad de corriente, la carga en estas experiencias se realizó siempre a 90mAh, y el mejor desempeño en la capacidad de descarga se obtiene con una densidad de corriente de  $18mAcm^{-2}$  y vale 129.9mAh. Lo mismo se representa en las fig. 5 y 6 para sistemas LIB. En este caso la mejor performance para la capacidad de descarga se obtiene con una densidad de corriente de  $90mAcm^{-2}$  y vale 290 mAh.

La fig. 7 muestra el diagrama de Nyquist para la batería de Ni-MH. A frecuencias altas el mismo adquiere forma de semicírculo que cambia a una línea recta al decaer la frecuencia. La región del semicírculo representa la impedancia asociada a las reacciones electroquímicas de la batería, mientras que la línea recta indica la difusión de especies electroactivas, en este caso la pendiente se relaciona al proceso de difusión del protón en el electrodo. La resistencia de la solución  $R_s$  (resistencia de la solución, el separador, electrodos y conectores) se obtiene de la intersección del semicírculo con el eje real, mientras que la resistencia a la transferencia de carga  $R_{tc}$  corresponde al diámetro del semicírculo.

El circuito equivalente para una batería de Ni-MH en el estudio de EIS puede representarse mediante una capacitancia en serie con una resistencia  $R_s$  en paralelo con una resistencia asociada a la transferencia de carga y una impedancia de Warburg, como muestra el esquema de la fig. 9. La fig. 5 exhibe los diagramas de Nyquist para el sistema en 3 diferentes estados de carga luego del ciclo de carga- descarga número 20. Lo primero que se observa es el aumento en el  $R_s$  cuando pasamos del ciclo 10 al 20, lo cual provoca una caída de potencial, que puede asociarse

al deterioro del separador, aumentando así la resistencia total de la batería. Los valores de  $R_s$  pueden considerarse constantes con respecto al ciclado y el SoC de la batería por lo antes mencionado, y se encuentran relacionados al desempeño de potencial de la misma. Por otra parte los valores de  $R_t$  varían con el número de ciclo y puede relacionarse al estado de carga de la batería.

El deterioro de las baterías puede seguirse utilizando esta metodología, dado que el mismo puede ser causado por pérdidas de potencial o capacidad, lo cual puede seguirse experimentalmente mediante la determinación del  $R_t$  y  $R_s$ .

La fig. 8 enseña la dependencia del estado de carga de la batería en la técnica de impedancia electroquímica. El comportamiento conductivo del material anódico es similar al de un metal semiconductor, con la diferencia del contenido de hidrógeno, cuando la concentración de éste aumenta en el seno de la aleación, la resistencia tiene la misma tendencia y por lo tanto se ve favorecida la conductividad en la batería, dicho de otro modo, la conductividad de la batería mejora con el aumento del estado de carga de la misma. Esto se infiere a partir de la expresión:  
 $\chi = G.l/S$

Las fig. 10 y 11 corresponden a diagramas de Nyquist para LIB, la forma de la curva a frecuencias altas se asemeja a un semicírculo, mientras que a bajas frecuencias se observa una recta con ángulo de  $45^\circ$  aproximadamente. El valor de  $R_s$  tiene tendencia a mantenerse constante para un tiempo dado de la vida útil de la batería, como se observa en los diagramas correspondientes al 82 y 66 %, ambos realizados simultáneamente. Un aumento en el  $R_s$  se da con el número de ciclos, pues el diagrama al 50 % de SOC fue realizado luego de 5 ciclos de carga-descarga con respecto a los anteriores, entonces podemos decir que ocurre algo similar a lo discutido anteriormente para baterías Ni-MH, o sea que el parámetro  $R_s$  se ve afectado por el deterioro del separador, conectores y también debido a la formación de electrolito sólido de interfase.

# Capítulo 9

## Motores eléctricos para autos híbridos y eléctricos

### 9.1. Introducción

Tradicionalmente por su tecnología madura y de simple control, los motores eléctricos utilizados en los sistemas de propulsión de los EV y los HEV han sido los motores de corriente continua. Contando con la ventaja de gran flexibilidad de control del motor en determinado punto de su curva par velocidad, estos motores tienen la gran desventaja de que requieren de un mantenimiento periódico asociado a las escobillas y anillos colectores.

Más recientemente la evolución de la electrónica de potencia y de los microprocesadores, han logrado 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. Estos motores cuentan con la ventaja de no tener prácticamente costos asociados de operación y poseen mayor potencia por unidad de volumen que los motores de corriente continua. Las desventajas de estos motores pasa justamente por la complejidad del control de velocidad.

Otro desarrollo importante en motores eléctricos para sistemas de propulsión de EV y HEV representan los motores de reluctancia variable o motores sincrónicos. Estos motores presentan características notables respecto a los anteriores, como ser una excelente respuesta frente a las exigencias de par y velocidad en aplicaciones de tracción, contando con un diseño simple y muy robusto de sus partes constitutivas. La desventaja de estos motores radica en el control del par motor.

El presente capítulo trata de abordar las particularidades de cada uno de estos motores en aplicaciones de tracción, partiendo de los principios que rigen el funcionamiento de los mismos, desarrollando a partir de estos las expresiones de las variables físicas y eléctricas que permiten representar y analizar cada uno de estos, para llegar a describir con detalle la aplicación de los mismos en sistemas de propulsión.

## 9.2. Motores de continua

Los vehículos eléctricos utilizan diferentes tipos de motores eléctricos. Sin embargo, una forma sencilla de entender un motor eléctrico es analizar un motor de corriente continua o motor de continua. Este tipo de motor es muy utilizado en aplicaciones tales como herramientas portátiles, juguetes, accionamientos de alza cristales eléctricos en autos, y electrodomésticos pequeños como el secador de pelo; aun si son alimentados por corriente alterna (en cuyo caso tendrán un rectificador). Sin embargo también son utilizados como tracción motora.

El funcionamiento del motor de corriente continua se explica a partir de una sola espira conductora que gira sobre un eje fijo y representa el bobinado rotor o armadura como muestra la fig. 9.1. La espira se encuentra inmersa en un campo magnético  $B$  establecido por un par de polos magnéticos que constituyen el estator de la máquina, indicados por N y S en la fig. 9.1.

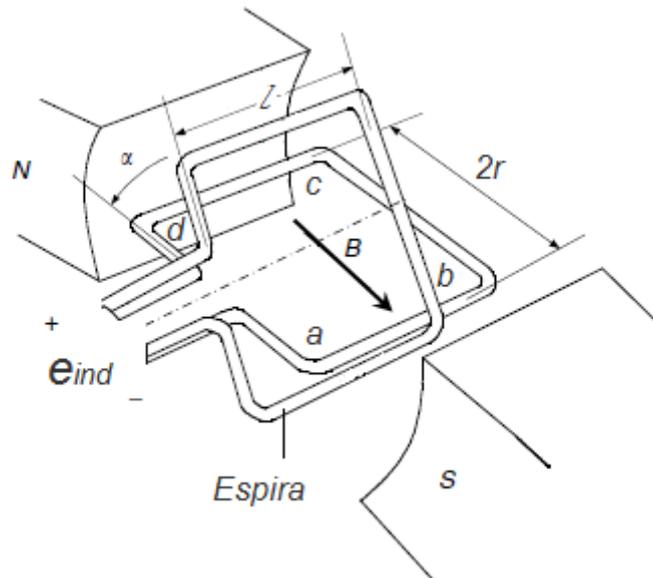


Figura 9.1: Espira conductora de un motor de continua inmersa en un campo magnético. La imagen muestra dos posiciones de la espira luego de girar un  $\alpha$  grados. [25]

### 9.2.1. Voltaje inducido en la espira giratoria

Si gira la espira conductora (rotor), se inducirá en sus terminales un voltaje dado por la ecuación:

$$e_{ind} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot l \quad (9.1)$$

donde  $v$  es la velocidad lineal de un punto de la espira,  $B$  el campo magnético que supondremos constante y perpendicular a la superficie del rotor en todo punto, y  $l$  es la longitud de cada segmento que constituye la espira rotor. La geometría rectangular de la espira permite determinar el voltaje  $e_{ind}$  sumando los voltajes inducidos en cada uno de los cuatro segmentos de la misma

$$e_{ind} = e_{ba} + e_{cb} + e_{dc} + e_{ad} = 2vBl \quad (9.2)$$

Cuando un segmento perpendicular al campo magnético recorre una cara polar, por ejemplo el polo magnético norte y pasa a la otra cara polar, el vector  $v \times B$  de la ecuación 9.1 cambia de

sentido. El voltaje inducido en dicho segmento cambia de polaridad bajo esta cara polar (polo magnético sur) y se mantiene constante hasta que vuelve a cruzar por frente al polo magnético norte. Si se grafica el voltaje  $e_{ind}$  en función del tiempo se obtiene la curva de la fig. 9.2.

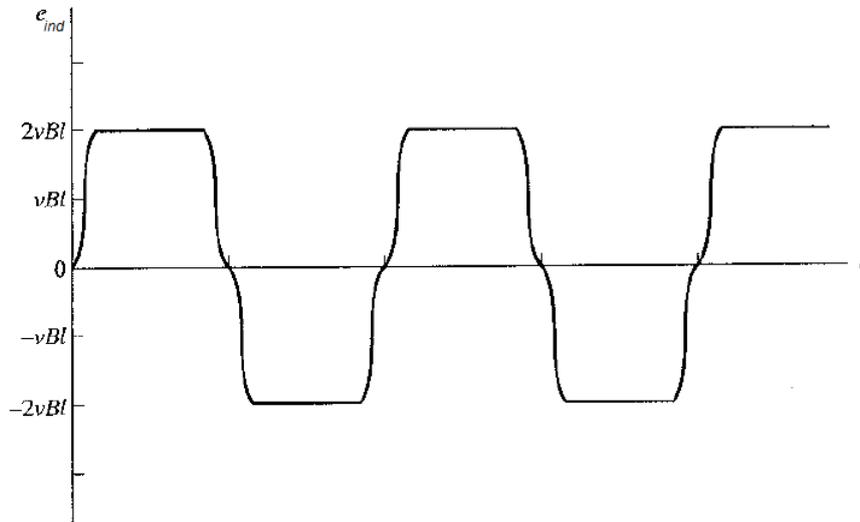


Figura 9.2: Tensión inducida en una espira giratoria simple. [57]

Si se conectan los terminales de la espira a un par de conductores semicirculares aislados eléctricamente y se colocan dos contactos fijos de forma que cuando el voltaje en la espira es cero los conductores semicirculares queden cortocircuitados por los contactos fijos, el voltaje inducido en bornes de los contactos fijos tendrá la forma de la fig. 9.4.

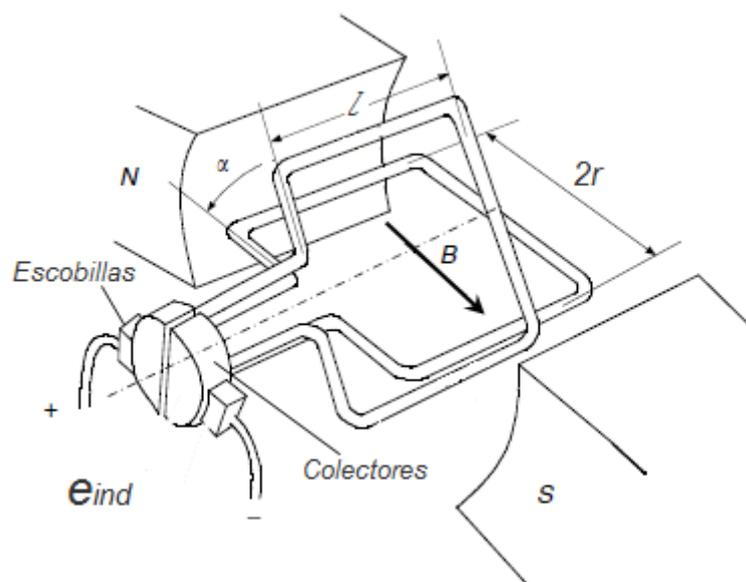


Figura 9.3: Espira conductora con escobillas y anillos colectores. La imagen muestra dos posiciones de la espira luego de girar  $\alpha$  grados. [25]

Los conductores semicirculares son los colectores y los contactos fijos las escobillas del motor de corriente continua. Estos componentes permiten conmutar la tensión en bornes de las escobillas cuando cambia la polaridad de la tensión en los segmentos de la espira para obtener una tensión continua con la forma mostrada en la fig. 9.4. Este proceso llamado conmutación establece la tensión continua en el rotor de la máquina.

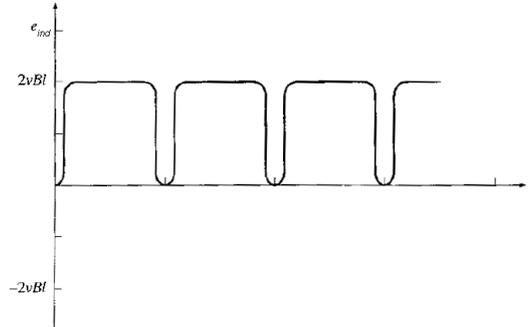


Figura 9.4: Tensión inducida en una espira giratoria simple. [57]

Si se expresa la velocidad tangencial de un segmento de espira como  $v = r\omega$ , la expresión del voltaje inducido en los bornes del rotor será .

$$e_{ind} = 2r\omega Bl \quad (9.3)$$

Por tanto el voltaje generado en el motor depende del producto del flujo magnético por la velocidad de rotación y por un parámetro que representa la construcción del rotor.

### 9.2.2. Par inducido en la espira giratoria

Se determinó la expresión del voltaje inducido en la máquina y la relación con el campo  $B$  y con velocidad de rotación  $\omega$ . Interesa determinar como se establece el movimiento del motor de corriente continua, la acción motora. Si se conecta una batería u otra fuente de tensión continua en bornes de las escobillas, se establece una corriente continua que depende de la resistencia de la espira. Un segmento de espira que porta una corriente  $I$  inmerso en un campo  $B$  experimentará una fuerza dada por:

$$\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B}) \quad (9.4)$$

y siendo el par resultante:

$$T = r.F.\text{sen}(\theta) \quad (9.5)$$

donde  $\theta$  es el ángulo entre  $r$  y  $F$ . Si se determina la fuerza y el par resultante en cada segmento de la espira se obtiene que el par total inducido está dado por:

$$T_{ind} = T_{ba} + T_{cb} + T_{dc} + T_{ad} = 2rIB \quad (9.6)$$

El par inducido en el motor depende del producto del flujo por la corriente y por una constante que representa la construcción del rotor.

### 9.2.3. Características constructivas de los motores reales

El tipo de construcción de devanados más sencilla que se utiliza en los motores de cd modernos es el devanado en serie simple o devanado imbricado. Un devanado imbricado simple consta de bobinas que contienen una o mas espiras y los dos extremos de cada bobina salen de colectores adyacentes. Una característica de este tipo de devanados es que tienen tantas trayectorias de corrientes en paralelo a través de la máquina como polos en la misma.

El voltaje inducido en un motor real será el producto del número de segmentos conductores por trayecto de corriente por el voltaje en cada conductor:

$$E_{ind} = K_1 r \omega B l \quad (9.7)$$

donde la constante  $K_1$  es el cociente entre el total de segmentos conductores y el número de trayectos de corriente.

Si se expresa la ecuación 9.7 en términos del flujo  $\phi$ , donde  $\phi = B \cdot Ap$  siendo  $Ap$  el área de cada polo, obtenemos que:

$$E_{ind} = K \phi \omega \quad (9.8)$$

donde la constante  $K = \frac{K_1 l}{Ap}$  depende de las características constructivas. Si se expresa la velocidad en términos de revoluciones por minuto ( $n$ ) se obtiene:

$$E_{ind} = K' \phi n \quad (9.9)$$

$$K' = \frac{\pi}{30} K \quad (9.10)$$

El par inducido que será igual al número de segmentos conductores multiplicado por el par en cada conductor. Si  $I_a$  es la corriente total del inducido:

$$T_{ind} = K_1 r l B I_a \quad (9.11)$$

En términos de flujo:

$$T_{ind} = K \phi \cdot I_a \quad (9.12)$$

El circuito eléctrico equivalente del motor se muestra en la fig.9.5.

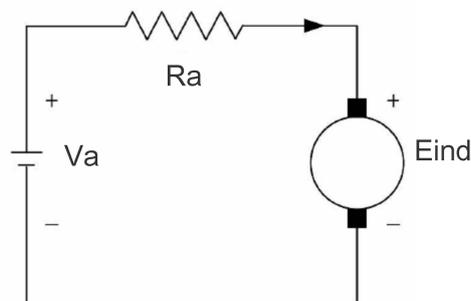


Figura 9.5: Modelo eléctrico de un motor de continua.

Un aspecto fundamental de las características constructivas del motor en aplicaciones de tracción lo determina el circuito magnético que establece el flujo en la máquina. En las figuras precedentes se mostró el circuito magnético de imán permanente para generar el campo magnético. Este tipo de motores no requieren circuito externo para controlar el campo y esta es su principal ventaja. En contraparte, no es posible variar el flujo de campo, el cual es fijo y depende del tipo de material, y por tanto no se puede variar la velocidad del motor controlando el flujo, como si se puede lograr con los circuitos de excitación externos mediante control de corriente. Sin embargo existen aplicaciones en EV que utilizan motores de imanes permanentes. En estos se controla la velocidad por medio del voltaje de alimentación y la resistencia de armadura.

Si bien los imanes permanentes presentan el problema de desmagnetización, en los últimos años se han desarrollado materiales magnéticos nuevos que tienen las características deseadas para evitar este problema. Tal es el caso de los materiales ceramicomagnéticos (ferrita) y los materiales de tierras raras. Sus curvas de magnetización presentan una densidad de flujo residual  $B_{res}$  muy grande e intensidad de magnetización coercitiva (corriente desmagnetizante) tan grande como sea posible como indica la fig. 9.6.

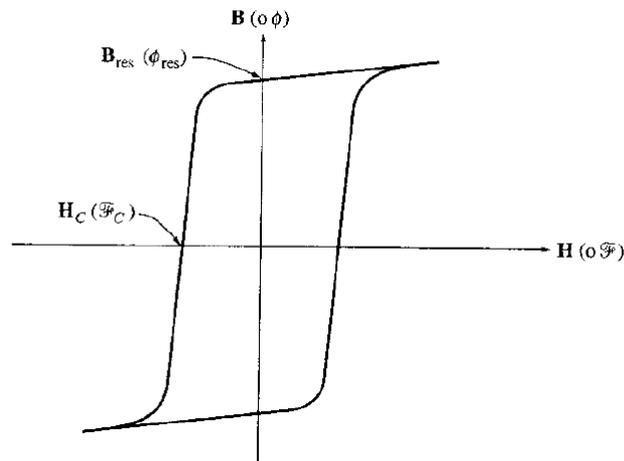


Figura 9.6: Curva de magnetización de un material de tierras raras. [57]

También es posible utilizar electroimanes para establecer el flujo magnético en la máquina. Estos son los llamados circuitos de campo. El campo magnético establecido de esta forma puede ser controlado fácilmente variando la corriente que circula por los bobinados. La principal desventaja es que la corriente eléctrica genera calor en los bobinados lo que repercute en la eficiencia del motor. Existen tres tipos clásicos de circuitos de campo o circuitos de excitación. Estos son los circuitos de excitación independiente, excitación paralelo y excitación serie como se muestra en la fig. 9.7.

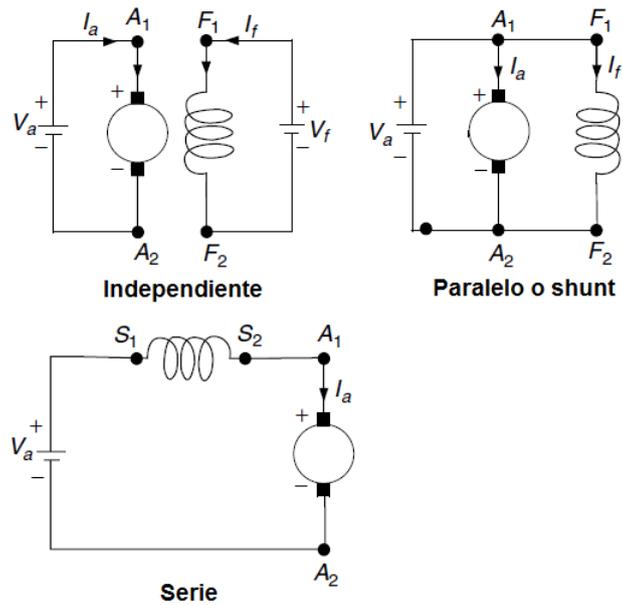


Figura 9.7: Tipos de excitación de los motores de continua. [25]

Los circuitos de excitación paralelo y serie no poseen el control de velocidad y torque que requiere la aplicación de vehículos eléctricos. La excitación paralelo es particularmente difícil de controlar. Si se reduce la tensión de alimentación se produce el debilitamiento del flujo magnético, que a su vez reduce la tensión inducida  $E_{ind}$ . El par inducido, proporcional al flujo y a la corriente de armadura ( $I_a$ ), evolucionará según cual de las dos variables (flujo y corriente) resulte determinante, puesto que la reducción de  $E_{ind}$  produce a su vez un aumento de la corriente  $I_a$ . En todo el rango de velocidades es de esperar que la corriente  $I_a$  se imponga sobre el flujo, incrementando el par y por tanto la velocidad del motor. Pero a bajas velocidades este control puede no tener efectos e inclusive invertir su comportamiento disminuyendo la velocidad.

La excitación serie tiene la ventaja de entregar alto par a velocidades bajas (lo que es deseable en aplicaciones de tracción) pero cae rápidamente a medida que la velocidad aumenta.

El motor de excitación independiente permite un control independiente del flujo y del voltaje inducido. Esto posibilita que los requerimientos de par a una determinada velocidad puedan ser alcanzados con gran flexibilidad. Por esta razón los motores de excitación independiente son los motores de continua más usados en vehículos eléctricos.

#### 9.2.4. Operación del motor de continua.

Existen dos maneras de operar el motor de continua con excitación independiente como indica la fig. 9.8. En el primer rango de velocidades el motor funciona 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, el voltaje de alimentación al circuito de armadura se mantiene 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

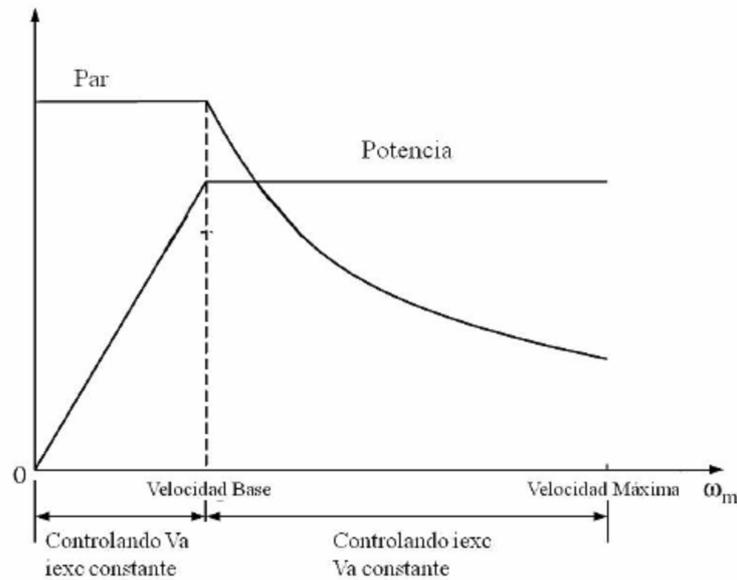


Figura 9.8: Control de velocidad de un motor de continua con excitación independiente.

funcionamiento del motor.

### 9.3. Motores de inducción

Los motores de inducción son ampliamente usados en todo tipo de máquinas industriales. Su tecnología madura ofrece una buena opción para su uso en aplicaciones de tracción. Con la particularidad de requerir alimentación alterna, no representa un inconveniente utilizar inversores para obtener alimentación de una fuente de tensión continua como las baterías o celdas de combustible.

Los motores de inducción deben su nombre al principio de funcionamiento que posibilita su movimiento. El voltaje en el rotor, que produce la corriente y el campo magnético del rotor, se induce en los devanados del rotor en lugar de ser establecido por un circuito de campo como en los motores de continua. La inducción de voltaje en el rotor es producida por el pasaje de un campo magnético giratorio producido en los devanados del estator. La presencia de un campo magnético estático y uno rotórico en una máquina de CA induce un par motor que produce el giro del rotor que intenta alinear los campos.

#### 9.3.1. Campo magnético giratorio

El principio de generación del campo magnético giratorio es que si un grupo de corrientes trifásicas, cada una desfasadas entre ellas por  $120^\circ$ , fluye en un devanado trifásico (tres devanados iguales separados  $120^\circ$  alrededor del estator), entonces producirán un campo magnético giratorio de magnitud constante.

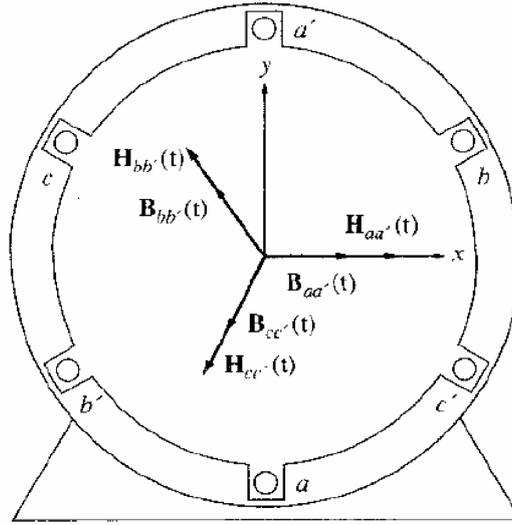


Figura 9.9: Intensidad magnética  $H$  y densidad magnética  $B$  resultante en un devanado trifásico. [57]

Si las corrientes en las bobinas son:

$$i_{aa'}(t) = I_M \sin(\omega t) \quad (9.13)$$

$$i_{bb'}(t) = I_M \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (9.14)$$

$$i_{cc'}(t) = I_M \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (9.15)$$

Los vectores de intensidad de campo magnético serán:

$$\vec{H}_{aa'}(t) = H_M \sin(\omega t) \quad (9.16)$$

$$\vec{H}_{bb'}(t) = H_M \sin(\omega t - 120^\circ) \exp^{j120} \quad (9.17)$$

$$\vec{H}_{cc'}(t) = H_M \sin(\omega t - 240^\circ) \exp^{j240} \quad (9.18)$$

La densidad de flujo resultante se obtiene por la relación:

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (9.19)$$

Resultando la densidad total de campo:

$$\vec{B}_{est}(t) = \vec{B}_{aa'}(t) + \vec{B}_{bb'}(t) + \vec{B}_{cc'}(t) = (1,5B_M \sin(\omega t))\vec{x} - (1,5B_M \cos(\omega t))\vec{y} \quad (9.20)$$

La fig. 9.9 representa el devanado trifásico y los vectores intensidad de campo magnético  $\vec{H}$  y densidad de campo  $\vec{B}$ . La fig. 9.10 muestra el campo magnético del estator, del rotor y el campo neto que en fase con el voltaje inducido neto. La corriente inducida en el rotor estará retrazada un ángulo  $\theta_R$  de la tensión inducida, lo que se corresponde a un componente inductivo del bobinado rotor. El campo inducido por la corriente del rotor desfasa  $90^\circ$  de la corriente.

### 9.3.2. El deslizamiento y el modelo eléctrico del motor en régimen

El voltaje inducido en la barra del rotor de un motor de inducción depende de la velocidad del rotor en relación con los campos magnéticos. Se define entonces la velocidad de deslizamiento

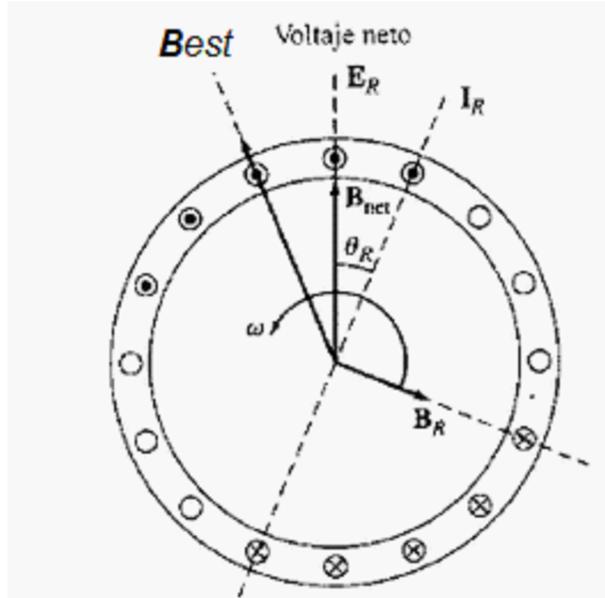


Figura 9.10: Campo magnético resultante de los campos de estator y rotor. [57]

como la diferencia entre la velocidad sincrónica y la velocidad del rotor:

$$n_{des} = n_{sinc} - n_m \quad (9.21)$$

El deslizamiento, es igual a la velocidad relativa expresada como porcentaje:

$$s = \frac{n_{des}}{n_{sinc}} \times 100\% \quad (9.22)$$

De esta ecuación se puede ver que si el rotor gira a velocidad sincrónica,  $s=0$ , mientras que si el rotor está estacionario,  $s=1$ . El funcionamiento normal del motor de inducción estará entre estos límites. La velocidad mecánica será:

$$n_m = (1 - s)n_{sinc} \quad (9.23)$$

$$\omega_m = (1 - s)\omega_{sinc} \quad (9.24)$$

La inducción de voltajes y corrientes en el motor de inducción permite establecer una analogía con los transformadores. En esencia el motor de inducción es un transformador rotatorio donde la frecuencia en el rotor estará determinada por el deslizamiento  $s$ ,  $f_{rot} = sf_{est}$ . El modelo eléctrico equivalente es el de un transformador, como se muestra en la fig. 9.11 con los parámetros eléctricos vistos desde el estator. Significado físico de los parámetros del circuito:

$R_C$ : modela las pérdidas en el hierro, perdida por histéresis y por corrientes de Foucault.

$X_M$ : es la reactancia magnetizante, modela la permeabilidad magnética del hierro.

$R_1$ : resistencia del bobinado del estator.

$X_1$ : modela la fuga del flujo magnético en los bobinados del estator.

$R_2$ : resistencia del bobinado de rotor pasada al estator.

$X_2$ : modela las fugas del flujo magnético en el rotor pasado al lado del estator.

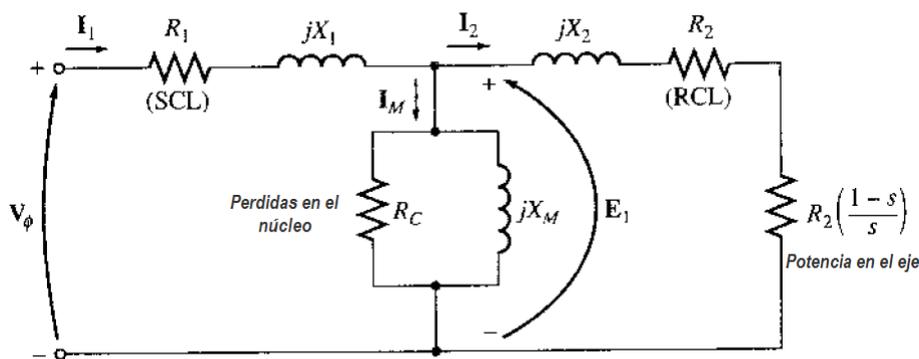


Figura 9.11: Modelo eléctrico del motor de inducción visto desde el estator. [57]

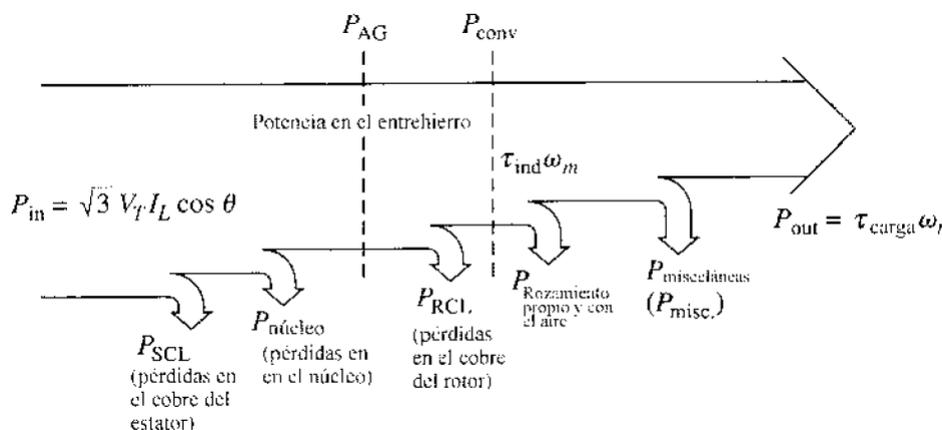


Figura 9.12: Flujo de potencia en un motor de inducción. [57]

### 9.3.3. Potencia y par del motor de inducción

Siendo el motor de inducción un transformador rotatorio, recibe una potencia eléctrica en los bobinados primarios, estator, y la trasmite en el secundario, rotor, en forma de potencia mecánica. Para comprender el flujo de potencia en la maquina se utiliza el diagrama de flujo de potencia mostrado en la fig. 9.12. En el diagrama de flujo  $P_{in}$  es la potencia eléctrica que consume el motor. Parte de esta potencia se disipa en forma de calor en el cobre del estator  $P_{SCL}$  y otra parte se pierde por histéresis y corrientes parásitas en material magnético  $P_{nucleo}$ . En este punto se traza una línea punteada en la fig. 9.12 para remarcar que la potencia  $P_{AG}$  es la potencia transmitida al rotor a través del entrehierro. En el rotor se disipa potencia en forma de calor en el cobre ( $P_{RCL}$ ) y la potencia restante  $P_{conv}$  es la disponible para transformarse en potencia mecánica y por ello se remarca con una segunda línea punteada. El término  $\frac{(1-g)}{g} R_{2e}$  del modelo eléctrico de la fig. 9.11 representa esta potencia mediante la expresión  $P_{conv} = 3 \frac{(1-g)}{g} R_{2e} I_{2e}^2$ . La potencia mecánica neta disponible en el eje se obtiene de descontar la pérdidas por fricción y ventilación,  $P_{Rozamiento}$ , y las pérdidas misceláneas (aquellas que no se ubican en ninguna de las anteriores).

Partiendo de la expresión de la potencia disponible  $P_{conv} = T_{ind}\omega$  y utilizando el circuito equivalente eléctrico se puede obtener una expresión del par inducido en el motor de inducción.

$$P_{mec} = T_{ind}\omega = 3R_2 \frac{(1-s)}{s} I^2 \quad (9.25)$$

$$T_{ind} = \frac{3V_{th}^2 R_2 (1-s)}{s\omega \left[ \left( R_{th} + \frac{R_2}{s} \right)^2 + (X_{th} + X_2)^2 \right]} \quad (9.26)$$

$$\omega = \frac{2\pi n_{mec}}{60} \quad (9.27)$$

$$R_{th} = R_1 \left( \frac{X_m}{X_1 + X_m} \right)^2 \quad (9.28)$$

$$X_{th} = X_1 \quad (9.29)$$

$$V_{th} = V_\phi \frac{X_m}{\sqrt{(R_1^2 + (X_1 + X_m)^2)}} \quad (9.30)$$

La curva característica par-velocidad del motor de inducción se muestra en la fig. 9.13.

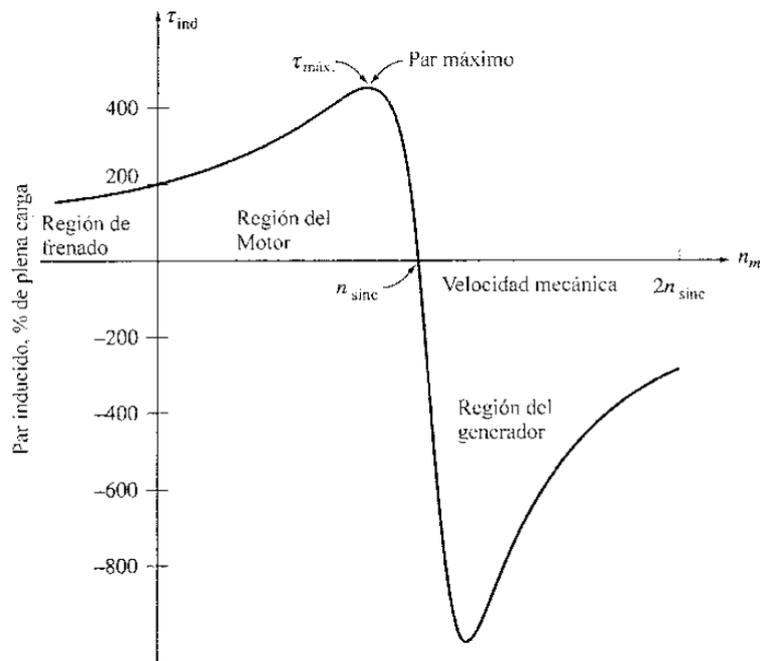


Figura 9.13: Curva par velocidad de un motor de inducción. [57]

Se destacan en esta curva los siguientes aspectos:

- El par inducido del motor es cero a velocidad síncrona.
- La curva par velocidad es casi lineal entre el punto de plena carga y vacío ( $n_{sinc}$ ). En este intervalo la resistencia  $\frac{R_2}{s}$  es mucho mayor que la reactancia  $X_2$ , por lo que la corriente del rotor, el campo y la  $T_{ind}$  aumentan linealmente conforme disminuye el deslizamiento.

- El par inducido encuentra su máximo valor a un deslizamiento mayor que el de plena carga, dos o tres veces el correspondiente a este valor según el motor.
- El par de arranque es mayor al de plena carga, por lo que el motor puede arrancar con cualquier carga que pueda alimentar a plena carga.
- Si la velocidad del motor supera la velocidad de sincronismo, el motor funciona como generador, transmitiendo potencia eléctrica. Esto posibilita la utilización del motor de inducción como freno regenerativo.
- Si el motor gira en sentido contrario en relación con el campo magnético, el par se invierte deteniendo rápidamente el motor para tratar de girar en la otra dirección.

### 9.3.4. El modelo dinámico del motor de inducción [24]

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

- Los bobinados del estator son idénticos.
- Los bobinados del rotor son idénticos.
- 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:

$$v_{as}(t) = r_s i_{as}(t) + \frac{d\psi_{as}(t)}{dt} \quad (9.31)$$

$$v_{bs}(t) = r_s i_{bs}(t) + \frac{d\psi_{bs}(t)}{dt} \quad (9.32)$$

$$v_{cs}(t) = r_s i_{cs}(t) + \frac{d\psi_{cs}(t)}{dt} \quad (9.33)$$

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.

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

$$v_{ar}(t) = r_r i_{ar}(t) + \frac{d\psi_{ar}(t)}{dt} \quad (9.34)$$

$$v_{br}(t) = r_r i_{br}(t) + \frac{d\psi_{br}(t)}{dt} \quad (9.35)$$

$$v_{cr}(t) = r_r i_{cr}(t) + \frac{d\psi_{cr}(t)}{dt} \quad (9.36)$$

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 de estator y rotor. Tanto las corrientes como los flujos son magnitudes instantáneas.

$$\begin{bmatrix} \psi_{as} \\ \psi_{bs} \\ \psi_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{sm} & -\frac{L_{sm}}{2} & -\frac{L_{sm}}{2} \\ -\frac{L_{sm}}{2} & L_{ls} + L_{sm} & -\frac{L_{sm}}{2} \\ -\frac{L_{sm}}{2} & -\frac{L_{sm}}{2} & L_{ls} + L_{sm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (9.37)$$

$$\begin{bmatrix} \psi_{ar} \\ \psi_{br} \\ \psi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{rm} & -\frac{L_{rm}}{2} & -\frac{L_{rm}}{2} \\ -\frac{L_{rm}}{2} & L_{lr} + L_{rm} & -\frac{L_{rm}}{2} \\ -\frac{L_{rm}}{2} & -\frac{L_{rm}}{2} & L_{lr} + L_{rm} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} + L_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} \quad (9.38)$$

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.
- $\theta_r$ : 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 vueltas<sup>(1)</sup> 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  $\theta_r$ . Transformando este sistema al dominio Park se presentan importantes ventajas al momento de analizar la dinámico del motor.

---

<sup>(1)</sup>Relación 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

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:

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \psi_{qs} \quad (9.39)$$

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \psi_{ds} \quad (9.40)$$

$$V_{0s} = r_s \cdot i_{0s} + \frac{d\psi_{0s}}{dt} \quad (9.41)$$

Ecuaciones de tensión del Rotor:

$$V_{dr} = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{qr} \quad (9.42)$$

$$V_{qr} = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{dr} \quad (9.43)$$

$$V_{0r} = r_r \cdot i_{0r} + \frac{d\psi_{0r}}{dt} \quad (9.44)$$

Las magnitudes están referidas a un marco de referencia arbitrario girando a una velocidad  $\omega$  donde los subíndice  $d$  y  $q$  son los ejes. En las ecuaciones rotóricas,  $\omega_r$  es la velocidad angular del rotor .

Ecuaciones de acoplamiento Magnético Estatóricos:

$$\psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \quad (9.45)$$

$$\psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \quad (9.46)$$

$$\psi_{0s} = L_s \cdot i_{0s} \quad (9.47)$$

Ecuaciones de acoplamiento Magnético Rotóricos:

$$\psi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (9.48)$$

$$\psi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (9.49)$$

$$\psi_{0r} = L_r \cdot i_{0r} \quad (9.50)$$

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.

## 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:

$$V_{ds} = r_s \cdot i_{ds} + \frac{d\psi_{ds}}{dt} - \omega \cdot \psi_{qs} \quad (9.51)$$

$$V_{qs} = r_s \cdot i_{qs} + \frac{d\psi_{qs}}{dt} + \omega \cdot \psi_{ds} \quad (9.52)$$

Ecuaciones de tensión del Rotor:

$$0 = r_r \cdot i_{dr} + \frac{d\psi_{dr}}{dt} - (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{qr} \quad (9.53)$$

$$0 = r_r \cdot i_{qr} + \frac{d\psi_{qr}}{dt} + (\omega - \omega_r) \cdot \psi_{dr} \quad (9.54)$$

Si se alinea el eje  $d$  del marco de referencia del sistema  $dq$  con el flujo magnético rotórico  $\psi_r$ , se obtiene el siguiente resultado.

$$\psi_r = \psi_{dr} + j \cdot \psi_{qr} \quad (9.55)$$

$$\{\psi_{dr} = \psi_r; \quad \psi_{qr} = 0 \quad (9.56)$$

Combinando la relación 9.56 con las ec. 9.48 y 9.49, se obtiene:

$$\psi_r = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (9.57)$$

$$0 = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (9.58)$$

Si se despeja  $i_{dr}$  de la Ecuación 9.57 y se sustituye en la Ecuación 9.53 se tiene la siguiente ecuación, donde el flujo magnético rotórico  $\psi_r$  es controlado por la corriente estatórica según

el eje  $d$ ,  $i_{ds}$ .

$$\frac{d\psi_r}{dt} = -\frac{r_r}{L_r} \cdot \psi_r + L_m \frac{r_r}{L_r} \cdot i_{ds} \quad (9.59)$$

Dada la expresión del par en el dominio Park:

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot (\psi_{qr} \cdot i_{dr} - \psi_{dr} \cdot i_{qr}) \quad (9.60)$$

Considerando que  $\psi_{qr}$  es nulo, Ecuación 9.56, despejando la corriente  $i_{qr}$  de la Ecuación 9.58 y sustituyéndola en la Ecuación 9.60, se obtiene la ecuación del par del motor de inducción en el dominio Park con el marco de referencia definido:

$$T = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} \cdot \frac{L_m}{L_r} \psi_{dr}(i_{ds}) \cdot i_{qs} \quad (9.61)$$

Como se observa en la ecuación 9.61, se tiene una ecuación del par análoga a la del motor de corriente continua, ecuación 9.12. 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  $i_{qs}$ .

### 9.3.5. Eficiencia del motor de inducción

El hecho de que circulen corrientes inducidas en el rotor adiciona pérdidas que resultan en una eficiencia menor que otros motores sin escobillas, 1 o 2% menos eficiente. En lo demás resulta igual a estos.

## 9.4. Motores de reluctancia variable

La utilización de motores de reluctancia variable en aplicaciones de tracción comienza a generalizarse recientemente. Por tener un principio de funcionamiento muy simple lo convierte en una alternativa interesante para este tipo de aplicaciones. En la fig. 9.14 se muestra el estator y el rotor de esta máquina, que son magnetizados por la bobina del estator. El movimiento del rotor será regido por el campo magnético del estator que tenderá a alinear el rotor con el estator para reducir al mínimo el espacio de entrehierro entre estos. Esto explica el nombre de este tipo de motores.

### 9.4.1. Funcionamiento de un motor de reluctancia

En la fig. 9.14 a) se muestra el campo aplicado al estator, que induce un par que tiende a alinear rotor y estator como indican las flechas. Cuando se alinea el rotor con el estator, fig. 9.14 b), el espacio de entrehierro es el mínimo posible (reluctancia mínima). Se corta la corriente que establece el campo magnético y el rotor continúa girando por su inercia poco más de cuarta vuelta (ver la cruz en el rotor), es decir poco después de que haya alcanzado la máxima reluctancia hasta la fig. 9.14 c). En este punto se restablece el campo por acción de la corriente y se induce el par motor que tenderá a alinear el rotor con el estator momento en que se interrumpe la corriente otra vez.

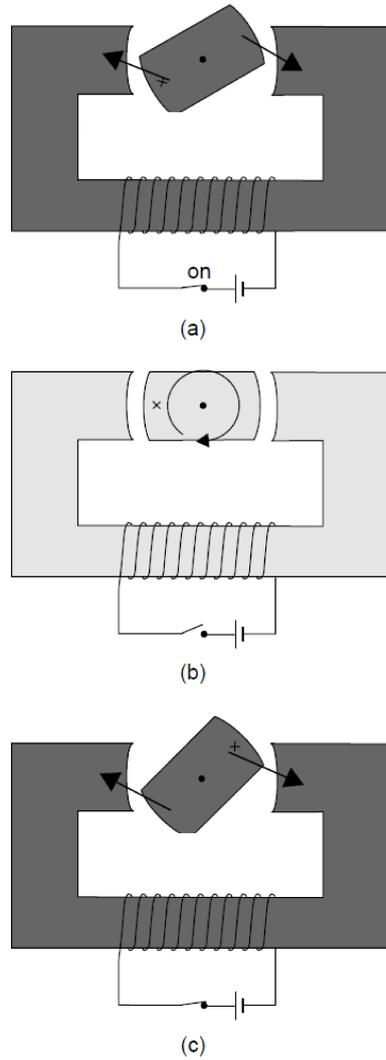


Figura 9.14: Esquema del funcionamiento del motor de reluctancia variable. [58]

### 9.4.2. Características constructivas y desempeño

El rotor de un motor de reluctancia variable es un trozo de material magnético blando con polos salientes como se muestra en la fig. 9.15 . El estator es similar al de los motores de inducción y de continua. Por su parte la corriente que induce el campo en el estator es pulsante. La velocidad puede ser controlada mediante el tiempo de aplicación del pulso de corriente. Al no tener restricciones eléctricas como el motor de corriente continua, pueden alcanzarse velocidades mayores.

La principal dificultad de estos motores la constituye el control de la corriente. Por ejemplo, si el rotor está desfazado  $90^\circ$  con el estator y la bobina se magnetiza, no habrá par inducido. Por lo que se requiere un sistema muy preciso del seguimiento del rotor que realimente el lazo de control de corriente.

Sin embargo, el rotor es mucho más simple, más barato y resistente que los motores de inducción. Además, al utilizar un núcleo de alta permeabilidad magnética el par que se produce



Figura 9.15: Rotor y estator del motor de reluctancia variable. [58]

dentro de un volumen determinado será superior al producido por aquellos. Combinando esto con las posibilidades de una mayor velocidad significa una mayor densidad de potencia disponible.

Estas características hacen de este motor una alternativa muy simple y de bajo costo para aplicaciones en EV.



# Capítulo 10

## Convertidores

Los convertidores electrónicos 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 el convertidor para que este controle el funcionamiento del motor eléctrico, produciendo el par y la velocidad adecuados a cada situación.

En los EV o en los HEV de acuerdo a la arquitectura de diseño y al motor eléctrico utilizado, se pueden encontrar generalmente dos tipos de convertidores electrónicos de potencia:

- *Convertidores DC-DC*, los que a partir de una fuente de tensión continua cambian y regulan la tensión, obteniendo a la salida una señal continua con el valor deseado. Estos se pueden encontrar por ejemplo, en comandos de Motores de Corriente Continua cuando se utiliza este tipo de motor como motor de tracción para el vehículo, o también como “adaptadores” que convierten una baja tensión (por ejemplo de las baterías de tracción), a una tensión algo más elevada que se distribuye por el vehículo en un Bus DC para alimentar otros sub-sistemas. Esto último permite utilizar una menor cantidad de baterías para lograr una tensión determinada con la consiguiente disminución de la masa total de vehículo, además de tener otras ventajas para un mejor aprovechamiento y cuidado durante la vida útil de las baterías (carga y descarga a tensión constante, menor ripple de corriente de carga y descarga, etc.).
- *Convertidores DC-AC*, los que a partir de una fuente de tensión continua, generan a la salida una señal sinusoidal de amplitud y frecuencias controladas. Estos se encontrarán, principalmente, en diseños de EV y HEV que utilicen un Motor de Corriente Alterna como motor de tracción.

El objetivo de este capítulo será entonces introducir algunos conceptos fundamentales de los Convertidores comúnmente utilizados en las diferentes arquitecturas de EV y HEV a modo de relevamiento del estado del arte.

## 10.1. Convertidores DC-DC

### 10.1.1. Convertidor Chopper

Los Choppers se utilizan para el control de Motores DC debido a una serie de ventajas como por ejemplo, alta eficiencia, flexibilidad en el control, bajo peso, pequeño tamaño, rápida respuesta y regeneración a muy bajas velocidades. Los Motores DC de excitación independiente se pueden utilizar como motores de tracción, debido a la flexibilidad de control de tensión de armadura y campo.

El Chopper ofrece una serie de ventajas para el control de motores DC en lazo abierto y en lazo cerrado debido a la alta frecuencia de operación, la que resulta en un ripple de tensión de salida de alta frecuencia y por consiguiente menos ripples en la corriente de armadura del motor y una menor región de conducción discontinua en la curva Par-Velocidad. Una reducción en el ripple de corriente de armadura, reduce las pérdidas en la armadura. Una reducción o eliminación de la región de conducción discontinua mejora la regulación en velocidad y la respuesta transitoria de la unidad.

El circuito de electrónica de potencia y las formas de onda de régimen permanente de un Chopper DC se muestran en la fig. 10.1. Una fuente DC,  $V$ , alimenta una carga inductiva a través de una llave semiconductor auto-conmutada,  $S$ . Se utiliza este símbolo de llave semiconductor auto-conmutada porque un Chopper se puede construir utilizando casi cualquier dispositivo de electrónica de potencia, con un circuito de conmutación forzada: GTO, transistor de potencia, MOSFET, e IGBT. El Diodo muestra la dirección en la que el dispositivo puede transportar corriente. Un diodo  $D_F$ , se conecta en paralelo con la carga. La llave semiconductor,  $S$ , se opera periódicamente por un período  $T$  y permanece cerrada por un tiempo  $t_{on} = \delta T$  con  $0 < \delta < 1$ . La variable  $\delta = t_{on}/T$  se llamada Ciclo de Trabajo del Chopper. En la fig. 10.1 se muestra además la forma de onda de la señal de control  $i_C$ . Esta señal será la corriente de base para un Chopper de transistores, y la corriente de gate para el GTO de un Chopper de GTO o el disparo del tiristor de un Chopper de Tiristores. Si se utiliza un Chopper de MOSFET de Potencia, esta será la tensión entre gate y source. Cuando está presente la señal de control, la llave semiconductor  $S$  conducirá, si está polarizada en directo. Se asume que la operación del circuito se ha configurado para que al cortar  $i_C$  se apague la llave.

Durante el tiempo ON de la llave ( $0 \leq t \leq \delta T$ ), la carga está sometida a una tensión  $V$  y la corriente de carga crece desde  $i_{a1}$  hasta  $i_{a2}$ . La llave se abre en  $t = \delta T$ . Durante el período OFF de la llave ( $\delta T \leq t \leq T$ ), la inductancia de carga mantiene el flujo de corriente a través del diodo  $D_{+F}$ . La tensión en bornes de la carga permanece en cero (si la caída de tensión en el diodo se desprecia en comparación con  $V$ ), y la corriente decrece desde  $i_{a2}$  hasta  $i_{a1}$ . El intervalo  $0 \leq t \leq \delta T$  se conoce como Ciclo de Trabajo (Intervalo de Servicio), y el intervalo  $\delta T \leq t \leq T$  se conoce como intervalo de rueda libre (freewheeling). El diodo  $D_F$  proporciona un camino para la corriente de carga que fluye cuando la llave  $S$  está en OFF, y entonces mejora la forma de onda de la corriente de carga. Además, manteniendo la continuidad de la corriente de carga en el apagado, se previenen tensiones transitorias que aparecen en la llave  $S$ , debido a los cambios repentinos en la corriente de carga. La forma de onda de la corriente de fuente se muestra además en la fig. 10.1e. La corriente de la fuente fluye solamente durante el Ciclo de Trabajo y es igual a la corriente de carga.

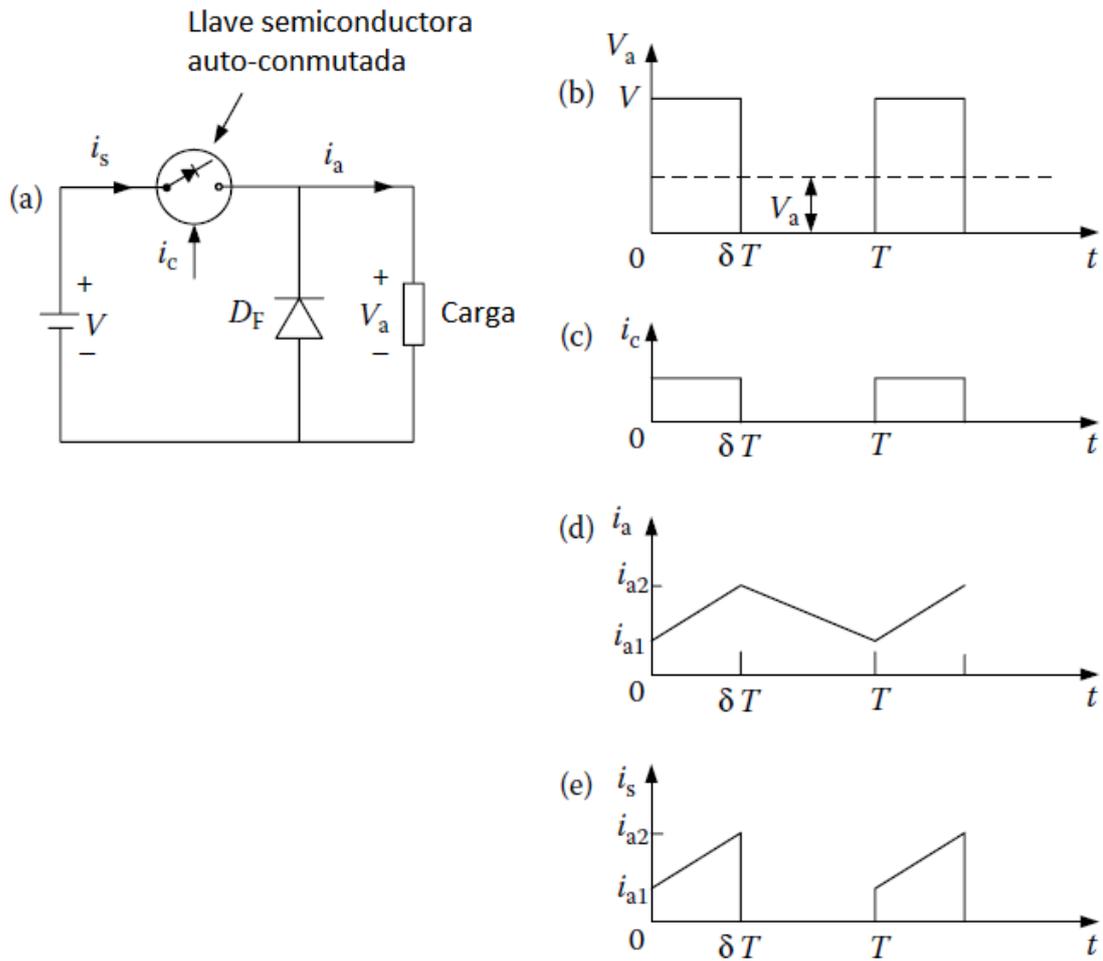


Figura 10.1: Principio de operación de un Chopper Step-Down (o clase A): (a) Circuito básico de Chopper; (b)-(e) Formas de onda.

La componente directa o Valor Medio de la tensión de carga  $V_a$  viene dado por:

$$V_a = \frac{1}{T} \int_0^T v_a dt = \frac{1}{T} \int_0^{\delta T} V dt = \delta V. \quad (10.1)$$

Controlando  $\delta$  entre 0 y 1, la tensión de carga puede variar desde 0 hasta  $V$ ; entonces el Chopper permite obtener una tensión variable de una fuente de tensión DC fija. La llave S puede controlarse de diversas formas variando el parámetro  $\delta$ . Las tecnologías de control se pueden dividir en dos categorías:

1. Control de Relación Temporal (TRC).
2. Control de Límite de Corriente (CLC).

El método TRC, también conocido como Modulación de Ancho de Pulso, se controla la relación entre el Tiempo ON y el Período del Chopper. El TRC se puede dividir además como sigue:

1. TRC de Frecuencia Constante: El período  $T$  del Chopper se mantiene fijo y el Período ON de la llave se hace variar para controlar el parámetro  $\delta$
2. TRC de Frecuencia Variable: Aquí  $\delta$  varía, o bien manteniendo  $t_{on}$  constante y variando  $T$  o bien modificando ambos  $t_{on}$  y  $T$

En el control de frecuencia variable con  $t_{on}$  constante, se obtiene una tensión de salida baja a bajas frecuencias de Chopper. La operación del Chopper a baja frecuencias afecta negativamente la performance del motor. Además, la operación de un Chopper con frecuencias variables vuelve difícil el diseño de un filtro de entrada. En consecuencia, el control de frecuencias variable es poco utilizado.

El CLC, también conocido como Control Punto por Punto,  $\delta$  se controla indirectamente mediante el control de la corriente de carga dentro de ciertos valores máximos y mínimos especificados. Cuando la corriente de carga alcanza el valor máximo especificado, la llave desconecta la carga desde la fuente y la vuelve a conectar cuando la corriente alcanza el valor mínimo especificado. Si la carga es un Motor DC, este tipo de control es, en efecto, de Frecuencia Variable-Tiempo ON variable.

Las siguientes son observaciones importantes, extraídas de la forma de onda de la fig. 10.1:

1. La corriente de la fuente no es continua, fluye por pulsos. La corriente pulsada aumenta el pico de demanda de energía de entrada y puede causar fluctuación en la tensión de la fuente. La forma de onda de la corriente de la fuente puede descomponerse en armónicos DC y AC. La frecuencia del fundamental AC es la misma que la frecuencia del Chopper. Los armónicos AC no son deseables porque interfieren con otras cargas conectadas a la fuente DC y pueden causar interferencia de radio frecuencia a través de la conducción y radiación electromagnética. Por lo tanto, habitualmente se incorpora un filtro LC entre el Chopper y la fuente DC. A altas frecuencias del Chopper, los armónicos se reducen a un nivel tolerable mediante un filtro más barato. Con esto, el Chopper podrá operarse a la frecuencia más alta posible.
2. La tensión en terminales de la carga no una tensión DC perfecta. Además de la componente DC, tiene armónicos de la frecuencia del Chopper y sus múltiplos. La corriente de carga tiene además un ripple AC.

### 10.1.2. Convertidor Boost

El Chopper Clase A mostrado en la fig. 10.1, es capaz de suministrar solamente una tensión positiva y una corriente positiva. Se denomina comúnmente Chopper de cuadrante único, suministrando control solamente para motores DC de excitación independiente en el primer cuadrante, esto es, velocidad positiva y par positivo. Debido a que puede variar la tensión de salida desde  $V$  hasta 0, es además un Chopper step-down o un Convertidor DC-DC tipo Buck. El principio de operación básico involucrado puede además utilizarse para entender un Chopper step-up o un Convertidor DC-DC tipo Boost.

El diagrama y las formas de onda en régimen se muestran en la fig. 10.2. Este Chopper se conoce como Chopper Clase B. La presencia de la señal de control  $i_C$  indica la duración para

que la llave pueda conducir si está polarizada en directo. Durante el Período de choppeo  $T$ , esta permanece cerrada durante un intervalo  $0 \leq t \leq \delta T$  y permanece abierta durante un intervalo  $\delta T \leq t \leq T$ . Durante el período ON,  $i_S$  crece desde  $i_{S1}$  hasta  $i_{S2}$ , aumentando por consiguiente la magnitud de la energía almacenada en la inductancia  $L$ . Cuando se abre la llave, la corriente fluye a través del paralelo de la carga y el capacitor  $C$ . Dado que la corriente es forzada contra una tensión más alta, la variación de la corriente es negativa. Esta decrece desde  $i_{S2}$  hasta  $i_{S1}$ , el período OFF de la llave. La energía almacenada en la inductancia  $L$  y la energía suministrada por la fuente de baja tensión se suministran a la carga. El capacitor  $C$  tiene dos propósitos. En el instante de apertura de la llave  $S$ , la corriente de fuente,  $i_S$ , y la corriente de carga,  $i_a$ , no son la misma. Si no estuviera  $C$ , el apagado de la llave forzaría a las corrientes a tener el mismo valor. Esto causaría una alta tensión inducida en la inductancia  $L$  y en la inductancia de carga. Otra razón para utilizar el capacitor  $C$  es reducir el ripple de tensión de carga. El propósito del diodo  $D$  es prevenir cualquier flujo de corriente desde la carga por la llave  $S$  o la fuente  $V$ .

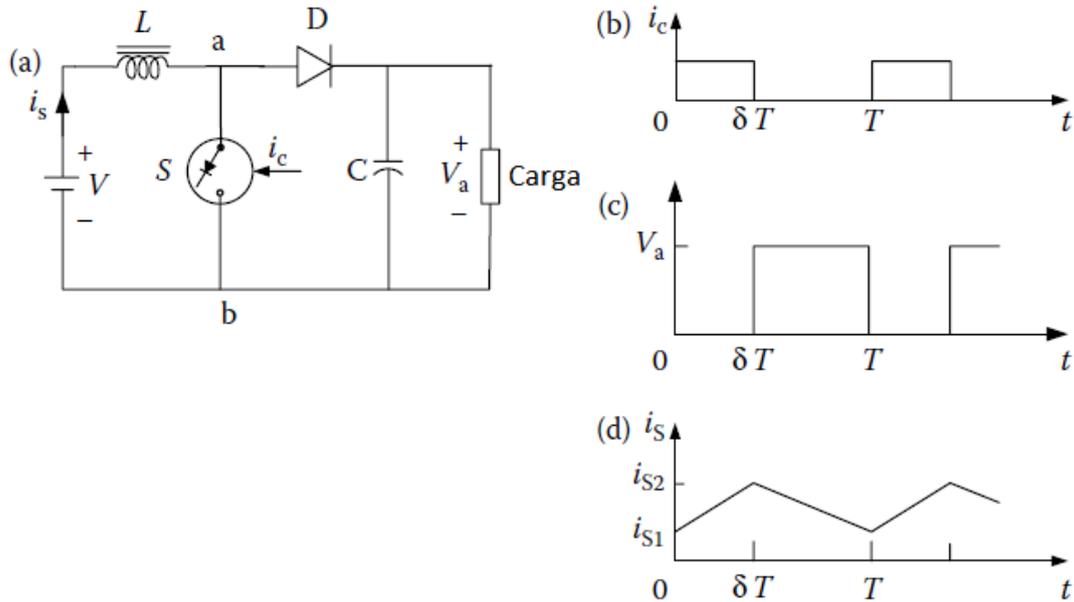


Figura 10.2: Principio de operación de un Chooper Step-Up (o clase B): (a) Circuito básico de Chopper; (b)-(d) Formas de onda.

Para entender la operación de un Step-up, el capacitor  $C$  se asume suficientemente grande como para mantener constante la tensión  $V_a$  en la carga. La tensión media en terminales  $a$  y  $b$  está dada por:

$$V_{ab} = \frac{1}{T} \int_0^T v_{ab} dt = V_a(1 - \delta) \quad (10.2)$$

La tensión media en la inductancia  $L$  es:

$$V_L = \frac{1}{T} \int_0^T (L \frac{di}{dt}) dt = \frac{1}{T} \int_{i_{S1}}^{i_{S2}} L di = 0 \quad (10.3)$$

La tensión en la fuente:

$$V = V_L + V_{ab} \quad (10.4)$$

Sustituyendo las ec. 10.2 y 10.3 en la ec. 10.4 se obtiene:

$$V = V_a(1 - \delta) \quad o \quad V_a = \frac{V}{1 - \delta} \quad (10.5)$$

De acuerdo a la ec. 10.5, teóricamente la tensión de salida  $V_a$  puede variar desde  $V$  hasta  $\infty$  controlando  $\delta$  entre 0 y 1. En la práctica,  $V_a$  puede controlarse desde  $V$  hasta una tensión más alta, que depende del capacitor  $C$ , y los parámetros de la carga y el Chopper.

La principal ventaja de un Chopper Step-Up es el bajo ripple en la corriente fuente. Mientras la mayoría de las aplicaciones requiere un Chopper Step-down, el Chopper Step-Up encuentra aplicaciones en vehículos de baterías de baja potencia. El principio del Chopper Step-Up es además utilizado para el freno regenerativo en unidades de Motor DC.

### 10.1.3. Convertidores DC-DC Bidireccionales

#### Especificaciones del convertidor DC-DC

Las especificaciones de este tipo de convertidores se pueden resumir como sigue [63]:

- Debe controlar el flujo de energía entre la batería y el motor.
- Debe ser bidireccional.
- Debería ser capaz de proporcionar alta y baja tensión de salida (modos Buck y Boost).
- Debe ser capaz de controlar corriente, para carga de la batería y permanecer dentro de los límites de los bobinados del motor.
- El control debería ser invariante ante variaciones en la dinámica de la entrada o salida.
- El control debe ser capaz de operar en los cuatro cuadrantes y moverse de uno a otro sin problemas.
- Las tensiones de prueba debería oscilar entre 0 y 50V, pero el diseño debería ser escalable a niveles de tensión y energía superiores.
- La corriente de prueba debería estar entre 0 y 10A, pero debería ser también escalable.

#### Chopper de 4 Cuadrantes

Un convertidor Chopper se denomina de 4 cuadrantes cuando es capaz de transportar energía en ambas direcciones y aumentar o disminuir la tensión. Una configuración típica se muestra en la fig. 10.3. Cuando se operan las llaves en cierto sentido, la topología será similar a la de los convertidores buck o boost ya vistos, y en consecuencia se puede aplicar la misma dinámica (con pequeñas modificaciones). Las tablas 10.1 y 10.2 muestran qué llaves y qué diodos están activos en cada modo de operación.

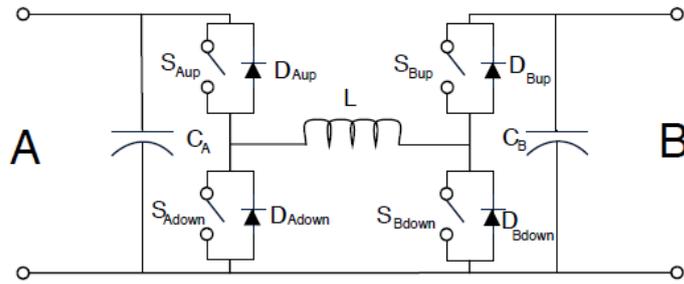


Figura 10.3: Convertidor de 4 Cuadrantes.

Energy direction	Mode	$S_{Aup}$	$S_{Bdown}$	$S_{Bup}$	$S_{Adown}$
A to B	Buck	A	0	0	0
A to B	Boost	1	A	0	0
B to A	Buck	0	0	A	0
B to A	Boost	0	0	1	A

Tabla 10.1: Modos de operación de las llaves.

Energy direction	Mode	$D_{Aup}$	$D_{Bdown}$	$D_{Bup}$	$D_{Adown}$
A to B	Buck	0	0	1	A
A to B	Boost	0	0	A	0
B to A	Buck	1	A	0	0
B to A	Boost	A	0	0	0

Tabla 10.2: Modos de operación de los Diodos.

### Convertidor Bidireccional específico

Otra de las estructuras de Convertidor DC-DC Bidireccional que con frecuencia se asocia a las aplicaciones de EV y HEV, es la que se muestra en la fig. 10.4.

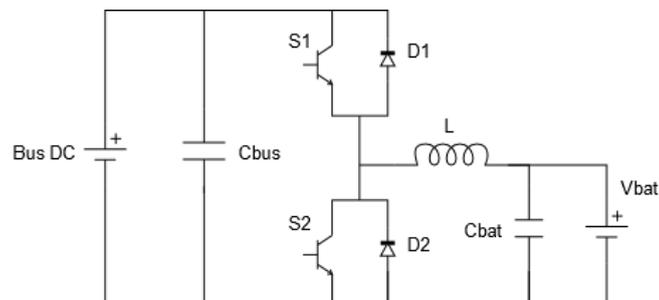


Figura 10.4: Convertidor DC-DC Bidireccional.

Se trata de un convertidor buck-boost en el que los flujos de energía se dan en ambas direcciones. La llave  $S_1$  se utiliza para la conversión Boost y la llave  $S_2$ , se utiliza para el modo Buck. Durante la operación Buck,  $S_1$  está cerrada y  $S_2$  está abierta. La energía fluye desde la fuente de alta tensión (Bus DC), hacia la fuente de baja  $V_{bat}$ . La caída de tensión en el inductor es:

$$V_L = V_{BusDC} - V_{bat} \quad (10.6)$$

y la corriente a través del inductor crece hasta  $I_{max}$ , dependiendo de los valores de  $L$  y durante  $T_{off}$ , la corriente fluye a través del diodo  $D_2$ ; la corriente de carga baja hasta el valor final. El valor medio de la corriente de carga está dado por:

$$I_L = \frac{I_{max} + I_{min}}{2} \quad (10.7)$$

En la operación Boost, la energía fluye desde  $V_{bat}$  hasta  $V_{BusDC}$ . Cuando  $S_2$  está encendida, la corriente fluye a través de  $L$  y se cumple:

$$V_L = -V_{bat} \quad (10.8)$$

Cuando  $S_2$  se apaga, la corriente del inductor fluye a través de  $D_1$  y carga la tensión de batería:

$$V_{BusDC} = V_{bat} + V_L \quad (10.9)$$

Este tipo de convertidores, tienen el comportamiento que se puede apreciar en [59], [60] y [61], entre otras, y su diseño, también tiene aplicaciones más específicas como las descritas en [64]. Las estrategias de diseño de un Convertidor con estas características, se muestran en [63], y a partir de esta idea es que se consideró el diseñar un Convertidor DC/DC Bidireccional, para utilizarlo en las simulaciones del EV a desarrollar.

### Diseño de un Convertidor DC/DC Bidireccional y su control asociado

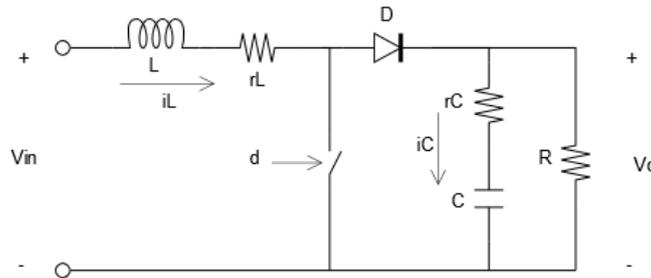


Figura 10.5: Esquema de Convertidor Boost para el diseño del controlador.

Para un convertidor Boost como el de la fig. 10.5, trabajando en Modo de Conducción Continua, se demuestra que la transferencia entre la Tensión de Salida  $V_O$  y el Ciclo de Trabajo  $d$ , tiene la expresión de la ec. 10.10

$$\frac{V_O}{d} = \frac{R(1 + r_C C s)[V_O(1 - D) - I_L(Ls + r_L)]}{(R + r_C)LCs^2 + [L + r_L(R + r_C)C + R(1 - D)^2 r_C C]s + r_L + R(1 - D)^2} \quad (10.10)$$

Se define entonces un juego de parámetros según el comportamiento requerido al Convertidor:

- $V_{in} = 100V$
- $V_O = 500V$
- $d = 0,8$
- $R = 12,5\Omega$ , con el Convertidor operando a plena carga
- $C = 10mF$
- $r_C = 18m\Omega$
- $L = 30\mu Hy$
- $r_L = 10m\Omega$

Para este juego de parámetros, se diseña un Compensador Serie que permita obtener el comportamiento requerido, con márgenes de estabilidad apropiados para la aplicación. El compensador diseñado, tiene la Transferencia que se muestra en la ec. 10.11

$$G_C = \frac{3,922 * 10^{-7}s^2 + 4,31 * 10^{-4}s + 0,058}{5,635 * 10^{-10}s^3 + 1,115 * 10^{-4}s^2 + s} \quad (10.11)$$

Estudiando la respuesta en frecuencia de este Compensador en Serie con la Planta, según aparece en la fig. 10.6, se puede ver que tiene las siguientes características:

- Frecuencia de Corte: 65 Hz
- Margen de Fase: 81.2°

que son características deseables en el comportamiento en lazo abierto del conjunto Compensador-Convertidor DC/DC).

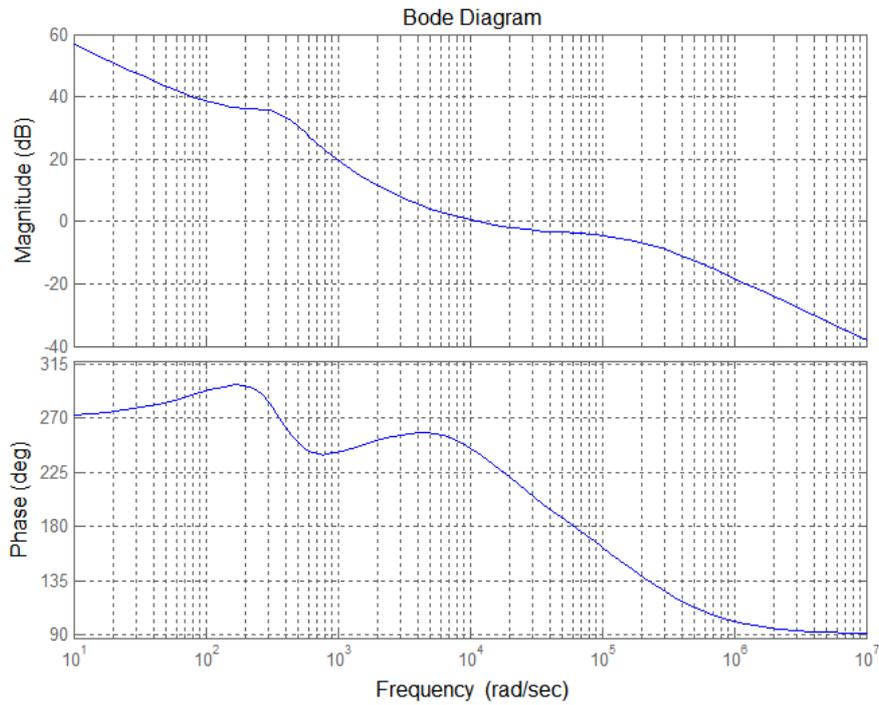


Figura 10.6: Respuesta en Frecuencia del Convertidor+Compensador Serie.

Estos diseños, junto al modelo de Convertidor DC/DC Bidireccional descrito antes, se cargan en el software Simulink y se corren simulaciones para verificar el desempeño del sistema diseñado. El modelo Simulink ensayado se muestra en la fig. 10.7, y el resultado del ensayo en la fig. 10.8.

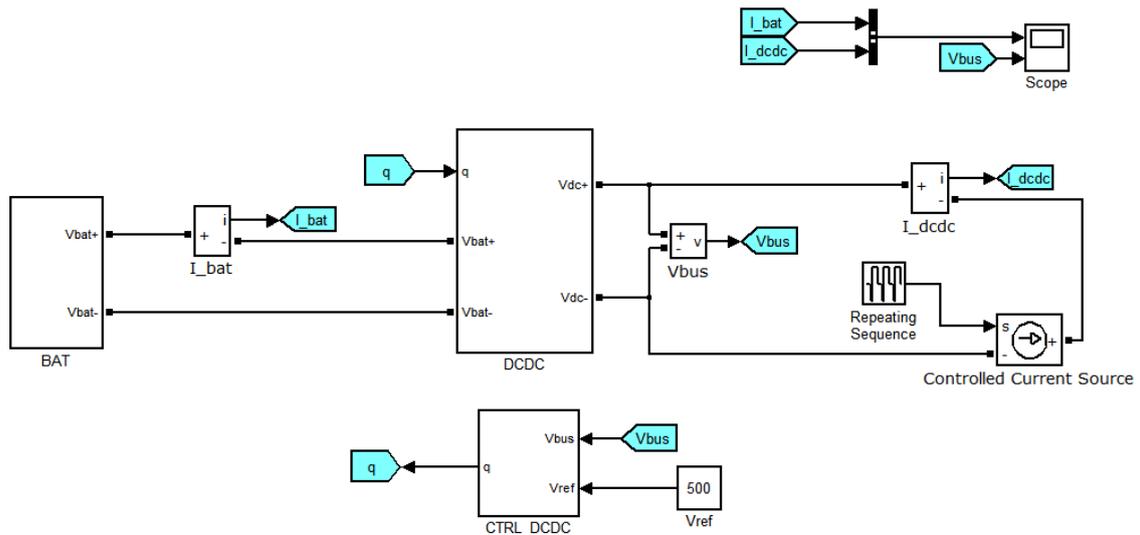


Figura 10.7: Modelo Simulink del sistema Convertidor DC/DC-Controlador.

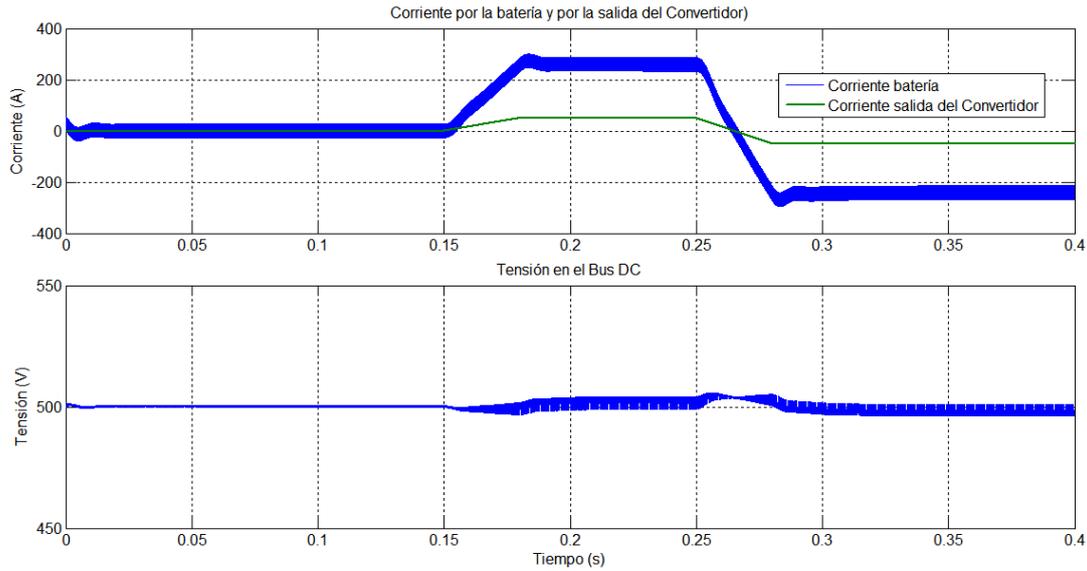


Figura 10.8: Modelo Simulink del sistema Convertidor DC/DC-Controlador.

Como se puede apreciar en la fig. 10.8, con la corriente circulando en ambos sentidos (desde y hacia la batería), el convertidor diseñado mantiene el valor medio de la tensión en el Bus DC en aprox. 500 V según lo requerido inicialmente, con lo cual se concluye que el diseño funciona según lo especificado. Por lo tanto este convertidor se utilizará en la simulación del Sistema EV.

## 10.2. Convertidores DC-AC

### 10.2.1. Inversores

El motor de tracción y el controlador toman energía de la batería o una fuente de energía alternativa, y proveen torque a la transmisión, lo que en consecuencia impulsa al vehículo. Además, el motor de tracción y el controlador pueden operarse como Generador y recuperar energía cinética disipada durante el frenado (Freno Regenerativo). El motor de tracción y el controlador proporcionan energía al dispositivo de almacenamiento, y torque negativo a la transmisión que en consecuencia frena el vehículo. La coordinación de los sistemas eléctrico e hidráulico, durante el frenado, es mejorado por el controlador del motor de tracción para satisfacer el comando de torque de frenado del conductor. El comando de torque motor es una entrada al loop compensador de torque que controla la estabilidad de la transmisión[62].

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 fig. 10.9. 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  $S_1$ ,  $S_4$ ,  $D_1$ ,  $D_4$  respectivamente, en la rama donde se conecta la *fase b* se tiene  $S_3$ ,  $S_6$ ,  $D_3$ ,  $D_6$ , y la

rama donde se conecta la *fase c* se tiene  $S_5, S_2, D_5, D_2$ .

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  $S_1, S_3, S_5$  y se abren  $S_4, S_6, S_2$ , y se alimenta con una tensión negativa ( $-V_d/2$ ) cuando se abren  $S_1, S_3, S_5$  y se cierran  $S_4, S_6, S_2$ , obteniendo así una corriente inversa de cada fase.

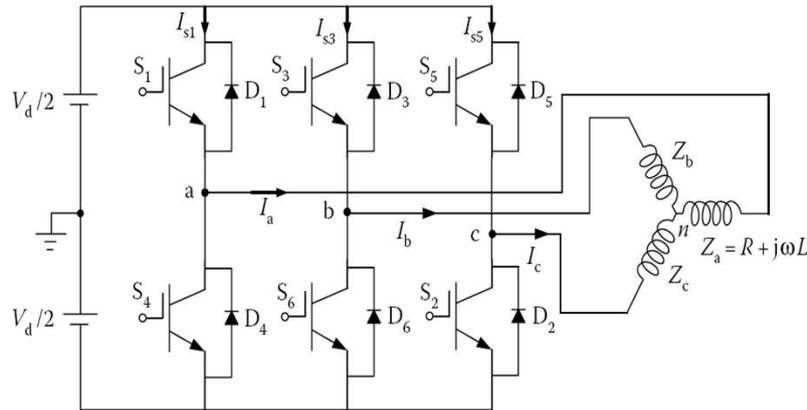


Figura 10.9: Convertidor DC/AC denominado Inversor (extraída de [25]).

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  $120^\circ$  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 desfase de ondas o PWM sinusoidal.

### 10.2.2. 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 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 fig. 10.10(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  $S1, S3, S4$  y se abren la llaves  $S4, S6$  y  $S2$  teniendo una tensión negativa. Las tensiones de las tres fases se muestran en las fig. 10.10(b),(c),y(d).

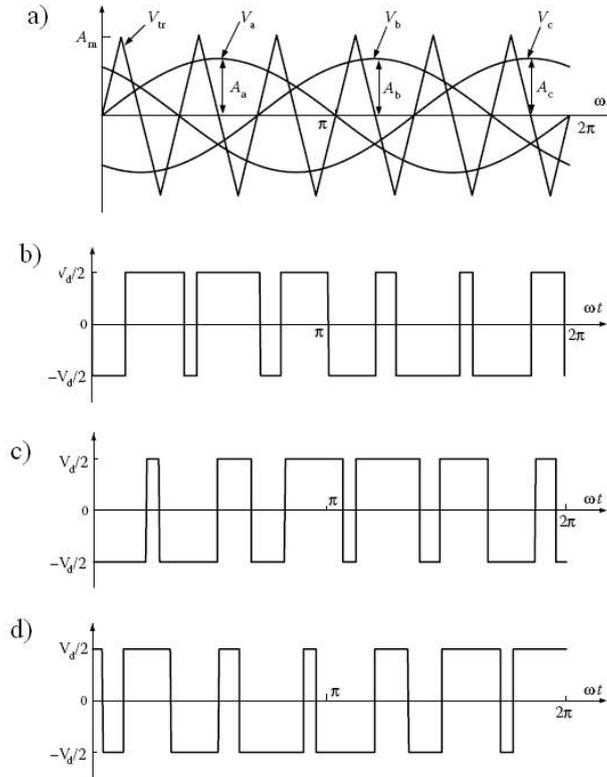


Figura 10.10: (a)Señales de referencias  $V_a, V_b, V_c$  junto con la señal portadora triangular  $V_{tr}$ . (b)Tensión *fase a*. (c)Tensión *fase b*. (d)Tensión *fase c* (extraída de [25]).

Si la 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 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 esta 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.

En la fig. 10.11 se ilustra el inversor conectado al motor de corriente alterna, el control de PWM sinusoidal y las formas de onda más relevantes.

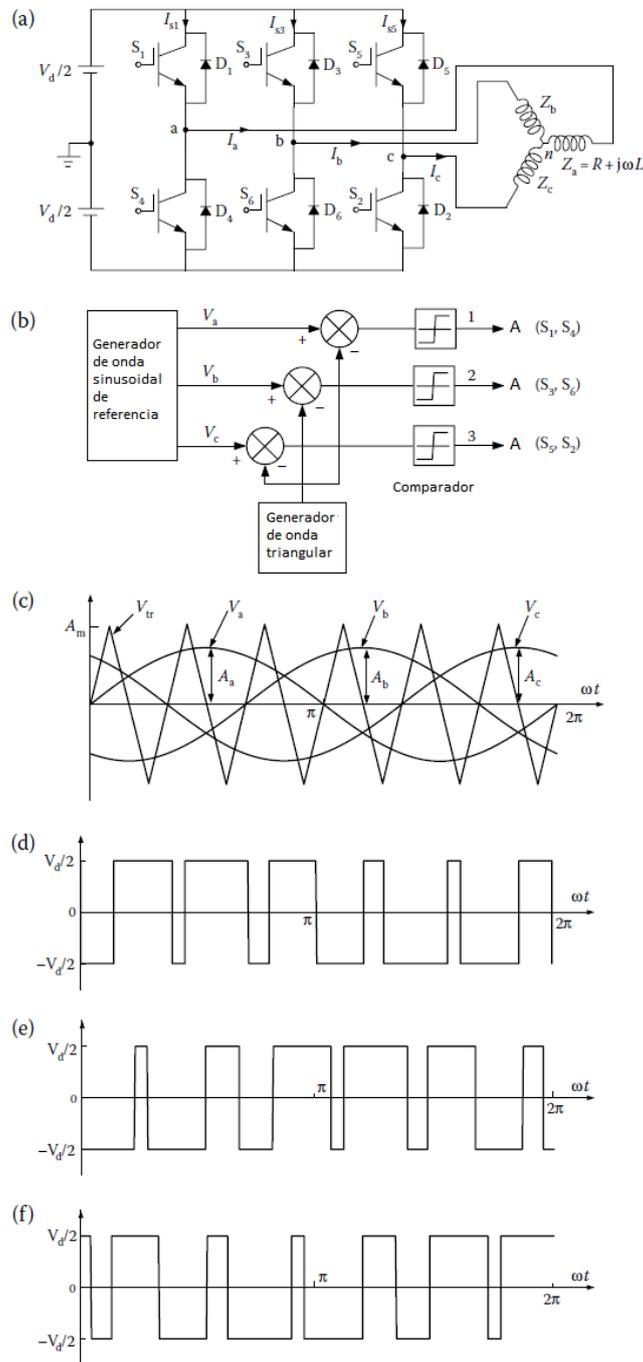


Figura 10.11: Inversor DC-AC con Modulación de Ancho de Pulso: (a) Topología del inversor; (b) Señales de Control; (c) Tensión de referencia trifásica y portadora triangular; (d) Tensión de la fase a; (e) Tensión de la fase b; (f) Tensión de la fase c.

### 10.2.3. Control vectorial

El Inversor de Electrónica de Potencia para Control Vectorial de motores de inducción, tienen la misma topología que se muestra en la fig. 10.11a. Las llaves de potencia en una misma rama (a, b o c), nunca deben estar ambas en conducción, ya que esto causaría un cortocircuito. Por otro lado, si ambas llaves en una misma rama están en corte, la tensión entre los bornes correspondientes será desconocido para el sistema de control del inversor. El circuito podrá completarse a través de los diodos superior e inferior y en consecuencia, la tensión será igual o bien al bus positivo (+) o al negativo (-). Por lo tanto el inversor se controla de forma de que en una misma rama alguna de las llaves superiores está encendida y la llave de abajo está apagada o viceversa, la llave de arriba está apagada y la de abajo encendida. Dado que solo está permitida la combinación de dos estados de las llaves en cada rama, se puede asignar una variable de conmutación binaria a cada fase del inversor. Por lo tanto, sólo hay ocho estados lógicos posibles para todo el circuito de potencia.

Vistos como fasores, estos ocho estados posibles se pueden representar en el plano como se muestra en la fig. 10.12. Se suele llamar a estos vectores como espaciales y es usual una representación en el plano complejo donde la componente  $\alpha$  es la componente real y  $\beta$  es la imaginaria. Con esta convención se puede definir cada vector como

$$v = q_a + aq_b + a^2q_c \quad (10.12)$$

donde  $a = e^{j2\pi/3}$ .

Hay dos configuraciones que generan voltaje nulo ( $V_0$  y  $V_7$ ) y corresponden a  $q_aq_bq_c = 000$  o  $q_aq_bq_c = 111$ . El vector  $V_1$  está alineado con el eje  $\alpha$  y corresponde con la configuración  $q_aq_bq_c = 100$ , mientras que los vectores  $V_3$  y  $V_5$  están desfasados  $120^\circ$  y  $240^\circ$  respectivamente y corresponden a las configuraciones  $q_aq_bq_c = 010$  y  $q_aq_bq_c = 001$  respectivamente. Una explicación detallada del origen de esta representación se puede encontrar en [66].

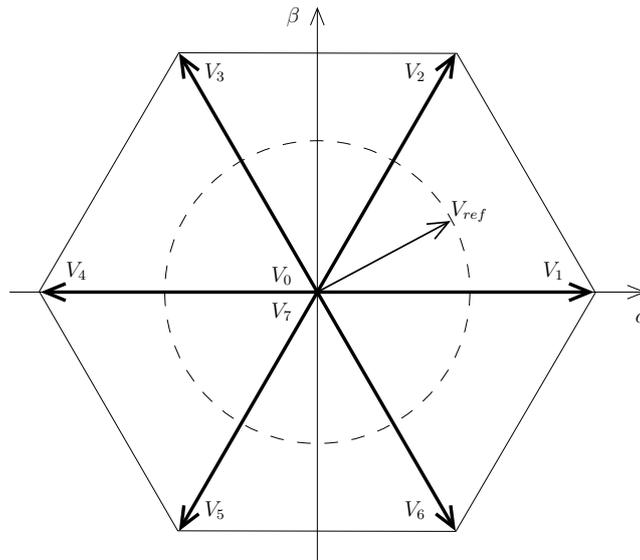


Figura 10.12: Representación de voltajes trifásicos en el espacio vectorial.

En esta representación, un voltaje trifásico sinusoidal balanceado recorre una circunferencia con velocidad angular igual a la frecuencia angular de la señal sinusoidal, tal como está indicado en la fig. 10.12. Si se deseara generar una salida con estas características, el valor instantáneo de la referencia se encontraría en algún lugar de la circunferencia. El control vectorial de tensión permite aproximar este valor utilizando modulación por ancho de pulso (PWM) de manera que el promedio del voltaje en un período de conmutación sea igual al valor instantáneo de la referencia. De hecho, este método de control permite generar voltajes de salida arbitrarios, no necesariamente sinusoidales, siempre y cuando la frecuencia de conmutación sea lo suficientemente alta con respecto al ancho de banda de la señal de referencia.

El control vectorial puede utilizarse de esta forma para controlar la tensión sinusoidal a la salida del inversor o también controlar directamente la corriente de salida, mediante un método más elaborado que fuera propuesto en [65].

# Capítulo 11

## Motor Eléctrico en Régimen Generador – Frenado Regenerativo

La transformación de energía eléctrica en energía mecánica (potencia eléctrica de las baterías en potencia mecánica en el eje de un motor eléctrico) puede ser un proceso bidireccional. Esto significa que se puede invertir el flujo de potencia y cargar las baterías con la potencia mecánica disponible en el eje del motor. Una vez que el motor está en movimiento con el eje girando a cierta velocidad angular  $\omega$ , se tiene potencial mecánico (expresado en potencia  $P_{mec} = C_r \cdot \omega$ ) capaz de cargar las baterías si estas ejercen un par resistente  $C_r$  en el proceso de carga. Esta capacidad, que se aprovecha al máximo en EV y EHV para mejorar los rendimientos, es la que se utiliza en el frenado de este tipo de vehículo y se conoce como frenado regenerativo.

El ejemplo de funcionamiento del motor de continua es muy claro para introducir el concepto. En la fig. 11.1 se muestra un motor de continua de un EV, alimentado por una batería de tensión  $V_b$ , que entrega un par  $C_m$  en el eje. Un instante después el conductor acciona el freno y conmuta de posición la llave  $S$ . La batería deja de entregar corriente al motor y la energía mecánica se disipa en la resistencia  $R_L$  frenando el vehículo <sup>(1)</sup>. En estas condiciones el par neto en el eje es resistente,  $C_r$  en la fig. 11.2, y se compone del par debido al rozamiento con el aire, el par de fricción y el par generador. El par generador lo produce la fem generada por el rotor que establece la corriente  $I_g$  a través de  $R_L$ . Si en lugar de la resistencia  $R_L$  se coloca la batería y acondicionamos la tensión inducida en el rotor para cargar la misma como en la fig. 11.3, se puede recargar las baterías cada vez que se acciona el freno.

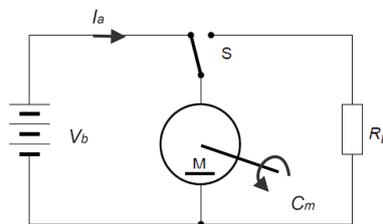


Figura 11.1: Motor de continua funcionando como motor.

<sup>(1)</sup>Un vehículo con frenos convencionales, disipa toda la energía cinética del movimiento (energía mecánica) en calor por rozamiento entre los patines y el tambor de freno.

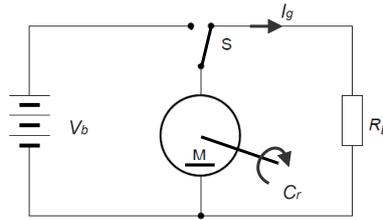


Figura 11.2: Motor de continua funcionando como generador.

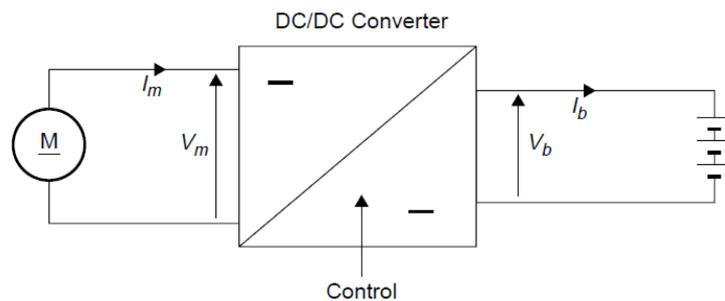


Figura 11.3: Motor de continua cargando la batería.

La elección de un motor eléctrico en la aplicación de EV y EHV toma en consideración la capacidad de recuperar energía del frenado, siendo este uno de los criterios que lleva a un fabricante a utilizar determinado motor. En lo que sigue se describe el comportamiento de los distintos tipos de motores en funcionamiento como generador. Luego se estudia cómo se selecciona un motor para obtener determinado desempeño en el frenado regenerativo.

## 11.1. Generador de inducción y generador síncrono

En esta sección se consideran los dos tipos de motores-generadores más utilizados por los fabricantes para el desarrollo actual de vehículos eléctricos.

### 11.1.1. El generador de inducción

La región de operación del motor de inducción generando energía eléctrica corresponde a velocidades mecánicas superiores a la velocidad de sincronismo  $n_{sync}$  y se indica sombreada en la fig. 11.4. En esta región el par eléctrico generado es negativo, como indica la figura, y alcanza un máximo superior al correspondiente a la operación como motor.

El generador de inducción únicamente es capaz de producir potencia activa, por lo que requiere tomar potencia reactiva de un capacitor u otra fuente que proporcione esta potencia para mantener el campo magnético del estator. Esta fuente debe controlar a su vez la tensión en bornes del generador, ya que en ausencia de una corriente de campo, el generador no puede controlar su voltaje de salida.

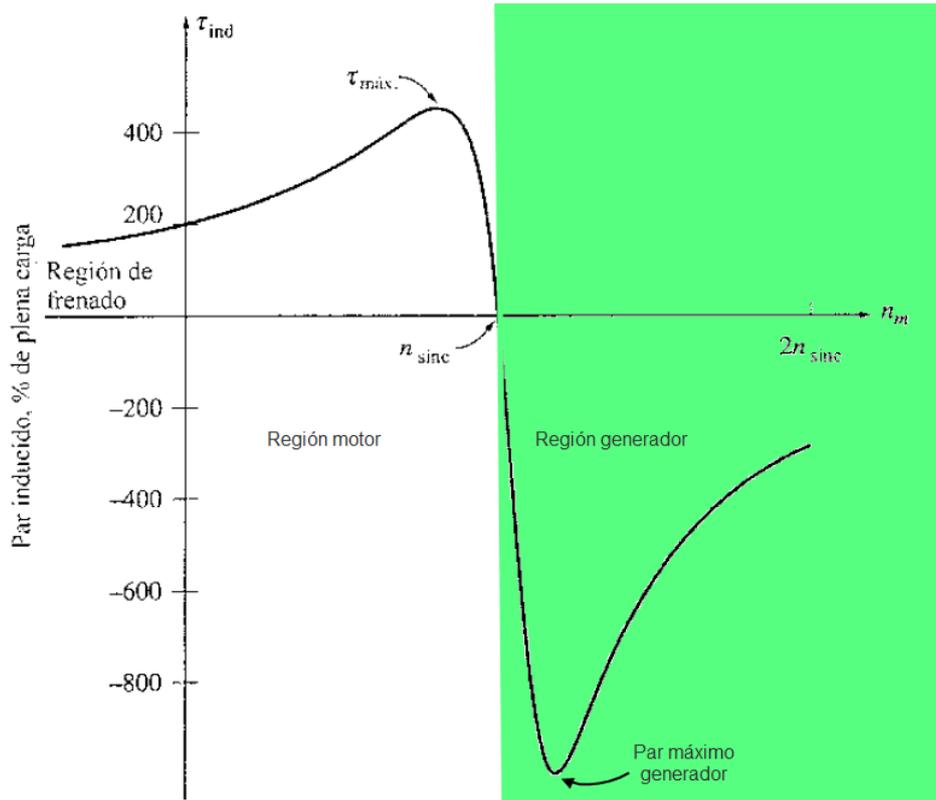


Figura 11.4: Curva del motor inducción en la región generador.

En los EV y EHV la potencia reactiva se toma del capacitor ubicado a la salida del convertidor DC-DC de la fig. 11.3, y el control de tensión lo establece el inversor de tensión que alimenta el motor trifásico.

### 11.1.2. El generador síncrono

El generador síncrono, como su nombre lo indica, funciona sincronizando la velocidad mecánica de rotación con la frecuencia eléctrica de alimentación, logrando que el rotor gire a la misma velocidad que los campos magnéticos establecidos por el estator. La velocidad de mecánica de un generador queda determinada por  $n_{mec} = \frac{f_e \cdot 60}{p}$ ; siendo  $f_e$  la frecuencia de alimentación y  $p$  el número de pares de polos del generador.

La potencia eléctrica que puede desarrollar el generador síncrono <sup>(2)</sup> es:  $P = \frac{3V_f \cdot E_A \cdot \text{sen } \delta}{X_s}$ ; donde  $V_f$  es la tensión en bornes del generador,  $E_A$  es la tensión interna generada en el bobinado,  $X_s$  la reactancia síncrona y  $\delta$  el ángulo formado entre los vectores  $E_A$  y  $V_f$  llamado ángulo de par de la máquina. Las máquinas síncronas utilizadas en la aplicación de EV y EHV son de polos salientes, por lo que se suma a la expresión de potencia el término debido al par de reluctancia en la máquina:

$$P = \frac{3V_f \cdot E_A \cdot \text{sen } \delta}{X_s} + \frac{3V_f^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{X_d \cdot X_q} \cdot \text{sen}(2\delta)$$

siendo  $X_d$  y  $X_q$  la reactancia síncrona directa y en cuadratura del generador.

<sup>(2)</sup>La expresión no considera las pérdidas mecánicas, en el núcleo y misceláneas.

El par inducido en el generador puede expresarse como:

$$T_{ind} = \frac{3V_f \cdot E_A \cdot \sin \delta}{\omega X_s} + \frac{3V_f^2}{2} \cdot \frac{X_d - X_q}{\omega X_d \cdot X_q} \cdot \sin(2\delta)$$

La curva del par del generador síncrono con polos salientes se muestra en la fig. 11.5.

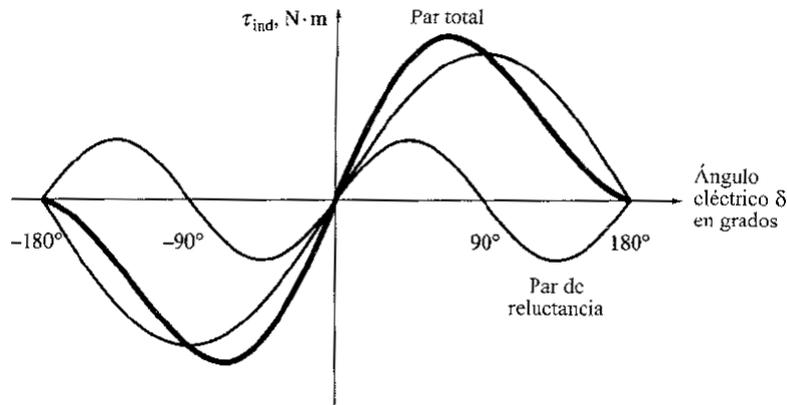


Figura 11.5: Curva del motor síncrono en la región generadora.

## 11.2. Motores en la aplicación del frenado regenerativo

En el sistema de frenos de los EV y los EHV coexisten el mecanismo de freno regenerativo y los frenos mecánicos. En muchas circunstancias de manejo de un vehículo el torque necesario para el frenado es superior al que es capaz de producir el motor eléctrico, en especial en frenadas bruscas. Esto se debe a que los motores equipados en estos vehículos no están diseñados para entregar el par de freno requerido en una situación de este tipo. Si así fuera, se requiere motores de mayor potencia que la necesaria para mover un vehículo tipo de 1500Kg, lo que implica mayor espacio y peso del mismo. Por lo que existe un compromiso entre potencia que debe desarrollar un motor eléctrico cuando realiza tracción del vehículo y la que debe entregar a las baterías cuando frena.

La potencia desarrollada en kWh por el motor eléctrico en la conducción de un vehículo en un camino llano está dada por la ecuación:

$$P_d = \frac{V}{1000} \cdot \left( Mgf_r + \frac{1}{2} \rho_a C_D A V^2 + M \delta \frac{dV}{dt} \right)$$

donde  $M$  es la masa del vehículo,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $f_r$  es el coeficiente de rozamiento,  $\rho_a$  es la densidad del aire,  $C_D$  el coeficiente de fricción aerodinámica,  $A$  es área frontal del vehículo,  $V$  es la velocidad y  $\delta$  el factor de inercia rotacional.

Cuando el motor eléctrico realiza tracción sobre las ruedas la potencia  $P_d$  es positiva, y cuando el motor no realiza tracción la potencia  $P_d$  negativa corresponde a la potencia debido a la energía cinética de movimiento del vehículo. Integrando esta expresión en el tiempo durante el transcurso de un ciclo de conducción, se puede estimar la energía necesaria para mover el vehículo y la energía necesaria para el frenado.

La fig. 11.6 muestra las energías de tracción y de frenado durante un ciclo de conducción FTP75. La energía de frenado al final del ciclo de conducción representa más del 50 % de la energía de tracción. En otros ciclos de conducción la energía de frenado puede representar hasta el 80 % de la energía de tracción (por ejemplo, en el ciclo de conducción New York).

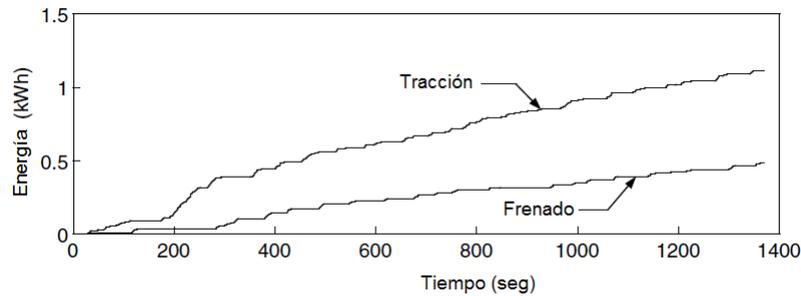


Figura 11.6: Energía de tracción y freno para el ciclo de conducción urbano FTP75. Extraído de [25].

Los datos anteriores marcan la importancia de la regeneración de energía durante la conducción de un EV o EHV. Si bien queda en evidencia la dependencia del ciclo de conducción en la energía de frenado, el compromiso entre potencia de tracción desarrollada contra potencia de frenado regenerada resulta ineludible para los fabricantes en el diseño de los motores eléctricos.

## Relación entre la energía de frenado y la potencia de frenado

La relación entre energía de frenado y la potencia de frenado para determinado ciclo de conducción permite obtener un criterio de diseño del motor eléctrico para la recuperación de energía. Si se analiza el gráfico de la fig. 11.7, donde se grafica la energía de frenado en relación al rango de potencia de frenado contra la potencia de frenado en un ciclo FTP75, se concluye que el 85 % de la energía total de frenado se obtiene en el rango de potencias de frenado menores a 14kW. Esto significa que con un motor de 15kW se puede recuperar el 85 % de la energía total de frenado.

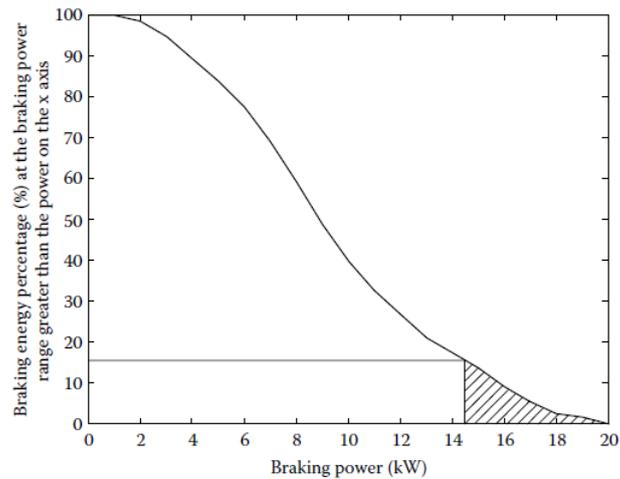


Figura 11.7: Porcentaje de la energía de frenado en relación a la potencia de frenado en un ciclo de conducción urbano FTP75. Extraído de [25].

Otros ciclos de conducción son comparados en la tabla 11.1 donde se tabulan los rangos de potencias para los cuales el 85% de la energía de frenado es consumida.

	<b>FTP75</b>	<b>LA92</b>	<b>US06</b>	<b>New York</b>	<b>ECE-15</b>
Potencia al 85% de energía de frenado	0-14kW	0-44,5kW	0-46,5kW	0-18,5kW	0-33,5kW

Tabla 11.1: Rangos de potencia de frenado para los cuales se consume el 85% de la energía total de frenado en los distintos ciclos de conducción. Extraído de [25].

Si se analiza la fig. 11.7 y la tabla 11.1 se puede ver que con un motor de 20kW, se recupera el 100% de la energía total de frenado en el ciclo de conducción FTP75 y más del 85% en el ciclo de New York.

## Relación entre la potencia de frenado y la velocidad

La relación entre potencia de frenado y la velocidad del vehículo es una herramienta de diseño muy importante en la determinación del motor eléctrico. Alcanza con ver la fig. 11.8 donde se grafica el perfil de potencia de frenado para cada velocidad en los distintos tipos de conducción.

La línea sólida sobre el gráfico de barras representa la potencia en kW del motor eléctrico que recupera el 85% de la energía total de frenado en el ciclo de conducción. Cabe señalar que esta línea se corresponde aproximadamente con la curva de potencia en un control típico de par velocidad de los autos eléctricos: un primer tramo donde la potencia es proporcional a la velocidad hasta una velocidad base (par constante), y un segundo tramo donde la potencia se mantiene constante con el aumento de la velocidad (par decreciente).

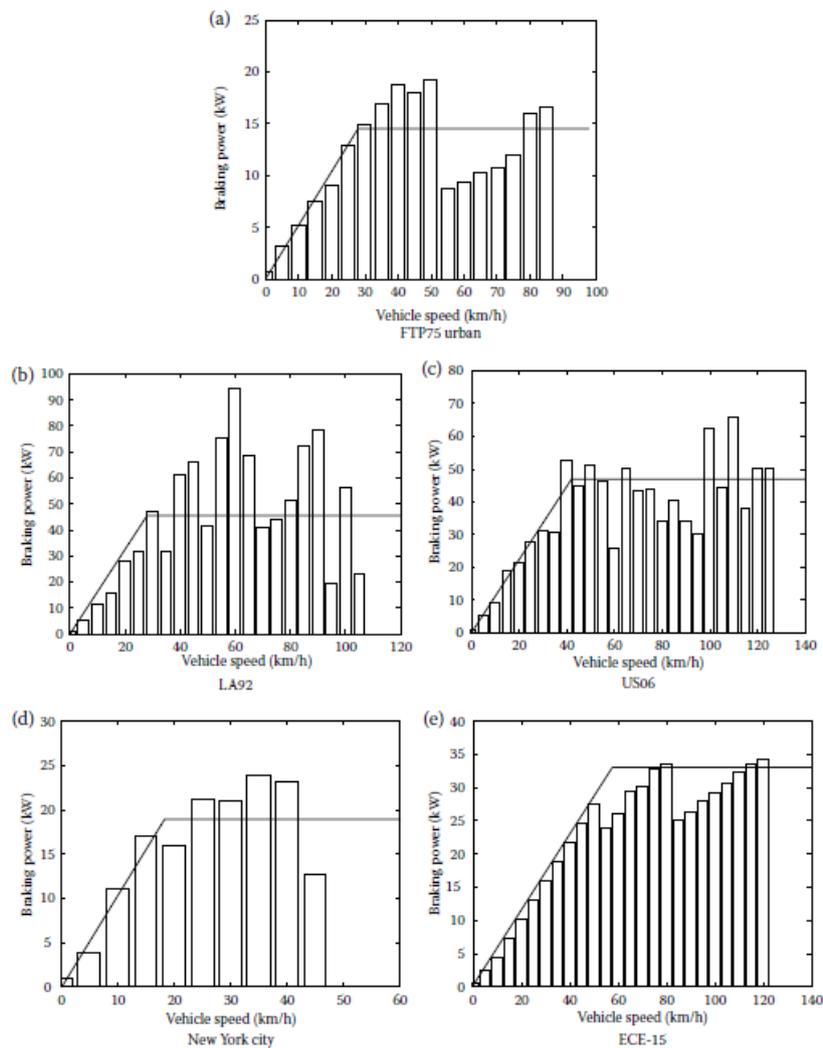


Figura 11.8: Potencia de frenado en función de la velocidad en los distintos ciclos de conducción. Extraído de [25].

Esta información resulta fundamental en el diseño del motor eléctrico a los efectos de ajustar el motor para determinadas prestaciones, pero también para conocer el desempeño y rendimiento de esperar en determinado ciclo de conducción. Nuevamente se pone de manifiesto la dependencia del ciclo de conducción para la elección del motor.

## Estrategias de control para el frenado regenerativo

De los puntos anteriores se desprende que existe una fuerte relación entre el diseño del motor y la estrategia de frenado regenerativo a utilizar, y que ésta depende del ciclo de conducción que se tome como referencia. Las limitantes que impiden que el frenado regenerativo recupere el 100 % de la energía de frenado vienen dadas principalmente por:

1. el par máximo que puede proporcionar la máquina eléctrica en régimen generador, y
2. la potencia máxima que puede circular en el tren eléctrico de potencia, compuesto por la máquina eléctrica, los convertidores y la batería.

Cuando el conductor desea frenar el vehículo, la señal de comando enviada por intermedio del pedal de freno, puede entenderse como una señal de par deseado. La estrategia más eficiente desde el punto de vista energético es proporcionar la totalidad de ese par deseado mediante freno regenerativo, hasta un cierto umbral predefinido que representa el par máximo que puede proporcionar la máquina eléctrica. Si el par deseado excede este valor, la diferencia se proporciona mediante el freno mecánico de fricción [25, 67].

Esta estrategia es posible siempre y cuando la potencia total no exceda el máximo. Dado que la potencia es el producto de par por velocidad, dependiendo de la velocidad del vehículo el par regenerativo puede llegar a ser menor que el umbral, aumentando entonces la necesidad de frenado mecánico.

Otra estrategia, que simplifica el control asociado, es mantener una relación de par entregado sobre par deseado constante durante todo el rango, tanto para el par mecánico como el regenerativo. De esta forma no es necesario un control sofisticado del freno mecánico y se pueden utilizar sistemas de freno mecánico convencionales. Como desventaja, la cantidad de energía recuperada es menor que en el caso anterior.

Estas dos estrategias se denominan “frenado regenerativo serial” y “frenado regenerativo paralelo” respectivamente en [67], ilustrado en la fig. 11.9.

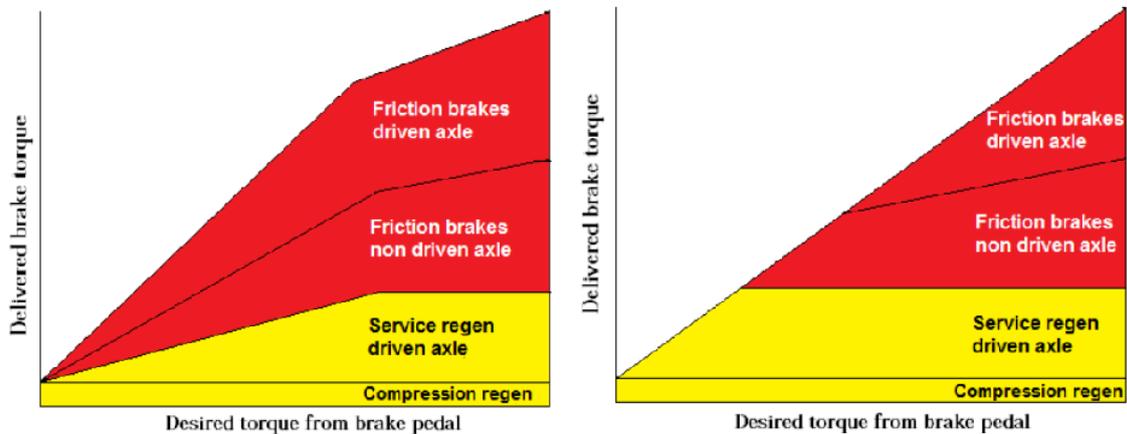


Figura 11.9: Freno regenerativo paralelo y serial respectivamente (extraído de [67]).

# Capítulo 12

## Simulación del Sistema de Propulsión Eléctrico

En este capítulo se describe la construcción de un modelo numérico representativo del sistema de propulsión de un automóvil eléctrico, que permite simular el funcionamiento bajo distintas condiciones de operación y evaluar el desempeño tanto desde el punto de vista dinámico como energético. El modelo es modular, permitiendo fácilmente modificar los parámetros de cada uno de sus componentes, las estrategias de control y los ciclos de conducción.

Los sistemas eléctricos y electrónicos descritos en los capítulos anteriores fueron integrados en una simulación para un caso de estudio. La simulación comprende:

1. un banco de baterías de 100V modelado como una fuente ideal;
2. un convertidor DC-DC que eleva la tensión hasta 500V, con su control asociado;
3. un inversor que alimenta el motor/generador de 50HP, con su control vectorial asociado;
4. una máquina que actúa como motor o generador en función del par requerido por el sistema de control;
5. un modelo del conductor que entrega un par deseado de referencia en función de la diferencia entre la velocidad real y la deseada (esta última definida por un ciclo de conducción);
6. un modelo del automóvil que calcula el par ejercido sobre la máquina en función de la velocidad;
7. un modelo de control de frenado regenerativo que permite a la máquina trabajar con un par negativo (régimen generador) hasta cierto límite, más allá del cual activa el freno mecánico.

Para desarrollar los modelos se utilizó Matlab/Simulink. Cada uno de los subsistemas fue diseñado y probado de manera independiente. Finalmente se integraron todos los componentes en una única simulación, que permite una evaluación global del desempeño del EV.

Se presentan a continuación cada uno de los subsistemas por separado y por último la simulación global con los resultados de desempeño obtenidos para una configuración de parámetros y ciclo de conducción representativos.

## 12.1. Convertidor DC-DC

Se modeló un convertidor bidireccional utilizando llaves ideales. La carga del convertidor es el inversor conectado a la máquina eléctrica, que se modelaron como una fuente de corriente a los efectos de probar este bloque. Si la corriente es negativa la máquina actúa como motor y la potencia fluye desde la batería a través del convertidor DC-DC; si la misma es positiva la máquina actúa como generador y la corriente fluye hacia la batería a través del mismo convertidor. Del lado de la batería, se modeló como una fuente ideal de tensión continua de 100V.

Para diseñar el control se realizó un modelo de pequeña señal de la transferencia entre el ciclo de trabajo y el voltaje de bus, a partir del cual se definió la realimentación adecuada para lograr estabilidad y una buena respuesta dinámica frente a cambios en la carga.

El modelo Simulink se muestra en las fig. 12.1, 12.2 y 12.3. Se utilizó la biblioteca SimPowerSystem en tiempo continuo con modelos de llaves ideales. Los parámetros de la simulación incluyen el método de integración ode23tb de paso variable con un tiempo mínimo de  $100ns$  y uno máximo de  $1\mu s$ . Estos valores resultan adecuados para una frecuencia de conmutación de  $50kHz$  que fue la elegida.

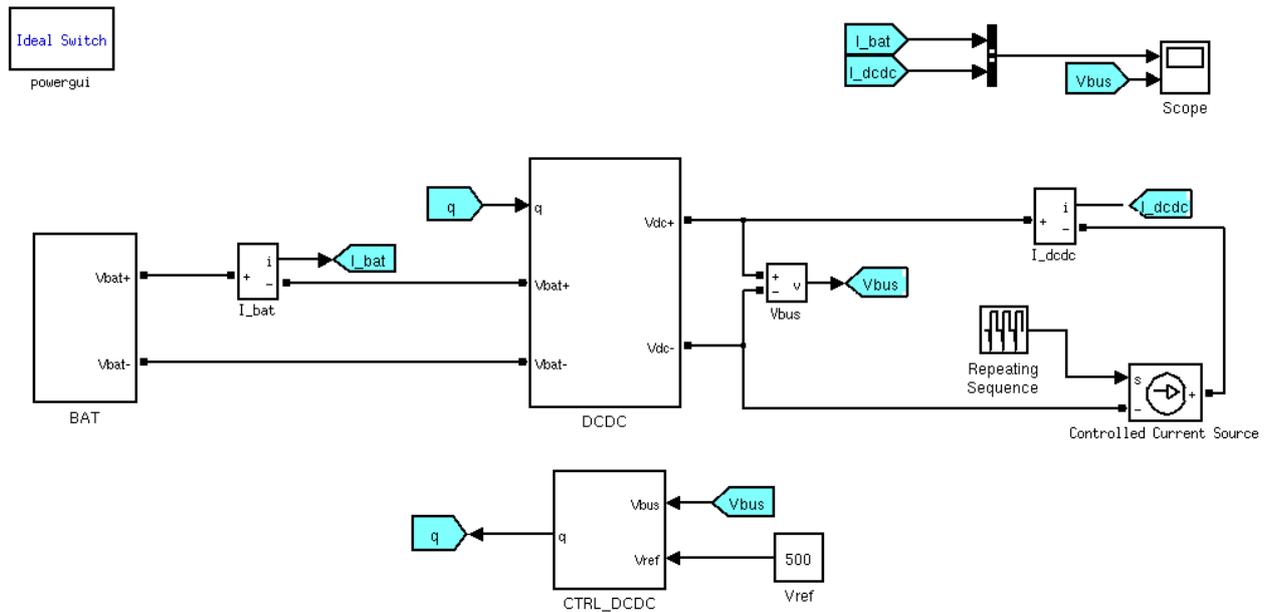


Figura 12.1: Modelo Simulink del convertidor DC-DC.

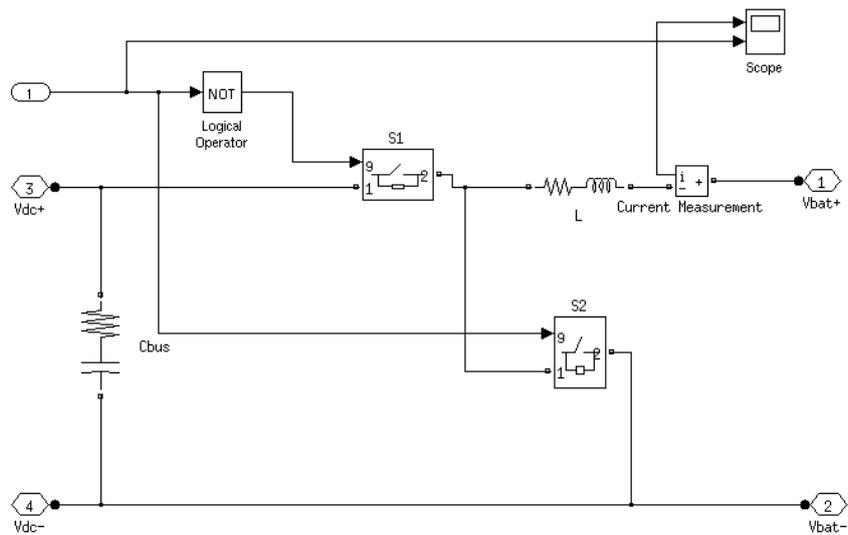


Figura 12.2: Bloque Simulink de la etapa de potencia del convertidor DC-DC.

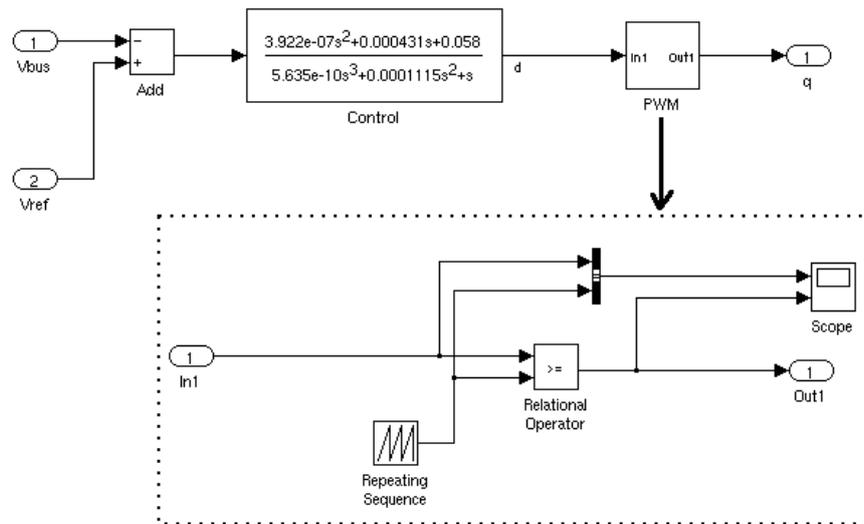


Figura 12.3: Bloque Simulink del control del convertidor DC-DC.

Los resultados de la simulación se muestran en la fig. 12.4. Se puede observar que ante variaciones de la corriente de carga bastante abruptas la respuesta del convertidor es adecuada, manteniendo el voltaje del bus dentro de una banda del 1% alrededor de su valor nominal. Esto se verifica para flujos de corriente en ambos sentidos.

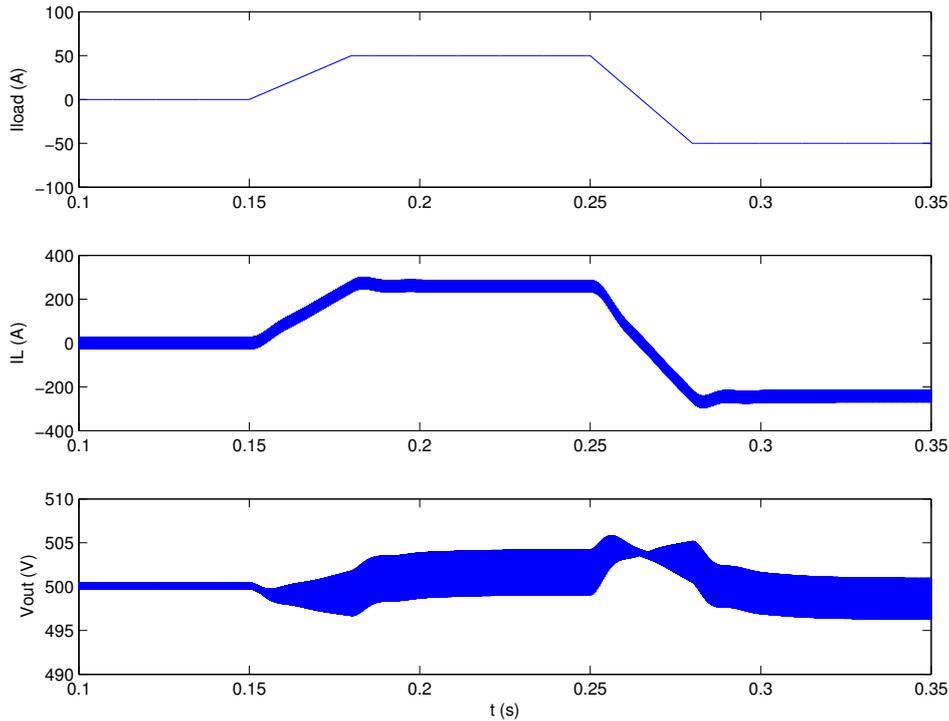


Figura 12.4: Resultados de la simulación del convertidor DC-DC. Arriba: corriente de carga; medio: corriente por el inductor; abajo: voltaje del bus de continua.

## 12.2. Inversor y máquina eléctrica

El inversor y la máquina eléctrica se modelaron utilizando bloques estándares de la biblioteca SimPowerSystem de Simulink. Para el motor se eligió una máquina de inducción de 50HP y 400V. El inversor está compuesto por tres ramas de llaves ideales. La entrada del inversor es el bus de continua regulado por el convertidor DC-DC y aquí se modeló como una fuente ideal de 500V.

El aspecto más elaborado de esta simulación es el control vectorial de corriente para comandar el inversor. Se reutilizó el modelo presentado en [24], ajustando los parámetros de acuerdo al nuevo motor utilizado.

La referencia de corriente para el inversor proviene de calcular el par requerido para el motor. En esta simulación se toma como entrada, ya que en un sistema completo deberá estar definido por el conductor del vehículo mediante el pedal acelerador.

La carga de par del motor se calcula en función del modelo estándar del comportamiento dinámico del automóvil, presentado por ejemplo en [25, 67], que consiste en una suma de la inercia, el arrastre del aire, la fricción del terreno y la pendiente. En total este par de carga tiene una fuerte dependencia con la velocidad del vehículo.

El modelo completo se muestra en la fig. 12.5. La simulación con SimPowerSystem es en tiempo discreto con un período de  $1\mu s$ , con el algoritmo ode15s.

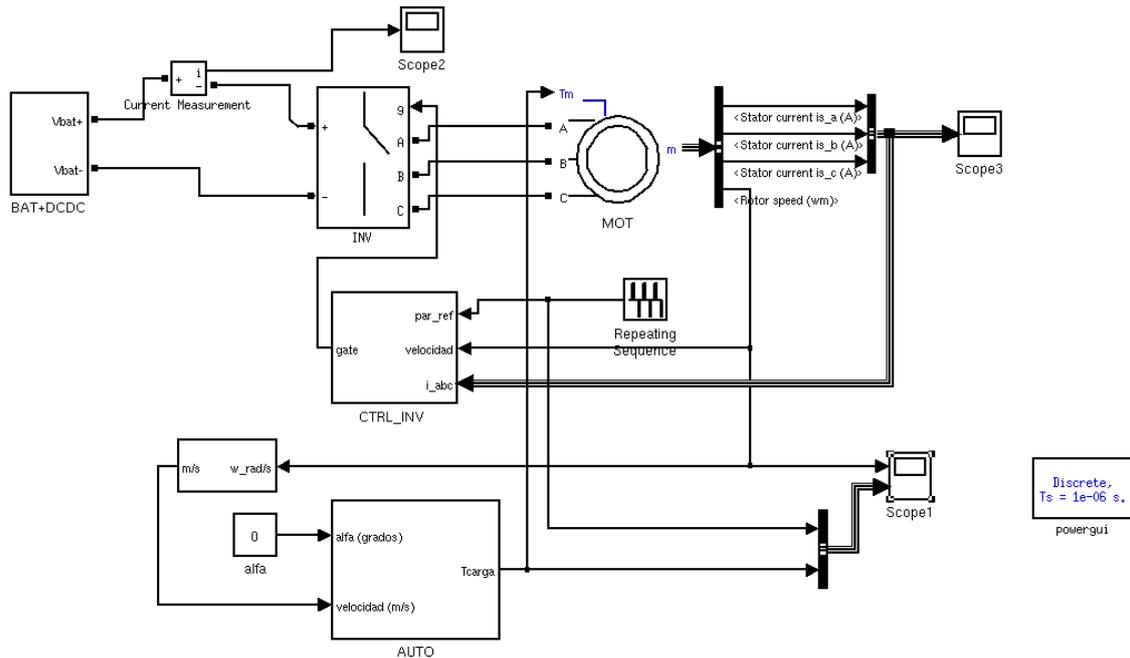


Figura 12.5: Modelo Simulink del inversor y el motor.

El resultado se muestra en la fig. 12.6. Se observa que el control logra seguir el par solicitado, tanto en aceleración como en frenado regenerativo. La velocidad varía de manera acorde.

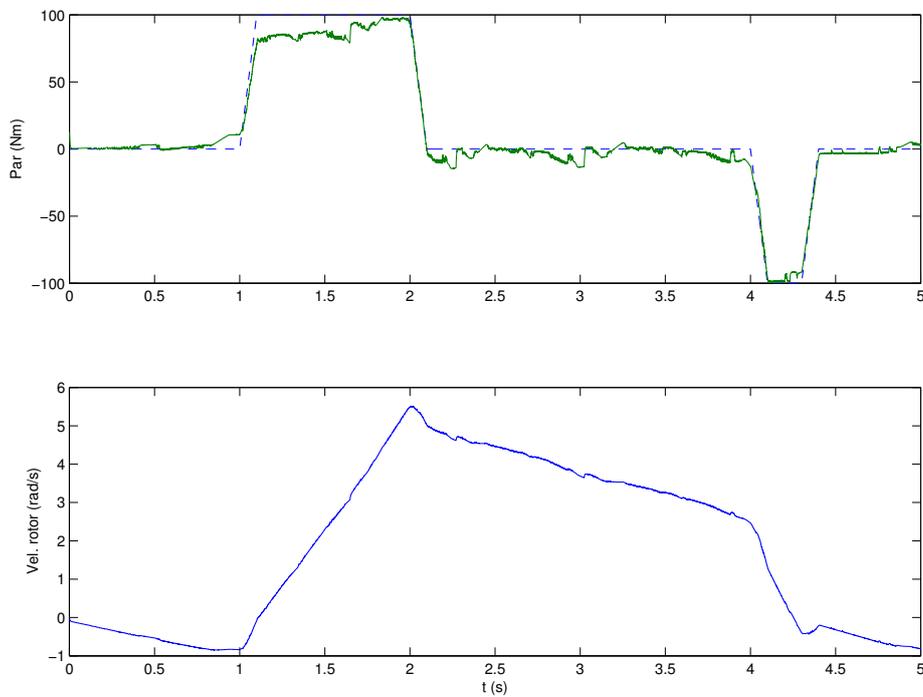


Figura 12.6: Resultados de la simulación del inversor y el motor. Arriba: par solicitado y par entregado; abajo: velocidad del rotor.

### 12.3. Control de frenado

Para el control de freno regenerativo se define un par de umbral por debajo del cual toda la carga la soporta la máquina trabajando en modo generador. Por encima de este umbral se activa el freno mecánico generando una señal de comando igual al par total necesario menos el umbral, mientras que la máquina soporta este par de umbral.

El modelo Simulink se muestra en la fig. 12.7. Se genera una referencia de velocidad a partir de la cual se calcula el par necesario para mover el vehículo. El bloque FRENO HIBRIDO hace la comparación del par de carga con el par umbral y toma la decisión de activar o no el par de freno mecánico.

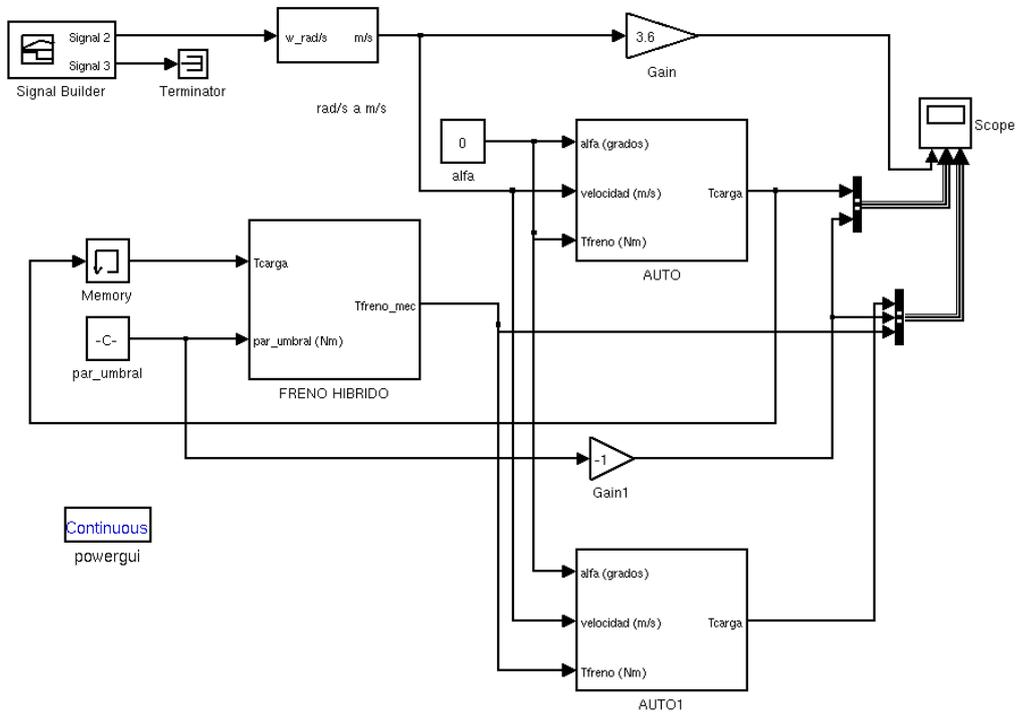


Figura 12.7: Modelo Simulink del control de freno regenerativo.

Los resultados de la simulación se muestran en la fig. 12.8. Se muestra el par total necesario, que es función de la velocidad del vehículo. Cuando el par excede el umbral como consecuencia de una frenada brusca (aproximadamente en  $t = 23s$ ), se activa el freno mecánico y se satura el par que actúa sobre el generador.

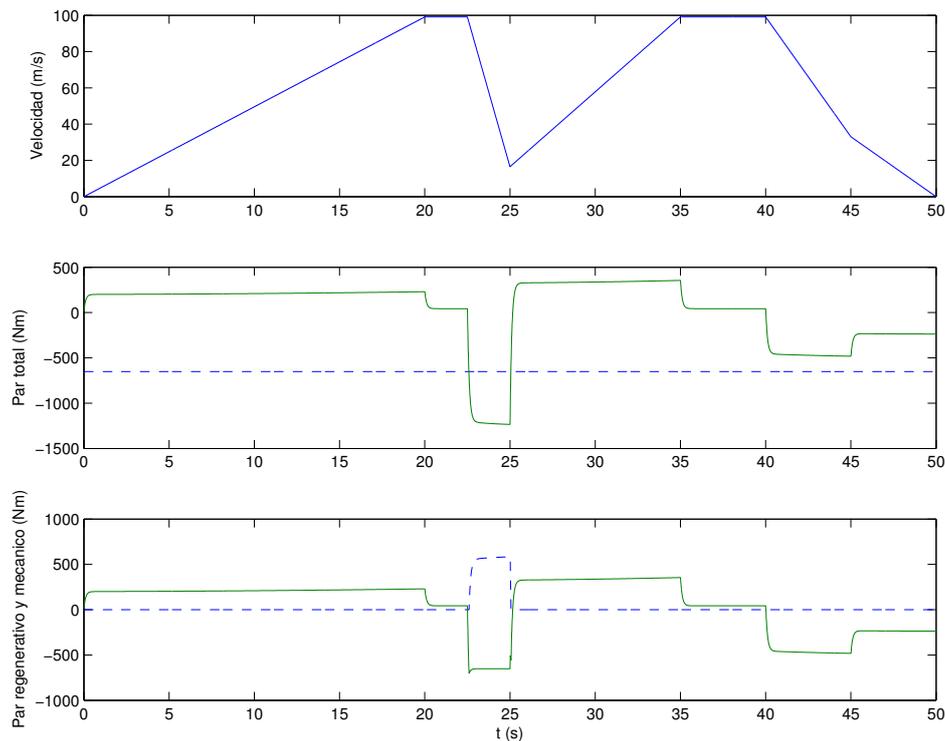


Figura 12.8: Resultados de la simulación del control de freno regenerativo. Arriba: velocidad del vehículo; medio: par total necesario (línea sólida) y par de umbral (línea punteada); abajo: par del motor (línea sólida) y par del freno mecánico (línea sólida).

## 12.4. Simulación completa

Las simulaciones realizadas hasta el momento permiten verificar el correcto funcionamiento de cada una de las partes. En esta sección se integra todo en una única simulación para poder evaluar el desempeño a nivel de sistema, sobre todo en términos de ahorro de energía como consecuencia de distintas estrategias de frenado y para ciclos de conducción estándares que se encuentran en la literatura.

Este modelo se muestra en la fig. 12.9. La entrada principal es la curva de velocidad de un ciclo de conducción típico. Un bloque controlador simulará la acción del conductor que producirá un par de referencia para ser enviado al motor. El bloque de control de freno regenerativo activará un par de carga mecánico cuando el umbral sea excedido o de acuerdo a cualquier otra estrategia que se desee programar. El modelo es modular y permite modificar con facilidad cualquiera de las partes para realizar estudios comparativos.

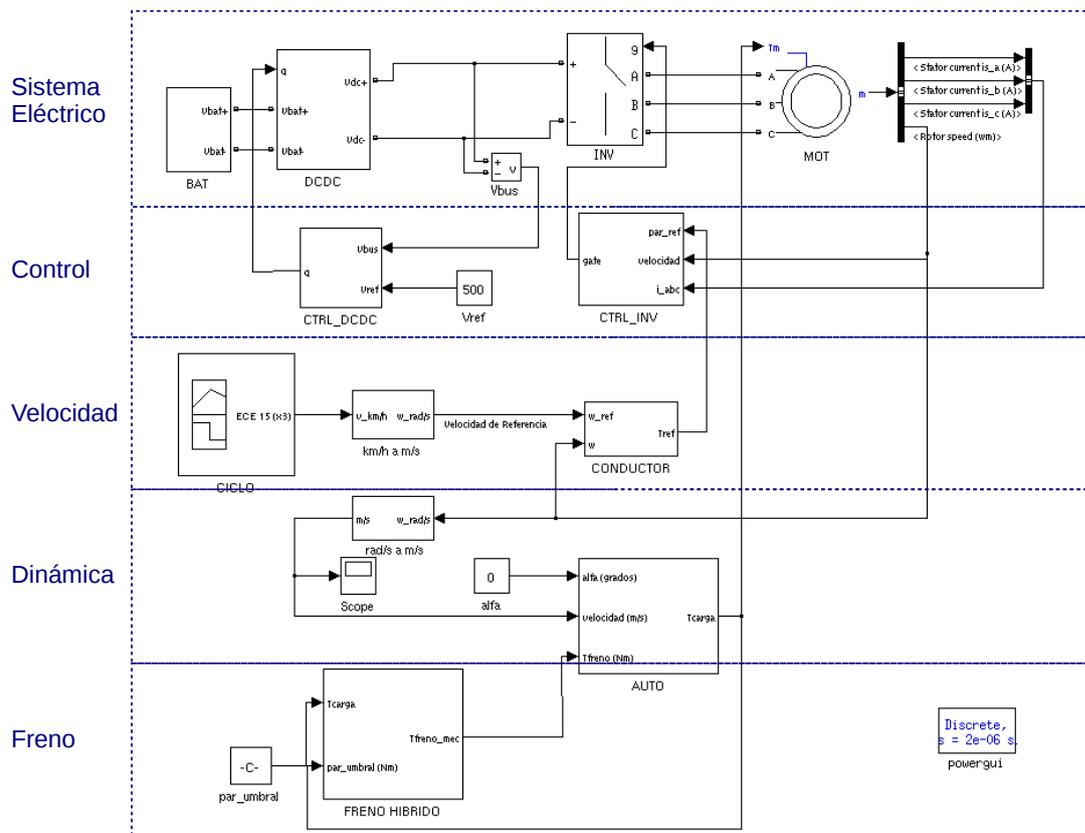


Figura 12.9: Diagrama de bloques de la simulación completa.

Es necesario aclarar que el período de conmutación del convertidor DC/DC es mucho menor que las constantes de tiempo del resto de los subsistemas. Esto hace muy difícil poder simular este bloque en conjunto con el resto, ya que el paso de integración debería ser mucho menor que el óptimo. Como se desean tiempos de simulación del orden de cientos de segundos, se encuentran limitaciones muy grandes en términos de tiempos de cómputo y memoria. Por lo tanto, se ha decidido separar la dinámica del convertidor DC/DC del resto e incorporar el conjunto del convertidor DC/DC y la batería como una fuente de tensión. Esto permite realizar la simulación en tiempos razonables y no afecta la calidad de la misma, ya que según se ha visto más arriba, la regulación del convertidor DC/DC es muy buena y puede considerarse una fuente de tensión a los efectos de simular el resto del sistema.

A continuación se presentan los resultados de la simulación utilizando el ciclo de conducción NEDC como entrada. Este ciclo fue ligeramente modificado para incluir una frenada brusca que permita apreciar la acción del freno mecánico.

En la fig. 12.10 se muestra una parte del Ciclo de Conducción ensayado con el resultado obtenido. Se observa sobre el comienzo del ciclo la frenada brusca que genera un pico de corriente ingresando en la batería.

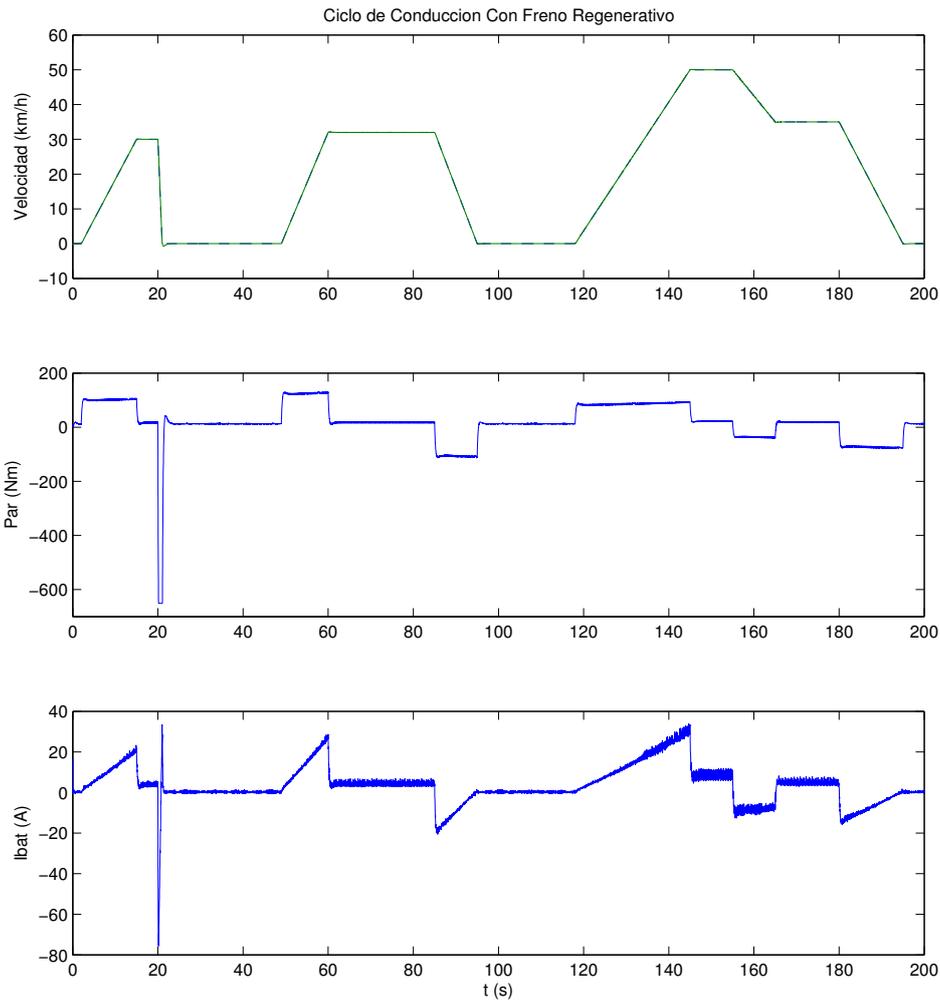


Figura 12.10: Resultados de simulación con freno regenerativo.

Para comparar los resultados, se muestra en la fig. 12.11 la misma simulación pero sin incluir el mecanismo de freno regenerativo. Se observa que la corriente por la batería es siempre positiva. En la fig. 12.12 se muestra la potencia entregada por la batería con y sin frenado regenerativo. El área de diferencia entre las dos curvas representa la energía recuperada gracias a esta técnica. En la tabla 12.4 se compara la energía total consumida en la batería para ambos casos. La diferencia representa una reducción del consumo de 32% gracias al uso del frenado regenerativo.

Caso	Energía consumida (kJ)
sin freno regenerativo	521
con freno regenerativo	355

Tabla 12.1: Comparación de consumo de energía.

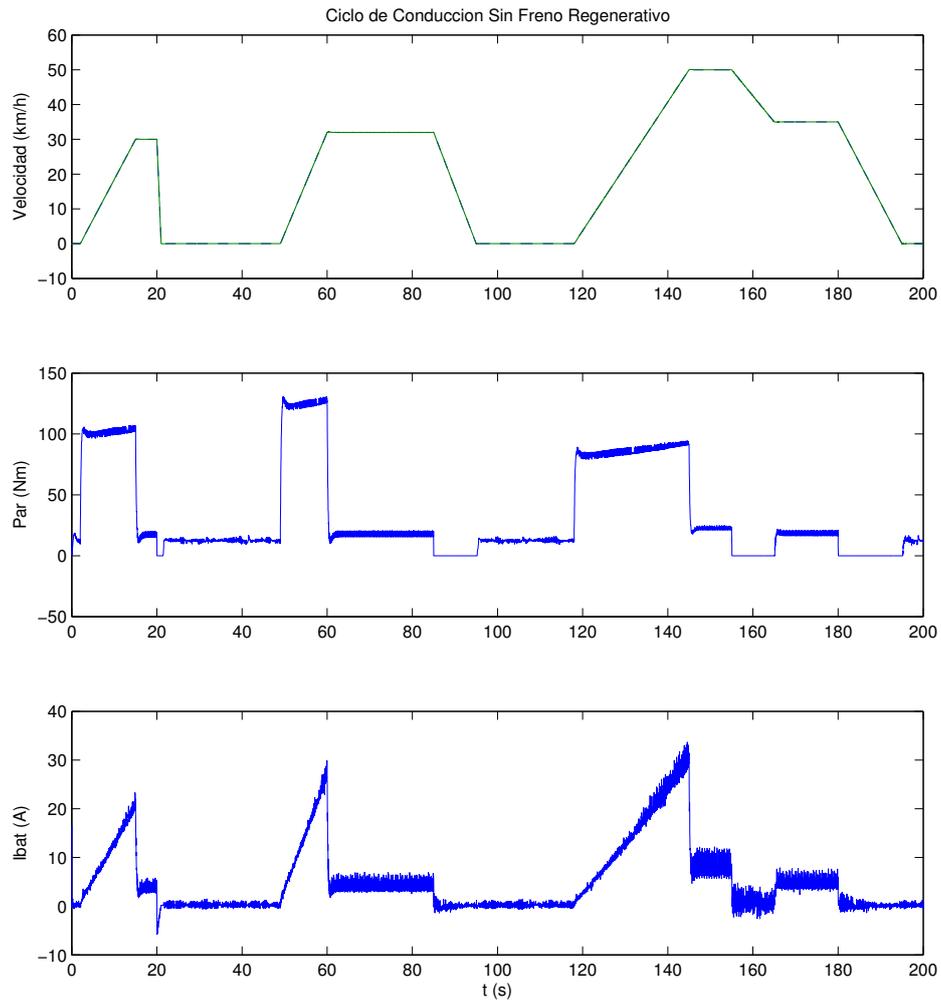


Figura 12.11: Resultados de simulación sin freno regenerativo.

Además del ahorro de energía, el frenado regenerativo permite un ahorro en el desgaste del freno mecánico, aumentando su vida útil. Este fenómeno puede ser estudiado y cuantificado si se incorpora a la simulación presentada un modelo de dicho desgaste en función de las condiciones de operación, lo cual excede el alcance del presente trabajo.

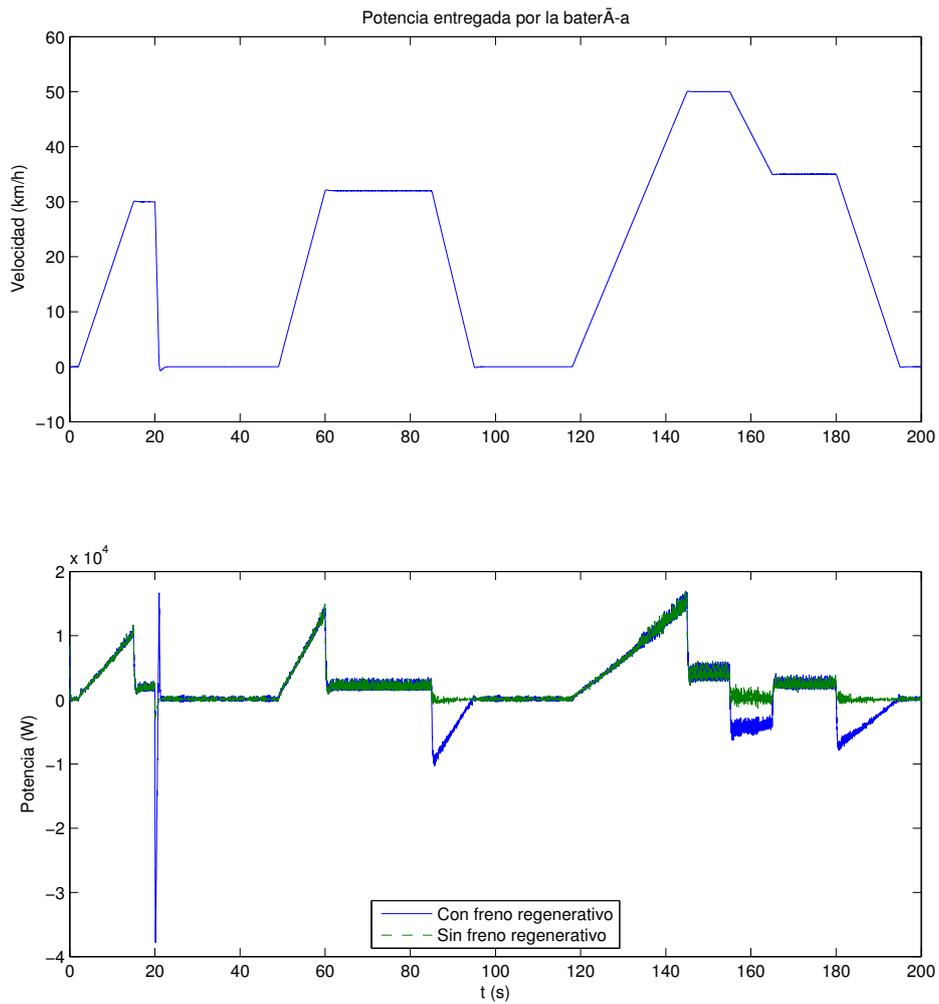


Figura 12.12: Resultados de simulación: potencia entregada por la batería con y sin frenado regenerativo.



# Capítulo 13

## Caracterización y evolución del parque automotor

### 13.1. Introducción

Con el objetivo de caracterizar el parque automotor tomando una porción del mismo para su estudio, se definieron las categorías de interés particular y se obtuvo una base de datos para el periodo 1993 a 2008, años en los que se contaba con la mayor cantidad de datos.

A partir de la base de datos del parque se obtuvo la correlación entre la evolución de éste y el PBI. Se eligió esta variable por ser un indicador a nivel nacional del estado de la economía que demostró guardar una correlación importante con la evolución del parque tanto a nafta como a gasoil.

Se simularon 3 escenarios de posibles de evolución del parque total a partir de 3 escenarios de crecimiento del PBI. A partir de éstos se formularon también escenarios para la inserción de los autos eléctricos en el parque automotor nacional.

### 13.2. Origen de los datos

Los datos base que se utilizaron para conformar la base son, en su origen, de las intendencias. En algunos casos se procesaron las bases de datos de las intendencias pero también se utilizaron datos ya extraídos de estas bases de datos a través de distintos informes [4] de variadas dependencias públicas que se listan a continuación.

- MTOP - Anuario estadístico de transporte 2007 [70]
- MIEM-DNE - Registro automotor de las intendencias
- INE - Estadística de evolución del parque automotor [72]

### 13.3. Porción del parque para el estudio

Debido a que es mas probable que la sustitución por autos eléctricos se registre mayormente dentro de cierto rango de vehículos, se limitó el análisis para éstos. Así se definió como la porción del parque automotor de nuestro interés a los vehículos que cumplían con las siguientes características:

Automóviles de uso particular y transporte liviano

- Capacidad hasta 4 personas
- Hasta 2 TON
- Máximo 5 puertas

Dentro de los vehículos con estas características se definieron las siguientes categorías de interés:

- Combustible
  1. nafta
  2. gasoil
- Lugar de uso
  1. Montevideo
  2. Interior

Así se obtuvo la porción del parque automotor de interés separado en 4 categorías, por lugar de uso y combustible del mismo. Cabe aclarar que se tomó como hipótesis que el lugar de empadronamiento es el lugar de uso.

### 13.4. Período de tiempo

Los años para los cuales se confeccionó la base de datos abarcaron el período entre 1993 y 2008, ya que sobre estos años se contaba mayor información.

### 13.5. Base de datos

Para construir la base de datos se utilizaron en su mayoría las bases de datos entregadas por las intendencias, filtrando solamente los automóviles que se encontraban dentro de las categorías seleccionadas.

En algunos casos no se logró obtener suficiente cantidad de datos como para conformar una base de datos completa, por lo que se utilizaron diferentes metodologías, según información que se contaba, para estimar los datos faltantes.

Para los años entre 1993 y 2005 se tenían los datos del parque automotor total para las categorías a estudiar, pero sin una distribución por departamentos. En estos casos se estimaron los datos de cada categoría por departamento tomando como hipótesis que la distribución por departamento se mantenía igual a la registrada en el año 2006.

	1993		1994		1995		1996		1997		1998		1999		2000		2001		2002		2003		2004		2005	
	Nafta	Gasoll																								
Artigas	8.031	1.631	8.377	1.713	8.754	1.790	8.574	1.688	9.443	2.224	10.503	2.551	11.917	3.041	11.463	3.278	10.705	3.468	10.554	3.458	8.575	3.225	8.568	3.293	7.606	2.937
Canelones	45.632	13.487	47.602	14.167	49.743	14.806	48.721	13.962	53.655	18.392	59.683	21.100	67.714	25.147	65.133	27.107	60.827	28.678	59.971	28.597	48.723	26.668	48.688	27.234	43.219	24.290
Cerro Largo	7.816	1.972	8.153	2.072	8.520	2.165	8.345	2.042	9.190	2.690	10.222	3.086	11.598	3.677	11.156	3.964	10.418	4.194	10.272	4.182	8.345	3.900	8.339	3.983	7.402	3.552
Colonia	15.276	2.765	15.935	2.904	16.652	3.035	16.310	2.862	17.961	3.770	19.979	4.326	22.667	5.155	21.803	5.557	20.362	5.879	20.075	5.862	16.310	5.467	16.298	5.583	14.468	4.979
Durazno	6.818	2.945	7.112	3.093	7.432	3.233	7.279	3.048	8.016	4.016	8.917	4.607	10.117	5.491	9.731	5.919	9.088	6.261	8.960	6.244	7.279	5.823	7.274	5.946	6.457	5.303
Flores	4.293	1.207	4.478	1.268	4.679	1.325	4.583	1.250	5.047	1.646	5.615	1.888	6.474	2.563	6.127	2.426	5.722	2.566	5.642	2.559	4.583	2.387	4.580	2.437	4.066	2.174
Florida	8.840	1.628	9.222	1.710	9.636	1.787	9.438	1.685	10.394	2.219	11.562	2.546	13.118	3.035	12.618	3.271	11.783	3.461	11.618	3.451	9.439	3.218	9.432	3.286	8.372	2.931
Lavalleja	7.609	2.023	7.937	2.125	8.294	2.221	8.124	2.094	8.947	2.758	9.952	3.164	11.291	3.771	10.861	4.065	10.143	4.301	10.000	4.289	8.124	3.999	8.118	4.084	7.207	3.643
Maldonado	38.868	10.828	40.546	11.374	42.369	11.887	41.489	11.209	45.701	14.766	50.835	16.940	57.676	20.188	55.478	21.762	51.809	23.023	51.081	22.959	41.500	21.409	41.470	21.864	36.812	19.501
Montevideo	122.445	19.289	127.730	20.262	133.474	21.176	130.733	19.968	143.971	26.304	160.145	30.177	181.695	35.964	174.770	38.768	163.214	41.015	160.919	40.899	130.737	38.140	130.643	38.950	115.968	34.739
Paysandu	15.432	2.961	16.098	3.111	16.822	3.251	16.477	3.066	18.145	4.038	20.184	4.633	22.900	5.521	22.027	5.952	20.570	6.297	20.281	6.279	16.477	5.855	17.162	6.288	14.616	5.333
Río Negro	4.195	1.221	4.376	1.283	4.573	1.341	4.479	1.264	4.932	1.665	5.486	1.910	6.225	2.277	5.987	2.454	5.591	2.597	5.513	2.589	4.665	2.593	4.476	2.466	3.973	2.199
Rivera	4.358	1.089	4.546	1.144	4.750	1.195	4.652	1.127	5.124	1.485	5.699	1.703	6.466	2.030	6.220	2.188	5.808	2.315	5.727	2.309	4.846	2.312	4.649	2.199	4.127	1.961
Rocha	8.506	2.241	8.873	2.354	9.272	2.460	9.081	2.320	10.001	3.056	11.124	3.506	12.621	4.179	12.140	4.504	11.338	4.765	11.178	4.752	9.082	4.431	9.075	4.526	9.459	4.759
Salto	11.607	2.753	12.108	2.892	12.652	3.022	12.392	2.850	13.647	3.754	15.181	4.307	17.223	5.133	16.567	5.533	15.472	5.854	15.254	5.837	12.393	5.444	12.384	5.559	10.993	4.958
San Jose	16.286	5.445	16.989	5.720	17.753	5.978	17.389	5.637	19.149	7.426	21.301	8.519	24.167	10.153	23.246	10.944	21.709	11.579	21.404	11.546	17.389	10.767	18.112	11.563	15.425	9.807
Soriano	9.861	2.730	10.287	2.868	10.750	2.997	10.529	2.826	11.595	3.723	12.898	4.271	14.633	5.090	14.076	5.487	13.145	5.805	12.960	5.789	10.529	5.398	10.522	5.513	9.340	4.917
Tacuarembó	3.046	807	3.177	847	3.320	886	3.252	835	3.581	1.100	3.984	1.262	4.520	1.504	4.347	1.621	4.060	1.715	4.003	1.710	3.387	1.713	3.250	1.629	2.885	1.453
Treinta y Tres	4.884	890	5.095	934	5.324	977	5.215	921	5.743	1.213	6.388	1.392	7.248	1.659	5.432	1.889	6.511	1.892	6.419	1.886	5.215	1.759	5.211	1.796	4.626	1.602

Tabla 13.1: Base de datos para el periodo 1993-2005.

Para el año 2006 se tenían los datos del anuario estadístico de transporte del MTOP que discrimina en las mismas categorías que se utilizaron para este informe. Debido a esto, este año se utilizó como base para las estimaciones.

Para el periodo 2007-2008, a partir de las bases de datos que las intendencias departamentales suministraron al MIEM (DNE), se obtuvieron los datos para cada categoría. Debido a que no todas las intendencias entregaron los datos requeridos, no se obtuvo una base de datos completa para estos años. Para estimar los datos faltantes en esos departamentos se realizaron dos estimaciones: una para los departamentos del interior y otra para Montevideo.

Para Montevideo la evolución se linealizó entre el año 2006 y 2009 ya que se contaba con las bases de datos entregadas por la intendencia para esos años.

Para el interior se asumió que la evolución para el año 2007 y el 2008 de los departamentos sin datos se comportaba igual al promedio de los departamentos con que sí se contaba con datos.

	2006		2007		2008	
	Nafta	Gasoil	Nafta	Gasoil	Nafta	Gasoil
Artigas	8.931	3.463	9.492	4.398	10.493	4.549
Canelones	50.748	28.639	53.934	36.368	59.622	37.617
Cerro Largo	8.692	4.188	8.847	4.306	9.780	4.454
Colonia	16.988	5.871	26.865	16.966	29.698	17.549
Durazno	7.582	6.253	9.800	6.430	10.834	6.651
Flores	4.679	2.511	4.973	3.189	5.497	3.298
Florida	9.831	3.456	9.029	4.057	9.981	4.196
Lavalleja	8.462	4.295	8.993	5.454	9.942	5.641
Maldonado	43.225	22.992	43.249	21.470	50.864	22.431
Montevideo	136.171	40.959	113.310	39.283	90.449	37.607
Paysandu	16.820	6.161	18.320	7.141	20.252	7.386
Rio Negro	5.189	2.961	5.595	3.194	6.030	3.442
Rivera	4.749	2.265	5.048	2.877	5.580	2.975
Rocha	10.885	5.498	10.007	5.270	11.062	5.451
Salto	12.908	5.846	10.661	4.308	12.321	5.155
San Jose	17.751	11.329	18.865	14.386	20.855	14.880
Soriano	10.967	5.797	9.064	5.426	7.439	4.593
Tacuarembó	3.320	1.678	3.528	2.131	3.900	2.204
Treinta y Tres	5.324	1.851	5.658	2.350	6.255	2.431

Tabla 13.2: Base de datos para el periodo 2006-2008.

## 13.6. Evolución

Una vez realizado el procesamiento descrito sobre los datos disponibles, se completó la base de datos con la evolución del parque automotor para el periodo 1993-2008. Para nuestro análisis sólo nos dedicamos a observar la evolución del parque discriminado según Interior y Montevideo. La división en cada departamento del interior no se utiliza ya que se asumen parques de iguales características para todos los departamentos.

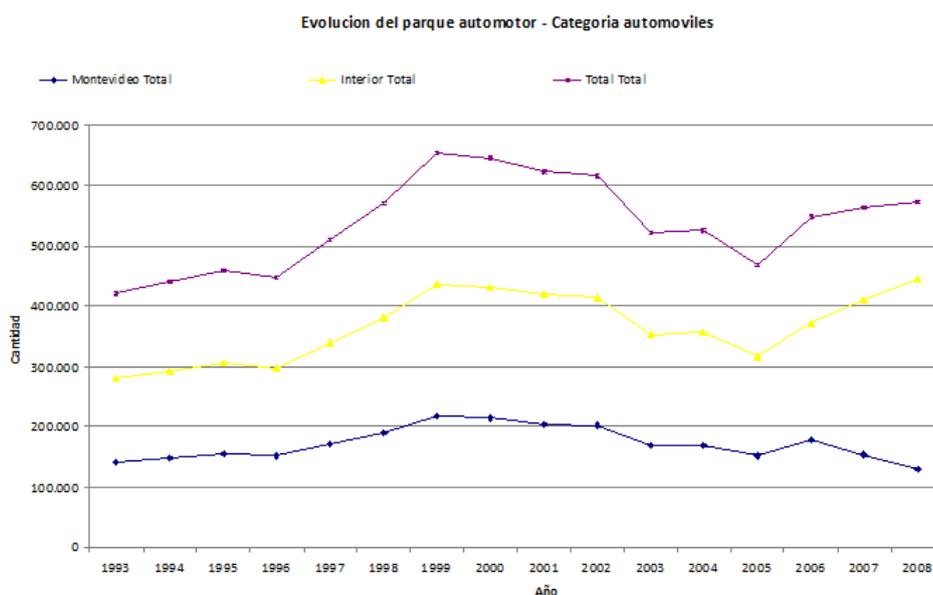


Figura 13.1: Evolución para el periodo 1993-2008.

# Capítulo 14

## Desarrollo del parque automotor a futuro

### 14.1. Escenarios a futuro

Para analizar la evolución del parque automotor bajo distintos escenarios de crecimiento y para realizar sobre éstos la formulación de los escenarios de penetración de los vehículos eléctricos dentro del parque futuro es necesario determinar la tasa de crecimiento del mismo en su conjunto para luego formular las hipótesis de sustitución por otras tecnologías.

Para calcular la evolución futura del parque se realizó primeramente un análisis de la evolución histórica del parque. Para estos efectos se discriminaron los vehículos según su combustible (nafta o gasoil) y no se realizó una discriminación según el lugar de uso.

#### 14.1.1. Variable explicativa - PIB

A los efectos de las previsiones a adoptar es necesario seleccionar una variable que explique el crecimiento del parque automotor en los años futuros. En este contexto, se analizó si la tasa de crecimiento anual del PIB se podría considerar como variable válida para ponderar el crecimiento del parque automotor en su conjunto.

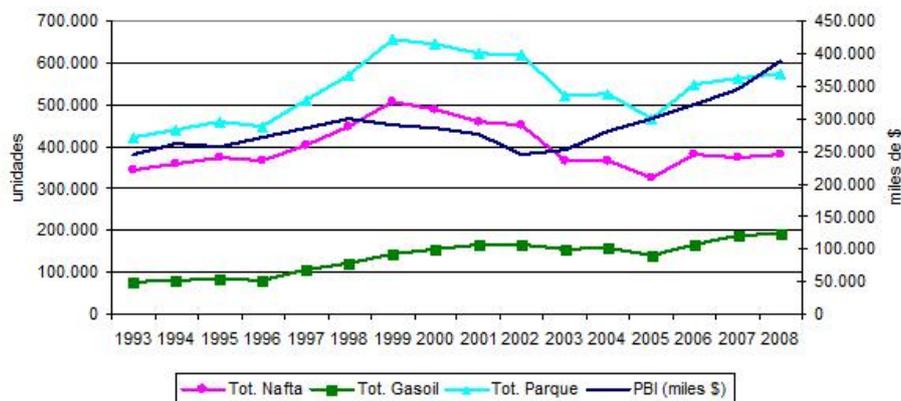


Figura 14.1: Evolución histórica del parque automotor y del PIB.

En la fig. 14.1 se presentan las evoluciones históricas del parque automotor total que surge de la base de datos obtenida del procesamiento detallado anteriormente, discriminado por com-

bustible. Asimismo se incluye la evolución histórica del PIB expresado en miles de pesos<sup>(1)</sup>. El coeficiente de correlación entre la serie de valores históricos del parque automotor a gasoil y del PIB es 0,79, mientras que el coeficiente de correlación del parque automotor a nafta y del PIB es 0,77. Estos coeficientes de correlación altos permiten que se considere para el análisis que la evolución a futuro del parque automotor se puede asociar a la evolución prevista para el PIB.

### 14.1.2. Escenarios de crecimiento

A los efectos de diseñar los escenarios a futuro para la evolución de la incorporación de los autos eléctricos al parque automotor de Uruguay, se consideró el estudio realizado en el año 2009 por la Oficina de Planeamiento y Presupuesto, "Estrategia Uruguay III Siglo - Aspectos productivos"[2]. Este estudio realiza un análisis prospectivo para contribuir al desarrollo en Uruguay, enfocado hacia el futuro en el mediano y largo plazo, con horizonte en el año 2030 y más allá. En dicho estudio se arriba a tres escenarios: el *Escenario Normativo Estratégico*, el *Escenario Dinámico Intermedio* y el *Escenario de Mínima*.

El *Escenario Normativo Estratégico* (ENE) es un escenario posible y deseable donde se configura la mejor combinación y estado de los factores clave considerados para cada uno de los 8 grupos sectoriales considerados en el estudio<sup>(2)</sup>. Este escenario constituye el objetivo de la estrategia Uruguay III Siglo y requiere un gran esfuerzo productivo e innovador a nivel país.

El *Escenario Dinámico Intermedio* es un escenario posible y también con un buen desempeño de crecimiento económico. En este caso en algunos sectores el desempeño en crecimiento de PIB y exportaciones es bueno pero no alcanzan los valores que se presentan en el ENE. Se supone aquí que el grupo Agroindustrias grandes I tiene un desempeño similar al ENE. De todas formas constituye un escenario que no se alcanza fácilmente sino que requiere de un esfuerzo importante.

El *Escenario de Mínima* es el peor escenario que se configura. Es una imagen de lo que se supone que pasaría si no se desarrolla un esfuerzo productivo e innovador suficiente para favorecer el mejor desarrollo de los factores clave. Cabe señalar que podrían acontecer sucesos que generaran escenarios peores que éste.

Para cada uno de los escenarios del estudio de la OPP se formula una tasa anual de crecimiento del PBI que se supone constante para todo el período 2008 - 2030. En la tabla 14.1 se presentan los porcentajes de crecimiento anual para el PBI en cada escenario.

Si se comparan estas tasas de crecimiento con los valores históricos que se han registrado con respecto al PIB (fig. 14.2) se puede observar que, si bien algunos años salen por fuera de lo que prevén los valores de los escenarios, en general se mantienen dentro del rango de variación previsto. Vale la pena aquí resaltar que por más que en algunos años las tasas de crecimiento superen ampliamente la prevista en el escenario más optimista (ENE), las tasas para los escenarios del estudio de OPP se mantienen constantes durante todo el período por lo que es razonable esta diferencia a los efectos de contemplar los vaivenes que se observan en la evolución histórica donde se presentan años con tasas negativas. De hecho, la tasa de

---

<sup>(1)</sup>fuentes: www.dne.gub.uy a partir de datos del Banco Central - "PBI a precios de productor en miles de pesos, a precios constantes de 1983".

<sup>(2)</sup>Estos grupos son Agroindustrias grandes I, Agroindustrias II, Innovadores TICs, Innovadores BIO, Industria intensiva en Mano de Obra, Industria insumos importados, Turismo y Logística y Transporte

	Escenarios		
	Mínima	Dinámico	ENE
Tasa crecimiento PIB 2008 – 2030 (%)	1,6	3,5	5,0

Tabla 14.1: Tasa de crecimiento del PIB.

crecimiento promedio histórica del PIB de acuerdo a los datos presentados es del 3,25 %, valor muy próximo a la tasa prevista en el escenario Dinámico.

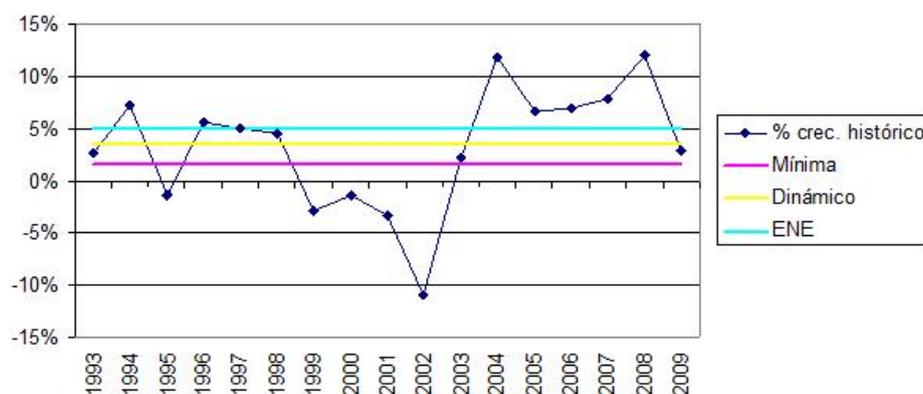


Figura 14.2: Evolución histórica del PIB vs. evolución a futuro.

## 14.2. Evolución a futuro del parque automotor

### 14.2.1. Evolución a futuro del parque automotor - Escenario base

Dado que los escenarios presentados pretenden explicar el desarrollo futuro del país bajo ciertas hipótesis, se consideró que el estudio de escenarios futuros para la incorporación de vehículos eléctricos al parque automotor de Uruguay debería realizarse en el marco de estos escenarios.

Es así que partiendo de los datos históricos obtenidos de la base de datos presentada anteriormente se realizaron las proyecciones a futuro del crecimiento del parque automotor en los tres escenarios (ENE, Dinámico y Mínima). En las fig. 14.3, 14.4 y 14.5 se presenta la evolución del parque automotor a nafta, gasoil y total respectivamente, para cada uno de los escenarios descritos anteriormente.

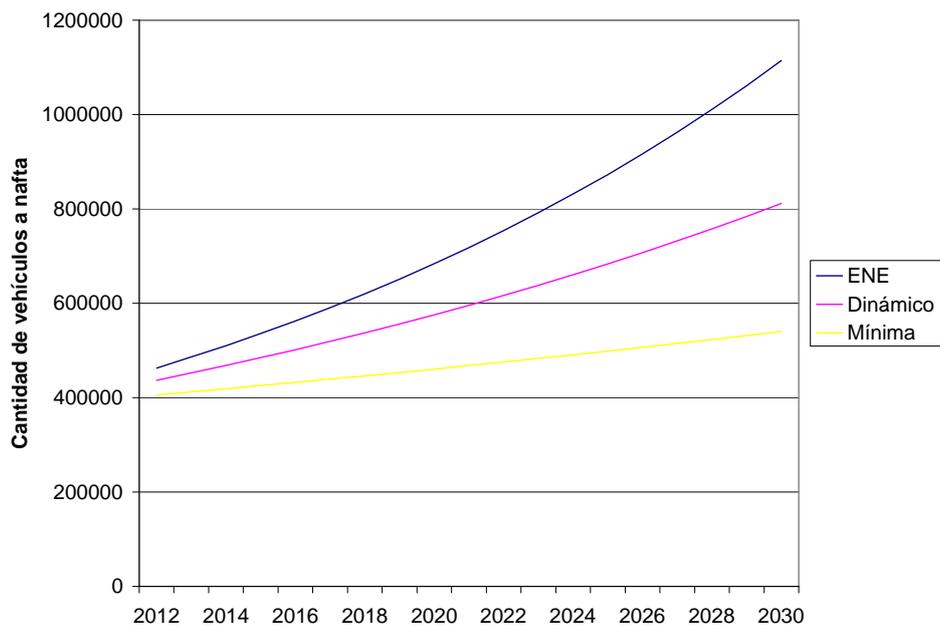


Figura 14.3: Evolución a futuro del parque automotor a nafta.

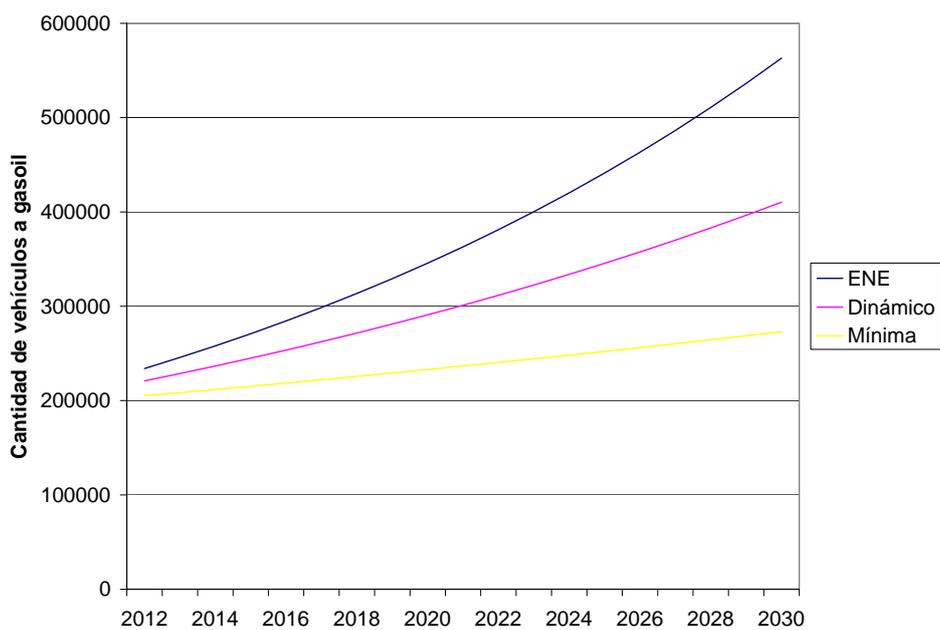


Figura 14.4: Evolución a futuro del parque automotor a gasoil.

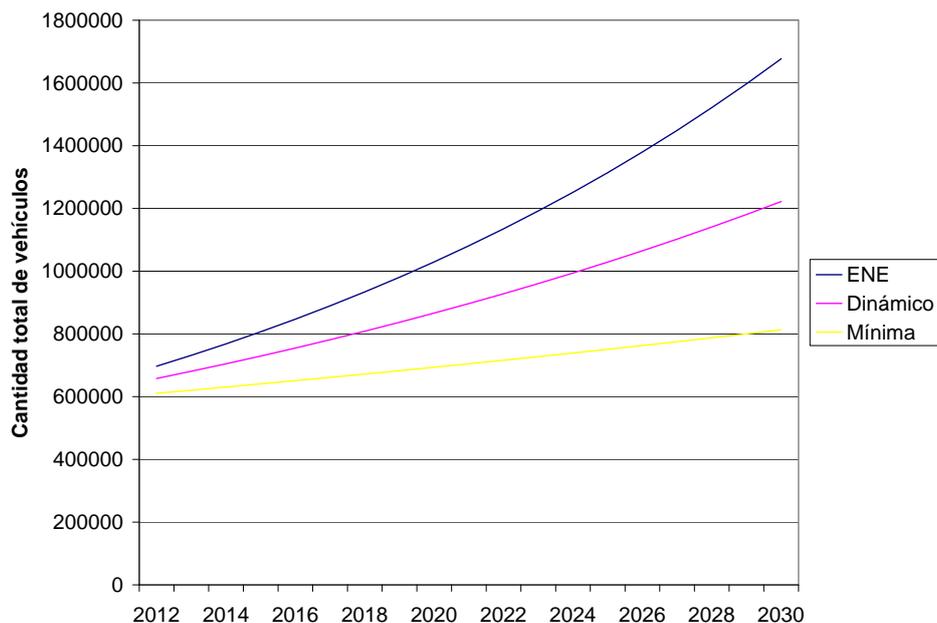


Figura 14.5: Evolución a futuro del parque automotor total.

Se puede observar de los gráficos que en el escenario ENE el parque automotor llega casi a triplicarse en el 2030, con respecto a la cantidad de vehículos existentes al 2008. A su vez, en el escenario Dinámico Intermedio el parque se duplica en el mismo período, mientras que en escenario de Mínima el parque crece un 50 %.

Estas serían entonces las cifras que cabría esperar para el parque automotor en Uruguay en distintos escenarios de desarrollo del país cuyo denominador común es que durante todo el período analizado no se produce la introducción de vehículos alternativos como híbridos o eléctricos. Desde el punto de vista de la introducción de vehículos alternativos estos casos constituirían el **Escenario Base**.

### 14.2.2. Introducción de vehículos eléctricos - Formulación de escenarios

La introducción de vehículos eléctricos en el parque automotor depende de diversos factores, entre otros:

- El costo del vehículo, tanto de inversión como de mantenimiento, en comparación con el costo de un vehículo estándar de motor a combustión.
- El desarrollo de la industria automotriz de vehículos eléctricos e híbridos, mediante la realización de modelos comerciales, el desarrollo de materiales para mejorar el desempeño de los vehículos, etc.
- El desarrollo de las baterías en cuanto a la mejora de su eficiencia, la reducción de su volumen y peso así como el aumento de su capacidad a los efectos de brindar mayor autonomía de funcionamiento.
- El desarrollo de la infraestructura de la red eléctrica en Baja Tensión que permita la recarga domiciliaria de los vehículos en escenarios de introducción masiva de los mismos.

- El desarrollo también de la infraestructura de la red eléctrica de Baja Tensión que permita la recarga de los vehículos en predios de uso público o en su defecto, de una red de de recambio de baterías.
- La evolución de los precios de los combustibles fósiles, ya sea por ser competidores directos de la electricidad a nivel del usuario final como por ser alternativas a otras fuentes para la generación de electricidad.
- Los eventuales beneficios impositivos al desarrollo de los vehículos eléctricos e híbridos ya sea como promoción directa a la industria automotriz o como excenciones tributarias a los compradores de dichos vehículos.
- La evolución de los límites planteados a las emisiones de  $CO_2$  y los compromisos asumidos por los países.
- El desarrollo de las *smart grids* como factor para generar el mejor acoplamiento de la demanda de energía eléctrica de los vehículos eléctricos a la curva de demanda típica de un sistema eléctrico.

Todos estos factores inciden no solo en la cantidad de vehículos eléctricos que se pueden esperar ingresen al mercado en los años futuros, sino en la velocidad con que se realiza la eventual transición del parque actual a un parque con participación importante de los vehículos eléctricos.

A los efectos de seleccionar escenarios de introducción de vehículos eléctricos en el parque automotriz, se buscaron estudios que evaluaran la evolución de los factores planteados como relevantes en la formulación de las predicciones a futuro.

En el estudio *Impact of Electric Vehicles* [68] realizado para el *Directorate - General for Climate Action (DG CLIMA)* de la Unión Europea, se plantean distintos escenarios para la penetración de los vehículos eléctricos que dependen de la evolución prevista de los factores mencionados.

En particular, se plantean tres escenarios, que llamaremos *Realista*, *Pesimista* y *Optimista* a los efectos de este informe, cuyos lineamientos generales se presentan a continuación.

En el escenario *Realista* se asumen los siguientes comportamientos:

- Los beneficios impositivos para los vehículos eléctricos no tendrán mejoras significativas con respecto a la situación actual.
- Se producen mejoras en la eficiencia de los vehículos con motor a combustión dentro del rango de lo esperado para el período.
- Muchos consumidores continúan siendo reticentes a cambiar por vehículos eléctricos mientras que el costo total.<sup>(3)</sup> asociado a los mismos continúa siendo mayor que el correspondiente para los vehículos tradicionales. Mientras se mantiene esa situación los vehículos eléctricos resultan una opción interesantes solo para los consumidores innovadores.

---

<sup>(3)</sup>el costo total tiene en cuenta el costo de adquisición, el costo de mantenimiento, los impuestos, la patente, el seguro, el combustible y la vida útil del vehículo.

- La capacidad de producción y la disponibilidad de puestos de carga dejará de ser una limitante recién a partir del 2025.
- El precio de los combustibles fósiles tiene una evolución al alza pero dentro de lo esperado para el período.

En el escenario *Pesimista* se asume que:

- El costo de las baterías no se reduce tanto como lo que se espera en el escenario *Realista*.
- Se produce un desarrollo hacia la reducción de emisiones y la mejora de la eficiencia de los vehículos con motor a combustión.
- Con el tiempo, los beneficios impositivos hacia los vehículos eléctricos se van reduciendo.
- Los consumidores potencialmente interesados en cambiar por un vehículo eléctrico continúan siendo pocos.
- El costo de los combustibles fósiles tiene la misma evolución que en el escenario *Realista*.

Por último, en el escenario *Optimista* se asume que:

- Se produce un rápido decrecimiento del costo de las baterías y un incremento de su vida útil.
- El costo total de los vehículos eléctricos se vuelve competitivo con el correspondiente para vehículos con motor a combustión.
- Se asume que a partir del 2025 existirán puestos donde sea posible realizar cargas rápidas.
- Se asume de todas formas que durante el período 2010 - 2020 aún existirán limitaciones asociadas a la capacidad de producción, el escepticismo de los consumidores y a la infraestructura de la red eléctrica.
- Se asume que el desarrollo tecnológico de los vehículos a combustión interna es análogo al registrado en el escenario *Realista*.

En el mencionado estudio se distinguen cuatro clases de vehículos:

- Los *Vehículos Completamente Eléctricos (VCE)* que solo tienen un motor eléctrico y no poseen motor a combustión.
- Los *Vehículos Híbridos Enchufables (VHE)* que tienen un motor a combustión, un motor eléctrico y baterías que se pueden cargar desde la red eléctrica.
- Los *Vehículos Eléctricos de Rango Extendido (VERE)* que además del motor eléctrico poseen un motor a combustión que se puede utilizar para cargar las baterías y extender el alcance del vehículo. Las baterías se pueden cargar desde la red eléctrica.
- Los *Vehículos con Motor a Combustión Interna (VMCI)* que son los vehículos convencionales, que utilizan combustibles derivados del petróleo para su funcionamiento.

En base a las características de cada escenario y de acuerdo al modelado realizado de las evoluciones de los factores relevantes para el desarrollo y la introducción de los vehículos eléctricos, se plantea que la penetración de cada tecnología será la que se presenta en la tabla 18.1.

<b>Escenario Realista</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
VMCI	100%	100%	99%	94%	82%
VHE	0%	0%	1%	4%	11%
VERE	0%	0%	0%	1%	4%
VCE	0%	0%	0%	1%	3%
<b>Escenario Pesimista</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
VMCI	100%	100%	99%	97%	93%
VHE	0%	0%	0%	2%	5%
VERE	0%	0%	0%	0%	1%
VCE	0%	0%	0%	0%	1%
<b>Escenario Optimista</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
VMCI	100%	100%	98%	88%	67%
VHE	0%	0%	1%	7%	18%
VERE	0%	0%	0%	3%	8%
VCE	0%	0%	0%	2%	7%

Tabla 14.2: Porcentaje de penetración de las distintas tecnologías consideradas en cada escenario.

De estos porcentajes se observa que los vehículos híbridos enchufables (VHE) son los que tendrán más participación en el mercado, mientras que los vehículos completamente eléctricos (VCE) serán los más rezagados.

Asumiendo que la cantidad total de vehículos del parque previsto a futuro no cambia debido a la introducción o no de vehículos eléctricos, a los efectos de ponderar la evolución de la introducción de vehículos eléctricos en el parque uruguayo se adoptaron los porcentajes de participación presentados en la tabla 18.1 para cada uno de los escenarios de evolución planteados en la sección 14.2.1.

En la tabla 14.3 se presentan, para los distintos escenarios de evolución del parque y de penetración de los vehículos eléctricos, las cantidades totales de vehículos de cada tipo que compondrán el parque automotor desde el año 2010 hasta el 2030. Como ya se mencionó, en estos números se asumió que, con respecto a los totales manejados en el Escenario Base, la introducción de vehículos eléctricos sustituye a los vehículos con motor a combustión interna. En particular, en la discriminación entre nafta y gasoil, se asumió que el 75 % de los vehículos eléctricos sustituye vehículos que hubieran sido alimentados a nafta y el restante 25 % sustituye vehículos que hubieran sido alimentados a gasoil.

Tipo de vehículo	Escenarios		2010	2015	2020	2025	2030
VHE	Realista	ENE	0	0	10297	52567	184497
		Dinámico	0	0	8664	41160	134435
		Mínima	0	0	6937	30039	89431
	Pesimista	ENE	0	0	10297	26283	83862
		Dinámico	0	0	8664	20580	61107
		Mínima	0	0	6937	15019	40650
	Optimista	ENE	0	0	10297	91992	301904
		Dinámico	0	0	8664	72030	219985
		Mínima	0	0	6937	52568	146341
VERE	Realista	ENE	0	0	0	13142	67090
		Dinámico	0	0	0	10290	48885
		Mínima	0	0	0	7510	32520
	Pesimista	ENE	0	0	0	0	12221
		Dinámico	0	0	0	0	8130
		Mínima	0	0	0	0	0
	Optimista	ENE	0	0	0	39425	134180
		Dinámico	0	0	0	30870	97771
		Mínima	0	0	0	22529	65040
VCE	Realista	ENE	0	0	0	13142	50317
		Dinámico	0	0	0	10290	36664
		Mínima	0	0	0	7510	24390
	Pesimista	ENE	0	0	0	0	16772
		Dinámico	0	0	0	0	12221
		Mínima	0	0	0	0	8130
	Optimista	ENE	0	0	0	26283	117407
		Dinámico	0	0	0	20580	85550
		Mínima	0	0	0	15019	56910
VMCI - Nafta	Realista	ENE	419893	535902	676239	813790	887673
		Dinámico	407982	484554	569001	637207	646809
		Mínima	393140	425614	455568	465037	430279
	Pesimista	ENE	419893	535902	676239	853215	1026046
		Dinámico	407982	484554	569001	668077	747635
		Mínima	393140	425614	455568	487566	497352
	Optimista	ENE	419893	535902	676239	754653	698983
		Dinámico	407982	484554	569001	590901	509319
		Mínima	393140	425614	455568	431243	338816
VMCI - Gasoil	Realista	ENE	212243	270882	343147	421526	487668
		Dinámico	206222	244927	288731	330059	355343
		Mínima	198720	215135	231171	240879	236386
	Pesimista	ENE	212243	270882	343147	434667	533792
		Dinámico	206222	244927	288731	340349	388951
		Mínima	198720	215135	231171	248389	258743
	Optimista	ENE	212243	270882	343147	401813	424771
		Dinámico	206222	244927	288731	314624	309513
		Mínima	198720	215135	231171	229614	205898

Tabla 14.3: Cantidad de vehículos por tipo para cada uno de los escenarios de evolución del parque y de penetración de las distintas tecnologías.

Dadas las características del parque resultante a futuro, los vehículos eléctricos que ingresarían continuarían consumiendo combustibles derivados del petróleo en menor medida que los actuales dado que parte de sus necesidades energéticas se cubrirían mediante el consumo de electricidad. En el caso límite, los vehículos completamente eléctricos (VCE) se alimentarían exclusivamente a través del consumo de electricidad.

A los efectos de estimar el consumo de electricidad que ocasionarían los distintos escenarios de composición del parque, se entendió pertinente expresar el consumo de electricidad de los distintos tipos de vehículos eléctricos en función del consumo de electricidad de un vehículo completamente eléctrico (VCE). Es así que, en base al estudio mencionado anteriormente para la UE, se adoptó que un vehículo híbrido enchufable (VHE) consume el 60 % de la electricidad que consume un VCE y que un vehículo eléctrico de rango extendido (VERE) consume el 75 % de la electricidad que un VCE.

En base a estas adopciones, se ponderó la cantidad de VHE y de VERE por su consumo equivalente eléctrico respectivo y estas cantidades se adicionaron al total de VCE previstos, obteniendo de esa forma una cantidad de VCE “equivalentes” (tabla 14.4) que permitirá efectuar un análisis de la variación en el consumo y producción de energía eléctrica que se verificaría en los distintos escenarios.

Escenarios		2010	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Realista	ENE	0	0	1017	2135	3362	4707	6178	16001	25656	36236	47811	60452	89140	120546	154869	192324	233137
	Dinámico	0	0	906	1875	2912	4018	5198	13271	20975	29202	37979	47334	68800	91711	116141	142169	169877
	Mínima	0	0	781	1587	2419	3277	4162	10431	16183	22116	28235	34545	49289	64496	80178	96344	113008
Pesimista	ENE	0	0	1017	2135	3362	4707	6178	9082	11125	13350	15770	18398	30081	42886	56897	72201	88894
	Dinámico	0	0	906	1875	2912	4018	5198	7532	9095	10759	12527	14406	23217	32628	42669	53373	64773
	Mínima	0	0	781	1587	2419	3277	4162	5920	7017	8148	9313	10514	16633	22946	29456	36169	43089
Optimista	ENE	0	0	1017	2135	3362	4707	6178	26164	46998	69850	94870	122217	174416	231529	293917	361965	436084
	Dinámico	0	0	906	1875	2912	4018	5198	21701	38424	56290	75361	95698	134619	176147	220418	267571	317755
	Mínima	0	0	781	1587	2419	3277	4162	17056	29645	42632	56027	69841	96442	123877	152164	181326	211381

Tabla 14.4: Cantidad de vehículos completamente eléctricos (VCE) “equivalentes”.

# Capítulo 15

## Modelado de la demanda del parque automotor híbrido - eléctrico

### 15.1. Introducción

El advenimiento de vehículos híbridos y eléctricos, hace que exista una transferencia de la demanda energía del transporte hacia el sector eléctrico. Esta transferencia trae aparejado diferentes impactos desde el consumo de energía eléctrica y de petróleo hasta una redistribución energética del país. Pensando en un Uruguay con diferentes niveles de inserción de automóviles eléctricos e híbridos a mediano y largo plazo, es necesario poder realizar estudios de impacto y planificación energética y regulatoria asociada a cumplir con estos cometidos.

De forma de poder realizar estudios de impacto es necesario tener un modelo de la demanda de este parque automotor que se adapte a la realidad del país y que mantenga la flexibilidad necesaria como para incorporar medidas regulatorias de control de carga así como también otros tipos de tecnologías vinculadas en el sector.

En la bibliografía sobre el tema la mayoría de los modelos encontrados se basan en estadísticas de manejo, horas de tráfico y cantidad de vehículos por usuario realizadas en la ciudad o el país donde se busca realizar el análisis [79][80][81][82]. En Uruguay no se cuenta con estadísticas de ese tipo como para poder hacer construcciones de esa naturaleza. Existen otros estudios que se independizan más de los datos estadísticos basándose en datos más macro sobre la realidad del país, pero que no incluyen en su modelado otras alternativas interesantes como la generación de energía eléctrica mediante la conexión del vehículo a la red entregando su remanente energético(V2G).

### 15.2. Características generales

#### 15.2.1. Hipótesis de Trabajo

A continuación se enlistan algunas de las hipótesis sobre las cuales este trabajo fue realizado. Algunas otras son mencionadas en el correr del trabajo.

- Se modela un día laboral típico, en esto se tienen en cuenta los viajes realizados y las horas de salida y de llegada promedio de los vehículos.

- Se consideran cinco períodos del día diferentes:
  - Madrugada: de 0 a 7.
  - Mañana: de 7 a 11.
  - Día: de 11 a 16.
  - Tarde: de 16 a 21.
  - Noche: de 21 a 24.
- El paso de simulación es de 10 minutos.
- Los vehículos pueden estar en dos ubicaciones: Casa, Afuera. La carga sólo se encuentra disponible en la casa.
- El tipo de carga disponible es lenta. No se cuenta con estaciones de carga rápida.
- En los casos donde se impone un tipo de política de carga, se asume que se cuenta con cargadores inteligentes los cuales se podrán programar para optimizar su carga/descarga de la red en diferentes horarios.
- Tanto la carga como la descarga de la batería (en particular cuando entrega energía a la red), fueron tomadas como constantes. O sea que si la batería tiene 24 kWh de carga y se carga en 6 horas, la potencia que tomará de la red será de 4 kW durante todo el período.

### 15.2.2. Vehículos utilizados

Para construir el parque automotor híbrido eléctrico, se consideraron los modelos comerciales que ya están en el mercado y lideran en ventas en los últimos años. De dicho relevamiento realizado se decidió escoger por tres vehículos híbridos y por tres vehículos eléctricos. Luego de realizada la elección fue necesario recabar la información técnica necesaria para incluirla en el modelo. La demanda de energía eléctrica depende del tipo de batería, de su capacidad, de la autonomía del vehículo y del tiempo de carga. De acuerdo a que vehículo se utilice varían estos parámetros. En la tabla 15.1 se muestran los vehículos elegidos y algunas de sus principales características [74][75].

	Eléctricos		
	Peugeot ION	Nissan Leaf	Citroen C-Zero
Autonomía (km)	130	175	130
Capacidad (kWh)	16.5	23.8	16.5
Recarga al 100% (h)	6	8	6
	Híbridos		
	Chevrolet Volt	Toyota Prius	Seat Leon
Autonomía (km)	64	22	52
Capacidad (kWh)	8.8	5.2	12
Recarga al 100% (h)	2	1	5

Tabla 15.1: Características principales de los vehículos elegidos. [74][75]

Estas características son consideradas en la simulación dependiendo del tipo de auto elegido.

## 15.3. Modelado de la flota de autos

El modelado de la flota de autos consta de dos grandes partes, en la primera se genera el escenario donde se quiere trabajar y las condiciones y en la segunda se realiza la simulación. La generación de escenario a su vez consta de cinco partes diferenciadas: sorteo de vehículos, distancias de viajes (cortos y largos), cantidad de viajes por período del día, asignación de viajes y horas de salida. Incluso en esta etapa de generación de escenario se elige el tamaño de la flota así como también la velocidad media de los vehículos. Para esta última se eligió una velocidad media de  $15 \text{ km/h}$  producto de un estudio realizado por otro de los grupos de trabajo del proyecto. En las próximas secciones se describen cada uno de los pasos mencionados.

### 15.3.1. Distancias de viajes

Pensando en un Uruguay que incorpore este tipo de tecnología, considerando la urbanización y la autonomía, así como también la densidad de población, Montevideo se sitúa como una ciudad candidata para este tipo de desarrollo. Con ese espíritu es que este trabajo se desarrolla considerando dicha ciudad cómo la zona donde estos vehículos se movilizan.

El generador de escenarios considera dos tipos de viajes que puede realizar un auto: largo y corto. Para elegir la distancia de los viajes de cada uno de los autos del parque automotor se sortea con dos distribuciones normales centradas en 8 km (para el caso de los viajes largos) y en 2 km (para los viajes cortos), con desviaciones estándar de 2 km y 1 km respectivamente. Estos parámetros también son ajustables por el usuario pensando en realizar la simulación en otro contexto, si se quisiera hacer una simulación para días no laborales estas distancias son un parámetro a modificar.

En la fig. 15.1 se observa un mapa de la zona metropolitana de Montevideo para brindar una idea de las distancias involucradas.



Figura 15.1: Zona metropolitana de Montevideo. [76]

### **15.3.2. Cantidad de viajes por período del día**

Luego de tener definidas las distancias de los viajes es necesario localizarlas en los distintos períodos del día. El generador de escenarios supone un máximo de tres viajes largos y cinco viajes cortos en el día. Por otra parte no se permite tener más de cinco viajes en ningún período del día, y en la madrugada el tope es de dos viajes.

### **15.3.3. Asignación de viajes**

En cuanto a la asignación de viajes por período del día, esta es realizada teniendo en cuenta que en un día laboral la mayoría de los usuarios realizan dos viajes largos, uno en el período de la mañana y otro en el período de la tarde. Por lo tanto el proceso de asignación comienza con los viajes largos localizando los dos primeros en la mañana y tarde, y sorteando los siguientes en el resto del día preferentemente durante el día.

Luego de hecha está asignación se asignan los viajes cortos donde primero que nada se verifica si el vehículo tiene o no viajes largos, en caso de no tener viajes largos, los dos primeros viajes cortos son asignados en el período de mañana y tarde y se sortean los siguientes. En caso de tener viajes largos los viajes cortos son sorteados en el día con la misma distribución de probabilidades que el 3er viaje largo mencionado anteriormente.

### **15.3.4. Horas de salida**

Para la asignación de horas es necesario conocer cuantos viajes largos y cortos hace cada vehículo en cada periodo del día. Luego la generación de horas de salida se hace en dos etapas, primero para los viajes largos y luego para los cortos. Para cada vehículo y cada periodo del día, se genera una hora de salida para uno de los viajes largos. Es necesario chequear que dicha hora de salida no se solape con otro viaje, es decir, el resto de los viajes ya planificados para ese vehículo deben haber finalizado al momento de iniciar el nuevo viaje. Luego se repite el proceso, generando tantas horas de salida como viajes largos haya en cada periodo y chequeando que no haya solapamiento con los viajes anteriormente generados.

Al finalizar de asignar los viajes largos se repite el procedimiento de generar horas de salida para cada periodo del día pero para los viajes cortos, nuevamente chequeando que estos no se solapen con los viajes anteriormente planificados.

## **15.4. Modelado del sistema para simulación**

Luego de tener generado el escenario donde se va a trabajar se corre el simulador. El proceso de simulación consta de dos etapas fundamentales las cuales son descritas en las siguientes subsecciones: el cálculo de potencia, y la matriz de transición de estados. Un diagrama de flujo simplificado del proceso de simulación se presenta en la fig. 15.2.

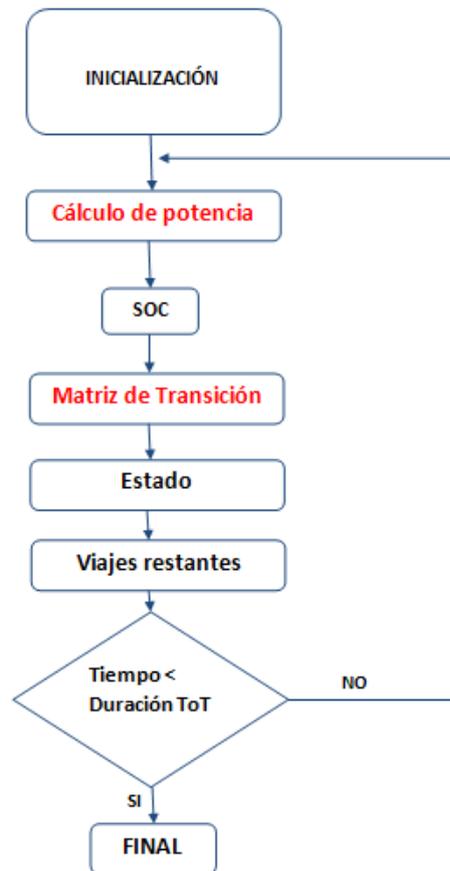


Figura 15.2: Diagrama de flujo de la simulación.

### 15.4.1. Inicialización

En la inicialización se carga el escenario generado por el Generador de escenarios y se define el estado inicial de la flota, el tiempo donde comienza la simulación, cuantos días se quiere simular, el lugar donde se ubica la flota (todos comienzan en el hogar), y el estado inicial de la batería de los vehículos.

### 15.4.2. Cálculo de potencia

El cálculo de potencia consumida o generada por paso de tiempo se realiza en un bloque particular del sistema. Este cálculo depende del tipo de auto elegido, el cual es sorteado en la generación de escenario, dependiendo el tipo de auto se sabe la autonomía, el tamaño de la batería y la duración en cargarla. Los autos posibles son los mencionados en la sección *Vehículos utilizados*. Dependiendo del estado en que se encuentre el auto es el cálculo que se realiza.

#### Estado andando

El consumo del auto se define como cuánto se usa de batería para poder recorrer un kilómetro, el término batería de la ec. 15.1 corresponde al tamaño de la batería de dicho vehículo en kWh.

$$\text{Consumo}(kWh/km) = \frac{\text{bateria}(kWh)}{\text{autonomia}(km)} \quad (15.1)$$

Entonces, se calcula la potencia consumida por el auto según la ec. 15.2.

$$P(kW) = Consumo(kWh/km) * velocidad(km/h) \quad (15.2)$$

Cuando el auto termina el recorrido antes de que termine el paso de tiempo, se calcula la potencia media durante el paso.

### Estado cargando

Para modelar la carga del vehículo se tomo la hipótesis de que el auto se carga linealmente. La potencia tomada de la red es constante en el lapso de carga, entonces es posible calcular la potencia tomada de la red según la ec. 15.3.

$$P(kW) = \frac{bateria(kWh)}{tiempo\ de\ carga(h)} \quad (15.3)$$

Si termina de cargar antes de que termine el paso se calcula la potencia media durante todo el paso.

### Estado generando

En este caso el auto le entrega energía a la red. Este estado es habilitado solamente cuando se permite la opción V2G (Vehicle to grid). Se consideró que la descarga de la batería es realizada de la misma forma que la carga, según la ec. 15.4.

$$P(kW) = \frac{bateria(kWh)}{tiempo\ de\ carga(h)} \quad (15.4)$$

### Estado estacionado

Para el caso en que el auto está estacionado no se consume ni se genera potencia por lo tanto la potencia es es cero, ec. 15.5.

$$P(kW) = 0 \quad (15.5)$$

### 15.4.3. Cálculo de transiciones

La otra parte fundamental del simulador es el cálculo de la matriz de transición de estados, para esta parte se realizaron modificaciones a la metodología propuesta en [73]. La idea es que para cada paso de simulación se calcula una matriz de transición de estados que indica cual es la probabilidad de que estando en un estado se pase al siguiente. La peculiaridad que tiene esta metodología es que la matriz está compuesta de 0 y de 1 y que las probabilidades son calculadas en base a donde se se encuentre el vehículo, cuantos viajes le queden y el estado de carga en el cual se encuentra la batería. Por lo tanto la parte aleatoria es realizada en la generación de los escenarios, mientras que en la simulación se plasma esa aleatoriedad para calcular los estados de los vehículos en cada paso de tiempo.

Para la simulación se consideran tres estados posibles: Parado, Andando y Cargando. Para cada paso de simulación el vehículo cambia o no de estado de acuerdo a probabilidades iguales a 0 o 1. No se considera el estado Generando (o entregando energía a la red) ya que la idea es usar este estado para un caso particular y no en el caso base. Por lo tanto el caso Generando es un

caso particular del caso Parado donde a su vez se habilita una bandera booleana que indica las horas que es posible generar.

Un vehículo estacionado (Parado), puede comenzar a andar, a cargar o permanecer estacionado. Un vehículo cargando puede empezar a andar o continuar cargando, en el caso que la carga esté completa el vehículo no pasa al estado Parado sino que continúa cargando pero con carga 0. Un vehículo andando puede continuar andando (mientras que tenga batería como para hacerlo) y si el viaje no está terminado, de otra forma estaciona el vehículo. Se asume que por lo menos el vehículo pasa por un paso de simulación estacionado antes de pasar al estado cargando cuando viene de andar. [73]. En la fig. 15.3 se presentan todas las posibles transiciones que puede llegar a tener un vehículo y la probabilidad asociada a dicha transición.

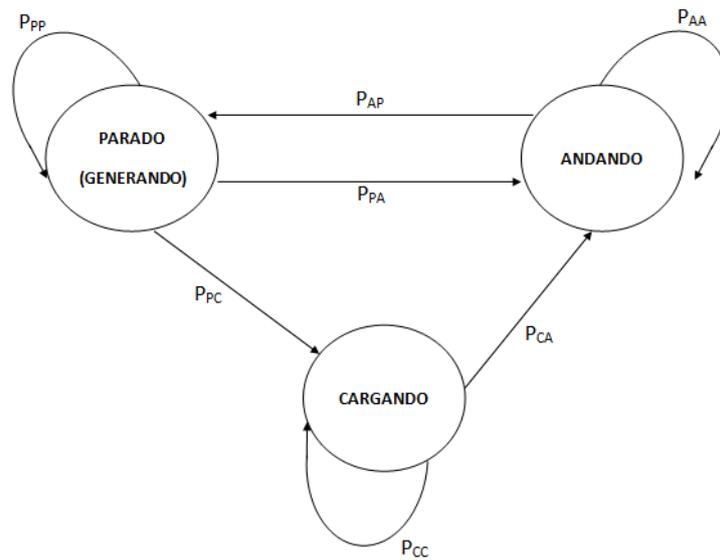


Figura 15.3: Estados y transiciones posibles. [73] (modificada)

Los cambios de estado son realizados de acuerdo al valor de las probabilidades de transición que se muestran en la fig. 15.3, su cálculo se describe a continuación.

### Probabilidad de comenzar a andar ( $P_{*A}$ )

La probabilidad de comenzar a andar a partir del estado Parado o Cargando depende de las probabilidades de que el usuario pueda andar ( $P_{BATERIA}$ ) y de que sea tiempo de andar ( $P_{VIAJE}$ ). La primera es más importante para el caso de los vehículos eléctricos puros, básicamente si la carga necesaria para realizar el próximo viaje es menor que la carga actual entonces  $P_{BATERIA} = 1$ . En cuanto a la segunda, para cada viaje a realizar los vehículos tienen una hora de salida, si esta coincide con el paso de simulación entonces  $P_{VIAJE} = 1$ . Finalmente se obtiene  $P_{*A}$  según la ec. 15.6.

$$P_{*A} = P_{BATERIA} * P_{VIAJE} \quad (15.6)$$

### Probabilidad de continuar andando ( $P_{AA}$ )

Si el viaje no está terminado y la batería no se agotó  $P_{AA} = 1$ .

### Probabilidad de estacionar ( $P_{AP}$ )

Como no existe la posibilidad de pasar del estado Andando al estado Cargando, esta probabilidad se puede calcular según la ec. 15.7

$$P_{AP} = 1 - P_{AA} \quad (15.7)$$

### Probabilidad de comenzar a cargar ( $P_{PC}$ )

Esta probabilidad depende en primer término de que el usuario tenga la posibilidad de cargar  $P_{puedocargar}$  (en el caso de este trabajo sólo cuenta con cargador en su hogar) con lo cual si el usuario se encuentra en su hogar  $P_{puedocargar} = 1$ . Por otra parte depende de que el usuario se encuentre en una hora permitida para la carga (en los casos de carga controlada), de ser así  $P_{tiempodecargar} = 1$ . Y por último depende de que el usuario quiera cargar ( $P_{quierocargar}$ ), asumiendo que el usuario carga cada vez que puede, este valor es siempre igual a 1, pero podría no serlo en caso de cambiarlo para darle por ejemplo prioridad a la generación. En definitiva se obtiene  $P_{PC}$  según la ec. 15.8.

$$P_{PC} = P_{puedocargar} * P_{tiempodecargar} * P_{quierocargar} \quad (15.8)$$

### Probabilidad de continuar cargando ( $P_{CC}$ )

$$P_{CC} = 1 - P_{*A} \quad (15.9)$$

### Probabilidad de continuar parado ( $P_{PP}$ )

$$P_{PP} = 1 - P_{PA} - P_{PC} \quad (15.10)$$

### Matriz de transición de estados

Finalmente luego de calcular cada una de las probabilidades anteriormente mencionadas se construye la matriz de transición de estados para el paso de simulación en cuestión. En la ec. 15.11 se muestra dicha matriz.

$$T = \begin{pmatrix} P_{AA} & P_{*A} & 0 \\ 0 & P_{AA} & P_{AP} \\ P_{PC} & P_{*A} & P_{PP} \end{pmatrix} \quad (15.11)$$

## 15.5. Resultados

En esta sección se muestran algunos de los resultados obtenidos. El simulador permite realizar infinidad de casos en un tiempo muy reducido por lo que es imposible abarcar en este trabajo todas las combinaciones analizadas. Antes de mostrar los resultados, resulta interesante mencionar el especial cuidado que hay que tener con las condiciones iniciales y el tiempo de simulación de forma de obtener resultados coherentes. Posteriormente se muestran los resultados para los tres casos de estudio. Estas simulaciones fueron realizadas para un parque de 3000 vehículos.

Pero para el estudio de impacto se realizaron simulaciones con un paquete de 500 vehículos, tal como se explica en el siguiente capítulo.

### 15.5.1. Estabilización de las condiciones iniciales

Un parámetro fundamental a la hora de realizar la simulación es el estado inicial de carga que uno le coloca al parque automotor (SOC<sup>(1)</sup>). Si se realiza una simulación de un día solo y no se tiene cuidado con el SOC inicial que se utiliza los resultados pueden distar de la realidad a la que se está apuntando, en las fig. 15.4 y fig. 15.5, se muestra la demanda calculada por el simulador para los casos de SOC inicial 0% y 100% respectivamente, donde se pueden observar diferentes distribuciones de carga pero ninguna acorde con los comportamientos esperados.

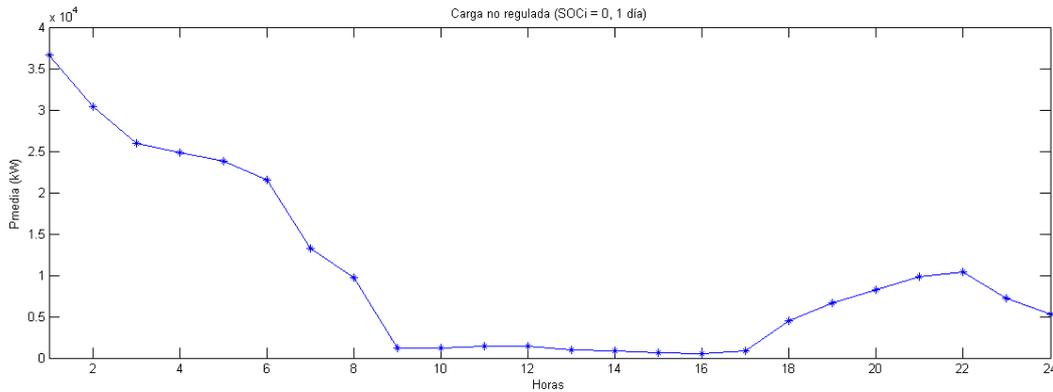


Figura 15.4: Carga No regulada - SOCi = 0, 1 día de simulación.

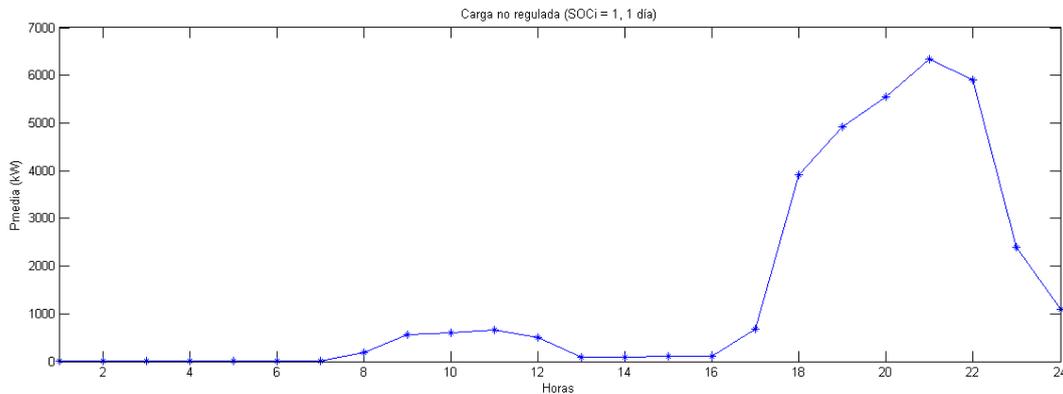


Figura 15.5: Carga No regulada - SOCi = 1, 1 día de simulación.

La manera de que no sucedan estos efectos es simulando más de un día. Mediante diferentes simulaciones del sistema se encontró de que tomar 5 días de simulación era una buena medida para no depender del estado inicial de carga de las baterías. Por otra parte se tomó 0.3 como carga inicial teniendo en cuenta que es el valor más representativo promedio de la hora de comienzo de la simulación.

---

<sup>(1)</sup>State of charge

### 15.5.2. Carga no regulada

En este caso se presenta la situación de lo que sucedería si no hubiese ningún tipo de incentivo o penalización para cargar en ciertas horas. En el programa esto se traduce en permitir que el usuario pueda cargar su vehículo siempre y cuando tenga cargador disponible. En la fig. 15.6 se muestra la curva obtenida.

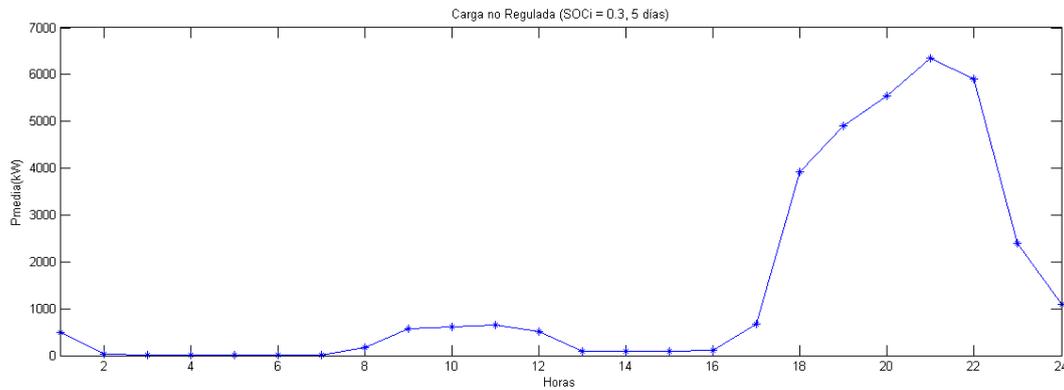


Figura 15.6: Carga no regulada.

Tal como era de esperarse, la mayoría de los usuarios llegan a sus hogares y ponen a cargar los vehículos generando un pico para las 21 horas. Esto generaría un gran inconveniente para el sistema Uruguayo pensando en una gran incorporación de esta tecnología puesto que corresponde con la hora del pico de la demanda de energía convencional [83].

### 15.5.3. Carga regulada

En este caso se busca mostrar que sucedería si no se le permitiese a los usuarios cargar sus vehículos en ciertas horas. La forma de implementación de estas medidas no es motivo de discusión de este trabajo, pero por ejemplo se podría dar señales de precios que hagan que ciertas horas de carga se encuentren muy por encima del precio medio o por el contrario generar horarios de muy bajo precio donde valga más la pena cargarlo para el usuario en términos económicos. De cualquier forma se busca mostrar alternativas para correr el pico de la demanda del parque automotor con respecto a la demanda de energía convencional. En las fig. 15.7 y 15.8 se muestran dos casos donde se prohíbe cargar autos entre las 19-23 en el primer caso y entre las 20 y 24 en el segundo. Se ve que como efecto colateral se genera un pico de demanda en la primer hora en la cual se puede cargar los vehículos pero este pico ya se encuentra fuera del horario de alta demanda de energía, particularmente en correspondiente con el valle (hora de menos demanda de energía [83]).

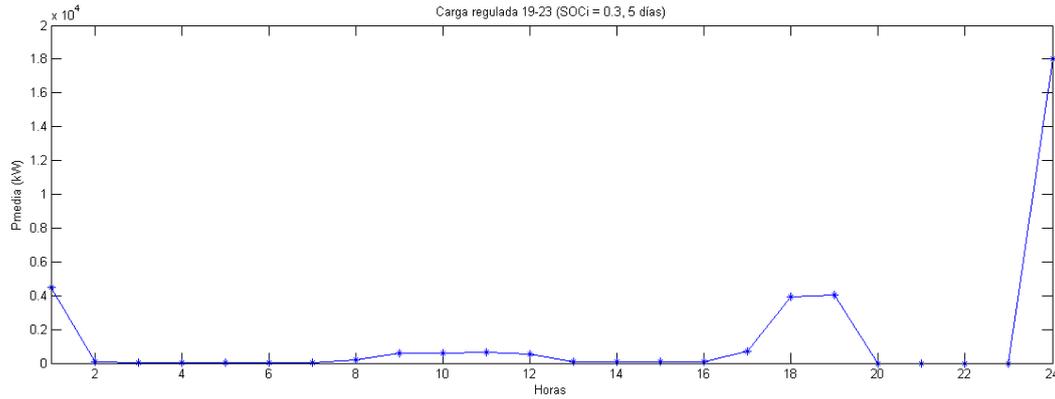


Figura 15.7: Carga regulada entre las horas 19 y 23.

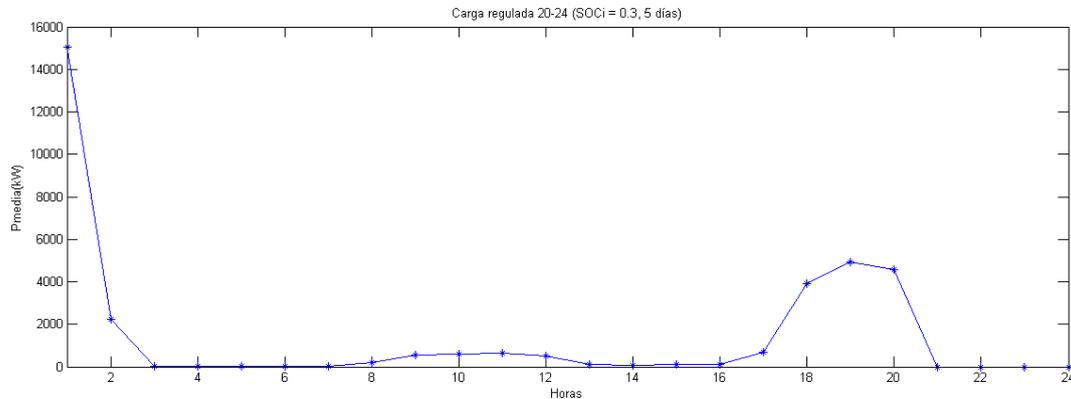


Figura 15.8: Carga regulada entre las horas 20 y 24.

#### 15.5.4. Carga y descarga a la red

Por último se presenta la posibilidad de que los usuarios utilicen el remanente de carga en sus baterías luego de un día laboral para entregar energía a la red. Esta alternativa es conocida como V2G y se presenta como una posibilidad para reducir el pico de consumo de energía y alisar la curva de la demanda. En primer término en la figuras 15.9 y 15.10 se muestran los resultados de una simulación permitiendo entregar energía a los vehículos solamente entre las 19 y las 23 y entre las 20 y 24 respectivamente, e inhabilitando la carga en dichas horas. Se ve como efecto de esta entrega de energía que aumenta el consumo en el resto de las horas, pero este es realizado en horas fuera del horario de punta.

Luego resulta interesante dejar libre la posibilidad de entregar y de consumir energía de la red para todas las horas del día y ver lo que sucedería. Se aprecia en la fig. 15.11 un constante intercambio entre generación y demanda.

Por último en la fig. 15.12 se muestra la demanda neta de energía (donde los valores negativos corresponden con inyecciones de energía a la red), en la cual se observa la fluctuación entre generación y demanda.

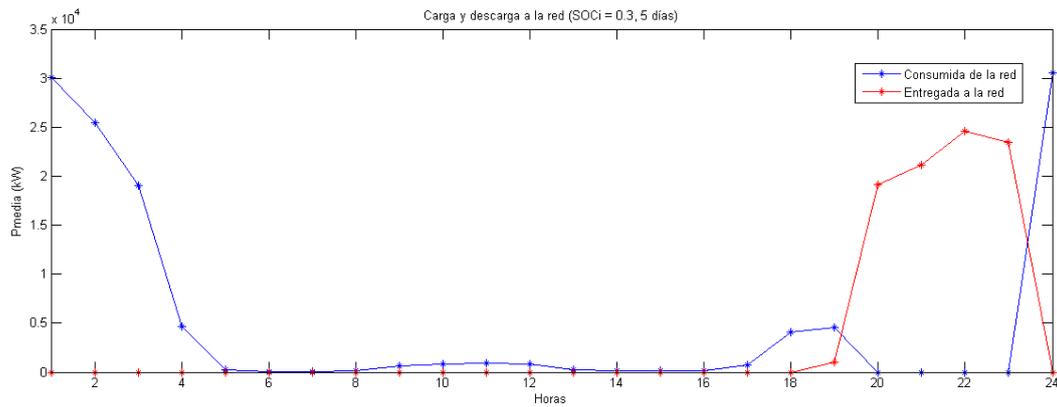


Figura 15.9: Carga y Descarga (V2G entre las horas 19 y 23).

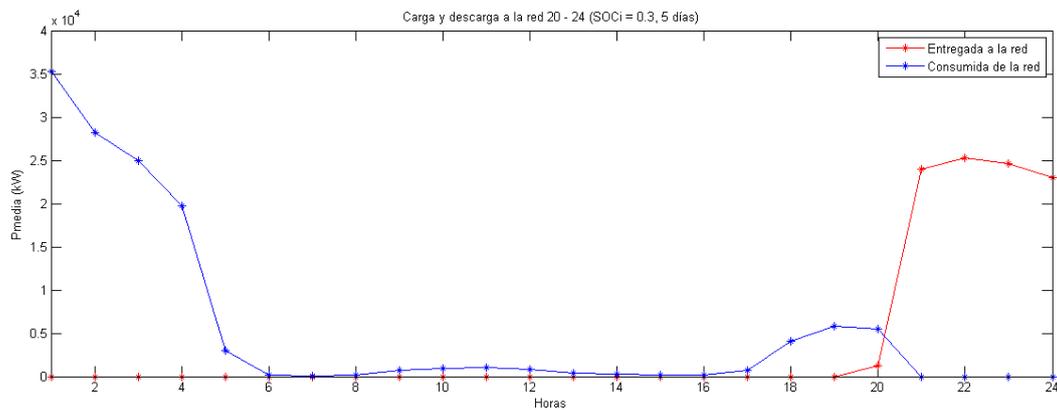


Figura 15.10: Carga y Descarga (V2G entre las horas 20 y 24).

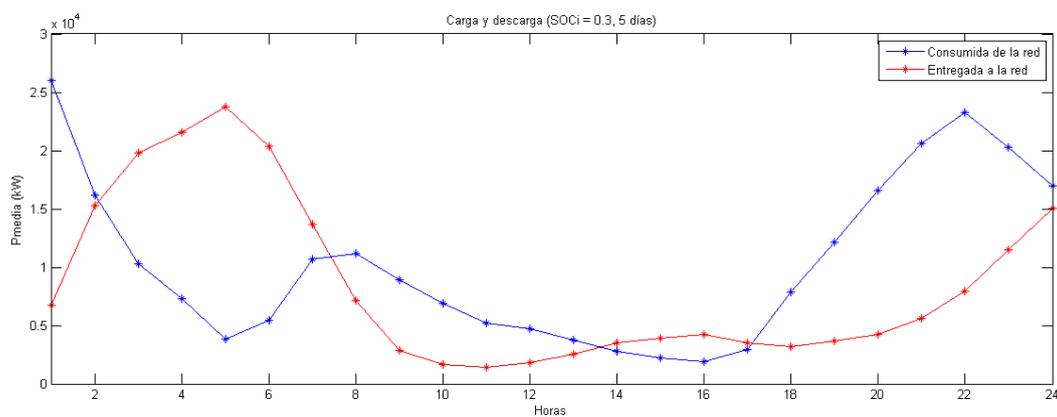


Figura 15.11: Carga y Descarga todas las horas.

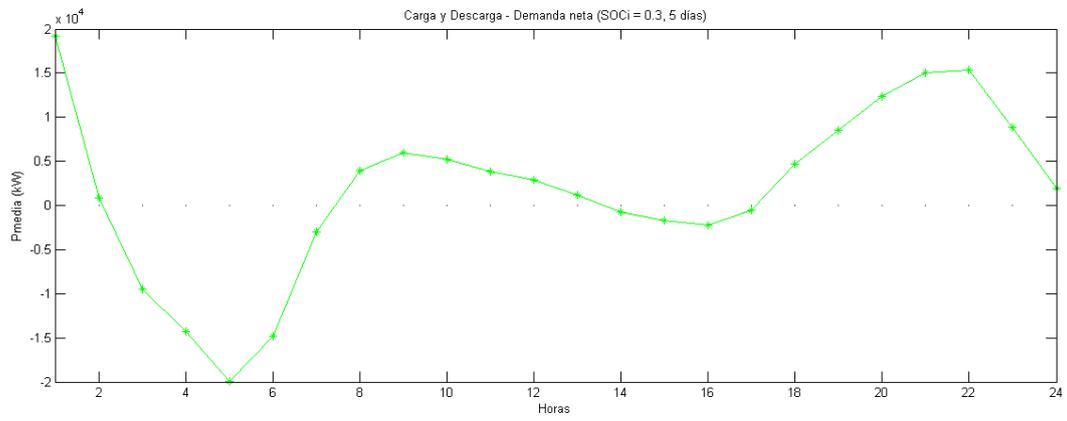


Figura 15.12: Demanda neta de energía (Carga y descarga todas las horas).



# Capítulo 16

## Impacto en la demanda de energía eléctrica asociada con la reconversión del parque de automóviles

### 16.1. Introducción

En capítulos anteriores se realizó un desarrollo de las consideraciones básicas necesarias vinculadas con la tecnología de autos híbridos y eléctricos que permitieron realizar un modelado de cómo sería la demanda de energía asociada con el parque automotor híbrido eléctrico para una flota que se desarrollara particularmente en Montevideo, Uruguay.

Por otra parte se caracterizó el crecimiento del parque automotor en el Uruguay y se brindaron diferentes escenarios de penetración de autos híbridos y eléctricos mirando a futuro, particularmente de cara a 2030.

En este capítulo se busca utilizar dicha información junto con proyecciones de desarrollo del parque generador de energía del Uruguay y de la demanda de energía eléctrica, de forma tal de poder evaluar el impacto en la demanda de energía eléctrica asociado con la reconversión del parque de automoviles que trae aparejado la aparición de nuevas cargas/generadores en el sistema.

El capítulo comienza explicando el modelado utilizado y luego se muestran los resultados de las simulaciones. Asimismo estas simulaciones servirán de input para poder evaluar otros impactos, los cuales serán desarrollados en capítulos posteriores.

La metodología desarrollada en este capítulo toma como referencia los trabajos [77] y [73], y las simulaciones fueron realizadas sobre el software SimSEE.

### 16.2. Modelado de matriz energética uruguaya

Como modo de ver el impacto de la introducción del vehículo eléctrico, se debe establecer cuál será la proyección tanto de la oferta como de la demanda de energía eléctrica. Para ello es necesario realizar un conjunto de hipótesis así como también tener en cuenta un factor de éxito

para los proyectos de expansión de la generación y una mirada a largo plazo. A continuación se comentan las hipótesis utilizadas para dicho modelado.

### 16.2.1. Proyección de la demanda de energía eléctrica

La demanda de energía es construida a partir de la demanda del año 2007, lo cual brinda la estacionalidad y forma de onda, luego a esta demanda se le aplica un factor de forma que la ajusta año a año. Se puede ver que existe una fuerte correlación entre el crecimiento de la demanda de energía eléctrica en base anual y del producto bruto interno de un país (PBI), para Uruguay esto ha funcionado como buen indicador de crecimiento en los últimos años [83]. Por lo tanto utilizando estimaciones de crecimiento del PBI es que se construyen los indicadores de crecimiento para la demanda de energía eléctrica. En este caso se toma un escenario medio que trabaja en un leve entorno de un 3 % anual.

En la fig. 16.1 se puede apreciar la demanda de energía (en GWh) para cada año hasta el 2033. Es importante aclarar que esta es la demanda base que no incluye la eventual demanda que podrían agregar el parque automotor, la cual será propia de cada uno de los casos que serán estudiados en este capítulo.

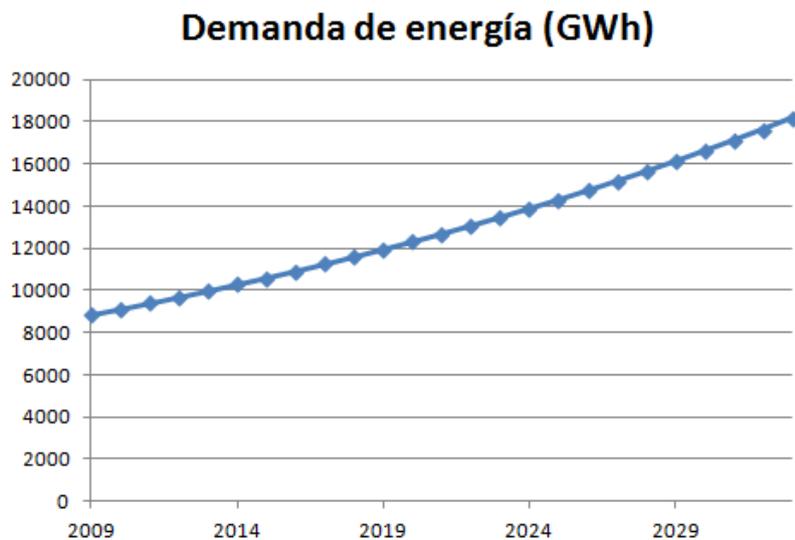


Figura 16.1: Demanda de Energía Eléctrica (sin incluir autos).

### 16.2.2. Parque generador uruguayo

El parque generador uruguayo se modela básicamente siguiendo los lineamientos conocidos e impuestos por la política energética 2030 planteada por la Dirección Nacional de Energía [84] y agregando alguna hipótesis adicional sobre la expansión del sistema realizada por el grupo de trabajo.

## **Parque térmico**

El parque térmico se lo puede dividir en tres grandes grupos, de acuerdo a su combustible: la generación en base a fuel oil, la generación en base a gas oil y la generación en base a gas natural.

En cuanto a la generación en base a fuel oil se cuenta con la siguientes centrales:

- 5ta unidad de central Batlle y Ordoñez con 75 MW, se sacaría de servicio a partir del 2021.
- 6ta unidad de central Batlle y Ordoñez con 120 MW, se sacaría de servicio a partir del 2021.
- Sala B de central Batlle y Ordoñez con 50 MW, se sacaría de servicio a partir del 2015.

Respecto de la generación en base a gas oil se modela:

- Motores de central Batlle y Ordoñez con 80 MW.
- Central térmica de la Tablada con 100 MW.
- Central Punta del Tigre 300 MW (hasta 2014 donde empieza a trabajar con Gas Natural).
- Central TGAA con 15 MW.

Por último en lo que refiere a la generación con gas natural, los proyectos asumen el éxito en la construcción de la planta regasificadora a partir del año 2014:

- Central Punta del Tigre 300 MW desde 2014.
- Central de Ciclo combinado con entrada escalonada desde 2014, con una etapa inicial de 180 MW y llegando a 480 MW para 2016, luego se asume una expansión más adelante de esta misma fuente de generación, existiendo en 2029 unos 660 MW.

## **Generación Hidroeléctrica**

Se modelan las 4 centrales existentes en la actualidad en Uruguay:

- Central de Salto Grande: Central Hidroeléctrica Bi-nacional (Argentina-Uruguay) con 900 MW disponibles para Uruguay, modelada como central de pasada.
- Central Hidroeléctrica Rafael Terra (Bonete): la única modelada con embalse con 120 MW.
- Central Hidroeléctrica Baygorria: central de pasada con 100 MW.
- Central Hidroeléctrica Palmar: central modelada de pasada con 330 MW.

## Generación Eólica

La política energética antes mencionada supone una fuerte incorporación de energía de origen eólico, en la fig. 16.2 se muestra la evolución en la potencia de energía eólica instalada entre 2015 y 2030. Se asume para esta fecha existan disponibles unos 2600 MW de potencia de origen eólico instalada.

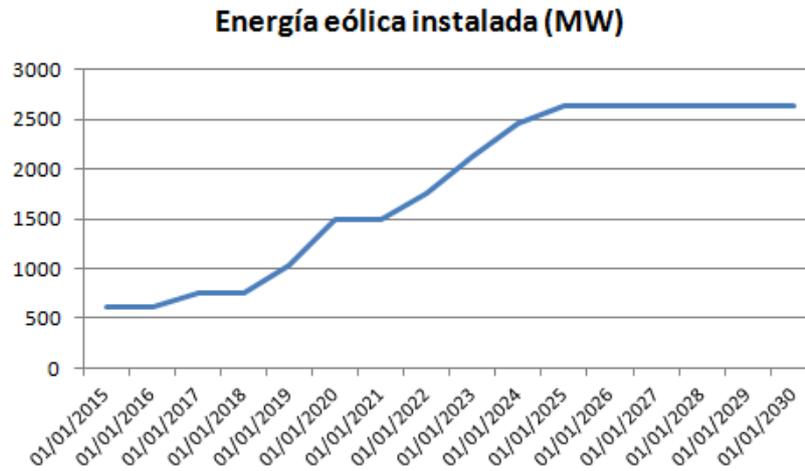


Figura 16.2: Potencia de origen eólico instalada.

## Generación con Biomasa

En cuanto a la Biomasa, esta es modelada con diferentes actores dentro del software de simulación considerando los casos de Biomasa Autodespachada así como también los casos de despacho centralizado. Teniendo en cuenta consideraciones referentes a la disponibilidad de combustible, y los actores existentes al día de hoy se modelan unos 280 MW de esta fuente.

## Intercambios internacionales

Para el modelado realizado teniendo en cuenta la incertidumbre asociada no se modelaron contratos de compra o venta de energía con los países vecinos. Respecto a los intercambios el único modelado realizado refiere a la posibilidad de exportar excedentes de vertimiento o de generación eólica.

## 16.3. Escenarios de penetración de vehículos eléctricos considerados

Teniendo en cuenta la variabilidad de posibles casos existentes estudiados en el capítulo *Desarrollo del parque automotor a futuro*, se buscó un conjunto de escenarios que tratara de explicar de la mejor forma la casuística existente pero sin exceder una cantidad inmanejable. En este punto hay que tener en cuenta que el proceso de simulación es largo para cada uno de los escenarios tanto desde el punto de vista computacional como desde el procesamiento de los datos obtenidos en la simulación.

Se decidió elegir por tres grandes grupos de escenarios de acuerdo a la penetración planteada: Realista, Pesimista, Optimista, que siguen la misma cadencia que la desarrollada originalmente, aunque se abandona la clasificación en ENE, Dinámico y Mínima. Lo que se hace para llevar estos tres casos a uno único es un promedio ponderado con los pesos de cada uno de estos escenarios que en definitiva se encuentra bastante cerca del escenario Dinámico.

En la tabla 16.1 se muestra la cantidad de autos (híbridos y eléctricos puros) por año de acuerdo a cada uno de los escenarios.

	2010	2015	2020	2025	2030
<b>Pesimista</b>	0	0	6000	45000	150000
<b>Realista</b>	0	0	8000	60000	220000
<b>Optimista</b>	0	0	10000	78000	300000

Tabla 16.1: Cantidad de autos por escenario.

Por otra parte se eligen otros tres grandes grupos de escenarios de acuerdo al tipo de carga y regulación existente, tal cual se habían definido en el capítulo *Modelado de la demanda del parque automotor híbrido - eléctrico*: Carga Regulada, Carga No Regulada y Carga y Descarga a la Red (V2G). Este segundo grupo no cambia la cantidad sino la forma de la demanda asociada al parque.

## 16.4. Metodología de cálculo

Para los cálculos de este estudio se utilizó el software SimSEE v3.59, considerando paso semanal, con 100 crónicas por paso de optimización y 500 crónicas para la simulación.

La optimización se realizó utilizando el simulador SimSEE. La política de operación fue calculada sobre la base de 10 sorteos de Monte Carlo para el tratamiento de los procesos estocásticos durante la programación dinámica estocástica. Para las simulaciones se utilizaron 100 crónicas correspondientes a los aportes históricos de caudales desde 1909 a 2008 inclusive.

## 16.5. Resultados obtenidos

En esta sección se muestran los resultados obtenidos respecto al impacto en la demanda de energía neta, en lo que respecta a los efectos sobre la propia curva de la demanda serán objeto de análisis del próximo capítulo. En cualquiera de los casos se observa un aumento en la demanda de energía neta debido a la incorporación de vehículos eléctricos, los cambios más notorios son entre escenario de penetración mientras que se observan también ciertos cambios respecto al método de carga elegido.

### 16.5.1. Expansión pesimista

La expansión pesimista se presenta como el escenario más conservador en lo que respecta a la penetración de esta tecnología en el mercado considerando unos 150.000 vehículos para 2030.

En las fig. 16.3, 16.4 y 16.5 se observa la diferencia entre la demanda neta de energía para los casos no regulados, regulados, y carga y descarga a la red respectivamente para este caso.

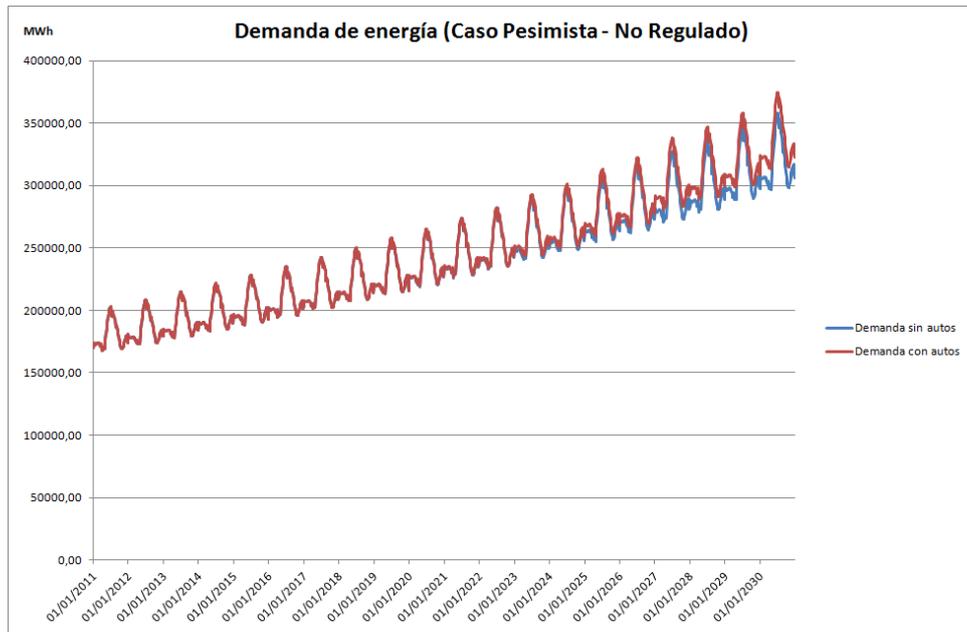


Figura 16.3: Demanda de energía con y sin autos (caso pesimista - no regulado).

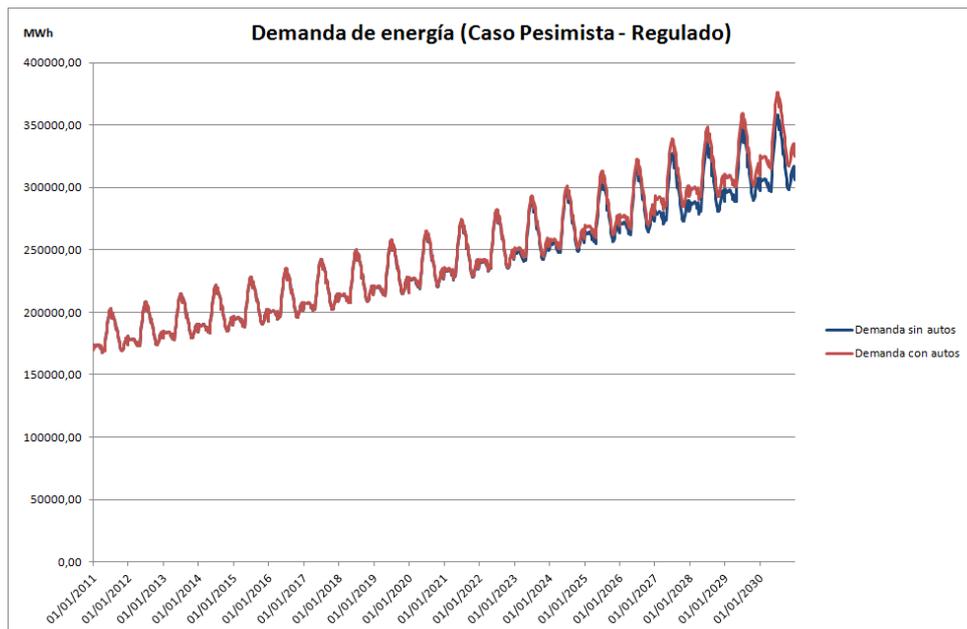


Figura 16.4: Demanda de energía con y sin autos (caso pesimista - regulado).

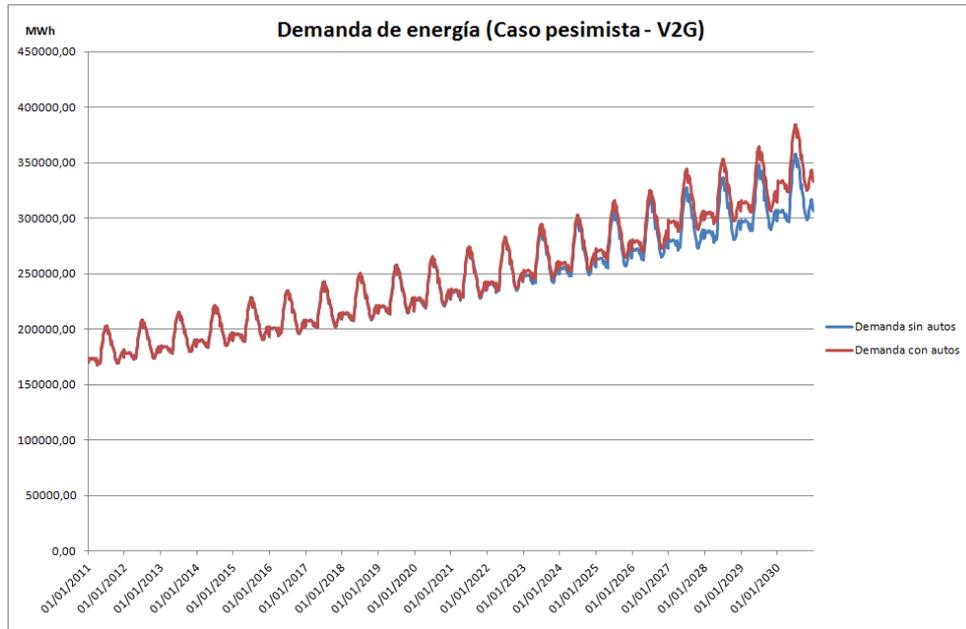


Figura 16.5: Demanda de energía con y sin autos (caso pesimista - V2G).

En este caso se observa para 2030 un aumento de la demanda de un 5.25 %, 5,79 % y un 8.34 % para los casos no regulado, regulado y V2G respectivamente. Cómo era de esperar no existen diferencias significativas entre los casos regulado y no regulado puesto que la energía demandada por el parque automotor es básicamente la misma, dichas diferencias se pueden explicar por el hecho de que se está realizando una simulación con paso semanal con lo que no se puede llegar a apreciar a un 100 % las diferencias horarias. Por otra parte se está comparando un promedio anual de incremento (en 2030) con otro.

Respecto del caso V2G el aumento era de esperar puesto que si bien se contribuye con la red entregando energía en la hora pico, esto implica tener que cargar el vehículo por más horas posteriormente implicando en un aumento neto de la energía demandada, con lo cual si bien se contribuye para dar el pico la demanda en el valle es mucho más grande y durante más horas.

Estas consideraciones se mantienen para los casos que se verán a continuación Realista, y Optimista.

### 16.5.2. Expansión realista

La expansión realista es el caso medio en el que se consideran unos 220.000 vehículos para 2030. En las fig. 16.6, 16.7 y 16.8 se observa la diferencia entre la demanda neta de energía para los casos no regulados, regulados, y carga y descarga a la red respectivamente para este caso.

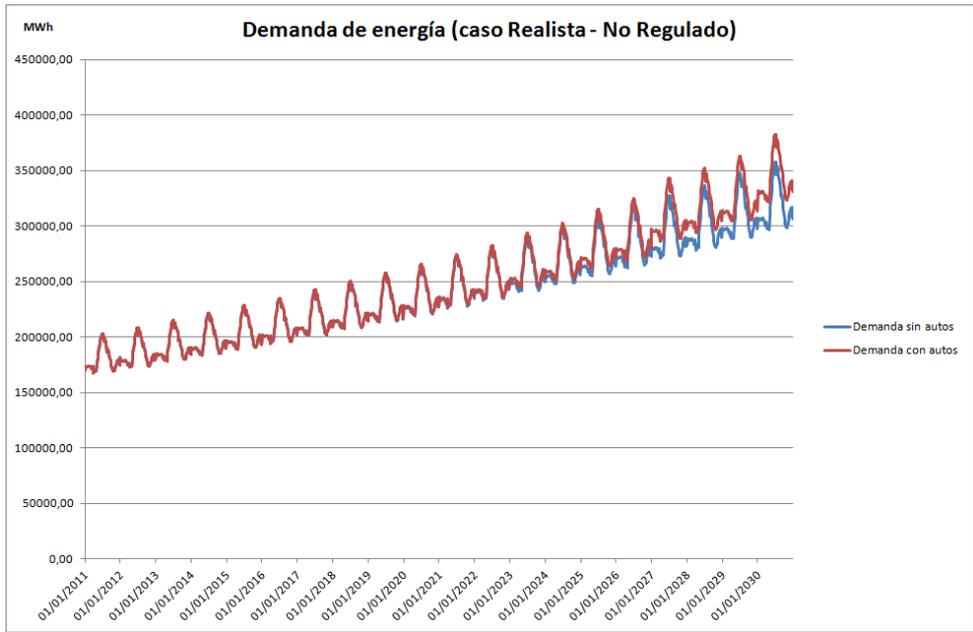


Figura 16.6: Demanda de energía con y sin autos (caso realista - no regulado).

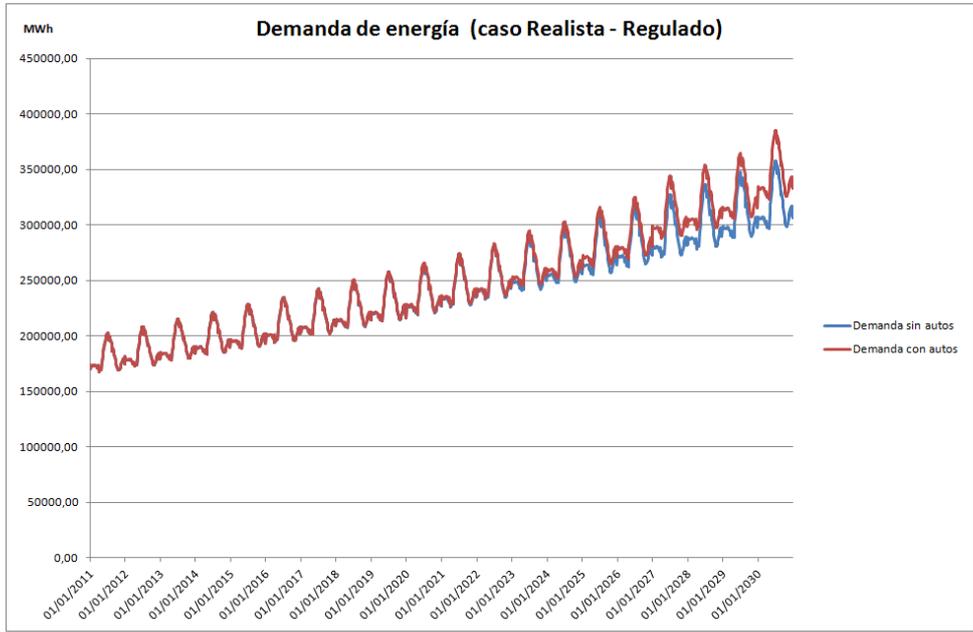


Figura 16.7: Demanda de energía con y sin autos (caso realista - regulado).

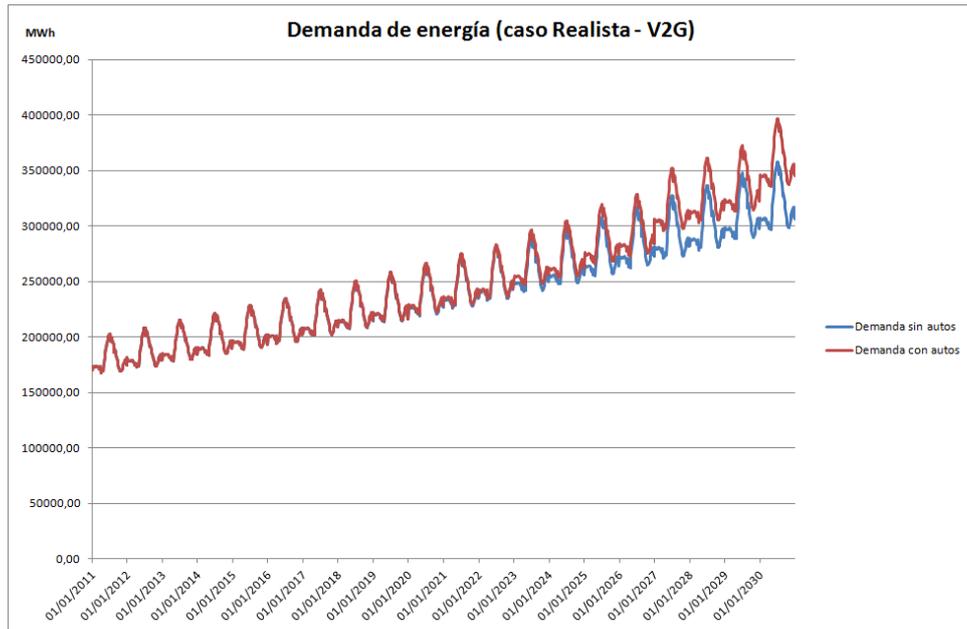


Figura 16.8: Demanda de energía con y sin autos (caso realista - V2G).

En este caso se observa un incremento de la demanda de un 7.70 %, 8,49 % y 12,24 % respectivamente, con lo cual se ve claramente un aumento en los tres valores respecto del caso anterior.

### 16.5.3. Expansión optimista

La expansión optimista es el caso que plantea el mayor crecimiento en el parque automotor híbrido eléctrico, donde se consideran unos 300.000 vehículos para 2030. En las fig. 16.9, 16.10 y 16.10 se observa la diferencia entre la demanda neta de energía para los casos no regulados, regulados, y carga y descarga a la red respectivamente para este caso.

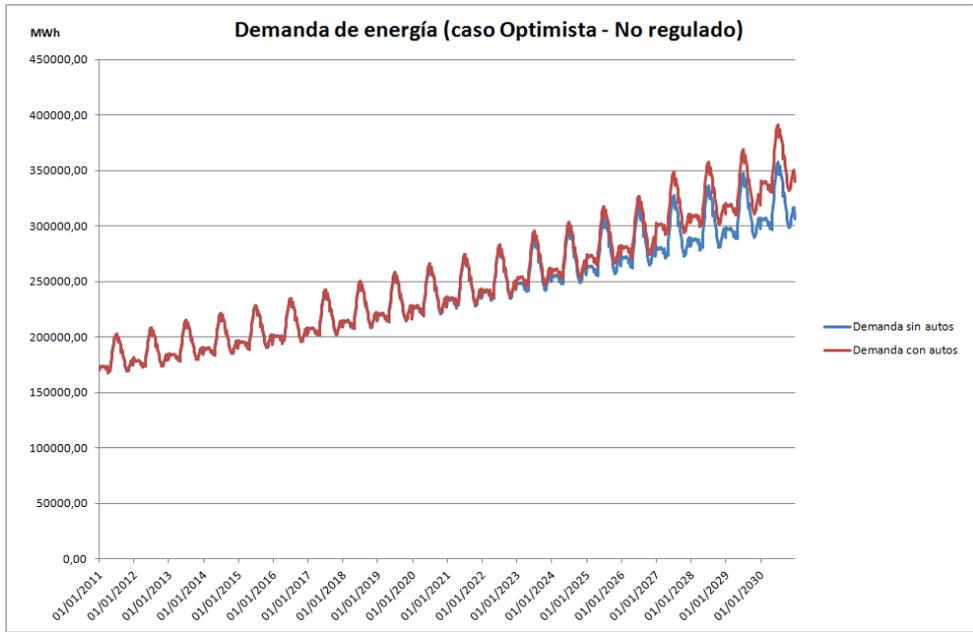


Figura 16.9: Demanda de energía con y sin autos (caso optimista - no regulado).

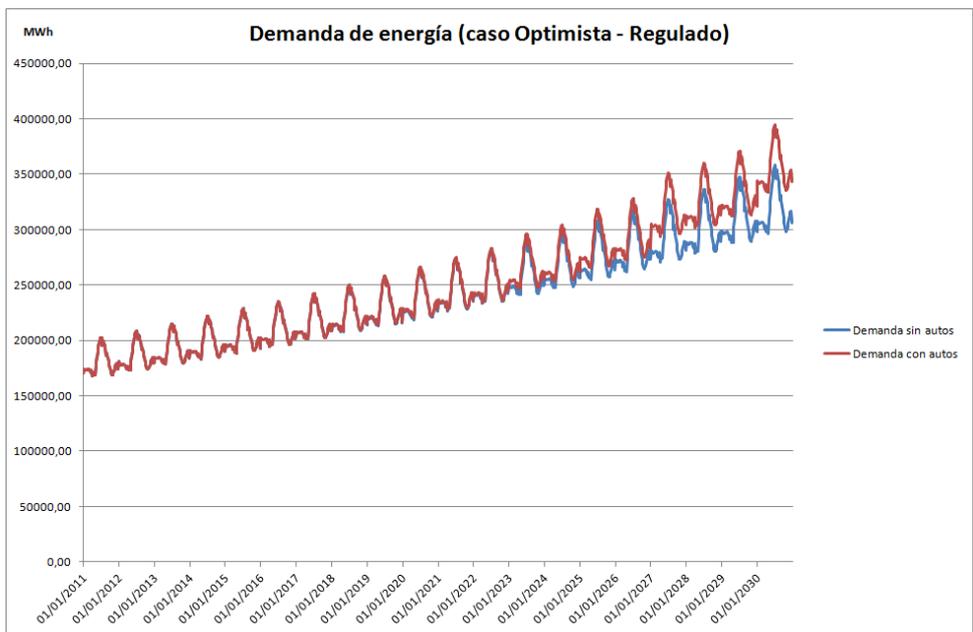


Figura 16.10: Demanda de energía con y sin autos (caso optimista - regulado).

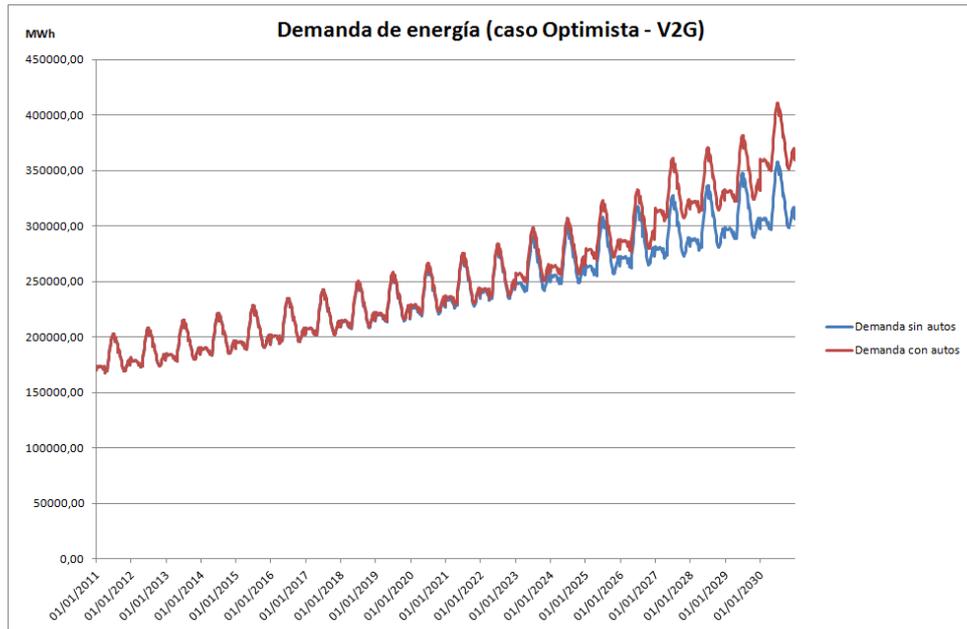


Figura 16.11: Demanda de energía con y sin autos (caso optimista - V2G).

Para finalizar se puede observar en este caso un aumento de un 10.50 %, 11.57 % y 16.69 % respectivamente para las tres modalidades de carga sugeridas. Se ve que se podría llegar a un aumento significativo de la demanda neta de energía aunque como se verá en el siguiente capítulo a costa de alisar la curva de la demanda.

#### 16.5.4. Resumen de resultados

En la tabla de la fig. 16.2 se observa un resumen de los resultados obtenidos donde se ve que para el caso más pesimista de incorporación sin permitir un régimen de carga y descarga a la red se podría dar una aumento en la demanda neta de energía de aproximadamente un 5.5 % respecto de la proyección a 2030, mientras que en el otro extremo para el caso más optimista considerando un régimen V2G se podría llegar a un 16.69 % de incremento en la demanda de energía respecto del escenario tendencial.

	No regulado	Regulado	V2G
Pesimista	5.25%	5.79%	8.34%
Realista	7.70%	8.49%	12.24%
Optimista	10.50%	11.57%	16.69%

Tabla 16.2: Resumen de resultados obtenidos.



# Capítulo 17

## Impacto en la curva de demanda de energía asociada con la capacidad de almacenamiento de los vehículos eléctricos

### 17.1. Introducción

En el capítulo anterior se presentó el impacto en la demanda neta de energía eléctrica debido a distintos niveles de incorporación de vehículos híbridos y eléctricos, así como también frente a diferentes alternativas de carga. Como se pudo observar las principales diferencias se ven al pasar de un escenario de incorporación a otro, el objetivo de este capítulo es evaluar el impacto en la curva de la demanda debido a diferentes estrategias de carga, donde se observaran los principales cambios entre una estrategia y otra y no tanto entre diferentes niveles de penetración a menos de un factor de escala.

Este capítulo en cierta forma completa el análisis comenzado en el capítulo anterior en lo que respecta al impacto en la demanda de energía eléctrica.

### 17.2. Motivación

Estudios iniciales sobre como participa el vehículo eléctrico en la red, están de acuerdo en aprovechar los horarios de valle como carga de las baterías, como modo de utilizar de manera más eficiente las inversiones realizadas en la infraestructura de la red eléctrica. Para ello se requiere algún tipo de regulación que imponga que esto se pueda llevar a cabo de esta manera (ya sea con una señal de precios, con una bonificación o lisa y llanamente restringiendo la carga de vehículos en ciertas horas del día). Así es que surgen los modelos de carga **regulada** y **no regulada**. De más está decir que la regulación es necesaria puesto que el comportamiento natural del usuario del vehículo eléctrico, que no tiene ningún tipo de restricción, sería cargarlo apenas puede hacerlo.

Un ejemplo se obtuvo del plan MOVELE hasta el 2014, donde se muestra una curva de demanda y la participación esperada de los vehículos eléctricos. En la fig. 17.1 se observa dicha curva.

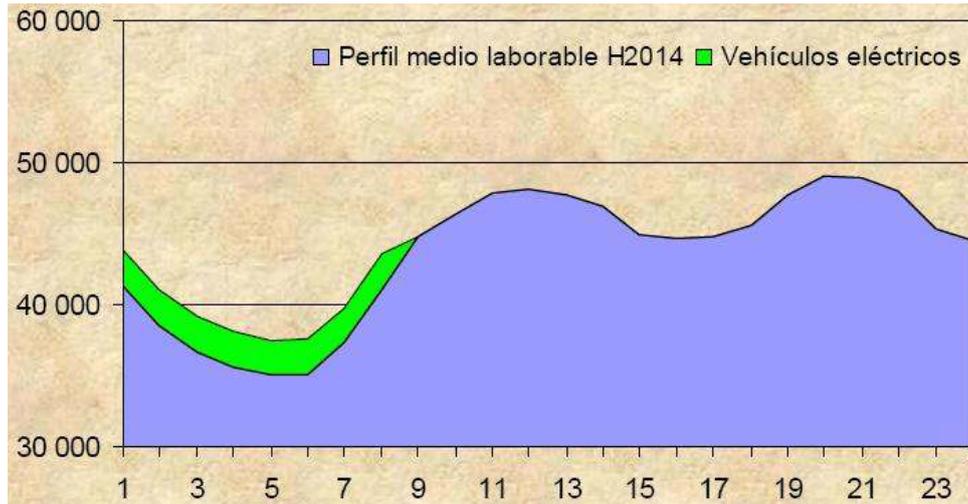


Figura 17.1: Alisamiento de la curva programa MOVELE. [74] [85]

En escenarios a futuro, se ve con gran interés la participación de los vehículos eléctricos no solamente como demanda que aplanan la curva, sino como posible oferta en horarios pico. Tal modo de operación permitiría la inclusión de mayor oferta de energía de origen renovable, ya que mejoraría la gestión, aspecto de especial interés sobre todo en el caso de energía eólica y solar.

Esta tecnología de carga inteligente se conoce como V2G (vehicle-to-grid), aspecto que también debe ser complementado con otros incentivos -principalmente económicos- que modifiquen la conducta de los propietarios de los vehículos.

### 17.3. Aspectos sobre la simulación

La simulación fue realizada con la versión 3.59 del SimSEE, en este punto es necesario realizar algunas aclaraciones de forma tal de poder entender el proceso de simulación y procesamiento posterior de resultados. La optimización y simulación es realizada con paso semanal, esto hace que no se cuente con el detalle horario del consumo de energía y/o generación. Para ello el programa implementa el manejo por postes de energía (o bandas horarias). La idea es permitir desordenar el tiempo dentro de un paso de tiempo. Para ellos, se elige un sub-paso de tiempo (generalmente 1 hora) en el cual se considera que los problemas de potencia quedan bien representados, se parte entonces el paso de tiempo en esos sub-pasos y luego se desordenan los sub-pasos agrupándolos por niveles similares de demanda. Así se definen bandas horarias que son diferente duración en las que el nivel de demanda es bastante bien representado por el promedio de la potencia de la demanda en los sub-pasos agrupados en la misma banda. [86].

Se utilizaron cuatro postes de energía de acuerdo al orden el poste 1 abarca la hora pico de energía de cada día de la semana, el poste 2 las cuatro horas que rodean a la hora pico, el poste 4 son las seis horas de más baja demanda del día (el valle) y por último el poste 3 son las horas restantes del día.

Como se cuenta con la evaluación de lo que sucede en cada uno de los postes lo que se hizo fue caracterizar la diferencia en la demanda por poste entre los escenarios con y sin autos y para cada una de las estrategias de carga antes mencionadas. Luego se tiene el incremento porcentual en cada uno de estos postes. A continuación, se considero un día promedio de demanda y se normalizo pasándolo a por unidad de forma tal de que no importe el año en que se esté manejando dicha información, ya que lo que sucede año a año es un crecimiento en la misma proporción para cada punto de la curva de la demanda.

Con el día promedio de demanda de energía normalizado, se identificaron los postes y a cada una de las horas del día se le aplicó el aumento (o reducción) porcentual por poste que resultaron de la simulación. De esta forma se pudo construir una curva horaria con y sin vehículos eléctricos pese a que la simulación fuera de paso semanal.

## 17.4. Algunos resultados

A los efectos de no abundar en gráficos e información en esta sección se muestran los resultados para el escenario realista y las tres diferentes alternativas de carga. Para los otros escenarios, los efectos son los mismos simplemente escalados por un factor de forma correspondiente al peso en la demanda de más o menos vehículos en el sistema. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

### 17.4.1. Carga No Regulada

En este primer caso se aprecia que es lo que sucede cuando no se impone ningún tipo de regulación ni de incentivos para la carga de las baterías en ciertas horas del día. Se observa que aparece un pico pronunciado en el horario de máxima demanda, lo cual puede conllevar a problemas tanto desde el lado de la generación como desde el lado de las redes.

En la fig. 17.2 se aprecian ambas curvas (con y sin vehículos eléctricos) y en el pico de la demanda el aumento es de aproximadamente un 22 % promedio respecto al escenario sin vehículos

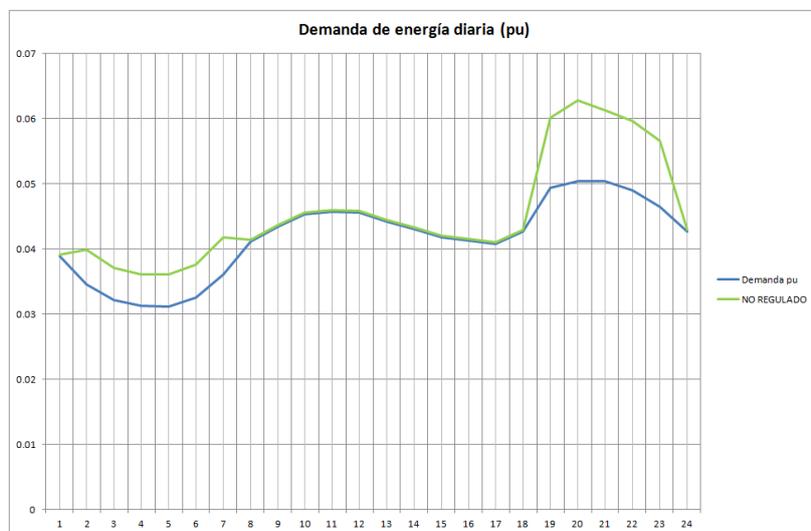


Figura 17.2: Curva horaria en caso no regulado con y sin vehículos eléctricos.

### 17.4.2. Carga Regulada

En el caso en que se de algún tipo de incentivo o penalización para no cargar en la hora pico lo que se observa es que se produce un alisamiento en la curva de la demanda, aumentando uniformemente durante todo el día y manteniéndose el pico de la misma forma. En la fig. 17.3 se pueden apreciar ambas curvas.

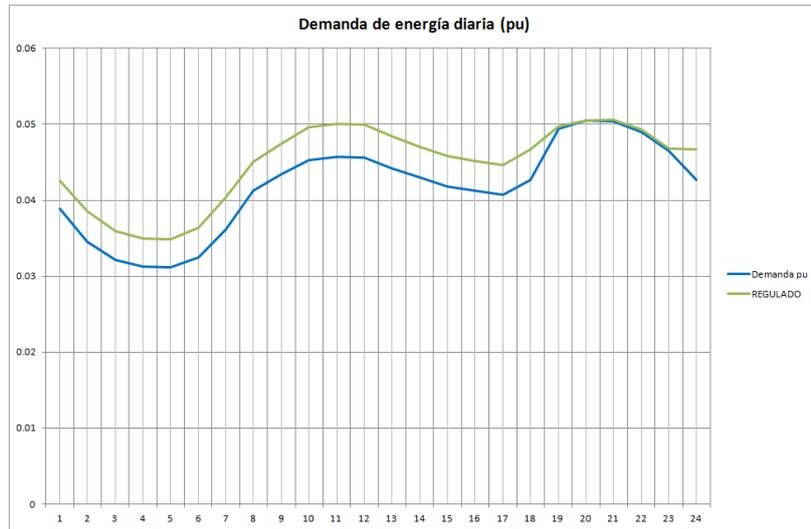


Figura 17.3: Curva horaria en caso regulado con y sin vehículos eléctricos.

### 17.4.3. Carga y Descarga a la red (V2G)

Por último es deseable analizar que sucedería si se permite que el usuario del vehículo eléctrico inyecte en el horario pico el remanente de energía que tiene su batería y el resto del día lo pueda cargar.

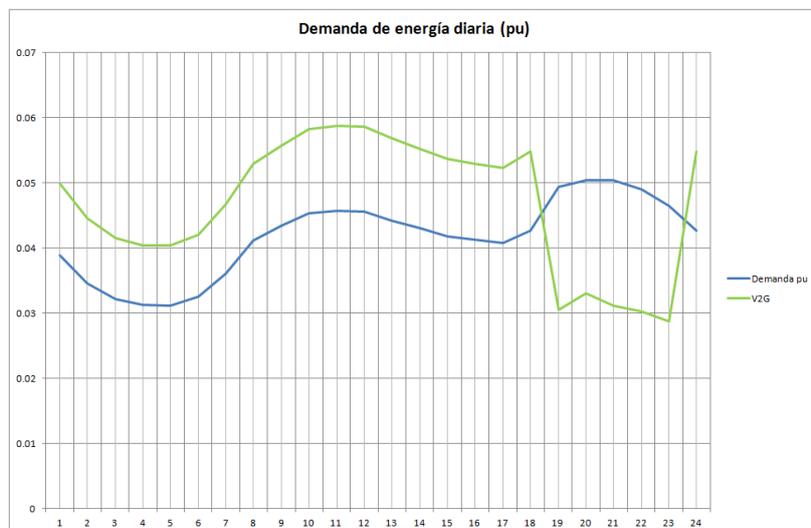


Figura 17.4: Curva horaria en caso V2G con y sin vehículos eléctricos.

Este fenómeno que se aprecia en la fig. 17.4 podría ser tan significativo como para implicar una reducción en el 35% del pico de la demanda, trasladando dicho pico para el horario del mediodía.



# Capítulo 18

## Impacto en la demanda de petróleo asociada con la reconversión de parque de automóviles

### 18.1. Introducción

La incorporación de autos eléctricos al parque automotor en sustitución de vehículos tradicionales de combustión interna ocasiona variaciones en el consumo previsto a futuro de derivados de petróleo como nafta y gasoil, los cuales se sustituyen por electricidad que permite la carga de las baterías de los vehículos eléctricos.

Este cambio en la estructura de consumo de energéticos ocasiona por un lado la reducción de consumo de nafta y gasoil pero por otro lado genera un aumento en el consumo de electricidad la cual puede ser generada a partir de diversos energéticos como pueden ser también derivados del petróleo (gasoil, fuel oil) u otros energéticos como gas natural, biomasa o también energía eólica o hidroeléctrica.

En este informe se presenta el impacto en el consumo de nafta y gasoil que se genera por la incorporación de vehículos eléctricos al parque vehicular en base a los escenarios planteados para su evolución en el período 2012 a 2030. A partir de la cantidad de vehículos que se prevé se incorporarán y del modelo de la demanda de energía eléctrica atribuible a la carga de los mismos, a través de las simulaciones energéticas realizadas, se analiza la variación en la estructura de abastecimiento de la demanda total del sistema a futuro, así como el impacto energético considerando en conjunto el parque vehicular objetivo del estudio y el sistema eléctrico.

### 18.2. Datos y escenarios

#### 18.2.1. Escenarios

En el estudio de la evolución futura de la porción del parque automotor donde se esperaría una mayor sustitución de vehículos convencionales por vehículos eléctricos se formularon nueve escenarios de evolución partiendo de tres escenarios de desarrollo del país.

Para cada escenario de desarrollo del país se formularon tres escenarios de penetración de vehículos eléctricos [69], el escenario *Realista*, el escenario *Pesimista* y el escenario *Optimista*. En la tabla 18.1 se presentan los índices de penetración de cada categoría de vehículos eléctricos en cada uno de los escenarios.

<i>Escenario Realista</i>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
VMCI	100%	100%	99%	94%	82%
VHE	0%	0%	1%	4%	11%
VERE	0%	0%	0%	1%	4%
VCE	0%	0%	0%	1%	3%
<i>Escenario Pesimista</i>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
VMCI	100%	100%	99%	97%	93%
VHE	0%	0%	0%	2%	5%
VERE	0%	0%	0%	0%	1%
VCE	0%	0%	0%	0%	1%
<i>Escenario Optimista</i>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
VMCI	100%	100%	98%	88%	67%
VHE	0%	0%	1%	7%	18%
VERE	0%	0%	0%	3%	8%
VCE	0%	0%	0%	2%	7%

Tabla 18.1: Porcentaje de penetración de las distintas categorías de vehículos eléctricos.

Las denominación de cada tipo de vehículo corresponde a:

- Los *Vehículos Completamente Eléctricos (VCE)* que solo tienen un motor eléctrico y no poseen motor a combustión
- Los *Vehículos Híbridos Enchufables (VHE)* que tienen un motor a combustión, un motor eléctrico y baterías que se pueden cargar desde la red eléctrica
- Los *Vehículos Eléctricos de Rango Extendido (VERE)* que además del motor eléctrico poseen un motor a combustión que se puede utilizar para cargar las baterías y extender el alcance del vehículo. Las baterías se pueden cargar desde la red eléctrica
- Los *Vehículos con Motor a Combustión Interna (VMCI)* que son los vehículos convencionales, que utilizan combustibles derivados del petróleo para su funcionamiento

Para la determinación de la demanda de electricidad que generarían los distintos escenarios de composición del parque, se expresó el consumo de electricidad de los distintos tipos de vehículos eléctricos en función del consumo de electricidad de un vehículo completamente eléctrico (VCE). Es así que se adoptó que un vehículo híbrido enchufable (VHE) consume el 60 % de la electricidad que consume un VCE y que un vehículo eléctrico de rango extendido (VERE) consume el 75 % de la electricidad que un VCE. En base a estas adopciones, se ponderó la cantidad de VHE y de VERE por su consumo equivalente eléctrico respectivo y estas cantidades se adicionaron al total de VCE previstos, obteniendo de esa forma una cantidad de VCE “equivalentes” a los efectos de realizar el análisis de la variación en el consumo y producción de energía eléctrica que se verificaría en los distintos escenarios.

Para la evaluación del impacto en la demanda de combustibles se seleccionó para el análisis el escenario de crecimiento del país denominado como *Dinámico intermedio*[68] <sup>(1)</sup>.

### 18.2.2. Datos

Para determinar el consumo de combustible del parque existente y futuro se consideraron los parámetros de la tabla 18.2 con respecto al consumo y rendimiento del tipo de vehículos que componen el parque objeto del estudio.[87]

Categorías de vehículos	Recorridos medios		Rendimiento (km/l)	Cantidad al 2006
	km/año	km/día		
Autos nafta	8888	24,7	10	284978
Camionetas nafta	9716	27,0	9	6243
Camionetas con actividad comercial nafta	12110	33,6	9	17826
Autos gasoil particulares	12892	35,8	14	97258
Camionetas gasoil particulares	19298	53,6	10	32945
Camionetas con actividad comercial gasoil	20551	57,1	13	34991
Camiones chicos gasoil	18747	52,1	7,5	876

Tabla 18.2: Recorridos medios y rendimiento por tipo de vehículo y combustible.

Estos datos están basados en el parque existente en Uruguay al 2006. A partir de los mismos se realizaron promedios ponderados para determinar el recorrido medio de un vehículo a nafta y un vehículo a gasoil así como los rendimientos medios, entre los vehículos comprendidos en el parque objetivo, tomando como base la cantidad de vehículos de cada tipo para ese año. En la tabla 18.3 se detallan los valores promedios obtenidos así como el poder calorífico correspondiente a la nafta (95 supra) y el gasoil que han sido considerados. Cabe destacar que el valor de la fila “Recorridos medios ponderados (km/año) eléctrico” de esta figura corresponde a que no todos los vehículos eléctricos que se incorporan al parque son puramente eléctricos, sino que al ser híbridos o eléctricos de rango extendido tienen un consumo de combustible asociado que es obviamente menor que el asociado a un vehículo convencional. Se asumió aquí que el 40 % del recorrido anual de estas dos categorías de vehículos se realiza a partir de nafta.

<b>NAFTA</b>	
Recorridos medios ponderados (km/año)	9090,6
Rendimientos medios ponderados (km/l)	9,9
Recorridos medios ponderados (km/año) eléctrico	3636,2
PCI (kcal/l)	8239,0
PCI (ktep/l)	8,2E-07
<b>GASOIL</b>	
Recorridos medios ponderados (km/año)	15807,5
Rendimientos medios ponderados (km/l)	13,0
PCI (kcal/l)	8655,0
PCI (ktep/l)	8,7E-07

Tabla 18.3: Promedio ponderado de recorridos medios y rendimientos.

<sup>(1)</sup>El escenario *Dinámico intermedio* es un escenario posible y con un buen desempeño de crecimiento económico. En el mismo algunos sectores presentan un desempeño en crecimiento de PIB y exportaciones bueno pero que no alcanzan los valores máximos establecidos en el escenario ENE. No constituye un escenario que se alcanza fácilmente sino que requiere de un esfuerzo importante

Para determinar el impacto tanto en el consumo de derivados de petróleo, así como de energéticos en su conjunto, que la incorporación de vehículos eléctricos ocasionaría en el país se consideró también el impacto en el sector eléctrico ocasionado por la demanda de la carga de baterías asociada a este tipo de vehículos.

A partir del modelado de la demanda que surge de las proyecciones realizadas, se realizó la simulación en *SimSEE* del abastecimiento del sistema eléctrico en escenarios con y sin vehículos eléctricos. Como se mencionó anteriormente, los escenarios seleccionados para estas simulaciones corresponden al escenario de crecimiento de PIB denominado como *Dinámico* y para cada una de las hipótesis de penetración de vehículos eléctricos: *Pesimista*, *Optimista* y *Realista*.

Dado que los resultados de *SimSEE* se obtienen en unidades de energía eléctrica (MWh) y refieren a la energía eléctrica efectivamente generada, se utilizaron los factores de la tabla 18.4 para determinar el consumo de combustible para los distintos tipos de centrales modeladas. Los rendimientos que se presentan con respecto a las centrales se obtuvieron de datos de UTE y del informe “Evaluación de la disponibilidad de residuos o subproductos de biomasa a nivel nacional” [88].

Central	Potencia Nominal (MW)	Potencia Mínima (MW)	Rendimiento Pot.Nominal	Rendimiento Pot.Mínima	Rendimiento medio
5ª unidad de Central Batlle	75	20	34%	29%	31%
6ª unidad de Central Batlle	120	30	33%	26%	29%
Sala B de Central Batlle	50	20	26%	20%	23%
Central Térmica de Respaldo La Tablada	200	40	30%	15%	23%
Central Maldonado	20	0	23%	11%	17%
Central Punta del Tigre	300	30	40%	12%	26%
Motores 80	80	0	45%	45%	45%
Ciclos Combinados	360	60	53%	27%	40%
Centrales a biomasa	---	---	26%	26%	26%

Tabla 18.4: Rendimiento de las centrales de generación eléctrica.

## 18.3. Resultados

Se presentan aquí los resultados obtenidos para los distintos escenarios estudiados. Los resultados se separan en dos partes, una primera donde se presentan exclusivamente los ahorros en consumo de nafta y gasoil que se obtienen de la incorporación de vehículos eléctricos sustituyendo los vehículos con motor a combustión interna. En la segunda parte, estos resultados se adicionan en términos energéticos a los combustibles requeridos para generar la energía eléctrica para abastecer la demanda, considerando como parte de esta demanda el consumo de electricidad de los vehículos eléctricos.

### 18.3.1. Evolución de los ahorros de nafta y gasoil

En las fig. 18.1 y 18.2 se presentan los ahorros porcentuales que se obtienen en cada escenario comparado contra el consumo del escenario sin incorporación de vehículos eléctricos. En este cálculo se incluyó que dado que no todos los vehículos que se incorporan son completamente eléctricos, los mismos tienen un porcentaje de consumo de combustible de acuerdo a lo detallado en la tabla 18.3.

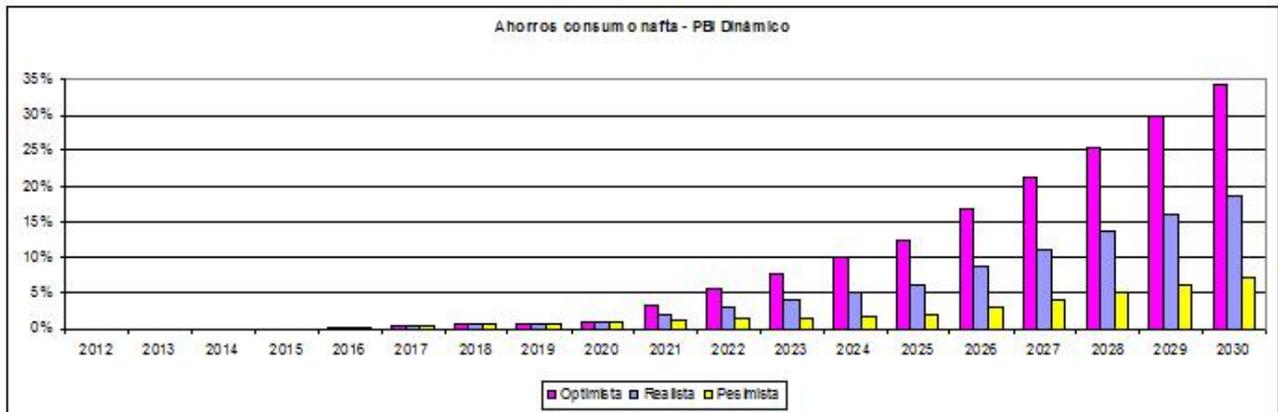


Figura 18.1: Reducción del consumo de nafta.

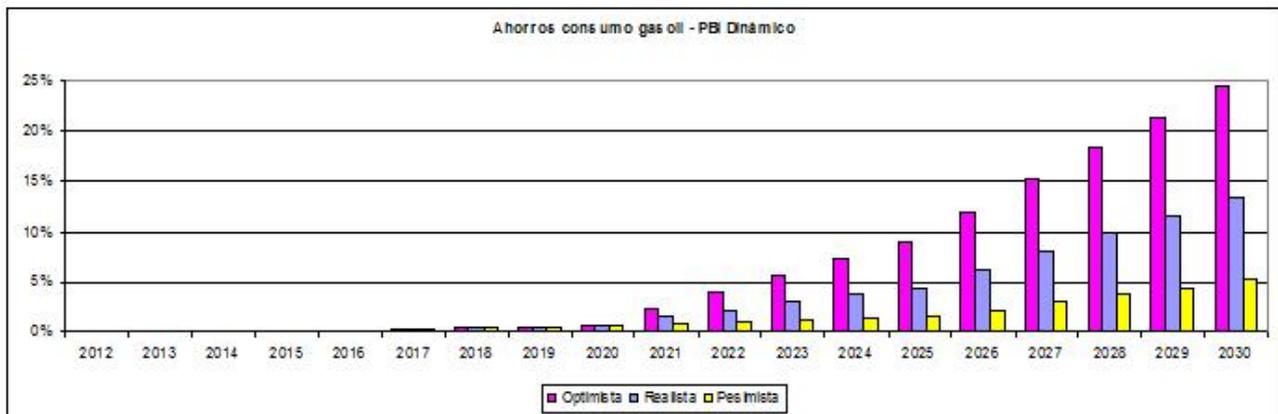


Figura 18.2: Reducción del consumo de gasoil.

Puede observarse que los ahorros llegan a casi un 35% en el caso del consumo de nafta y casi a un 25% en el caso del gasoil. Esto es consistente con que se asumió una menor sustitución de vehículos a gasoil por vehículos eléctricos. Es importante recordar que estos porcentajes de ahorro se han calculado no con respecto al consumo de combustibles del parque automotor total de Uruguay sino que están expresados con respecto a la evolución del consumo del total de vehículos de las categorías que se asumieron como con mayor probabilidad de ser sustituidos por vehículos eléctricos<sup>(2)</sup>.

<sup>(2)</sup>De acuerdo al capítulo “Caracterización y evolución del parque automotor” dichas categorías corresponden a automóviles de uso particular y transporte liviano. En el año 2006 esta porción del parque automotor representaba del orden del 80% del total de vehículos y tenía una participación del orden del 90% en el total de consumo de nafta y 27% en el total de consumo de gasoil

## 18.4. Evolución del consumo energético total

A partir de los resultados de consumo de nafta y gasoil obtenidos para cada uno de los escenarios considerados resulta de interés analizar el impacto de los ahorros registrados cuando se considera el consumo energético de esta porción del parque automotor y su impacto en el consumo de combustibles para suministrar la demanda de electricidad que considera la alteración que ocasionaría esta nueva fuente de demanda eléctrica.

Es así que a partir de las simulaciones del abastecimiento de la demanda para todos los escenarios seleccionados se analizó la composición del suministro de la demanda de energía eléctrica total y se determinó la cantidad de energía en miles de toneladas equivalentes de petróleo (ktep) que involucraría el suministro conjunto de la demanda de nafta, gasoil y electricidad.

En cada uno de los escenarios a futuro se asumió la misma estrategia de expansión del sistema de generación. La expansión a futuro se realizará exclusivamente a través de la incorporación de energía eólica y de ciclos combinados que utilizarán gas natural. Se prevé asimismo la incorporación de centrales de generación a partir de biomasa.

Al compararse la generación a partir de cada energético disponible, para el promedio de todas las crónicas, se observa que, como era de esperar, la generación promedio a partir de la energía eólica y la hidroelectricidad no difieren de un escenario a otro. La diferencia en composición del abastecimiento que surge de considerar la demanda de los vehículos eléctricos se suple a través de generación adicional a gas natural y biomasa y en muy menor medida, prácticamente despreciable, a partir de gasoil y fuel oil.

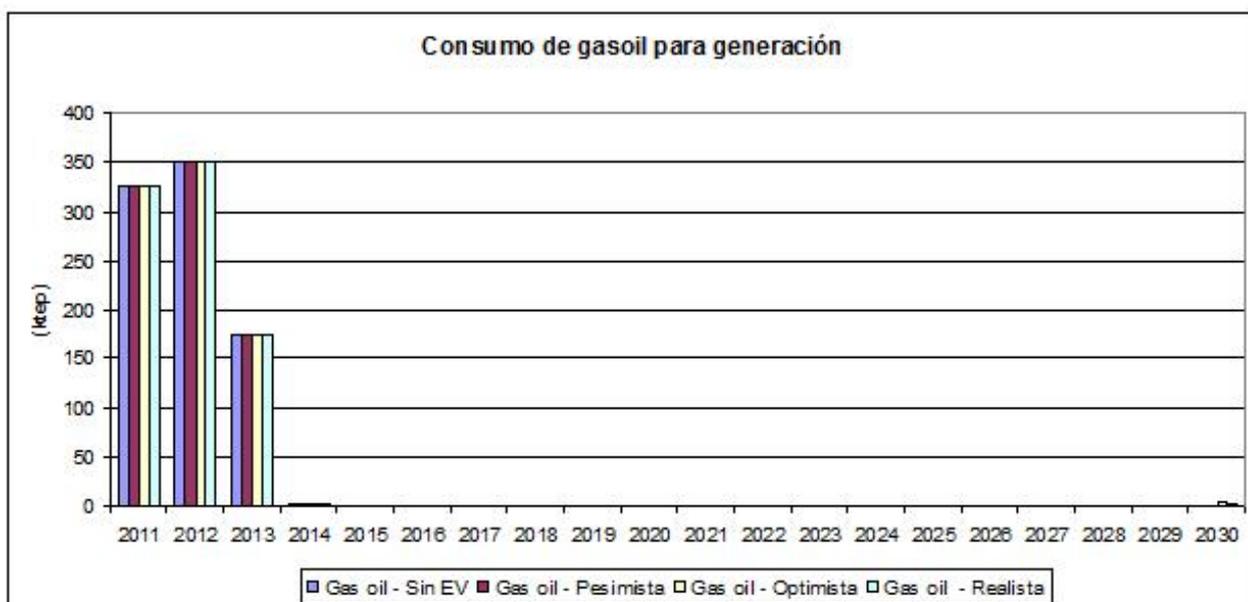


Figura 18.3: Consumo de gasoil para generar energía eléctrica.

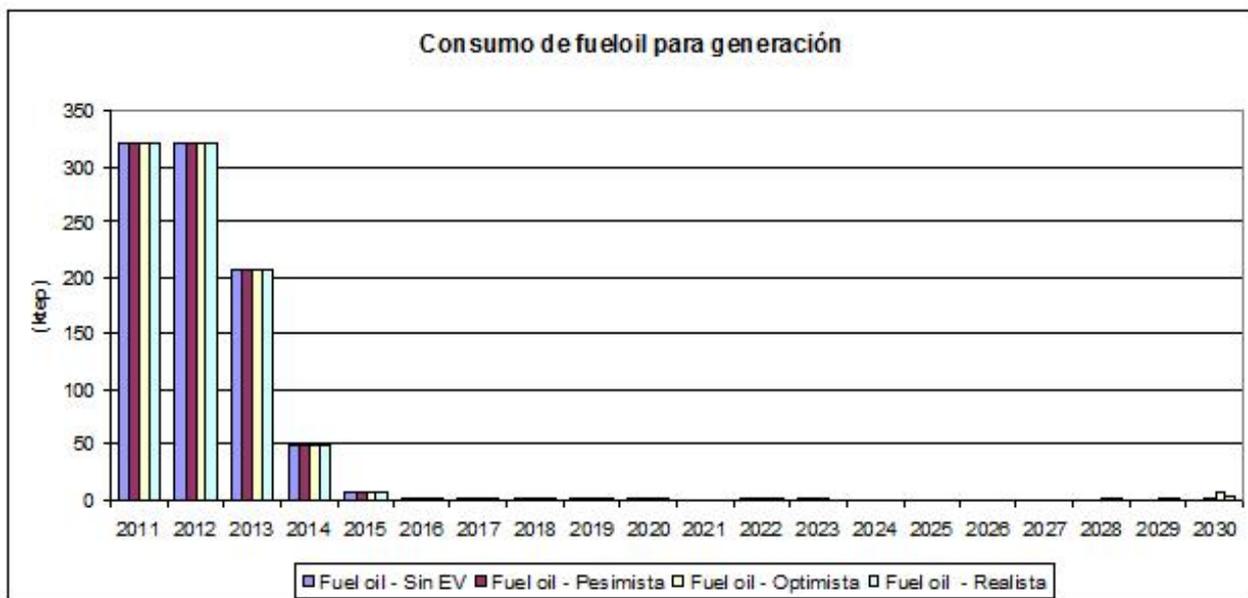


Figura 18.4: Consumo de fueloil para generar energía eléctrica.

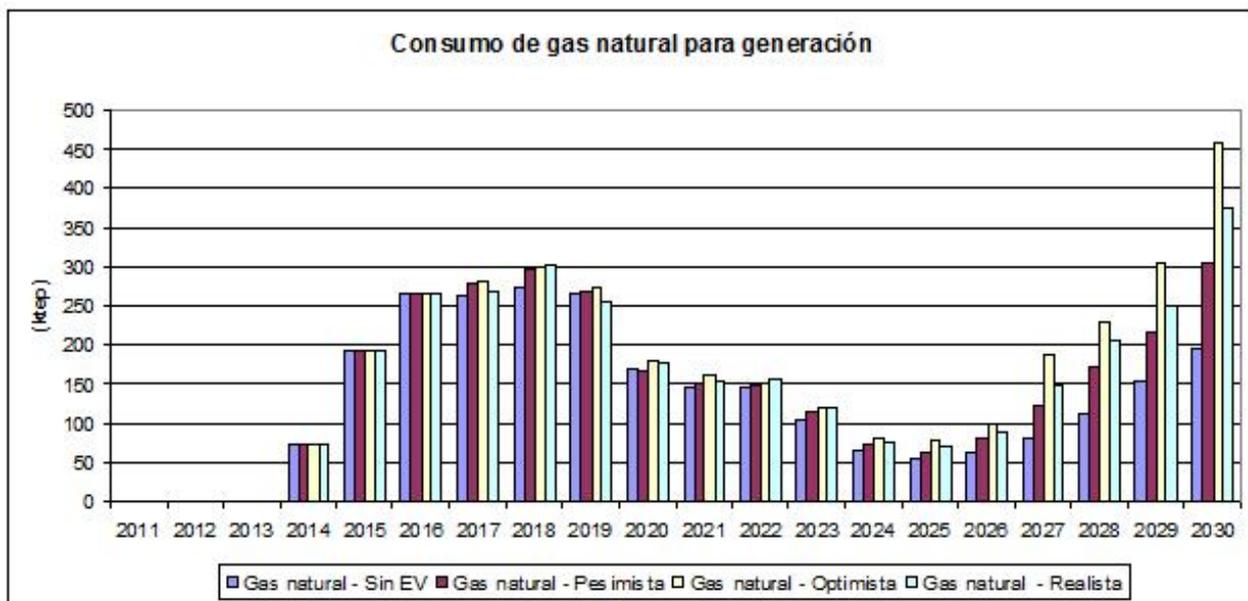


Figura 18.5: Consumo de gas natural para generar energía eléctrica.

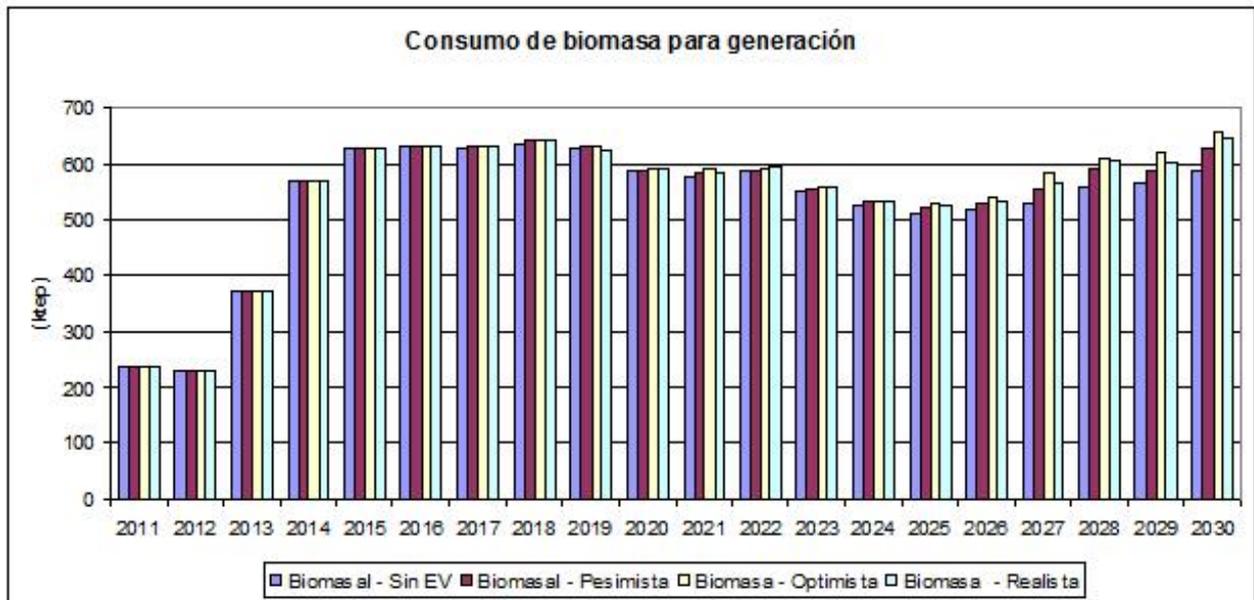


Figura 18.6: Consumo de biomasa para generar energía eléctrica.

Cabe notar que el gas natural se asume disponible recién a partir del año 2014. Por otro lado, la biomasa si bien tiene un costo asociado a su energía, se asume en su mayoría como autodespachable o con un costo variable menor al de las centrales a gas, por lo que es la fuente que se utiliza mayoritariamente una vez que se ha generado lo disponible a partir de la energía eólica e hidráulica, antes que el gas natural, que sería el energético a partir del cual se completaría el suministro de la demanda una vez que se encuentre disponible para el sistema. Esta configuración desplaza la generación a partir de fuel oil y gasoil por resultar menos económicas.

La evolución creciente, luego decreciente y finalmente creciente de la generación a partir de biomasa y gas natural que se observa se debe al escalonamiento modelado en cuanto a la expansión de generación a partir de energía eólica, que al incorporarse al sistema sustituye directamente generación a partir de gas y biomasa (ver fig. 18.7 para el escenario sin vehículos eléctricos, los otros escenarios presentan un comportamiento análogo).

Si bien la energía eléctrica obtenida a partir de biomasa representa siempre un entorno del 10 % del total de energía eléctrica demandada (nunca llega al 20 %), se puede observar que el bajo rendimiento del proceso de generación asociado a esta fuente hace que en realidad la energía asociada a la biomasa antes de su transformación en energía eléctrica sea superior a los otros energéticos considerados. Asimismo vale aquí la consideración que la biomasa constituye una fuente considerada primaria que se aprovecha directamente para la generación de electricidad, mientras que tanto el gasoil como el fueloil son combustibles secundarios que han surgido del refinamiento del petróleo, por lo que se están comparando energéticos de distinto grado de procesamiento.

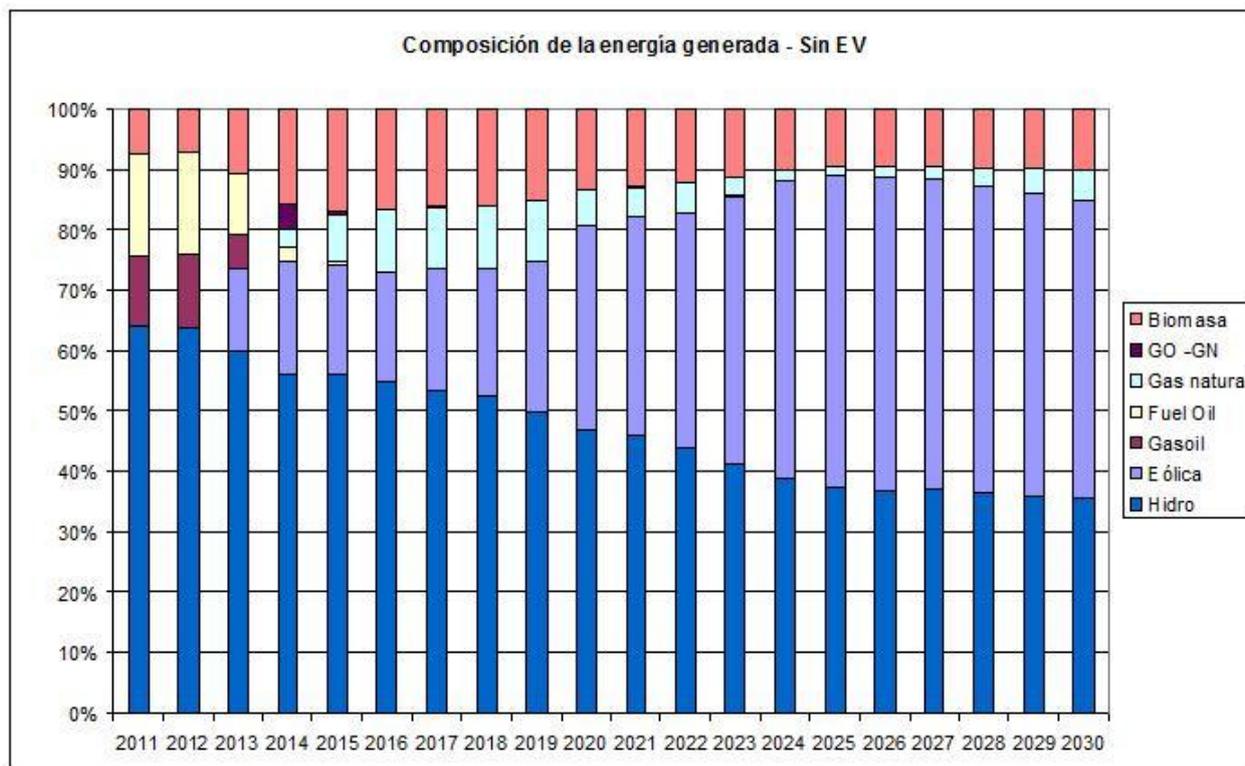


Figura 18.7: Composición del abastecimiento de la demanda de electricidad - escenario sin vehículos eléctricos.

En la fig. 18.8 se presenta la energía a partir de fuel oil, gasoil y gas natural que es necesaria para cubrir la demanda de electricidad y de combustibles para el parque vehicular objeto del estudio. En la demanda de energía eléctrica, para los escenarios *Pesimista*, *Optimista* y *Realista* se incluye la demanda de electricidad correspondiente a los vehículos eléctricos. En la fig. 18.9 se adiciona a la anterior, la energía proveniente de la biomasa utilizada para generar electricidad.

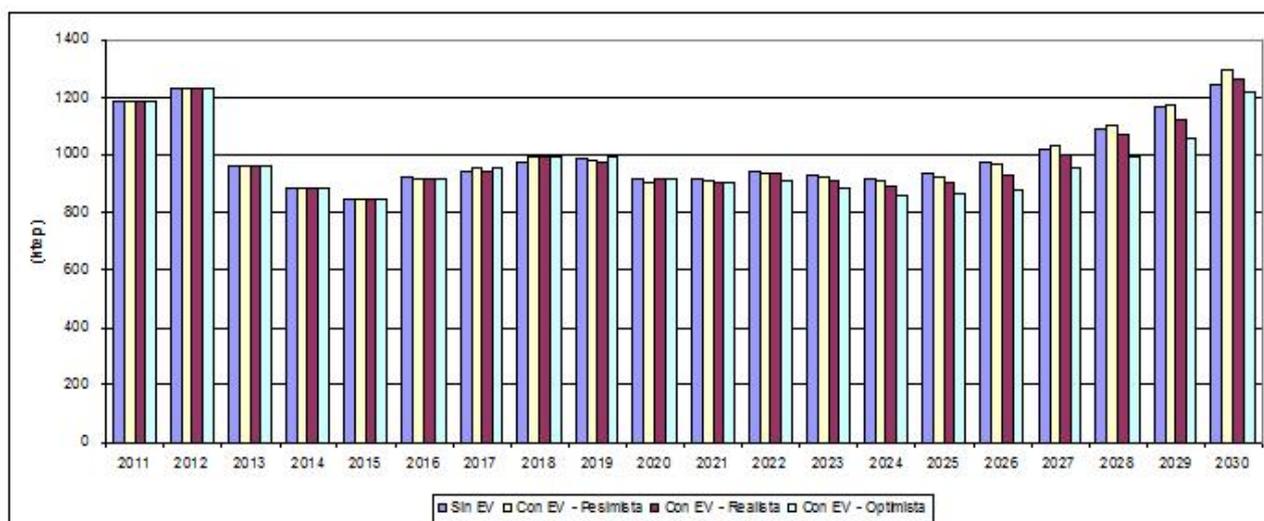


Figura 18.8: Energía de combustibles asociados al suministro de la demanda de energía eléctrica y parque vehicular considerado - fuel oil, gasoil y gas natural.

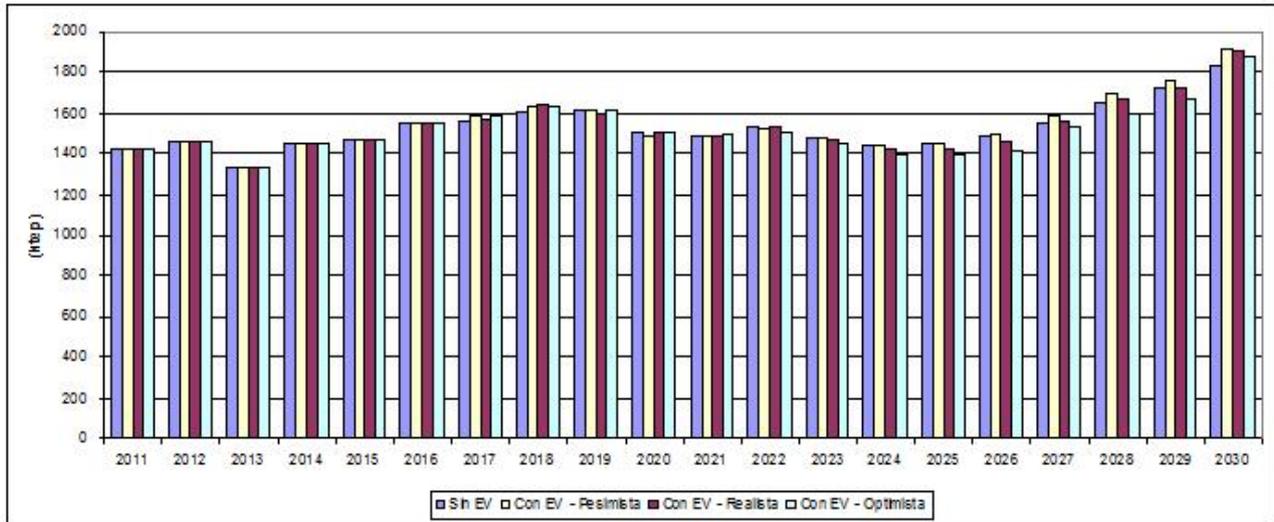


Figura 18.9: Energía de combustibles asociados al suministro de la demanda de energía eléctrica y parque vehicular considerado - fuel oil, gasoil, gas natural y biomasa.

En la fig. 18.10 se presenta la diferencia entre cada escenario con vehículos eléctricos y el escenario sin vehículos eléctricos, de la energía necesaria para suministrar la demanda eléctrica y de combustible para vehículos, expresada en forma porcentual con respecto a la energía necesaria en el escenario sin vehículos eléctricos. Se considera aquí la energía proveniente de fuel oil, gasoil y gas natural. La fig. 18.11 presenta la misma información pero adicionando en todos los casos la energía proveniente de la biomasa.

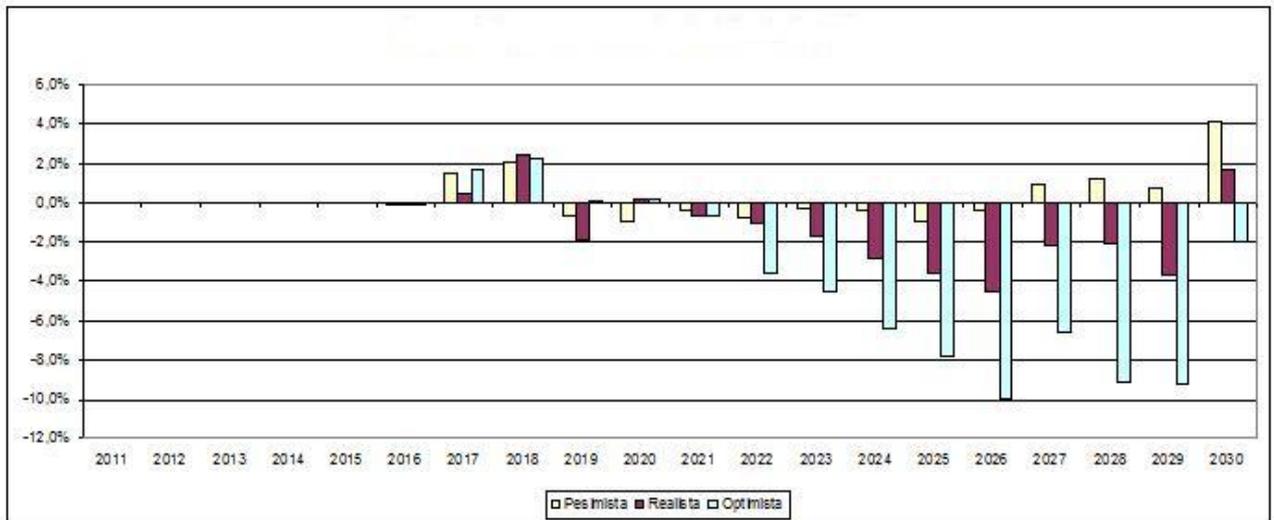


Figura 18.10: Ahorro de energía - fuel oil, gasoil y gas natural.

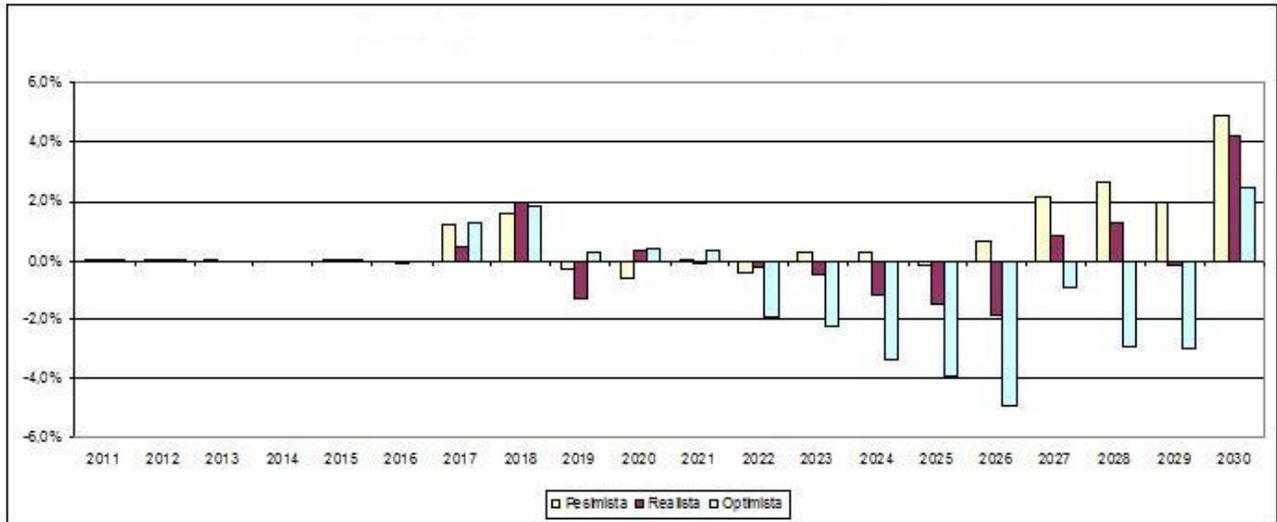


Figura 18.11: Ahorro de energía - fuel oil, gasoil, gas natural y biomasa.

Puede observarse que en todos los años, en el escenario *Optimista* se produce un ahorro neto de energía producida por el efecto de incorporar vehículos eléctricos, reducir el consumo de nafta y gasoil en el parque vehicular, y suministrar energía eléctrica para el transporte. Se consigue aquí un ahorro debido a que la energía necesaria para el transporte a través de los vehículos eléctricos se genera con tecnologías más eficientes, en este caso generación de energía eléctrica a gas natural, que la combustión en un motor de un vehículo convencional.

Se observa asimismo, que los ahorros disminuyen cuando se considera la energía proveniente de biomasa. Esto resulta lógico pues la eficiencia supuesta para la quema de la biomasa (26 %) es comparable con la que se obtiene en un vehículo con motor a combustión interna que funciona a nafta.

En el escenario *Realista* los ahorros disminuyen y hasta se produce un aumento neto en el consumo de energía en algunos años y sobre todo cuando se considera la energía de la biomasa, mientras que en el escenario *Pesimista* prácticamente no se producen ahorros.

Estas tendencias podrían indicar que si se lograran escenarios más agresivos en cuanto a la sustitución de vehículos eléctricos se estaría mejorando la eficiencia en el consumo de energía en general. Por otra parte, el cambio de los resultados al considerar o no la biomasa hace que quede en evidencia que la sustitución de vehículos convencionales por vehículos eléctricos aporta a la reducción de consumo energético en general siempre que se esté generando la energía eléctrica necesaria a partir de tecnologías más eficientes de generación, como podrían ser los ciclos combinados.



# Capítulo 19

## Impacto en la expansión y eficiencia de las redes por la utilización de la capacidad de almacenamiento y generación distribuida de los autos eléctricos

### 19.1. Introducción

Cuando los vehículos eléctricos toman carga del sistema donde se conectan, para cargar sus baterías, se comportan como una demanda adicional, imponiendo a la red los costos característicos de un consumidor, expresados normalmente en la forma de peajes, que se calculan mediante las metodologías usuales de asignación [89]. Sin embargo, tal como se describió en capítulos anteriores, en determinadas circunstancias los vehículos pueden también entregar energía a la red, lo cual representa una capacidad de generación distribuida, que puede ser utilizada para aliviar las redes, en particular durante las horas pico del sistema. Desde el punto de vista de la expansión y eficiencia de las redes, los efectos de la generación distribuida son principalmente dos, el impacto en las pérdidas y el impacto en el uso de la red, aunque también un adecuado desarrollo de la misma permite lograr impactos positivos en la confiabilidad y regulación de tensión [91]. A continuación se muestra con ejemplos sencillos, el impacto de la generación distribuida (GD) en las pérdidas y en la utilización de la red de distribución.

### 19.2. Impacto de la generación distribuida en las pérdidas de la red

Veamos de qué forma la presencia de la GD modifica las pérdidas en la red de distribución donde se encuentra conectada. Consideremos para ello, a forma de ejemplo, la red de distribución radial de la fig. 19.1 [92].

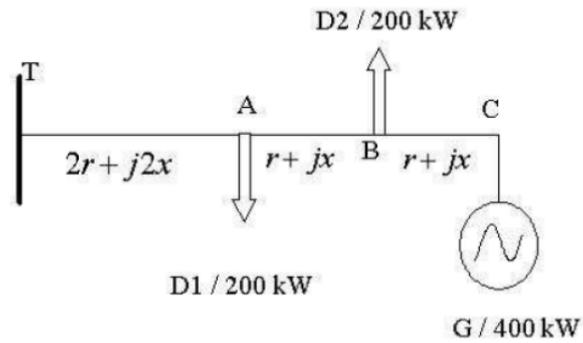


Figura 19.1: Ejemplo de red de distribución radial con GD.

La red se encuentra alimentada desde una subestación en el punto T. Existen dos cargas (D1 y D2) conectadas en los puntos A y B, y un generador distribuido (G) conectado en el punto C. Las potencias demandadas por D1 y D2 son constantes e iguales a 200 kW. G tiene una capacidad de generación de 400 kW. Asumiremos que la distancia entre el punto A y el punto B es la misma que entre B y C y que además la distancia entre T y A es el doble que entre A y B. Las impedancias de cada tramo de la red son las indicadas en la figura. Para simplificar los cálculos, haremos las siguientes hipótesis:

- Los módulos las tensiones en todas las barras son iguales a 1 p.u.
- Las caídas de tensión son despreciables
- Las pérdidas son despreciadas para el cálculo de los flujos
- $x \gg r$

Tomaremos como potencia base 100 kW y un valor de  $r = 0,001 p.u.$  Con las hipótesis realizadas es sencillo demostrar que las pérdidas en una línea ( $l$ ) pueden ser calculadas multiplicando el valor de la resistencia ( $r$ ) por el cuadrado del flujo de potencia activa por la línea ( $p$ ):

$$l = r \cdot p^2 \text{ (con todos los valores en p.u.)}$$

Para el caso de la fig. 19.1 con el generador entregando 400 kW, resultan los flujos de potencia activa indicados en la fig. 19.2.

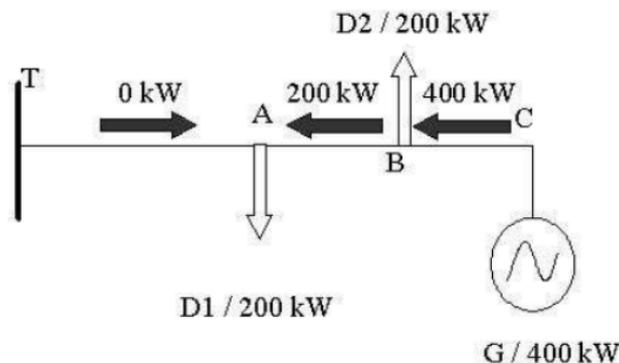


Figura 19.2: Flujos con el generador G inyectando potencia a la red.

Para este caso las pérdidas totales en la red resultan:  $l = 0,001 \cdot (2^2 + 4^2) = 0,02p.u.$  , es decir 2 kW. Si ahora consideramos que el generador G no está presente en la red, resultan los flujos de la fig. 19.3.

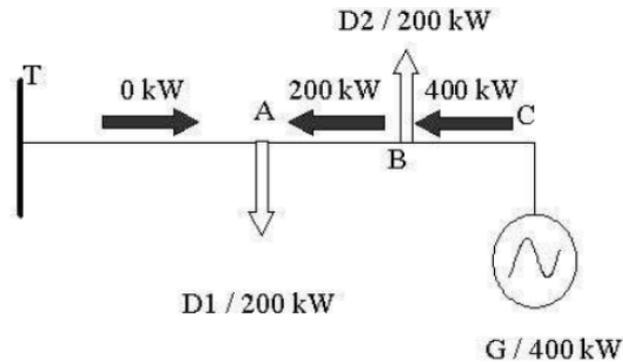


Figura 19.3: Flujos con el generador G desconectado.

Para este caso, las pérdidas en la red resultan:  $l = 4^2 \cdot (2 \cdot 0,001) + 2^2 \cdot 0,001 = 0,036p.u.$ , es decir 3.6 kW.

En conclusión podemos decir entonces que para el ejemplo particular de esta red de distribución, la presencia del generador G produce una reducción en las pérdidas de 3.6 kW a 2 kW, o sea 44 %.

Es importante observar, sin embargo, que para el caso del generador conectado existe un valor de potencia inyectada para el cual las pérdidas comienzan a ser mayores que en el caso en que no existe generador o en que la inyección de potencia de éste es nula. Por otra parte, además, existe un valor de potencia inyectada para el cual las pérdidas son mínimas. Este valor de potencia se puede calcular y está en el orden de los 250 kW, siendo las pérdidas en la red para este caso un poco mayores a 1 kW. Por otra parte, la generación dentro de la red de distribución disminuye los flujos en la red de transmisión que la alimenta y por lo tanto las pérdidas en esta.

Como puede verse en el ejemplo simple presentado anteriormente, el impacto de la GD en las pérdidas de la red puede ser positivo (fortaleza) o negativo (debilidad) dependiendo de los flujos iniciales en la red, de la ubicación de la GD y de la cantidad de potencia inyectada por ésta. En consecuencia, si se quiere obtener un impacto positivo deberán establecerse las señales tarifarias adecuadas que reconozcan el mismo en forma de costo (si la GD aumenta las pérdidas) o de beneficio (si la GD disminuye las pérdidas) [91]. En particular, para el caso de los autos híbridos y eléctricos, que toman y pueden entregar energía a la red, las señales deben ser tales que la carga de las baterías se realice en las horas de valle del sistema, y la eventual inyección de energía a la red en las horas de pico.

### 19.3. Impacto de la generación distribuida en el uso de la red

Utilizando el mismo ejemplo presentado en la sección anterior puede observarse que la GD altera los flujos en la red y por lo tanto el uso de la misma, entendiéndose por tal al cociente

entre el flujo real y la capacidad de la línea o cable. En efecto, si se mira lo que ocurre con el flujo de potencia en el tramo TA, se observa que antes de la conexión del generador, el flujo era de 400 kW, mientras que con el generador entregando 400 kW el flujo en TA desciende a 0 kW. Distintos valores en TA pueden obtenerse según la potencia que entregue el generador, pudiendo inclusive superar los 400 kW si la potencia entregada es lo suficientemente elevada (mayor a 800 kW). Nuevamente, el impacto en la red provocado por la GD podrá ser positivo (disminución en el uso) o negativo (aumento en el uso) dependiendo de los flujos iniciales en la red, de la ubicación de la GD y de la cantidad de potencia inyectada por ésta.

Análogamente a lo concluido en el caso anterior para las pérdidas, si se quiere obtener un impacto positivo (fortaleza) deberán establecerse las señales tarifarias adecuadas que reconozcan el mismo en forma de costo (si la GD aumenta el uso de la red) o de beneficio (si la GD disminuye el uso de la red) [91]. Para los autos híbridos y eléctricos que se conectan a la red, esto se traduce nuevamente en proporcionar señales adecuadas al tiempo de uso para la inyección o consumo de energía de la red.

## 19.4. Estimación del impacto (costos) para los escenarios de penetración simulados

Tal como se deduce de los ejemplos anteriores, el impacto de la conexión a la red de un vehículo híbrido o eléctrico depende del lugar particular en el cual se conecte y del momento particular en el cual tome o inyecte energía. Por lo tanto, un estudio del impacto en la red debería partir de ciertas hipótesis de distribución y localización geográfica de la conexión de los autos, así como del conocimiento en detalle del sistema eléctrico de distribución en dichas localizaciones.

A los efectos de este primer trabajo en el tema, se pretende estimar un impacto a nivel promedio en el sistema eléctrico uruguayo, por lo que se utilizarán los costos de red asociados a la demanda de un MW adicional en la hora pico del sistema. Para ello se utilizarán los resultados obtenidos en [90], en el cual se determina un valor a partir de dos metodologías distintas, una basada en el estudio de inversiones pasadas asociadas al incremento de la demanda pico en la red, y la otra utilizando los valores de peajes vigentes. Ambas metodologías, llevan a valores similares (38.5 USD/kW-mes y 35.25 USD/kW-mes, respectivamente), por lo cual se utilizará para este trabajo el valor promedio entre ambos, 36.9 USD/kW-mes.

En la tabla siguiente se muestra un resumen de los escenarios de estudio, ya presentados en los capítulos anteriores, en donde se indican la potencia demandada y/o consumida por el parque automotor eléctrico para diferentes grados de penetración estimada de vehículos para 2020, 2025 y 2030, en tres situaciones particulares: optimista (alta penetración), realista (penetración media) y pesimista (baja penetración). A su vez se distinguen tres casos:

- Sin regulación: No admite entrega de energía hacia la red, el usuario del vehículo realiza la carga cuando desea (mayormente hay carga al regreso de la jornada laboral).
- Con regulación: No admite entrega de energía hacia la red, pero el usuario del vehículo no puede cargar en la hora pico de demanda.

- V2G (Vehicle 2 grid): Es como el escenario “Con Regulación”, pero admitiendo entrega de energía a la red, la cual se realiza en las horas pico de demanda.

Escenario	Tipo	2020		2025		2030		HORA	
		MW Dem.	MW Inyec.	MW Dem.	MW Inyec.	MW Dem.	MW Inyec.	Demanda	Inyección
Sin Regulación	Optimista	-30,82	0	-226,46	0	-804	0	Hora 19-20	
	Realista	-22,78	0	-166,16	0	-589,6	0	Hora 19-20	
	Pesimista	-16,08	0	-113,9	0	-402	0	Hora 19-20	
Con Regulación	Optimista	-11,96	0	-87,88	0	-312	0	Hora 1 - 2 -3	
	Realista	-8,84	0	-64,48	0	-228,8	0	Hora 1 - 2 -3	
	Pesimista	-6,24	0	-44,2	0	-156	0	Hora 1 - 2 -3	
V2G	Optimista	-29,67	43,47	-218,01	319,41	-774	1134	Hora 1 - 2 -3	Hora 19-20
	Realista	-21,93	32,13	-159,96	234,36	-567,6	831,6	Hora 1 - 2 -3	Hora 19-20
	Pesimista	-6,45	9,45	-109,65	160,65	-387	567	Hora 1 - 2 -3	Hora 19-20

Tabla 19.1: Escenarios estudiados. Potencias demandadas e inyectadas en MW.

Para el escenario “Con Regulación”, la carga de los vehículos se produce en las horas fuera de pico y por lo tanto el impacto en las redes es en términos generales neutro.

Para el escenario “Sin regulación”, la penetración de los vehículos eléctricos produce costos adicionales en el sistema que se pueden estimar en base al costo de red asociado a un MW adicional. En la siguiente tabla se muestran los costos anuales, en cada uno de los casos sin regulación. Se observa que para el escenario medio (realista) los costos adicionales son del orden de 10 MMUSD en 2020, 70 MMUSD en 2025 y 260 MMUSD en 2030.

Escenario	Tipo	2020		2025		2030	
		MW Dem	MW Inyec.	MW Dem	MW Inyec.	MW Dem	MW Inyec.
Sin Regulación	Optimista	13.647.096	0	100.276.488	0	356.011.200	0
	Realista	10.086.984	0	73.575.648	0	261.074.880	0
	Pesimista	7.120.224	0	50.434.920	0	178.005.600	0
V2G	Optimista	0	-19.248.516	0	-141.434.748	0	-502.135.200
	Realista	0	-14.227.164	0	-103.774.608	0	-368.232.480
	Pesimista	0	-4.184.460	0	-71.135.820	0	-251.067.600

Tabla 19.2: Costos y ahorros anuales en USD.

Para el escenario V2G, la carga de los vehículos se produce en las horas fuera de pico, no imponiendo costos adicionales en la red. Sin embargo, los vehículos entregan su carga remanente de baterías en las horas de pico, actuando como una capacidad distribuida que disminuye la necesidad de capacidad en los circuitos, generando ahorros que se traducen en postergación de inversiones. Para el caso medio (realista), se observan ahorros del orden de 14 MMUSD en 2020, de 100 MMUSD para 2025 y 370 MMUSD para 2030.



# Capítulo 20

## Impacto en la calidad del servicio eléctrico ante la proliferación de autos eléctricos con capacidad de generación distribuida

### 20.1. Introducción

La incorporación de autos eléctricos al parque automotor puede ocasionar diversos efectos en el sistema eléctrico al tratarse de nuevas cargas que aparecen en forma distribuida en la red de baja tensión.

Entre estos efectos se pueden mencionar: el deterioro de la calidad del suministro eléctrico debido al aumento de la presencia de armónicos de corriente ocasionados por la conexión de cargas no lineales a la red como son los cargadores necesarios para cargar las baterías de los vehículos, el registro de huecos de tensión ante la conexión de los cargadores de los vehículos o cuando los mismos se conecten para inyectar energía a la red en el caso que sea posible, la variación del perfil de tensiones de la red de Distribución, entre otros.

En este capítulo se presenta un estudio sobre los efectos que podría ocasionar la incorporación masiva de vehículos eléctricos en determinadas topologías de circuitos de baja tensión de la red de Distribución de Montevideo, en particular, la afectación del nivel de tensión de la red así como el nivel de contaminación armónica que se podría registrar.

Para evaluar dichos efectos, se seleccionaron circuitos de tres barrios de la ciudad de Montevideo donde, dado el nivel económico de su población, se presupone que serán las zonas de la ciudad donde se observará una mayor penetración de este tipo de tecnología de vehículos. Los barrios seleccionados fueron Pocitos, Punta Carretas y Carrasco.

Se modelaron distintos escenarios de incorporación y para cada uno de ellos se evaluó el nivel de contenido armónico de la red y su compatibilidad con las normas aplicables [96], así como la cargabilidad del circuito y la desviación de tensión que se ocasionaría en la red.

Asimismo, de acuerdo a las características de cargadores típicos se estudió la posibilidad de conectar dichos equipos dependiendo de la potencia contratada de los usuarios y del nivel de

cortocircuito de la red a partir de la cual sean alimentados, en base a la resolución ENRE 99/97 [98].

## **20.2. Modelado de la red de distribución de baja tensión con alta penetración de vehículos eléctricos**

### **20.2.1. Circuito eléctrico**

Para el modelado y la determinación de los efectos sobre la red de baja tensión de la incorporación de vehículos eléctricos se utilizó el software PSIM versión 9.0.

En dicho software, se modeló la red trifásica de baja tensión partiendo de los transformadores de media a baja tensión. La red aguas arriba el transformador se representó tomando en cuenta la potencia de cortocircuito disponible en dicho punto.

Los usuarios se representaron como cargas lineales compuestas por una serie de resistencia e inductancia.

### **20.2.2. Cargador de baterías**

#### **Modelo del cargador**

El adecuado modelado del cargador de baterías constituye un elemento clave en la determinación del efecto sobre la calidad de energía de la incorporación de vehículos eléctrico en forma masiva a la red.

En la determinación del modelado, se debe tener en cuenta la diversidad entre las distintas fuentes de generación de armónicos, pues de otra forma, se pueden sobreestimar las consecuencias producidas por el conjunto de cargadores funcionando simultáneamente.

Para este estudio se adoptó el modelado que surge del estudio realizado por W.M. Grady [95]. En dicho estudio se determina un modelo aplicable para un cargador de baterías que se conectará a una red con varios otros cargadores funcionando en paralelo.

Para esta determinación se parte de los registros de las corrientes armónicas de un cargador real. Dado que la potencia que consume el cargador varía durante el proceso de carga de la misma, a partir de los datos iniciales se determina el espectro armónico para distintas potencias del cargador.

Otros elementos a tomar en consideración al evaluar el impacto de varios cargadores funcionando en paralelo en una red de distribución, son la determinación o consideración del estado inicial de carga de la batería y el hecho que no todos los usuarios comenzarán a cargar sus vehículos en el mismo instante. Debido a estos elementos, al tener varios usuarios del sistema de distribución con automóviles eléctricos, los cargadores asociados presentarán distinta configuración de carga en un instante dado. Es por ello que se modela estos elementos como variables aleatorias con funciones de densidad de probabilidad dadas. En particular, el estado inicial de carga de cada batería asociada a cada cargador se modela como una variable aleatoria con una densidad de

probabilidad asociada que toma en consideración la distancia media típica recorrida por los vehículos y el rango de autonomía que proveen las baterías.

En el estudio referido, a partir del análisis de la potencia consumida por un único cargador, asumiendo que cada cargador se opera en forma independiente, se determina el contenido armónico ocasionado por un conjunto de cargadores, tomando en cuenta las variables detalladas anteriormente. Los resultados analíticos que se obtienen se corroboran a través de un algoritmo computacional que utiliza el método Monte Carlo para determinar la potencia consumida por los cargadores seleccionando aleatoriamente el comienzo de la carga de la batería y el estado inicial de carga de la batería. Como resultado se observa que, distribuyendo uniformemente durante un período de ocho horas el tiempo de comienzo de la carga, se obtiene que los valores medios y la varianza de la corriente consumida por el conjunto de cargadores aumenta desde cero hasta un valor máximo en un tiempo menor o igual al tiempo que le lleva llegar a ese máximo a un cargador operando sobre una batería completamente descargada. La corriente consumida por el conjunto de cargadores queda en ese valor máximo en forma constante, formando una meseta, hasta luego disminuir en forma monótona hacia cero (fig.s 20.1 y 20.2 - adaptado de [95]). Tanto la solución analítica como los cálculos empleando el método Monte Carlo muestran que la potencia media y las corrientes armónicas medias convergen a un mismo valor al considerar un número de cargadores mayor o igual a 7.

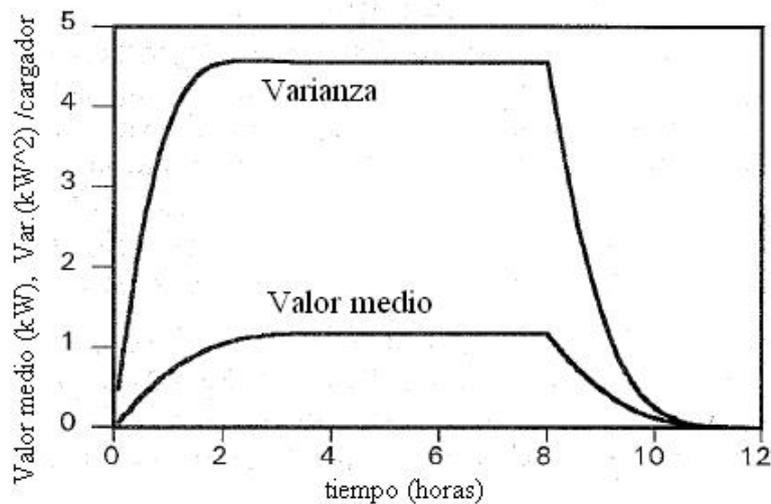


Figura 20.1: Valor medio y varianza de la potencia consumida con respecto al tiempo .

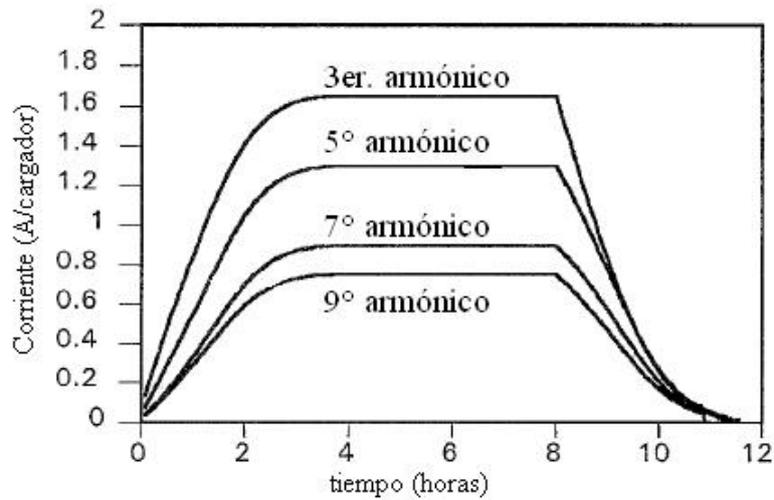


Figura 20.2: Valor medio de la corriente para los armónicos 3, 5, 7 y 9.

Se determina entonces el comportamiento estadístico, del punto de vista de las corrientes armónicas consumidas, de un grupo de cargadores y en particular las corrientes armónicas consumidas en el período de meseta (tabla 20.1).

Orden del armónico	Valor esperado	
	Corriente (A/cargador)	Desfasaje
1	100	-26
3	31	-52
5	25	-94
7	17	-67
9	17	-66
11	9	-67
13	5	-46

Tabla 20.1: Valores estadísticos de las corrientes armónicas durante el período constante.

Este resultado permite independizarse de supuestos sobre el tiempo de comienzo de la carga y el estado inicial de la batería, al asumir que, independientemente de estas variables, en algún momento durante el período de carga el comportamiento estadístico será el presentado en la fig. 20.3, el cual se mantiene durante un tiempo comparable al período de carga de la batería. Estos valores estadísticos de las corrientes armónicas consumidas en el período de meseta se utilizarán entonces para modelar cada uno de los cargadores en el estudio para ponderar el efecto en la red de un grupo de cargadores operando conectados simultáneamente a la red de baja tensión.

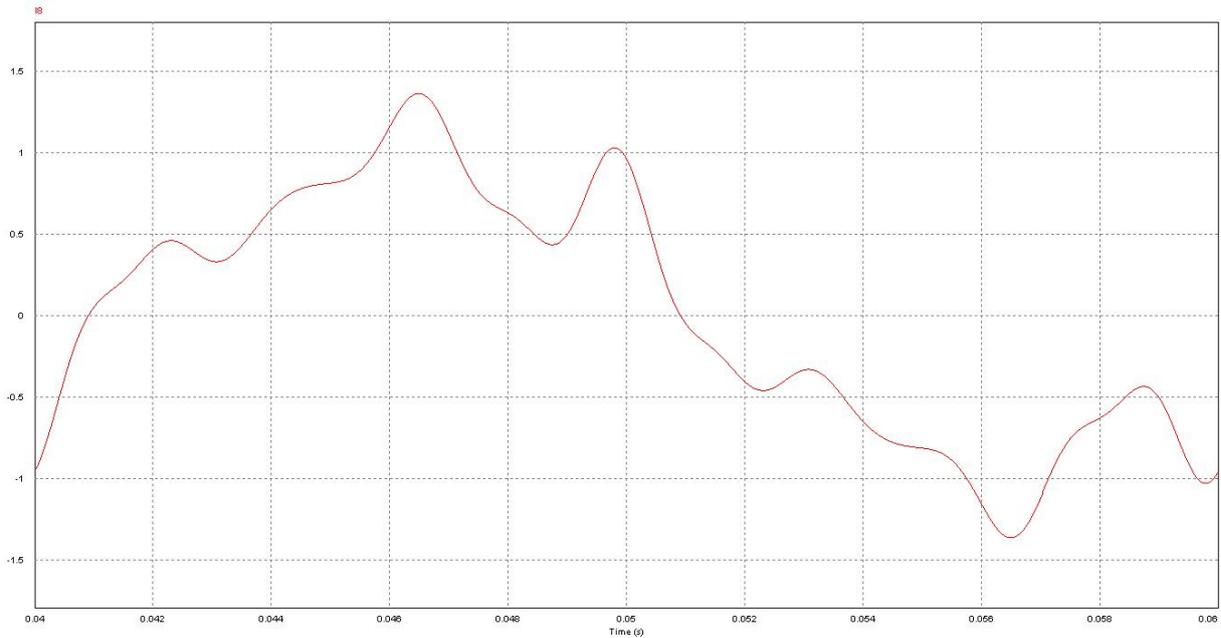


Figura 20.3: Forma de onda de la corriente consumida por el cargador en p.u.

### Modalidades de carga

A los efectos de este estudio se supuso que los vehículos que mayoritariamente se incorporarían al parque automotor serían los más pequeños en términos de baterías debido a que se asume que el costo de los mismos será más accesible. Es por ello que se asumió que los vehículos tendrían una batería con una capacidad de 16 kWh.

La carga de la batería puede ser rápida o lenta, dependiendo de las características de la misma. En este estudio se analizaron tres tipos de carga, la carga baja o lenta, la carga media y la carga rápida. Evidentemente el cargador requerido para cada uno de los tipos de carga es diferente pero se asume que mantiene el contenido armónico relativo presentado en 20.2.2.

Para la carga lenta se asume que la potencia máxima consumida por el cargador es de 2.4 kW y que la batería se carga completamente, partiendo de un estado de total descarga, en un tiempo de seis horas. Para la carga media, la potencia máxima consumida por el cargador es de 3.6 kW y la batería llega a una carga completa en 4 horas. Por último, para la carga rápida la potencia máxima consumida por el cargador es de 11.4 kW y la batería completa se carga en 1 hora.

Del punto de vista del modelo adoptado para el programa de simulación, los cargadores para los vehículos se modelaron como fuentes de corriente para cada una de las componentes armónicas conectadas en paralelo.

## 20.3. Circuitos y escenarios seleccionados

### 20.3.1. Circuitos estudiados

De acuerdo a los escenarios previstos a nivel país para la incorporación de vehículos eléctricos al parque vehicular nacional, en las hipótesis más optimistas el porcentaje de participación de estos vehículos con respecto al total llega a un 33 % al año 2030.

Si bien en esta proyección no se discriminaron zonas con mayores porcentajes de incorporación con respecto a otras, es válido suponer que la sustitución por vehículos eléctricos será mayor en las zonas urbanas que presentan mayor poder adquisitivo. Es así que para realizar el estudio del impacto en redes de distribución de la incorporación de vehículos eléctricos, se seleccionaron circuitos de baja tensión típicos de las zonas de Pocitos, Punta Carretas y Carrasco.

En las fig. 20.4, 20.5 y 20.6 se presenta un esquema de los circuitos modelados en estas zonas, basados en tendidos reales de la red de distribución de baja tensión de UTE.

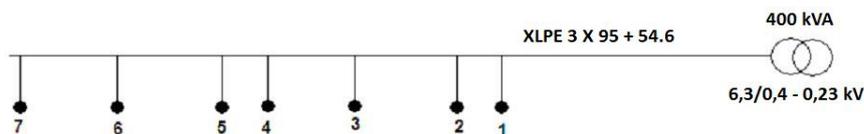


Figura 20.4: Esquema del circuito de Carrasco.

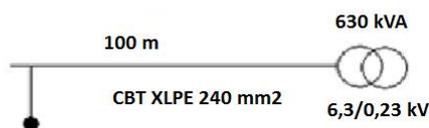


Figura 20.5: Esquema del circuito de Pocitos.

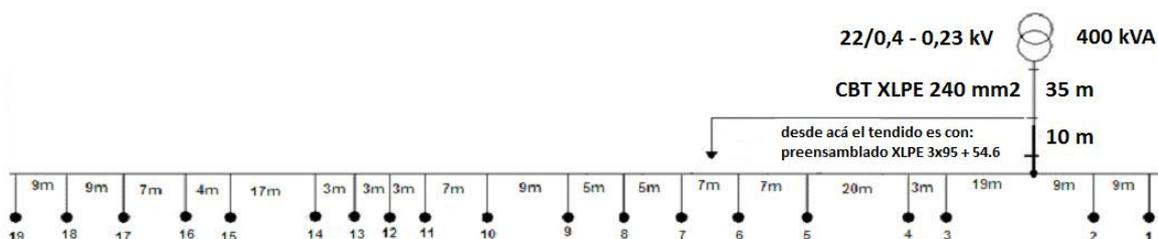


Figura 20.6: Esquema del circuito de Punta Carretas.

En los tres casos se modeló la red de un circuito de baja tensión a partir de la salida del transformador de media a baja tensión. En el caso de Carrasco se trata de una red puramente aérea. En el caso de Pocitos se trata de una red subterránea con cable que alimenta directamente un edificio de apartamentos y en el caso de Punta Carretas se trata de una red que sale en forma subterránea por cable de la subestación y luego pasa a una red aérea de la que se alimentan usuarios individuales y agrupamientos de algunos apartamentos.

Los datos de la red considerada para cada uno de los circuitos así como los usuarios modelados se detallan en las tablas 20.2 y 20.3.

	Carrasco	Pocitos	Punta Carretas
<b>Potencia de cortocircuito (kVA)</b>	48	44	170
<b>Datos del transformador</b>			
S (kVA)	400	630	400
V1 (kV)	6,3	6,3	22
V2 (kV)	0,4	0,23	0,4
P <sub>cu</sub> (W)	4600	6500	4600
U <sub>k</sub> (%)	4	4	4
<b>Datos de los conductores</b>	<b>R (ohm/km)</b>	<b>X (ohm/km)</b>	<b>In (A)</b>
Cable CBT XLPE 240	0,125	0,139	430
Línea XLPE 3 x 95 + 54.6	0,32	0,084	230

Tabla 20.2: Datos de la red, transformadores y conductores.

CARRASCO			POCITOS			PUNTA CARRETAS			
Usuario	Potencia (kW)	Tipo de suministro	Usuario	Potencia (kW)	Tipo de Suministro	Usuario	Potencia (kW)		Tipo de suministro
1	6,6	MONOFÁSICO	1	2,2	MONOFÁSICO	1	5,5		MONOFÁSICO
2	6,6	TRIFÁSICO	2	3,8	TRIFÁSICO	2	9,2		MONOFÁSICO
3	6,5	TRIFÁSICO	3	2,2	MONOFÁSICO	3	15		TRIFÁSICO
4	5	TRIFÁSICO	4	4,6	MONOFÁSICO	4	1,32		MONOFÁSICO
5	12	TRIFÁSICO	5	3,7	TRIFÁSICO	5	2,2		MONOFÁSICO
6	6	TRIFÁSICO	6	3	TRIFÁSICO	6	2,2		MONOFÁSICO
7	30	TRIFÁSICO	7	3	TRIFÁSICO	7	2,8		MONOFÁSICO
			8	3	TRIFÁSICO		2,3		MONOFÁSICO
			9	3	MONOFÁSICO		2,2		MONOFÁSICO
			10	3	TRIFÁSICO	8	2,2	Apto	MONOFÁSICO
			11	3	TRIFÁSICO	9	5,5		MONOFÁSICO
			12	3	TRIFÁSICO		8,8		MONOFÁSICO
			13	3	TRIFÁSICO		6,6		MONOFÁSICO
			14	3	TRIFÁSICO	10	4,4	Apto	MONOFÁSICO
			15	6	TRIFÁSICO	11	2,25		MONOFÁSICO
			16	3	TRIFÁSICO	12	5,5		MONOFÁSICO
			17	3	TRIFÁSICO	13	7,6		TRIFÁSICO
			18	3	TRIFÁSICO	14	5,5		MONOFÁSICO
			19	3	TRIFÁSICO	15	2,2		MONOFÁSICO
			20	3	TRIFÁSICO	16	2,2		MONOFÁSICO
			21	3	TRIFÁSICO		3,3		MONOFÁSICO
			22	3	MONOFÁSICO	17	7,4	Apto	MONOFÁSICO
			23	3	TRIFÁSICO	18	6,6		MONOFÁSICO
			24	5,7	TRIFÁSICO	19	6,6		MONOFÁSICO
			25	3	TRIFÁSICO				
			26	3	TRIFÁSICO				
			27	3	TRIFÁSICO				
			28	5,35	TRIFÁSICO				
			29	3	TRIFÁSICO				
			30	9	TRIFÁSICO				
			31	3	TRIFÁSICO				
			32	6	TRIFÁSICO				
			33	3	TRIFÁSICO				
			34	3	TRIFÁSICO				
			35	3	TRIFÁSICO				
			36	6	TRIFÁSICO				
			37	3	TRIFÁSICO				
			38	3	TRIFÁSICO				
			39	3	TRIFÁSICO				
			40	3	TRIFÁSICO				
			41	3	TRIFÁSICO				

Tabla 20.3: Datos de los usuarios por circuito.

Como se mencionó anteriormente, a partir de estos datos se modeló a través de la herramienta PSIM 9.0 el circuito completo para cada caso, a partir del transformador y considerando la potencia de cortocircuito en la subestación. En la fig. 20.7 se observa el circuito modelado para el caso de Punta Carretas. Las cargas de los usuarios se modelaron como resistencias y reactancias en serie. No se asumió ningún nivel de contaminación armónica en las cargas de los usuarios previo a la incorporación de los cargadores correspondientes a los autos eléctricos. Se asumió que la distribución de usuarios por fase se realiza de la forma más equilibrada posible.

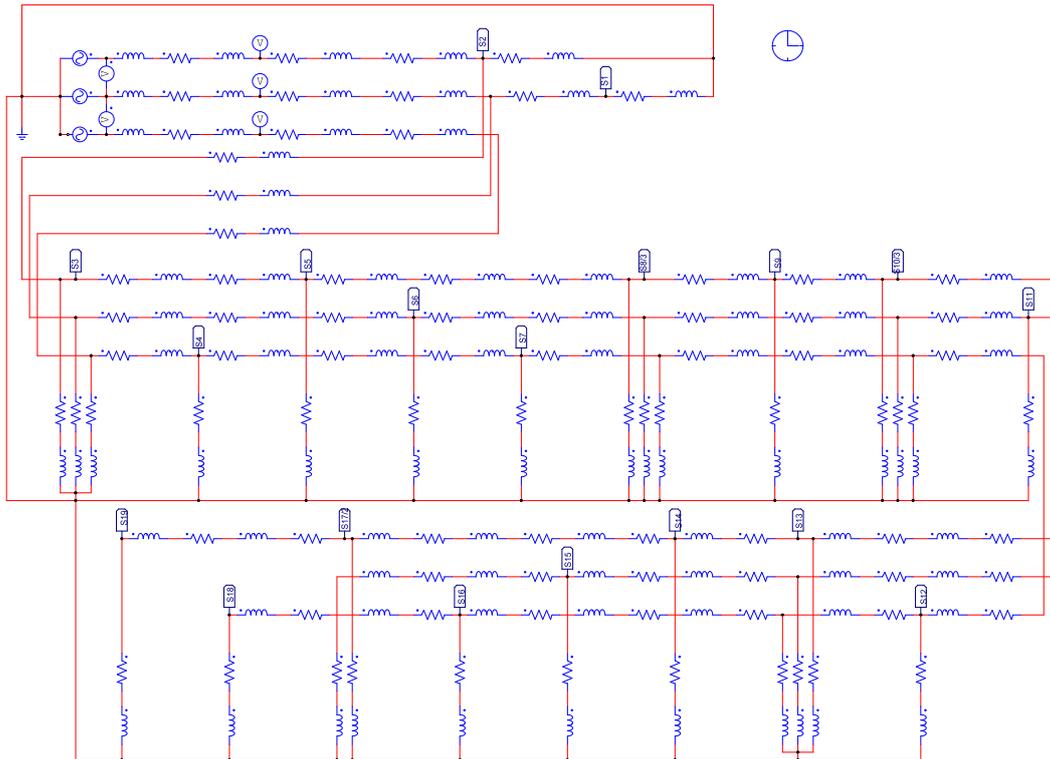


Figura 20.7: Esquema del circuito modelado en PSIM para el caso de Punta Carretas.

### 20.3.2. Escenarios seleccionados

A los efectos de simular distintos escenarios de carga de la red, a partir de una curva de carga residencial de Montevideo típica (fig. 20.8) se determinaron coeficientes para afectar la potencia contratada por los usuarios, asumiendo que en el momento de máxima demanda la potencia consumida por los usuarios coincide con la potencia contratada por cada uno de ellos.

En particular, se estudió el impacto para la carga promedio entre las 23:00 y las 5:00 horas, que equivale a un 68 % de la carga máxima y la carga promedio entre las 20:00 y las 2:00, que equivale a un 84 % de la carga máxima. La duración de estos intervalos busca representar el tiempo de carga para una carga lenta. Para representar intervalos de carga asociados a una carga media se estudió el impacto para la carga promedio entre las 23:00 y las 3:00, que equivale a un 71 % de la carga máxima y la carga promedio entre las 20:00 y las 24:00, que equivale a un 92 % de la carga máxima.

El rango a partir de las 20 horas se seleccionó pues se asume que la mayoría de los usuarios cargará su vehículo una vez que haya llegado a su casa. El rango a partir de las 23 horas sería factible si se adoptara alguna política de eficiencia en la carga de los vehículos con el objetivo de efectuar la carga fuera del pico del sistema. Asimismo, al ser una situación de menor carga constituye un peor caso en cuanto al impacto relativo de las corrientes armónicas en el sistema. Por último, se simuló un escenario de mínima carga del sistema, que equivale a la carga registrada a las 4:00, para evaluar el impacto de la carga rápida, también en el supuesto que constituye un peor caso en cuanto al impacto relativo de las corrientes armónicas en el sistema.

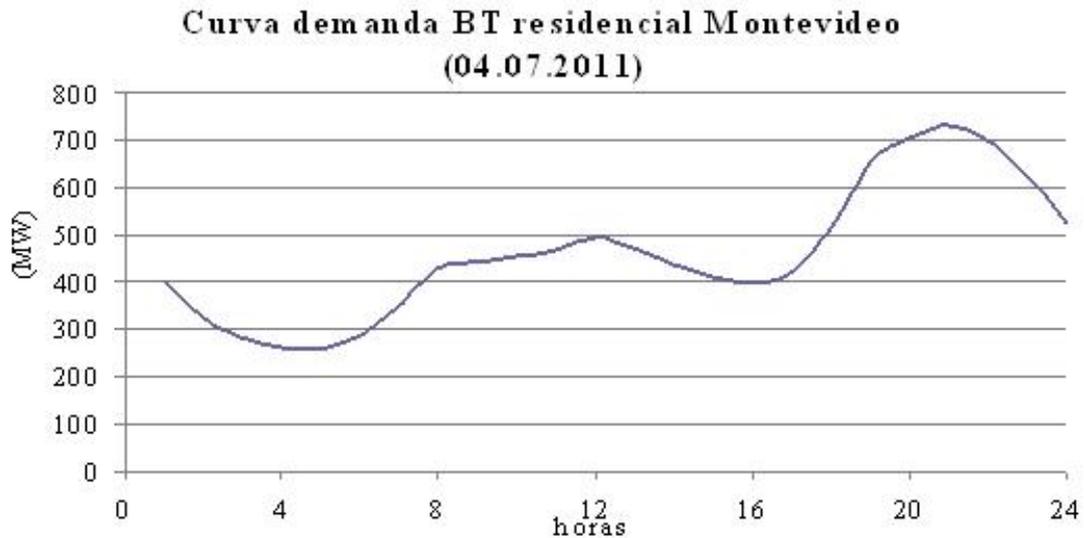


Figura 20.8: Curva de carga diaria residencial en Montevideo.

## 20.4. Resultados

Se presentan aquí los resultados obtenidos en cuanto a la Distorsión Armónica Total en tensión (THD) obtenida en cada uno de los nodos de conexión de usuarios y el valor máximo registrado de la misma en la red.

Asimismo, se presenta el resultado de la caída de tensión máxima en la red y la corriente por el transformador en cada uno de los casos estudiados. En los casos estudiados de carga lenta y carga media se asumió que todos los usuarios poseen un vehículo eléctrico. Si se asume que en cada vivienda hay un promedio de dos vehículos, este supuesto equivaldría a asumir un 50% de penetración de vehículos eléctricos en estas zonas de la ciudad.

### 20.4.1. Resultados Carrasco

En las tablas 20.4, 20.5 y 20.6 se presentan los resultados obtenidos para el circuito de Carrasco. Dado que, a excepción de uno de los usuarios en este circuito, el resto son usuarios con suministro trifásico, se simuló para cada condición de carga un escenario donde los cargadores se conectan en forma equilibrada en la red y otro escenario donde los cargadores se conectan mayoritariamente en las fases R y S del circuito.

Distribución:	1 por casa		Distribución:	1 por casa	
Carga:	baja	2,4 kW	Carga:	baja	2,4 kW
Horario:	20:00 a 2:00	factor = 0.84	Horario:	23:00 a 5:00	factor = 0.68
Distribución por fase:	EQUILIBRADA		Distribución por fase:	EQUILIBRADA	
Nodo - Usuario - Fase conexión	THD (%)		Nodo - Usuario - Fase conexión	THD (%)	
1 - 1 - R		0,71%	1 - 1 - R		0,71%
2 - 2 - R		0,73%	2 - 2 - R		0,73%
2 - 2 - S		0,46%	2 - 2 - S		0,46%
2 - 2 - T		0,46%	2 - 2 - T		0,46%
3 - 3 - R		0,76%	3 - 3 - R		0,76%
3 - 3 - S		0,48%	3 - 3 - S		0,48%
3 - 3 - T		0,50%	3 - 3 - T		0,50%
4 - 4 - R		0,79%	4 - 4 - R		0,80%
4 - 4 - S		0,49%	4 - 4 - S		0,49%
4 - 4 - T		0,51%	4 - 4 - T		0,51%
5 - 5 - R		0,80%	5 - 5 - R		0,80%
5 - 5 - S		0,50%	5 - 5 - S		0,50%
5 - 5 - T		0,52%	5 - 5 - T		0,52%
6 - 6 - R		0,82%	6 - 6 - R		0,82%
6 - 6 - S		0,50%	6 - 6 - S		0,50%
6 - 6 - T		0,53%	6 - 6 - T		0,54%
7 - 7 - R		0,84%	7 - 7 - R		0,84%
7 - 7 - S		0,50%	7 - 7 - S		0,50%
7 - 7 - T		0,53%	7 - 7 - T		0,54%
Máximo		0,84%	Máximo		0,84%
Corriente por el transformador (A)			Corriente por el transformador (A)		
R		118	R		102
S		54	S		43
T		51	T		41
DV max		1,79%	DV max		1,49%

Tabla 20.4: Resultados circuito Carrasco - Carga Lenta.

Distribución:	1 por casa		Distribución:	1 por casa	
Carga:	media	3.6 kW	Carga:	media	3.6 kW
Horario:	20:00 a 24:00	factor = 0.95	Horario:	22:00 a 02:00	factor = 0.77
Distribución por fase:	EQUILIBRADA		Distribución por fase:	EQUILIBRADA	
Nodo - Usuario - Fase conexión	THD (%)		Nodo - Usuario - Fase conexión	THD (%)	
1 - 1 - R		1,04%	1 - 1 - R		1,05%
2 - 2 - R		1,07%	2 - 2 - R		1,07%
2 - 2 - S		0,69%	2 - 2 - S		0,69%
2 - 2 - T		0,69%	2 - 2 - T		0,69%
3 - 3 - R		1,13%	3 - 3 - R		1,13%
3 - 3 - S		0,72%	3 - 3 - S		0,71%
3 - 3 - T		0,74%	3 - 3 - T		0,74%
4 - 4 - R		1,18%	4 - 4 - R		1,18%
4 - 4 - S		0,74%	4 - 4 - S		0,74%
4 - 4 - T		0,77%	4 - 4 - T		0,77%
5 - 5 - R		1,19%	5 - 5 - R		1,19%
5 - 5 - S		0,75%	5 - 5 - S		0,75%
5 - 5 - T		0,78%	5 - 5 - T		0,78%
6 - 6 - R		1,22%	6 - 6 - R		1,22%
6 - 6 - S		0,75%	6 - 6 - S		0,75%
6 - 6 - T		0,81%	6 - 6 - T		0,81%
7 - 7 - R		1,24%	7 - 7 - R		1,24%
7 - 7 - S		0,75%	7 - 7 - S		0,75%
7 - 7 - T		0,81%	7 - 7 - T		0,81%
Máximo		1,24%	Máximo		1,24%
Corriente por el transformador (A)			Corriente por el transformador (A)		
R		146	R		127
S		61	S		50
T		58	T		46
DV max		2,27%	DV max		1,96%

Tabla 20.5: Resultados circuito Carrasco - Carga Media.

Distribución:	1 auto	
Carga:	rápida	11,2 kW
Horario:	04:00	factor = 0.35
Distribución por fase:	FASE R al final de la línea	
<b>Nodo - Usuario - Fase conexión</b>		
1 - 1 - R		1,09%
2 - 2 - R		1,13%
2 - 2 - S		0,08%
2 - 2 - T		0,08%
3 - 3 - R		1,22%
3 - 3 - S		0,08%
3 - 3 - T		0,08%
4 - 4 - R		1,29%
4 - 4 - S		0,08%
4 - 4 - T		0,08%
5 - 5 - R		1,33%
5 - 5 - S		0,08%
5 - 5 - T		0,08%
6 - 6 - R		1,41%
6 - 6 - S		0,08%
6 - 6 - T		0,08%
7 - 7 - R		1,50%
7 - 7 - S		0,08%
7 - 7 - T		0,08%
<b>Máximo</b>		<b>1,50%</b>
<b>Corriente por el transformador (A)</b>		
R		86
S		25
T		25
<b>DV max</b>		<b>1,39%</b>

Tabla 20.6: Resultados circuito Carrasco - Carga Rápida.

Como puede observarse, la distorsión armónica total (THD) en tensión nunca supera el límite admisible del 5 % según la norma IEEE519 [96]. Se observa que la distorsión es mayor durante la carga media pero que no varía demasiado con la demanda de los usuarios, fuera de lo demandado por los cargadores de baterías.

La caída de tensión máxima en el circuito no supera el límite del 6 % establecido en el Reglamento de Calidad de Servicio de Distribución de Energía Eléctrica de URSEA [97].

En esta situación la corriente máxima por la línea de baja tensión nunca supera el límite permanente de corriente admisible por la misma.

#### 20.4.2. Resultados Pocitos

En las tablas 20.7, 20.8 y 20.9 se presentan los resultados obtenidos para el circuito de Pocitos. En el circuito representado aquí, por tratarse de un edificio, se presentan los resultados en cada fase de la salida del transformador de media a baja tensión. En este caso, en forma similar que en Carrasco, la gran mayoría de los usuarios tienen suministro trifásico por lo que se simuló para cada condición de carga un escenario donde los cargadores se conectan en forma equilibrada en la red y otro escenario donde los cargadores se conectan mayoritariamente en la fase R del circuito.

Distribución:	1 por casa		Distribución:	1 por casa	
Carga:	baja	2,4 kW	Carga:	baja	2,4 kW
Horario:	20:00 a 2:00	factor = 0.84	Horario:	23:00 a 5:00	factor = 0.68
Distribución por fase:	EQUILIBRADA		Distribución por fase:	EQUILIBRADA	
Nodo - Usuario - Fase conexión			Nodo - Usuario - Fase conexión		
	THD (%)			THD (%)	
1 - 1 - R		3,64%	1 - 1 - R		3,66%
1 - 1 - S		3,48%	1 - 1 - S		3,51%
1 - 1 - T		3,30%	1 - 1 - T		3,31%
Máximo		3,64%	Máximo		3,66%
Corriente por el transformador (A)			Corriente por el transformador (A)		
R		331	R		298
S		179	S		158
T		168	T		144
DV max		2,88%	DV max		2,53%

Tabla 20.7: Resultados circuito Pocitos - Carga Lenta.

Distribución:	1 por casa		Distribución:	1 por casa	
Carga:	media	3.6 kW	Carga:	media	3.6 kW
Horario:	20:00 a 24:00	factor =0.95	Horario:	22:00 a 02:00	factor =0.77
Distribución por fase:	EQUILIBRADA		Distribución por fase:	EQUILIBRADA	
Nodo - Usuario - Fase conexión			Nodo - Usuario - Fase conexión		
	THD (%)			THD (%)	
1 - 1 - R		5,46%	1 - 1 - R		5,51%
1 - 1 - S		5,15%	1 - 1 - S		5,50%
1 - 1 - T		4,94%	1 - 1 - T		4,97%
Máximo		5,46%	Máximo		5,51%
Corriente por el transformador (A)			Corriente por el transformador (A)		
R		430	R		390
S		231	S		212
T		206	T		190
DV max		3,79%	DV max		3,40%

Tabla 20.8: Resultados circuito Pocitos - Carga Media.

Distribución:	1 auto	
Carga:	rápida	11,2 kW
Horario:	04:00	factor = 0.35
Distribución por fase:		
Nodo - Usuario - Fase conexión		
	THD (%)	
1 - 1 - R		2,47%
1 - 1 - S		1,19%
1 - 1 - T		1,20%
Máximo		2,47%
Corriente por el transformador (A)		
R		177
S		70
T		68
DV max		1,35%

Tabla 20.9: Resultados circuito Pocitos - Carga Rápida.

La distorsión armónica total (THD) en tensión supera el límite admisible del 5% según la norma IEEE519 [96] para el caso de cargadores de carga media tanto en el horario de 20:00 a 24:00 como en el horario de 23:00 a 2:00. La distorsión es entonces mayor durante la carga media y en este caso aumenta levemente al aumentar la demanda de los usuarios, fuera de lo

demandado por los cargadores de baterías.

La caída de tensión máxima en el circuito no supera el límite del 6 % establecido en el Reglamento de Calidad de Servicio de Distribución de Energía Eléctrica de URSEA [97].

En esta situación la corriente máxima por el cable de baja tensión llega exactamente al valor de corriente nominal del mismo en el caso de la carga media realizada a partir de las 20 horas.

### 20.4.3. Resultados Punta Carretas

En las tablas 20.10, 20.11 y 20.12 se presentan los resultados obtenidos para el circuito de Punta Carretas.

Distribución:	1 por casa		Distribución:	1 por casa	
Carga:	baja	2,4 kW	Carga:	baja	2,4 kW
Horario:	20:00 a 2:00		factor = 0.84	23:00 a 5:00	
Horario:			factor = 0.68		
Distribución por fase:	EQUILIBRADA		Distribución por fase:	EQUILIBRADA	
Nodo - Usuario - Fase conexión	THD		Nodo - Usuario - Fase conexión	THD	
1 - 1 - S		1,79%	1 - 1 - S		1,78%
2 - 2 - R		1,82%	2 - 2 - R		1,81%
3 - 3 - R		1,94%	3 - 3 - R		1,92%
3 - 3 - S		1,90%	3 - 3 - S		1,89%
3 - 3 - T		1,92%	3 - 3 - T		1,91%
4 - 4 - T		1,94%	4 - 4 - T		1,93%
5 - 5 - R		2,08%	5 - 5 - R		2,06%
6 - 6 - S		2,09%	6 - 6 - S		2,07%
7 - 7 - T		2,12%	7 - 7 - T		2,10%
8 - 9 - R		2,18%	8 - 9 - R		2,16%
8 - 10 - S		2,15%	8 - 10 - S		2,14%
8 - 11 - T		2,14%	8 - 11 - T		2,13%
9 - 12 - R		2,21%	9 - 12 - R		2,19%
10 - 13 - R		2,24%	10 - 13 - R		2,22%
10 - 14 - S		2,22%	10 - 14 - S		2,20%
10 - 15 - T		2,19%	10 - 15 - T		2,18%
11 - 16 - S		2,24%	11 - 16 - S		2,22%
12 - 17 - T		2,22%	12 - 17 - T		2,21%
13 - 18 - R		2,28%	13 - 18 - R		2,26%
13 - 18 - S		2,26%	13 - 18 - S		2,24%
13 - 18 - T		2,23%	13 - 18 - T		2,21%
14 - 19 - R		2,29%	14 - 19 - R		2,27%
15 - 20 - S		2,30%	15 - 20 - S		2,28%
16 - 21 - T		2,27%	16 - 21 - T		2,26%
17 - 22 - R		2,34%	17 - 22 - R		2,32%
17 - 23 - S		2,31%	17 - 23 - S		2,29%
18 - 24 - T		2,29%	18 - 24 - T		2,27%
19 - 25 - R		2,36%	19 - 25 - R		2,33%
<b>Máximo</b>		<b>2,36%</b>	<b>Máximo</b>		<b>2,33%</b>
<b>Corriente por el transformador (A)</b>			<b>Corriente por el transformador (A)</b>		
<b>R</b>		<b>263</b>	<b>R</b>		<b>242</b>
<b>S</b>		<b>212</b>	<b>S</b>		<b>197</b>
<b>T</b>		<b>200</b>	<b>T</b>		<b>187</b>
<b>DV max</b>		<b>4,78%</b>	<b>DV max</b>		<b>4,35%</b>

Tabla 20.10: Resultados circuito Punta Carretas - Carga Lenta.

Distribución:	1 por casa		Distribución:	1 por casa	
Carga:	media	3.6 kW	Carga:	media	3.6 kW
Horario:	20:00 a 24:00	factor = 0.92	Horario:	23:00 a 3:00	factor = 0.71
Distribución por fase:	EQUILIBRADA		Distribución por fase:	EQUILIBRADA	
Nodo - Usuario - Fase conexión	THD		Nodo - Usuario - Fase conexión	THD	
1 - 1 - S	2,63%		1 - 1 - S	2,65%	
2 - 2 - R	2,63%		2 - 2 - R	2,66%	
3 - 3 - R	2,81%		3 - 3 - R	2,84%	
3 - 3 - S	2,80%		3 - 3 - S	2,81%	
3 - 3 - T	2,83%		3 - 3 - T	2,84%	
4 - 4 - T	2,86%		4 - 4 - T	2,87%	
5 - 5 - R	3,03%		5 - 5 - R	3,05%	
6 - 6 - S	3,08%		6 - 6 - S	3,09%	
7 - 7 - T	3,13%		7 - 7 - T	3,15%	
8 - 9 - R	3,19%		8 - 9 - R	3,21%	
8 - 10 - S	3,18%		8 - 10 - S	3,19%	
8 - 11 - T	3,17%		8 - 11 - T	3,18%	
9 - 12 - R	3,23%		9 - 12 - R	3,24%	
10 - 13 - R	3,28%		10 - 13 - R	3,30%	
10 - 14 - S	3,28%		10 - 14 - S	3,29%	
10 - 15 - T	3,25%		10 - 15 - T	3,26%	
11 - 16 - S	3,32%		11 - 16 - S	3,33%	
12 - 17 - T	3,29%		12 - 17 - T	3,30%	
13 - 18 - R	3,34%		13 - 18 - R	3,35%	
13 - 18 - S	3,34%		13 - 18 - S	3,36%	
13 - 18 - T	3,30%		13 - 18 - T	3,31%	
14 - 19 - R	3,35%		14 - 19 - R	3,36%	
15 - 20 - S	3,40%		15 - 20 - S	3,41%	
16 - 21 - T	3,37%		16 - 21 - T	3,38%	
17 - 22 - R	3,43%		17 - 22 - R	3,44%	
17 - 23 - S	3,42%		17 - 23 - S	3,43%	
18 - 24 - T	3,39%		18 - 24 - T	3,40%	
19 - 25 - R	3,46%		19 - 25 - R	3,47%	
Máximo	3,46%		Máximo	3,47%	
Corriente por el transformador (A)			Corriente por el transformador (A)		
R	338		R	291	
S	277		S	244	
T	264		T	233	
DV max	6,09%		DV max	5,24%	

Tabla 20.11: Resultados circuito Punta Carretas - Carga Media.

Distribución:	2 autos	
Carga:	rápida	11,2 kW
Horario:	04:00	factor = 0.35
Distribución por fase:	TODOS FASE R	
Nodo - Usuario - Fase conexión	THD	
1 - 1 - S		0,25%
2 - 2 - R		2,12%
3 - 3 - R		2,28%
3 - 3 - S		0,25%
3 - 3 - T		0,25%
4 - 4 - T		0,25%
5 - 5 - R		2,37%
6 - 6 - S		0,25%
7 - 7 - T		0,25%
8 - 9 - R		2,45%
8 - 10 - S		0,25%
8 - 11 - T		0,25%
9 - 12 - R		2,47%
10 - 13 - R		2,51%
10 - 14 - S		0,25%
10 - 15 - T		0,25%
11 - 16 - S		0,25%
12 - 17 - T		0,25%
13 - 18 - R		2,56%
13 - 18 - S		0,25%
13 - 18 - T		0,25%
14 - 19 - R		2,56%
15 - 20 - S		0,25%
16 - 21 - T		0,25%
17 - 22 - R		2,56%
17 - 23 - S		0,25%
18 - 24 - T		0,25%
19 - 25 - R		2,56%
<b>Máximo</b>		<b>2,56%</b>
<b>Corriente por el transformador (A)</b>		
R		182
S		59
T		53
<b>DV max</b>		<b>3,04%</b>

Tabla 20.12: Resultados circuito Punta Carretas - Carga Rápida.

En el circuito representado aquí, a diferencia de los casos anteriores, la gran mayoría de los usuarios tienen suministro monofásico por lo que la distribución de los cargadores para los casos de carga lenta y carga media se realizó de la misma forma que se encuentran distribuidos los usuarios, que se asume que es en la forma más equilibrada posible, por lo que para todas las condiciones de demanda de los usuarios, la distribución de los cargadores es la misma.

La distorsión armónica total (THD) en tensión, si bien es mayor que en los casos anteriores, nunca supera el límite admisible del 5% según la norma IEEE519 [96]. Se observa que la distorsión es mayor durante la carga media pero no varía significativamente ante la variación de la demanda de los usuarios.

La caída de tensión máxima en el circuito supera el límite del 6% establecido en el Reglamento de Calidad de Servicio de Distribución de Energía Eléctrica de URSEA [97] en el caso de carga media y demanda promedio entre las 20 y 24 horas, que equivale al 92% de la demanda máxima del circuito.

En los casos simulados, salvo en la situación de carga rápida, siempre se supera el límite de corriente admisible del conductor en régimen permanente al menos en una de las tres fases. En

los casos de carga media se supera el valor de corriente nominal para las tres fases.

## 20.5. Armónicos individuales de corriente

A los efectos de mitigar los efectos en las redes de la contaminación armónica en corriente (sobretensión en conductores, disminución de vida útil en bancos de capacitores, ferro-resonancias, etc), las normas internacionales como la IEC 61000-3-2 [93] o la IEC 61000-3-12 [94], establecen límites de emisión individual para corrientes armónicas a los equipamientos conectados a la red. Estos límites son recogidos y adaptados como exigencias para los usuarios conectados a la red, en diversas reglamentaciones de organismos nacionales reguladores de actividades eléctricas como por ejemplo el ENRE en Argentina. En nuestro país no existe de momento un reglamentación a nivel del regulador nacional (URSEA) que imponga límites de contaminación armónica a los usuarios conectados a la red de distribución. Sin embargo, está previsto en el Artículo 40 del "Reglamento de Calidad del Servicio de Distribución de Energía Eléctrica" [97] el control de la polución armónica. La Resolución URSEA N° 184/11 prevé que la "Etapa 2" (en la que se definirán los parámetros eléctricos a medir, la metodología para la medición y el procesamiento de las medidas reglamentarias y de las prestaciones del equipamiento a utilizar) se postergue hasta el 31 de diciembre de 2013. Por tal motivo, en el presente estudio se utilizará como reglamentación de referencia la Resolución ENRE N° 99/97 [98] del Ente Nacional Regulador de Electricidad de Argentina.

Se contrasta a continuación el contenido armónico para un cargador de baterías que tiene el contenido armónico sugerido por W.M. Grady [95], en situaciones de carga lenta, media y rápida, contra la Resolución ENRE N° 99/97.

### 20.5.1. Resolución ENRE 99/97

La resolución ENRE 99/97 establece los límites de emisión individual de corrientes armónicas por parte de usuarios que se muestran en las tablas 20.13 y 20.14, donde  $I_{max}$  denota el máximo valor eficaz permitido para el armónico respectivo y  $n$  el número de armónico. Como puede observarse en el caso de clientes con potencia contratada que no supere los 10 kW, los límites se expresan en Amperes.

Armónico	$I_{max}(A)$
5	2,28
7	1,45
11	0,66
13	0,42
17	0,26
19	0,24
23	0,20
25	0,18
>25	4,5/n
multiplos de 3	4,60

Tabla 20.13: Límites para usuarios BT con potencia contratada menor o igual a 10 kW.

Sin embargo, para el caso de clientes con potencia contratada superior a los 10 kW, los límites se expresan como porcentaje a la corriente contratada (correspondiente a la potencia contratada por el usuario). De esta manera, para consumidores importantes en términos absolutos (Amperes), se tolera más polución armónica en quienes tienen mayor potencia contratada.

Armónico	I max(%)
5	12,0
7	8,5
11	4,3
13	3,0
17	2,7
19	1,9
23	1,6
25	1,6
>25	$0,2+0,8 \times 25/n$
múltiplos de 3	16,6

Tabla 20.14: Límites para usuarios BT con potencia contratada mayor a 10 kW.

Con el modelo de cargador de baterías analizado, los regímenes de carga manejados (lenta, media y rápida), aplicando el Reglamento 99/97 del ENRE se tendría la siguiente situación:

1. Para carga lenta y media (potencias de cargador 2.4 kW y 3.6 kW respectivamente):

Si el cliente tiene una potencia contratada que no supera los 10 kW, entonces no se cumpliría la reglamentación (recordar que en este caso los límites están dados en Amperes).

Si el cliente tiene una potencia contratada igual o superior a 10 kW, entonces cumple la reglamentación (recordar que en este caso los límites están dados en % de la corriente contratada).

2. Para carga rápida (potencia de cargador 11.2 kW):

El cliente tendría que contratar al menos 23.5 kW para cumplir la reglamentación.

En las fig. 20.9 y 20.10 se presentan gráficamente los mismos resultados anteriormente mencionados.

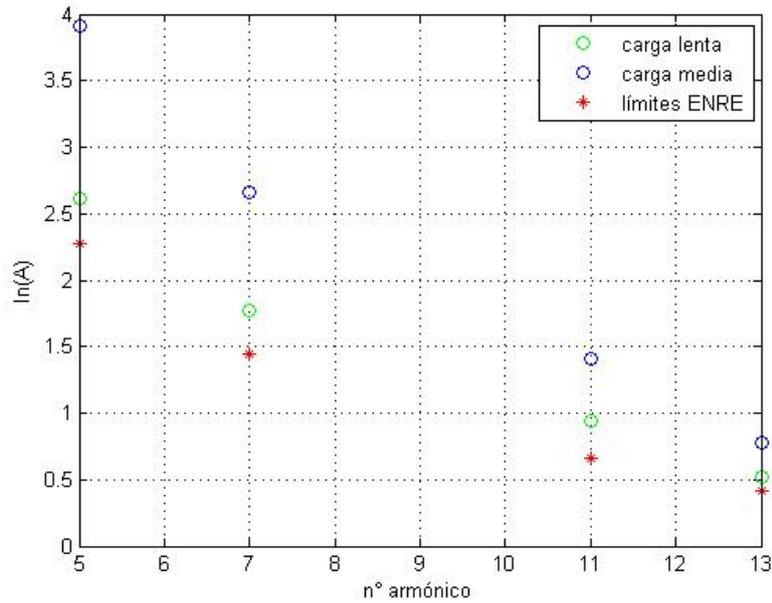


Figura 20.9: Límites de emisión armónica individual - Cargas lenta y media.  $P < 10$  kW.

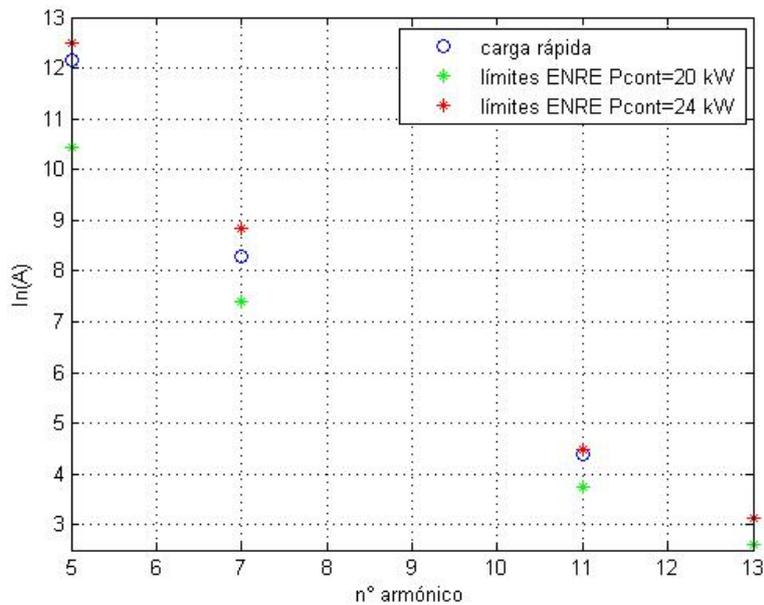


Figura 20.10: Límites de emisión armónica individual - Carga rápida.

Entonces, en el caso argentino, para tener la posibilidad de efectuar cargas lenta o media en su domicilio, el cliente debería contratar una potencia de al menos 10 kW. Si el cliente quisiera disponer de la posibilidad de efectuar carga rápida, entonces tendría que contratar una potencia de al menos 23.5 kW.

Es importante destacar que en países donde los PEVs han tenido mayor penetración, las cargas rápidas se realizan en estaciones de servicio, mientras que las cargas lenta y media se realizan en los domicilios de los usuarios.

Por otra parte, como se puede observar en la Sección 20.3.1, las potencias contratadas por los clientes de UTE en las zonas donde probablemente se dé la mayor penetración de PEVs son en general inferiores a 10 kW. Por tanto, suponiendo la hipótesis de que los referidos clientes no variarán drásticamente el resto de su consumo individual, la aplicación de una reglamentación con límites similares a la 99/97 del ENRE (en el escenario de penetración de PEVs supuesto) podría significar económicamente inconveniente para los futuros usuarios de PEVs, y un eventual cambio importante en la infraestructura de las redes de distribución de UTE (se recuerda que dicho cambio no se justificaría por problemas de caídas de tensiones excesivas o distorsión armónica en tensión).

Es importante observar que no se ha hecho énfasis en la carga rápida, puesto que se supone que por tratarse de estaciones de servicio, el costo de la potencia a contratar será una variable más para que el inversor estime su costo inicial y de mantenimiento del negocio. Es decir, la determinación del impacto de la Reglamentación en este caso ameritaría un análisis económico más detallado, que excede el alcance de este trabajo. Lo mismo para el impacto en la infraestructura de las redes de distribución, en donde las estaciones de servicio pueden ser asimilables a cualquier otra actividad económica que necesite contratar la misma potencia.

Por lo dicho, se considera importante realizar estudios adicionales en búsqueda de posibles problemas en las redes ocasionados por contaminación armónica (ferroresonancias, disminución de vida útil de bancos de capacitores, disparos no deseados en protecciones), en topologías de redes de distribución típicas, a fin de establecer exigencias mínimas en la contaminación armónica individual en usuarios de potencia contratada menor a 10 kW. Por otra parte se entiende también conveniente revisar las exigencias mínimas en cuanto a emisión armónica individual para cargadores de baterías de autos eléctricos.

# Capítulo 21

## Experiencias en la Conversión de un Vehículo de la Flota de UTE a Eléctrico[99]

### 21.1. Introducción

Como una empresa del Estado Uruguayo, UTE asume un rol proactivo en la promoción de soluciones energéticas más convenientes para la sociedad uruguaya, en concordancia con las políticas del Estado. En ese marco se creó en UTE<sup>(1)</sup> un grupo multidisciplinario con profesionales de diferentes sectores de la empresa, para estudiar la viabilidad de los vehículos eléctricos y el impacto de su incorporación masiva en el Uruguay.

Con el objetivo de tener un *banco de pruebas*, y poder evaluar el desempeño técnico y económico de los vehículos eléctricos en las condiciones particulares de nuestro país, es decir, con las condiciones de manejo que existen en el Uruguay y la diferente geografía que existe en Montevideo, y también, para poder identificar *barreras* a la hora de poder habilitar legalmente a estos vehículos para su circulación, se decidió como primer hito contar con un vehículo eléctrico propio.

En ese sentido, existen dos opciones posibles: a) obtener un vehículo elaborado completamente en fábrica por alguna marca de la industria automotriz que fabriquen dichos vehículos, o, b) convertir un vehículo convencional de combustión interna. Debido a que a nivel mundial esta tecnología está en una etapa de investigación y desarrollo, y algunos fabricantes tienen modelos desarrollados en forma limitada circulando en países desarrollados, y por otro lado, en el Uruguay existe una empresa con la capacidad técnica y experiencia en conversión de vehículos de combustión interna a eléctrico puros, se resolvió en esta primera etapa la conversión de un vehículo de la flota de la empresa, pasando a ser eléctrico puro.

De esta manera UTE se convirtió en la primera empresa eléctrica latinoamericana en convertir un vehículo de su flota a eléctrico, siendo el lanzamiento oficial el 30 de marzo de 2011.

---

<sup>(1)</sup>UTE: Administración Nacional de Usinas y Trasmisiones eléctricas

## 21.2. Características del vehículo

El vehículo que se convirtió es una camioneta FIAT Fiorino del año 2000. Se sacó el motor de combustión interna y todos los componentes que necesita esta tecnología para su funcionamiento: radiador, caño de escape, tanque de combustible y filtros de aceite, aire, combustible.

El vehículo cuenta con un motor eléctrico, un banco de baterías formado por 8 baterías AGM selladas de ciclo profundo, un cargador on board, indicador digital en el tablero, sistema de frenos regenerativos con asistencia por vacío en las 4 ruedas, y mantiene la caja de cambios original del vehículo (5 marchas hacia delante y 1 marcha atrás) con tracción delantera.

### 21.2.1. Características técnicas

El motor eléctrico es trifásico de inducción con rotor de jaula de ardillas, tensión nominal 96V, potencia nominal 26HP (20kW), potencia máxima 55HP (40kW), par máximo 170Nm. Las baterías son de plomo ácido AGM-VRLA, sellada de ciclo profundo, reguladas por válvula, tensión nominal 12V, capacidad 150Ah, con un peso de 53kg. El banco de 8 baterías tiene un peso total de 420kg y una energía total de 14kWh. El cargador on board es de cargas múltiples, tienen una potencia máxima de 2,2kW, tensión nominal de 230V, con un tomacorriente Schuko.

El sistema de frenos regenerativos funciona a través de la transmisión. Cuando el vehículo está en movimiento y no se acciona ni el freno ni el acelerador, el motor funciona como generador desacelerando el vehículo y cargando el banco de baterías. Los frenos regenerativos son asistidos por vacío, cuando se acciona el freno el vehículo se detiene a través de frenos mecánicos. Todas las luces de señalización (señaleros, luces traseras, luces de frenos y marcha atrás), son de tecnología LED.

Se instaló un medidor de energía monofásico dentro del vehículo, que registra la energía que se le *inyecta* al banco de batería en cada carga. De esta manera se registra toda la energía, independientemente del lugar de carga del vehículo. El vehículo cuenta con un sistema de seguimiento satelital que permite su ubicación en forma remota.

### 21.2.2. Prestaciones de diseño

Según el diseño del vehículo, tiene una velocidad máxima limitada electrónicamente de 100km/h, una autonomía de 70km por carga y un consumo de energía de 185Wh/km. El tiempo para recuperar al 100 % la carga de las baterías, partiendo de una descarga total, es de 6 horas y 30 minutos.

El vehículo cuenta con un modo de funcionamiento denominado Reserva. Cuando se ha consumido el 80 % de la energía en el banco de baterías (tensión de 91V en el banco), el sistema limita la velocidad del vehículo y no permite circular a más de 40 km/h, quedando energía para 6 a 10 km hasta un punto de carga.

## 21.3. Camino recorrido

Desde el desarrollo de la conversión hasta la actualidad, se han recorrido diferentes caminos que se explicarán en los siguientes puntos.

### 21.3.1. Conversión

La conversión se realizó contratando a una empresa nacional con experiencia local e internacional. Dentro de los costos, se encuentran los de mano de obra y de los componentes eléctricos. Estos últimos no tienen ningún tipo de beneficios fiscales, pagando por ende todos los impuestos para su ingreso al país, aumentando significativamente el costo total que implicó el trabajo.

### 21.3.2. Compra de Baterías

La decisión de incorporar baterías de plomo ácido se basó en dos factores: a) la disponibilidad en el mercado local y por consiguiente la posibilidad de contar con las mismas en un breve plazo para iniciar los trabajos, y b) el costo sensiblemente menor a las baterías de Ion-Litio.

Asimismo, inicialmente se había diseñado el vehículo contando con baterías de 180Ah, las que no pudieron obtenerse en un breve plazo, decidiéndose una modificación por baterías de 150Ah. La cantidad de baterías debió determinarse buscando un equilibrio entre la autonomía necesaria para el uso que se le daría al vehículo, y el peso total del banco de baterías.

### 21.3.3. Trámites

Una vez finalizado el trabajo técnico de conversión, se procedió a realizar los trámites de habilitación para que el vehículo pudiera circular en la vía pública. Se contactó a la Intendencia de Montevideo (IM), generándose un expediente para que habilitara el *cambio de motor*. Luego de varias semanas de gestiones con las autoridades de la IM, se definió un nuevo procedimiento para que los siguientes vehículos eléctricos convertidos sean habilitados en un tiempo sensiblemente menor al incurrido por UTE.

Una de las trabas que surgió fue que el motor no contaba con un número de serie de fábrica, al tratarse de un motor fabricado especialmente para la empresa uruguaya que realizó la conversión. Actualmente existe un procedimiento en la IM para autorizar los cambios de motor (generalmente de nafta a gas-oil), en el que los importadores de los motores generan un documento de importación por cada motor, de modo que la IM pueda controlar ese mercado.

La IM procedió al marcado del motor con un número propio, realizando el importador las gestiones ante la Dirección Nacional de Aduanas, quién fiscalizó el motor, dando el visto bueno y de esa manera regularizando el trámite en la IM.

Otro de los temas que resolvió la IM fue determinar el valor a cobrar por la Patente de Rodados, ya que este vehículo no se encuentra en la tabla de vehículos (si bien figura la marca, modelo y año, no existe ninguno con motor eléctrico). Por más que el valor del vehículo es superior a uno similar de combustión interna (por el costo de la conversión, motor, equipos electrónicos y

baterías), se mantuvo el mismo valor de la patente.

A los efectos de circular por la vía pública, fue necesario modificar la póliza de seguros emitida por el Banco de Seguros del Estado, empresa que presta ese servicio a UTE. Luego de una inspección técnica, en pocos días se dio el visto bueno y la unidad quedó cubierta por el seguro, adicionando a la prima el valor de la conversión y descontando el valor del motor sustituido.

#### **21.3.4. Lugar de trabajo del vehículo**

El vehículo fue diseñado para realizar diferentes tareas en UTE. En una primera etapa el vehículo estaba siendo utilizado por Servicio Técnico Comercial de Montevideo (STC). Se eligió una cuadrilla que cubriera las zonas cercanas al punto de carga del vehículo (que no tengan un recorrido mayor al de diseño). En el STC los funcionarios requieren un vehículo para movilizarse sin restricciones de autonomía, siendo prioritario el servicio al cliente antes que el manejo eficiente, por lo tanto el modo de conducción del vehículo era muy *agresivo*, con aceleraciones y frenando siempre con la asistencia mecánica, lo que impacta fuertemente en la baja de la autonomía de diseño. Con esta forma de manejo, las prestaciones de diseño en cuanto a la autonomía era muy diferente a la real por lo que los choferes presentaron una disconformidad.

Esto llevó a que se decidiera un cambio en los usuarios del vehículo, pasando a ser utilizado por el Departamento de Ventas Montevideo, que realiza una actividad denominada Divulgación Escolar, donde funcionarios de UTE brindan charlas a alumnos de 6to año de enseñanza Primaria sobre uso eficiente y seguro de la energía eléctrica. En este caso el modo de manejo es menos *agresivo*, los choferes planifican el día para realizar cargas parciales durante el medio día si es necesario. Por otro lado, uno de los temas a tratar en dichas charlas es el Vehículo Eléctrico y los escolares pueden apreciarlo directamente, viendo entre otras cosas, la baja contaminación sonora.

En base a la experiencia sobre los estilos de manejo, se detectó la necesidad de dar una charla a los choferes del Dpto. de Ventas Montevideo sobre el modo de optimizar la conducción de este vehículo. Si bien en una primera instancia se había considerado que esto no era necesario, la realidad indicó que se trata de una nueva tecnología con sus particularidades que deben atenderse.

### **21.4. Resultados obtenidos**

En este punto se muestran los primeros resultados del seguimiento que se está realizando al vehículo.

#### **21.4.1. Prestaciones reales relevadas**

En la tabla 21.1 se muestra las prestaciones reales relevadas en el vehículo.

<i>Datos</i>	<i>Valores</i>
Velocidad máxima	100 km/h
Autonomía por carga	50 km
Consumo de energía	255 Wh/km

Tabla 21.1: Prestaciones relevadas

Cuando se ha consumido el 80 % de la energía en el banco de baterías (tensión en el banco de baterías 91V), el vehículo queda funcionando en modo de Reserva, el sistema limita la velocidad y tiene una autonomía de 10km hasta un punto de carga. Ver fig. 21.1.

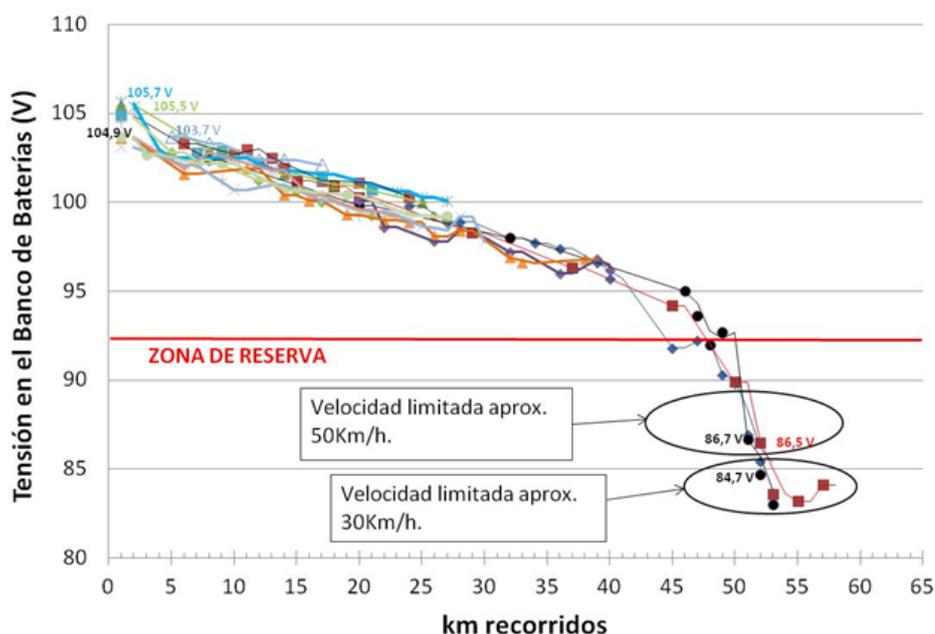


Figura 21.1: Comparativo entre recorridos. Se registraron los km recorridos y la tensión en el banco de baterías para distintos recorridos.

### 21.4.2. Costos operativos

A partir del consumo de energía de cada vehículo y los precios de cada energético se tiene la tabla 21.2.

<i>Energético</i>	<i>Consumo de Energía</i>	<i>Costo del Energético<sup>4</sup></i>	<i>Costo al recorrer 1km</i>
Nafta	0,10 l/km	1,853 USD	0,185 USD
Eléctrico	255 Wh/km	0,125 USD	0,032 USD

Tabla 21.2: Costos operativos.

En esta primera etapa, no se cuantificaron las ventajas que presentan los vehículos eléctricos frente a los vehículos de combustión interna, en relación a los costos de mantenimiento. El tiempo de uso del vehículo es aún breve para evaluar la vida útil de las baterías.

## 21.5. Análisis de resultados

De acuerdo al modo de manejo y de las diferentes geografías donde circula el vehículo, las prestaciones de diseño difieren de las prestaciones relevadas. La autonomía del vehículo en la práctica se reduce unos 20km (29 %) que la diseñada, y el consumo aumenta unos 70Wh/km (38 %) que el diseñado. Por otro lado se tiene que coincide la velocidad máxima diseñada con la relevada.

Como se muestra en la fig. 21.1, el vehículo queda en modo Reserva luego que la tensión en el banco de baterías es menor a 91V, limitando la velocidad a 50km/h (tensión en el banco entre 86V y 91V), y limitando la velocidad a 30km/h (tensión en el banco menor a 86V).

Al utilizar el vehículo eléctrico se tiene un ahorro de 83 % respecto al utilizar un vehículo de combustión interna a nafta. Ver la fig. 21.2. El costo de realizar 1km pasó de 0,185 USD a 0,032 USD. <sup>(2)</sup>

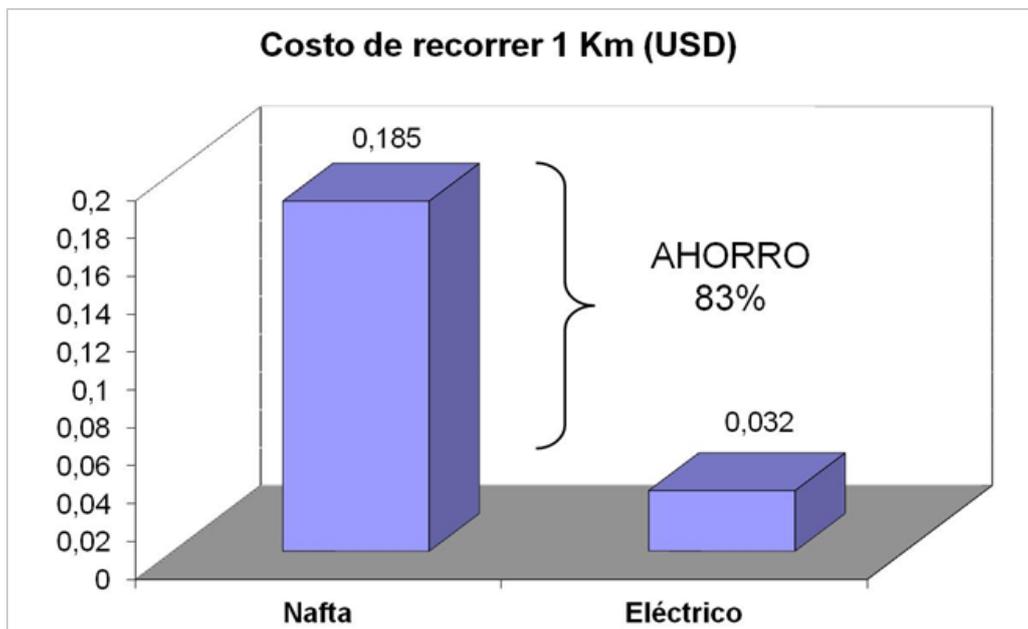


Figura 21.2: Comparativo entre los costos de los diferentes energéticos

<sup>(2)</sup> Costo de Nafta Super 95 SP correspondiente al 29/05/2012. Costo de Energía Eléctrica correspondiente al precio de Valle de la Tarifa Doble Horario Residencial de pliego vigente desde el 01/01/2012. Tipo de cambio Interbancario 20,348\$/USD correspondiente al cierre de 28/05/2012.

# Capítulo 22

## Conclusiones finales

### 22.1. Introducción

El proyecto *Hacia un transporte automotor racional y eficiente: Autos Híbridos y Eléctricos* comenzó en el año 2011 y nucleó a diferentes investigadores de diversas áreas, como Ingeniería Eléctrica, Mecánica y Química. Asimismo también participaron actores fuera de la órbita de la Universidad de la República como es el caso de UTE, y la Dirección Nacional de Energía. En este capítulo se realiza un pequeño recorrido sobre lo que han sido los diferentes aportes de los grupos de trabajo del proyecto de forma de dar cierre a esta etapa así como también generar un espacio de reflexión de cara al futuro.

Este trabajo presenta dos partes bien diferenciadas. Los primeros capítulos del proyecto definen el estado del arte de la tecnología y la situación actual en el mundo, mientras que la segunda mitad del documento se muestran resultados obtenidos por los diferentes grupos de trabajo del proyecto de forma de darle valor agregado y autóctono al desarrollo de este trabajo.

### 22.2. Historia de los autos eléctricos

En este capítulo se realizó una breve reseña de la evolución histórica que ha tenido la tecnología de los autos eléctricos desde sus orígenes hasta la cercana actualidad. Un nuevo advenimiento tecnológico sobre la movilidad eléctrica parece estar llevándose a cabo, razón por la cual es motivo de estudio muchos de los cuales se presentan en este trabajo.

A su vez se hizo una mención al caso paradigmático del EV-1 de General Motors, que deja de manifiesto que las estrategias de impulso y promoción de los autos eléctricos en el mercado automotriz, deberán tener en cuenta los intereses contrapuestos que surgen.

### 22.3. Tipologías de Vehículos Híbridos o Eléctricos

En este capítulo se describieron las tipologías actuales correspondientes a las distintas configuraciones de sistemas de propulsión que existen para los vehículos híbridos y eléctricos.

Se estudiaron las configuraciones existentes así como también diferentes arquitecturas posibles para los sistemas de tracción.

## 22.4. Eficiencia y Tecnologías de motores de combustión para autos Híbridos

La primera conclusión que se desprende del análisis presentado en este capítulo, es la posibilidad de representar de forma realista los resultados de desempeño para los motores de ciclo Otto, Atkinson y Diesel a partir de modelos termodinámicos simples. Estos modelos permiten obtener valores adecuados de potencia y rendimiento, manteniendo una simplificación adecuada en las ecuaciones que dominan el problema, sin tener que recurrir a modelos complicados como cuasi-dimensionales o multidimensionales para simular el comportamiento de los motores.

El uso de motores de combustión interna en los vehículos híbridos (que no se alimentan de la red eléctrica) representa la única fuente de energía, por lo tanto el rendimiento de los mismos condiciona el rendimiento de todo el vehículo. Es claro que para los vehículos a gasolina (nafta) el uso de motores de ciclo Otto no es una buena opción, en comparación con los motores de ciclo Atkinson, donde se obtienen rendimientos de consumo (km/l) 18% mayores para carretera y 18,5% mayores para ciclo urbano.

En relación al uso de motores de combustión interna para propulsión vehicular, es interesante destacar que es una tecnología que tiene más de 100 años de desarrollo y que está altamente inserta en la cultura de nuestra sociedad. Desde hace algún tiempo, por factores medioambientales, ha cobrado gran impulso el estudio de la forma en que se consume la energía, tendiendo a disminuir al máximo las pérdidas en todos los procesos relacionados con la conversión energética. La propulsión vehicular no escapa a esta tendencia, hoy en día hay un gran interés en hacer más eficientes los motores de los vehículos.

Aparte de mejorar el funcionamiento de los motores actuales, se promueve el desarrollo de vehículos híbridos y eléctricos que consuman menos que los vehículos convencionales. Esta tecnología promete grandes mejoras desde el punto de vista medio ambiental y energético. Dando lugar a un nuevo panorama en la distribución energética para el transporte.

Un elemento interesante para promover la tecnología de vehículos híbridos es que, en una de sus configuraciones, permite mejorar considerablemente el rendimiento, haciendo trabajar al motor de combustión interna en un punto de funcionamiento óptimo para generar electricidad, mientras los motores eléctricos son los encargados de suministrar la potencia.

Al día de hoy hay varios inconvenientes a tener en cuenta para que esta propuesta tecnológica tenga éxito, uno de ellos es el que deriva de la antigüedad de la industria automotriz. Ésta ya está desarrollada y todos sus actores, directos e indirectos, tienen su lugar en la cadena productiva, cambiar esto implicaría demasiados recursos para esta industria, repercutiendo fuertemente en la economía global.

Otro inconveniente que todavía no ha resuelto esta nueva tecnología, en particular para vehículos eléctricos exclusivamente, es la capacidad de almacenamiento de energía. En un kilogramo

de combustible se almacenan 44,7 MJ, mientras que en la batería de un vehículo eléctrico se almacenan 1,22 MJ por kilogramo, si el rendimiento de los motores a combustible es del 30 % y el de los motores eléctricos fuera del 100 %, aún en estas condiciones los motores a gasolina tendrían 11 veces más capacidad de acumular energía útil (es decir 11 veces más autonomía).

Además no hay que perder de vista, la fuente de la producción de energía eléctrica, si ésta es más contaminante o tiene menor rendimiento que el motor, no tendría sentido convertir el parque automotor por razones ambientales.

La utilización de autos híbridos con motores de combustión interna y motores eléctricos se puede ver como un paso intermedio en el cambio tecnológico. Las tecnologías actuales de almacenamiento de energía por medio de hidrógeno y su uso mediante celdas de combustible, las baterías eléctricas con altos niveles de densidad de energía, permiten aventurar la proximidad de las tecnologías eléctricas para su uso en vehículos de transporte. Estas tecnologías tienen que venir acompañadas de una cierta madurez de la sociedad y deben ser fomentadas. Es de esperar que en los próximos años haya una tendencia hacia estas las tecnologías, los pasos naturales serían los que incorporen cada vez más componentes eléctricos a los sistemas de propulsión actuales. Por lo tanto la tecnología de propulsión híbrida entre eléctrica y mecánica debe ser en un futuro cercano una nueva realidad.

## 22.5. Estudio de Baterías, pilas y celdas de combustible para uso vehicular

De los capítulos, *Baterías secundarias para Autos Híbridos y Eléctricos*, *Celdas de combustible para Autos Eléctricos*, *Almacenamiento de hidrógeno para Autos Eléctricos* se pueden destacar algunas consideraciones importantes:

La aplicación de un sistema electroquímico para alimentación vehicular requiere de varios aspectos energéticos y de carga; tipo de batería, tensión nominal, corriente de carga, ciclo de trabajo, requerimientos de temperatura, vida útil, período de validez, ciclos de carga/descarga, requerimientos físicos, mantenimiento, costo, seguridad y confiabilidad.

El estudio de un sistema electroquímico en comparación con otros motores se realiza mediante las curvas de Ragone, y la medición o cálculo de las eficiencias termodinámicas se pueden traducir desde las baterías a los motores de combustión mediante ecuaciones equivalentes.

El estudio intrínseco de cada batería fue realizado mediante el modelado teórico de las ecuaciones para la irreversibilidad del sistema por matlab en las curvas de polarización de las baterías estudiadas. Se observó como factores principales de definición en los perfiles energéticos la transferencia de carga, en cuanto a la densidad de corriente de intercambio y el factor de simetría, mas que los asociados con la transferencia de masa.

Se realizó un estado del arte de las baterías níquel-hidruro metálico con las baterías litio-ión en contraposición con las celdas de combustible de hidrógeno. Se definieron los *estados* de carga, los cuales definen entre un 20 y 80 % el accionar en motores híbridos, mediante medidas

directas de potencial de circuito abierto e impedancia potencioestática para la constante de tiempo capacitiva encontrada.

## 22.6. Estudio de la disposición carga/descarga de celdas de Litio/Ion y Niquel/Mh

En este capítulo se estudió y experimentó con las tecnologías de Li-ion y Ni-MH.

Termodinámicamente se puede ver que es más favorable la reversibilidad de los procesos de carga-descarga en la batería de Li-ion que en Ni-MH, dado que la diferencia de potenciales en los cuales ocurren tales procesos es menor.

Desde el punto de vista de recuperabilidad de los estados de carga/descarga, el desempeño de las celdas de Li-ión es mucho mejor que las Ni-MH a partir de los resultados de las curvas cronopotenciométricas.

Los estados de carga y descarga se pueden seguir perfectamente mediante los Diagramas de Nyquist en la espectroscopía de impedancia electroquímica. Las dos baterías muestran dos circuitos equivalentes diferentes; Ni-MH con un circuito tipo Randles y una Warburg por difusión de especies, mientras que Li-ion muestra un circuito mas complejo que requiere de 3 elementos interfaciales.

### 22.6.1. Trabajo siguiente

Se deben realizar las curvas equivalentes cronopotenciométricas y de impedancia para la celda de combustible hidrógeno/aire de potencia similar.

## 22.7. Motores eléctricos para autos híbridos y eléctricos

Los motores de inducción y los motores síncronos de imanes permanentes constituyen las máquinas eléctricas más utilizadas en aplicaciones de EV. Los motores síncronos en particular se han beneficiado de los crecientes avances en la utilización de las tierras raras como materiales magnéticos, y representan una clara alternativa de uso en EV superando el desempeño de los motores de inducción.

Si bien los motores eléctricos son tecnologías muy maduras, el diseño de los mismos representa un factor determinante para su aplicación en EV, como sucede con los motores de reluctancia variable, que presentan desempeños mejores que los anteriores en aplicaciones de EV, pero requieren de un diseño sofisticado para su uso.

## 22.8. Convertidores

Para sistemas de propulsión de autos eléctricos con motores eléctricos de corriente alterna, la conversión de energía desde las baterías hasta el motor se puede realizar adaptando el nivel de

tensión continua por medio de un convertidor DC-DC. De esta forma se puede implementar un inversor no aislado que trabaje desde el nivel de tensión continua óptimo para manejar el motor de alterna, al mismo tiempo que se selecciona el valor de tensión continua para el banco de baterías que optimiza la relación capacidad-tamaño.

El convertidor DC-DC suaviza la corriente que proporciona el banco de baterías, aumentando su tiempo de vida.

Cuando el convertidor DC-DC tiene la capacidad de convertir la energía en forma bidireccional, se agrega la capacidad del sistema de implementar frenado regenerativo, lo cual aumenta el rendimiento y autonomía en forma global. Al acompañar este tipo de solución con métodos de conmutación suave se logra aumentar aún más el rendimiento total del sistema desde el punto de vista energético.

## **22.9. Funcionamiento del motor eléctrico como generador, frenado regenerativo**

Se introdujeron conceptos básicos de los convertidores electrónicos de potencia más utilizados en las aplicaciones de EV y EHV. En particular, se presentó el diseño de un convertidor DC/DC bidireccional y su control asociado. También se describieron las topologías y métodos de control más utilizados para el control de inversores alimentando máquinas de corriente alterna.

Se presentaron las características más sobresalientes de los motores eléctricos más utilizados en aplicaciones de EV y EHV, principalmente cuando se utilizan en régimen generador. Se presentaron los principios del frenado regenerativo, los criterios de diseño y las estrategias de control más utilizadas.

Se desarrolló un modelo de auto eléctrico con banco de baterías, convertidor DC/DC, inversor, motor/generador de inducción, dinámica del automóvil y control de freno regenerativo. El modelo permite incorporar fácilmente distintas estrategias de control, de frenado regenerativo y ciclos de conducción.

Se presentaron resultados de simulación que muestran el impacto del frenado regenerativo en el consumo de energía para un ciclo de conducción determinado. Estos resultados sientan las bases para una exploración más exhaustiva de distintas estrategias con la finalidad de optimizar la eficiencia del EV.

## **22.10. Caracterización y evolución del parque automotor**

A los efectos de estudiar distintos escenarios a futuro de la incorporación de vehículos eléctricos al parque vehicular de Uruguay se definieron las categorías de automóviles que podrían ser reemplazados por vehículos eléctricos. Para estas categorías se confeccionó una base de datos histórica para el período 1993 a 2008 que resultaría la base para simular la evolución futura, hasta el año 2030, del parque automotor y la incorporación al mismo de los vehículos eléctricos.

Las categorías de interés comprendieron los automóviles de uso particular y transporte liviano, con una capacidad de hasta cuatro personas, un peso de hasta 2 Toneladas y un máximo de 5 puertas. Para la confección de la base de datos se clasificaron los vehículos de acuerdo al combustible que consumen (nafta, gasoil) y de acuerdo a la zona del país donde se encuentran (Montevideo, Interior).

La base de datos se confeccionó con datos disponibles a partir del Ministerio de Transporte y Obras Públicas (Anuario estadístico de transporte 2007), del Ministerio de Industria, Energía y Minería - Dirección Nacional de Energía, que contaba con el registro automotor de gran parte de las intendencias, y del Instituto Nacional de Estadística que contaba con algunos registros de la estadística de evolución del parque automotor.

La evolución a futuro del parque automotor objeto del estudio se realizó a partir del crecimiento esperado del Producto Bruto Interno (PBI), dada la alta correlación que esta variable ha presentado en el pasado con el desarrollo del parque automotor en Uruguay. Se consideraron tres escenarios para la evolución del PBI que surgen de un estudio realizado por OPP: *Estrategia Uruguay III Siglo Aspectos productivos*[69]. Éstos son el Escenario Normativo Estratégico (ENE), el Intermedio y el de Mínima. De acuerdo a la estimación de crecimiento del PBI para cada uno de estos escenarios, se observa que el parque automotor a futuro llega a triplicarse al año 2030 en el ENE, con respecto a la cantidad de vehículos existentes al 2008. En el Escenario Dinámico Intermedio el parque se duplica en el mismo período mientras que en el Escenario de Mínima el parque crece un 50 % también en ese período.

A su vez, a partir de estos escenarios base de desarrollo del parque automotor, se desarrollaron escenarios para la introducción de vehículos eléctricos. De acuerdo con un estudio realizado para la Comunidad Europea (Impact of Electric Vehicles - Directorate General for Climate Action)[68] donde se toman en consideración los distintos aspectos que pueden influir en el desarrollo y la incorporación de vehículos eléctricos, se formularon tres escenarios para simular la introducción de este tipo de vehículos en el parque automotor: Pesimista, Realista y Optimista.

Dentro de cada escenario de introducción, se pondera la cantidad vehículos del parque dependiendo de si se trata de Vehículos Completamente Eléctricos (VCE), Vehículos Híbridos Enchufables (VHE), Vehículos Eléctricos de Rango Extendido (VERE) o los Vehículos con Motor a Combustión Interna (VMCI)

En todos los escenarios planteados se observa que los VHE son los que tendrán más participación en el mercado, mientras que los VCE serán los más rezagados.

En los todos los escenarios planteados el desarrollo del mercado automotor para los vehículos eléctricos comienza a registrar un impacto en el total de vehículos a partir del año 2020. Para el año 2030 en el escenario de mayor incorporación de vehículos eléctricos (Escenario Optimista), el total de este tipo de vehículos (suma de las categorías VCE, VHE y VERE) representará el 33 % del total del parque automotor, mientras que para el Escenario Pesimista el total de vehículos eléctricos representará el 7 % del parque automotor para el año 2030.

## **22.11. Modelado de la demanda del parque automotor híbrido - eléctrico**

En este capítulo se presentó un modelo para la demanda de energía del parque automotor híbrido-eléctrico ajustado a la realidad Uruguaya de forma de utilizarlo para realizar los diversos estudios de impacto sobre la penetración de este tipo de tecnología en el Uruguay.

Este modelo sienta la base para el resto de las simulaciones y estudios realizados en el resto del trabajo.

Es importante para destacar de cualquier manera, más allá de los resultados obtenidos la metodología utilizada que permiten realizar mejoras modulares sin tener que afectar lo que ya se realizó. Otro aspecto a destacar del simulador es la rapidez con la que corre, obteniendo los resultados en cuestión de minutos en computadoras convencionales.

## **22.12. Impacto en la demanda de energía eléctrica asociada con la reconversión del parque de automóviles**

Con el modelo desarrollado en el capítulo anterior se evaluó el impacto en la demanda de energía eléctrica. Para ello primero que nada fue necesario realizar un conjunto de hipótesis para el modelado del parque de generación de energía eléctrica uruguayo de cara al 2030.

Se simularon nueve casos diferentes, para tres escenarios de penetración de autos híbridos y eléctricos (Pesimista, Realista, Optimista) y para tres escenarios de carga: no regulada, regulada y carga y descarga a la red (V2G).

Se vio que para el caso más pesimista de incorporación sin permitir un régimen de carga y descarga a la red se podría dar un aumento en la demanda neta de energía de aproximadamente un 5.5 % respecto de la proyección a 2030, mientras que en el otro extremo para el caso más optimista considerando un régimen V2G se podría llegar a un 16.69 % de incremento en la demanda de energía respecto del escenario tendencial.

## **22.13. Impacto en la curva de demanda de energía asociada con la capacidad de almacenamiento de los vehículos eléctricos**

Para completar el análisis del impacto en la demanda de energía, se estudiaron los efectos sobre la curva de la demanda diaria utilizando la capacidad de almacenamiento que presentan los vehículos eléctricos. Permitiendo, no sólo, pensarlos como cargas móviles, sino que también como generadores móviles.

Se estudiaron los efectos para las tres alternativas de carga: sin regulación, con regulación, carga y descarga a la red. En el primer caso se ve que se genera un sobre-pico en la hora de

más demanda de energía que podría implicar un aumento de hasta un 22 % de dicho pico. En el segundo caso se ve que la curva se suaviza siendo menos pronunciado el pico respecto del valle. En el último caso se ve que aparece un alivio en el pico de la demanda, donde los autos vuelcan a la red su excedente de carga. Este fenómeno puede ser tan significativo como para reducir el pico de la noche en un 35 % pasando a estar el pico en el mediodía.

Se concluye necesaria la regulación para evitar efectos negativos sobre las redes y tener en cuenta estos fenómenos para la planificación y desarrollo de estas. Alguno de los efectos negativos son estudiados en el capítulo *Impacto en la expansión y eficiencia de las redes por la utilización de la capacidad de almacenamiento y generación distribuida de los autos eléctricos*.

## **22.14. Impacto en la demanda de petróleo asociada con la reconversión de parque de automóviles**

En el estudio sobre impacto en la demanda de petróleo se analizaron las variaciones en el consumo de nafta y gasoil que se generan por la incorporación de vehículos eléctricos al parque vehicular, en base a los escenarios planteados para su evolución en el período 2012 a 2030. A partir de la cantidad de vehículos que se prevé se incorporarán y del modelo de la demanda de energía eléctrica atribuible a la carga de los mismos, a través de las simulaciones energéticas realizadas, se analizó la variación en la estructura de abastecimiento de la demanda total del sistema a futuro, así como el impacto energético considerando en conjunto el parque vehicular objetivo del estudio y el sistema eléctrico.

Del análisis realizado y considerando el consumo asociado a la porción del parque vehicular correspondiente a los automóviles de uso particular y transporte liviano, surge que se podría generar una disminución en el consumo de nafta cercano al 35 % y de gasoil cercano al 25 % hacia el año 2030, en el escenario Optimista que es el que prevé mayor sustitución de vehículos convencionales por vehículos eléctricos.

Por otro lado, cuando se estudia cómo la demanda de energía eléctrica adicional debido a los vehículos eléctricos altera la composición de la generación del conjunto de la demanda de energía eléctrica, se observa que aumenta la generación a partir de biomasa y de gas natural.

Finalmente al considerar la energía total asociada al suministro de combustibles (nafta y gasoil) y energía eléctrica demandada se observa que, sin considerar la generación a biomasa, en todos los años del estudio para el escenario Optimista se produce un ahorro neto de energía debido a la incorporación de vehículos eléctricos. Se consigue aquí un ahorro debido a que la energía necesaria para el transporte a través de los vehículos eléctricos se genera con tecnologías más eficientes, en este caso generación de energía eléctrica a gas natural, que la combustión en un motor de un vehículo convencional. Se observa asimismo, que los ahorros disminuyen cuando se considera la energía proveniente de biomasa dada la baja eficiencia del proceso de quema de la misma.

En el escenario Realista los ahorros disminuyen y hasta se produce un aumento neto en el consumo de energía en algunos años, sobre todo cuando se considera la energía de la biomasa, mientras que en el escenario Pesimista prácticamente no se producen ahorros.

Estas tendencias podrían indicar que si se lograran escenarios más agresivos en cuanto a la sustitución de vehículos eléctricos se estaría mejorando la eficiencia en el consumo de energía en general. Por otra parte, el cambio de los resultados al considerar o no la biomasa hace que quede en evidencia que la sustitución de vehículos convencionales por vehículos eléctricos aporta a la reducción de consumo energético en general siempre que se esté generando la energía eléctrica necesaria a partir de tecnologías más eficientes de generación, como podrían ser los ciclos combinados.

## **22.15. Impacto en la expansión y eficiencia de las redes por la utilización de la capacidad de almacenamiento y generación distribuida de los autos eléctricos**

En este capítulo se mostró con ejemplos sencillos, el impacto de la generación/carga distribuida (GD) en las pérdidas y en la utilización de la red de distribución.

Los vehículos híbridos y eléctricos que se conectan al sistema presentan un potencial de ahorro en infraestructura de redes, cuando los ciclos de descarga y carga de baterías se coordinan con las horas de pico y fuera de pico del sistema respectivamente. Esta situación se puede lograr a través de señales tarifarias que reflejen los costos y beneficios que imponen los usuarios en la red, con cargos que penalicen el consumo para la carga de baterías en horas pico y a su vez paguen a los usuarios por inyectar potencia en estas horas.

El caso *Sin regulación* es desaconsejable, siendo el caso V2G el óptimo desde el punto de vista del uso de la red eléctrica. Para este caso, y en un escenario medio, los ahorros a largo plazo en infraestructura de red podrían llegar a 370 MMUSD anuales.

## **22.16. Impacto en la calidad del servicio eléctrico ante la proliferación de autos eléctricos con capacidad de generación distribuida**

En el estudio realizado sobre calidad de energía se analizaron los efectos que podría ocasionar la incorporación masiva de vehículos eléctricos en determinadas topologías de circuitos de baja tensión de la red de Distribución de Montevideo, en particular, la afectación del nivel de tensión de la red así como el nivel de contaminación armónica que se podría registrar.

Para evaluar dichos efectos, se seleccionaron circuitos de tres barrios de la ciudad de Montevideo donde, dado el nivel económico de su población, se presupone que serán las zonas de la ciudad donde se observará una mayor penetración de este tipo de tecnología de vehículos. Los barrios seleccionados fueron Pocitos, Punta Carretas y Carrasco.

Se modelaron distintos escenarios de incorporación de vehículos eléctricos, y para cada uno de ellos se evaluó el nivel de contenido armónico de la red y su compatibilidad con las normas

aplicables (IEEE 519) así como la cargabilidad del circuito y la desviación de tensión que se ocasionaría en la red.

Asimismo, de acuerdo a las características de cargadores típicos se estudió la posibilidad de conectar dichos equipos dependiendo de la potencia contratada de los usuarios y del nivel de cortocircuito de la red a partir de la cual sean alimentados, en base a la resolución ENRE 99/97.

De acuerdo a los resultados obtenidos no se registran problemas con la Total Harmonic Distortion (THD) en tensión, para los circuitos seleccionados como representativos de Carrasco, Pocitos y Punta Carretas. Solo en el circuito de Pocitos y con carga media se obtienen valores ligeramente superiores al 5% establecido por IEEE 519. Debe tenerse en cuenta que estos resultados se obtuvieron considerando que en cada uno de los hogares de los referidos barrios, se dispondría de dos vehículos del cual uno de ellos es eléctrico. Esto constituye un caso hipotético extremo, que si bien no representa lo que sucedería en un eventual escenario de penetración de vehículos eléctricos, nos permite definir una cota extrema para la THD.

Por otra parte, en el mismo escenario de penetración de vehículos eléctricos tampoco se registran problemas significativos con la caída de tensión en las salidas de las subestaciones analizadas.

Con respecto a la emisión individual de armónicos de corriente, se desprende que los usuarios deberían contratar potencias superiores a los 10kW a los efectos de cumplir con la reglamentación de emisión armónica de acuerdo a la resolución ENRE 99/97. Corresponde mencionar que los límites del ENRE manejados se desprenden esencialmente de la normativa internacional IEC (IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-12) que en forma estricta refieren a equipamiento eléctrico conectado a la red y no a usuarios. Por ello, y porque en el presente estudio se supuso que el resto del equipamiento del usuario que está conectado a la red conjuntamente con el cargados, no consume (o inyecta) armónicos a la red, se entiende que debería estudiarse la normativa aplicable directamente a los equipos (cargadores) y no a los usuarios. Siguiendo en esta dirección, se afirma que quizás deba revisarse las exigencias en cuanto a emisión de armónicos para los equipos cargadores de baterías para vehículos eléctricos.

## **22.17. Experiencias en la Conversión de un Vehículo de la Flota de UTE a Eléctrico**

En este capítulo se contaron los resultados de la experiencia de la reconversión de un vehículo de combustión interna de la flota de UTE a un eléctrico.

Se vio que los costos operativos son bajos. El bajo costo de la energía eléctrica en comparación con la nafta, hace que en operación el vehículo eléctrico sea económicamente más conveniente que los vehículos de combustión interna.

En cuanto al valor de la Patente de Rodados que cobra la IM, deberá analizarse en el Congreso de Intendentes si ese valor es coherente con una política del Estado en cuanto a fomentar el uso de esta tecnología. A nivel de Montevideo, el mayor generador de contaminación sonora son los vehículos a combustión. La incorporación de vehículos eléctricos implicará una drástica

disminución de la misma, logrando beneficios tangibles a corto plazo para los ciudadanos.

Asimismo, los vehículos eléctricos no tienen emisiones de CO<sub>2</sub>. En el caso de Uruguay, muy probablemente la energía utilizada para cargar las baterías será de origen renovable. Al igual que se realiza en varias comunas de otras partes del mundo, sería lógico que se planteara una exoneración por al menos 5 años de la Patente de Rodados, así como exonerar de los costos de estacionamiento tarifado en la vía pública. De esta manera, se demostrará con hechos la intención de apoyar la incorporación de una tecnología limpia para el transporte en las ciudades.

Actualmente en Uruguay la importación de vehículos eléctricos o híbridos tienen un impuesto (IMESI) muy bajo, en comparación con los impuestos a la importación de vehículos a combustión. Esto tiene la finalidad de desincentivar la importación de vehículos contaminantes. Paradójicamente, la importación de piezas para el armado de vehículos eléctricos en Uruguay no cuenta con los beneficios del vehículo eléctrico. Por ejemplo, importar una batería de litio dentro de un vehículo eléctrico (conjuntamente con éste) tiene una carga impositiva sensiblemente inferior a importar una batería por separado y convertir un vehículo localmente. Las normas no contemplaron esta situación, siendo necesaria una rápida modificación para fomentar el desarrollo de mano de obra nacional y generar una industria incipiente a nivel mundial.

Si bien las prestaciones relevadas en la práctica con las condiciones particulares de manejo en nuestro país presentan una sensible diferencia con las prestaciones de diseño, la experiencia para UTE ha sido valorada como muy positiva.

## **22.18. Algunas reflexiones finales**

Este es el primer proyecto de investigación realizado en la Universidad de la República sobre esta tecnología. Los vehículos eléctricos son motivo de investigación aún hoy en día en muchas partes del mundo, mientras que aparece que esta vez se puedan configurar como una realidad en el sistema para lo cual es necesario prepararse.

A nivel mundial se le está dando un gran impulso ideológico para comenzar a migrar el parque automotor de combustión a eléctrico. Este impulso está amparado en la mejor eficiencia y en la protección medioambiental que conlleva el uso de esta tecnología, pero debe superar las barreras económicas y sociales para instalarse definitivamente en el seno de la sociedad.

Para lograr el advenimiento de los vehículos eléctricos en el mercado no alcanza solamente con el desarrollo tecnológico, aumentar la eficiencia y disminuir los costos, sino que es necesario dar señales regulatorias y un impulso gubernamental. Hay que llegarle al usuario final para que elija los vehículos eléctricos, ya que no hay que dejar de lado que son los consumidores quienes van a determinar el éxito de la penetración y del cambio.

Hay que tener en cuenta que no es solamente el vehículo, sino que se requiere toda una infraestructura alrededor; se necesita una estrategia y una logística que deben abordar los municipios, las compañías eléctricas, etc. Es decir que hay una serie de cambios y modificaciones que se tienen que dar en simultáneo.

Los vehículos híbridos y eléctricos van a cumplir un rol fundamental en el futuro, lo que no se sabe bien de que manera se va a hacer la transición y cuando, pero si que este es el camino correcto.

# Apéndice A

## Tabla comparativa de las diferentes baterías utilizables para vehículos eléctricos

	Densidad de energía (Wh/kg) – Energía específica	Densidad de Energía (Wh/L)	Potencia específica (W/kg)	Densidad de Potencia (W/L)	Economía de combustible – gasolina (km/L)	Eficiencia Promedio (Wh/km)	Eficiencia de ciclo (%)	Potencial nominal (V)	Capacidad de Carga teórica (mAh/g)	Capacidad de Carga práctica (mAh/g)	Velocidad de autodescarga	Ciclos de durabilidad	Tiempo de vida (años)
NiMH	(30) 50 - 100 (80)	140 - 300	(250) 500 - 1200	1000	34	99.45	66	1.1 – 1.3	800 - 2900		30% por mes	1000 - 5000	
NiMH-híbrido (HEVs)	(30) 50 - 100 (80)	140 - 300	500 - 1200	1000	34	99.45	85	1.1 – 1.3	800 - 2900		30% por mes	1000 - 5000	
Celda de Hidrógeno	10 - 600		100 - 500	10 - 600			90	0.7					0.5 a 5
Li-ion	120 (180)	40 - 200	260 (1800)			104.27	99,9	3,6 - 4			5 - 10%	3500 (500)	2 a 3
Li-Carbono	120 - 150								372	300 - 350			
Li-Aleación Metálica	130 (TiS <sub>2</sub> - LiAl/TiS <sub>2</sub> )	280 (TiS <sub>2</sub> - LiAl/TiS <sub>2</sub> )	4000				87 - 95%	2,1 - 2,3	300 - 1200	140 - 200		200 (9000)	20

Figura A.1: Tabla comparativa de las diferentes baterías utilizables para vehículos eléctricos



# Índice de figuras

2.1.	Thomas Edison y un coche eléctrico en 1913. [19]	17
2.2.	Camille Jenatzy en un coche eléctrico La Jamais Contente, 1899. [19]	18
2.3.	Anuncio del Detroit Eléctric. [19]	19
2.4.	Anuncio del Nuklea. [21]	20
2.5.	Fotografía de un Citicar. [22]	21
2.6.	Fotografía de un EV-1. [23]	21
3.1.	Tren de tracción primario de un vehículo eléctrico (modificado). [25]	26
3.2.	Diagrama conceptual de un tren de tracción moderno. [24]	27
3.3.	Configuraciones posibles de EV. [25]	28
3.4.	Configuración en Serie de un HEV. [26]	29
3.5.	Configuración en Paralelo de un HEV. [26]	30
3.6.	Configuración Híbrida Serie-Paralelo de un HEV. [26]	33
3.7.	Acople de velocidad (basada en imagen extraída de [25], pág. 138).	34
3.8.	Engranaje planetario, usado para acoplamientos por velocidad (extraído de [25] pág. 139).	35
3.9.	Acople alternativo entre velocidad o par con engranaje planetario (extraído de [25] pág. 145).	36
3.10.	Acople integrado de velocidad y par (extraída de [25] pág. 147).	37
4.1.	Diagrama presión-volumen, simulado e ideal.	41
4.2.	Diagrama presión-volumen, simulado e ideal.	43
4.3.	Diagrama presión-volumen, simulado e ideal.	45
4.4.	Diagrama de funcionamiento para calcular el consumo.	52
4.5.	Ciclos de conducción para autopista, semi-urbano y urbano.	52
6.1.	(a) La electrolisis 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 recombinados y generan energía en un proceso inverso (par galvánico o pila). [46]	66
6.2.	Estructura básica de una CdC cátodo - electrolito - ánodo. [46]	68
6.3.	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. [46]	69
6.4.	Diagrama de Energías en función de la coordenada de reacción. [46]	70
6.5.	Un banco de tres celdas donde se muestra como las placas bipolares conectan el ánodo de una celda con el cátodo de su vecina. [46]	71

7.1.	Curva de potencial vs. tiempo para la carga de hidrógeno y formación de hidruros fase $\alpha$ y $\beta$ y para la descarga posterior. . . . .	78
7.2.	Presión de equilibrio para la absorción de Hidrógeno por algunas aleaciones metálicas, en función de la temperatura. . . . .	78
8.1.	Curvas de potencial vs. capacidad de descarga de la batería de Ni-MH. Tanto la carga como la descarga se realizaron a 90mAh. . . . .	87
8.2.	Curvas de potencial vs. capacidad de descarga para batería de Li-ion. Tanto la carga como la descarga se realizaron a 125mAh. . . . .	88
8.3.	Curvas de descarga para batería de Ni-MH a diferentes velocidades. . . . .	89
8.4.	Dependencia de la Capacidad con la densidad de corriente para la batería de Ni-MH. . . . .	90
8.5.	Curvas de descarga para batería de Li-ion a diferentes velocidades. . . . .	90
8.6.	Dependencia de la Capacidad con la densidad de corriente para la batería de Li-ion. . . . .	91
8.7.	Diagrama de Nyquist, batería de Ni-MH 70% SOC. . . . .	91
8.8.	Diagramas de Nyquist para batería de Ni-MH a 70 y 50% de SOC. . . . .	92
8.9.	Circuito equivalente para sistemas Ni-MH. . . . .	92
8.10.	Diagrama de Nyquist, batería de Li-ion 100% SOC. . . . .	93
8.11.	Diagramas de Nyquist para batería de Li-ion a 100, 82, 66 y 50% de SOC. . . . .	94
8.12.	Circuito equivalente para sistemas LIB. . . . .	94
9.1.	Espira conductora de un motor de continua inmersa en un campo magnético. La imagen muestra dos posiciones de la espira luego de girar un $\alpha$ grados. [25] . . . . .	98
9.2.	Tensión inducida en una espira giratoria simple. [57] . . . . .	99
9.3.	Espira conductora con escobillas y anillos colectores. La imagen muestra dos posiciones de la espira luego de girar $\alpha$ grados. [25] . . . . .	99
9.4.	Tensión inducida en una espira giratoria simple. [57] . . . . .	100
9.5.	Modelo eléctrico de un motor de continua. . . . .	101
9.6.	Curva de magnetización de un material de tierras raras. [57] . . . . .	102
9.7.	Tipos de excitación de los motores de continua. [25] . . . . .	103
9.8.	Control de velocidad de un motor de continua con excitación independiente. . . . .	104
9.9.	Intensidad magnética $H$ y densidad magnética $B$ resultante en un devanado trifásico. [57] . . . . .	105
9.10.	Campo magnético resultante de los campos de estator y rotor. [57] . . . . .	106
9.11.	Modelo eléctrico del motor de inducción visto desde el estator. [57] . . . . .	107
9.12.	Flujo de potencia en un motor de inducción. [57] . . . . .	107
9.13.	Curva par velocidad de un motor de inducción. [57] . . . . .	108
9.14.	Esquema del funcionamiento del motor de reluctancia variable. [58] . . . . .	114
9.15.	Rotor y estator del motor de reluctancia variable. [58] . . . . .	115
10.1.	Principio de operación de un Chopper Step-Down (o clase A): (a) Circuito básico de Chopper; (b)-(e) Formas de onda. . . . .	119
10.2.	Principio de operación de un Chopper Step-Up (o clase B): (a) Circuito básico de Chopper; (b)-(d) Formas de onda. . . . .	121
10.3.	Convertidor de 4 Cuadrantes. . . . .	123
10.4.	Convertidor DC-DC Bidireccional. . . . .	123
10.5.	Esquema de Convertidor Boost para el diseño del controlador. . . . .	124

10.6. Respuesta en Frecuencia del Convertidor+Compensador Serie. . . . .	126
10.7. Modelo Simulink del sistema Convertidor DC/DC-Controlador. . . . .	126
10.8. Modelo Simulink del sistema Convertidor DC/DC-Controlador. . . . .	127
10.9. Convertidor DC/AC denominado Inversor (extraída de [25]). . . . .	128
10.10(a)Señales de referencias $V_a, V_b, V_c$ junto con la señal portadora triangular $V_{tr}$ . (b)Tensión <i>fase a</i> . (c)Tensión <i>fase b</i> . (d)Tensión <i>fase c</i> (extraída de [25]). . . . .	129
10.11Inversor DC-AC con Modulación de Ancho de Pulso: (a) Topología del inversor; (b) Señales de Control; (c) Tensión de referencia trifásica y portadora triangular; (d)Tensión de la fase a; (e) Tensión de la fase b; (f) Tensión de la fase c. . . . .	130
10.12Representación de voltajes trifásicos en el espacio vectorial. . . . .	131
11.1. Motor de continua funcionando como motor. . . . .	133
11.2. Motor de continua funcionando como generador. . . . .	134
11.3. Motor de continua cargando la batería. . . . .	134
11.4. Curva del motor inducción en la región generador. . . . .	135
11.5. Curva del motor síncrono en la región generador. . . . .	136
11.6. Energía de tracción y freno para el ciclo de conducción urbano FTP75. Extraído de [25]. . . . .	137
11.7. Porcentaje de la energía de frenado en relación a la potencia de frenado en un ciclo de conducción urbano FTP75. Extraído de [25]. . . . .	138
11.8. Potencia de frenado en función de la velocidad en los distintos ciclos de conduc- ción. Extraído de [25]. . . . .	139
11.9. Freno regenerativo paralelo y serial respectivamente (extraído de [67]). . . . .	140
12.1. Modelo Simulink del convertidor DC-DC. . . . .	142
12.2. Bloque Simulink de la etapa de potencia del convertidor DC-DC. . . . .	143
12.3. Bloque Simulink del control del convertidor DC-DC. . . . .	143
12.4. Resultados de la simulación del convertidor DC-DC. Arriba: corriente de carga; medio: corriente por el inductor; abajo: voltaje del bus de continua. . . . .	144
12.5. Modelo Simulink del inversor y el motor. . . . .	145
12.6. Resultados de la simulación del inversor y el motor. Arriba: par solicitado y par entregado; abajo: velocidad del rotor. . . . .	145
12.7. Modelo Simulink del control de freno regenerativo. . . . .	146
12.8. Resultados de la simulación del control de freno regenerativo. Arriba: velocidad del vehículo; medio: par total necesario (línea sólida) y par de umbral (línea punteada); abajo: par del motor (línea sólida) y par del freno mecánico (línea sólida). . . . .	147
12.9. Diagrama de bloques de la simulación completa. . . . .	148
12.10Resultados de simulación con freno regenerativo. . . . .	149
12.11Resultados de simulación sin freno regenerativo. . . . .	150
12.12Resultados de simulación: potencia entregada por la batería con y sin frenado regenerativo. . . . .	151
13.1. Evolución para el periodo 1993-2008. . . . .	156
14.1. Evolución histórica del parque automotor y del PIB. . . . .	157
14.2. Evolución histórica del PIB vs. evolución a futuro. . . . .	159
14.3. Evolución a futuro del parque automotor a nafta. . . . .	160

14.4. Evolución a futuro del parque automotor a gasoil. . . . .	160
14.5. Evolución a futuro del parque automotor total. . . . .	161
15.1. Zona metropolitana de Montevideo. [76] . . . . .	169
15.2. Diagrama de flujo de la simulación. . . . .	171
15.3. Estados y transiciones posibles. [73] (modificada) . . . . .	173
15.4. Carga No regulada - SOCi = 0, 1 día de simulación. . . . .	175
15.5. Carga No regulada - SOCi = 1, 1 día de simulación. . . . .	175
15.6. Carga no regulada. . . . .	176
15.7. Carga regulada entre las horas 19 y 23. . . . .	177
15.8. Carga regulada entre las horas 20 y 24. . . . .	177
15.9. Carga y Descarga (V2G entre las horas 19 y 23). . . . .	178
15.10 Carga y Descarga (V2G entre las horas 20 y 24). . . . .	178
15.11 Carga y Descarga todas las horas. . . . .	178
15.12 Demanda neta de energía (Carga y descarga todas las horas). . . . .	179
16.1. Demanda de Energía Eléctrica (sin incluir autos). . . . .	182
16.2. Potencia de origen eólico instalada. . . . .	184
16.3. Demanda de energía con y sin autos (caso pesimista - no regulado). . . . .	186
16.4. Demanda de energía con y sin autos (caso pesimista - regulado). . . . .	186
16.5. Demanda de energía con y sin autos (caso pesimista - V2G). . . . .	187
16.6. Demanda de energía con y sin autos (caso realista - no regulado). . . . .	188
16.7. Demanda de energía con y sin autos (caso realista - regulado). . . . .	188
16.8. Demanda de energía con y sin autos (caso realista - V2G). . . . .	189
16.9. Demanda de energía con y sin autos (caso optimista - no regulado). . . . .	190
16.10 Demanda de energía con y sin autos (caso optimista - regulado). . . . .	190
16.11 Demanda de energía con y sin autos (caso optimista - V2G). . . . .	191
17.1. Alisamiento de la curva programa MOVELE. [74] [85] . . . . .	194
17.2. Curva horaria en caso no regulado con y sin vehículos eléctricos. . . . .	195
17.3. Curva horaria en caso regulado con y sin vehículos eléctricos. . . . .	196
17.4. Curva horaria en caso V2G con y sin vehículos eléctricos. . . . .	196
18.1. Reducción del consumo de nafta. . . . .	203
18.2. Reducción del consumo de gasoil. . . . .	203
18.3. Consumo de gasoil para generar energía eléctrica. . . . .	204
18.4. Consumo de fueloil para generar energía eléctrica. . . . .	205
18.5. Consumo de gas natural para generar energía eléctrica. . . . .	205
18.6. Consumo de biomasa para generar energía eléctrica. . . . .	206
18.7. Composición del abastecimiento de la demanda de electricidad - escenario sin vehículos electricos. . . . .	207
18.8. Energía de combustibles asociados al suministro de la demanda de energía eléc- trica y parque vehicular considerado - fuel oil, gasoil y gas natural. . . . .	207
18.9. Energía de combustibles asociados al suministro de la demanda de energía eléc- trica y parque vehicular considerado - fuel oil, gasoil, gas natural y biomasa. . . . .	208
18.10 Ahorro de energía - fuel oil, gasoil y gas natural. . . . .	208
18.11 Ahorro de energía - fuel oil, gasoil, gas natural y biomasa. . . . .	209

19.1. Ejemplo de red de distribución radial con GD. . . . .	212
19.2. Flujos con el generador G inyectando potencia a la red. . . . .	212
19.3. Flujos con el generador G desconectado. . . . .	213
20.1. Valor medio y varianza de la potencia consumida con respecto al tiempo . . . . .	219
20.2. Valor medio de la corriente para los armónicos 3, 5, 7 y 9. . . . .	220
20.3. Forma de onda de la corriente consumida por el cargador en p.u. . . . .	221
20.4. Esquema del circuito de Carrasco. . . . .	222
20.5. Esquema del circuito de Pocitos. . . . .	222
20.6. Esquema del circuito de Punta Carretas. . . . .	222
20.7. Esquema del circuito modelado en PSIM para el caso de Punta Carretas. . . . .	225
20.8. Curva de carga diaria residencial en Montevideo. . . . .	226
20.9. Límites de emisión armónica individual - Cargas lenta y media. $P < 10$ kW. . . . .	235
20.10 Límites de emisión armónica individual - Carga rápida. . . . .	235
21.1. Comparativo entre recorridos. Se registraron los km recorridos y la tensión en el banco de baterías para distintos recorridos. . . . .	241
21.2. Comparativo entre los costos de los diferentes energéticos . . . . .	242
A.1. Tabla comparativa de las diferentes baterías utilizables para vehículos eléctricos	255

# Bibliografía

- [1] *Balance Nacional En Energía Útil De Uruguay 2006. Estudios de base para el diseño de estrategias y políticas energéticas: relevamiento de consumos de energía sectoriales en términos de energía útil a nivel nacional.* Montevideo, 7 de Julio de 2009. MIEM-DNETN. Proyecto OPP-BM 4598-UR-PNUD-URU/01/010.
- [2] *The state of the art of electric, hybrid and fuel cell vehicles* C.C. Chan, Proceedings of IEEE, Vol. 95 No. 4, April 2007.
- [3] *Power electronics for hybrid-drive systems.* Renken, F.; Wolf, J. Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on 2-5 Sept. 2007 Page(s):1 - 10
- [4] Top 10 tech cars. Voelcker, J. Spectrum, IEEE, Volume 46, Issue 4, April 2009 Page(s):42 - 4910 techno cars 2009
- [5] Changing the electricity game. Nourai, A.; Schafer, C. Power and Energy Magazine, IEEE. Volume 7, Issue 4, July-Aug. 2009 Page(s):42 - 47
- [6] Cars as power plants? It could-and should-happen!. Roman, H.T. Power and Energy Magazine, IEEE, Volume 4, Issue 3, May-June 2006 Page(s):96 - 94.
- [7] Charge! EVs power up for the long haul. Toepfer, C.B.; Spectrum, IEEE, Volume 35, Issue 11, Nov. 1998 Page(s):41 - 47
- [8] Kuriyama N, Sakai T, Miyamura H, Tanaka H, Ishikawa H, Uehara I. Vacuum 47 (1996) 889.
- [9] Hong K., J Alloys Compd 321 (2001) 307.
- [10] Furukawa N. J Power Sources 51 (1994) 45.
- [11] Akiba E. Curr Opin Solid St M 4 (1999) 267.
- [12] Cui N, He P, Luo JL., Acta Mater 47 (1999) 3737.
- [13] Sakai T, Uehara I, Ishikawa H. J Alloys Compd. 293-295 (1999) 762.
- [14] Regeneration in electric vehicles. Miller, R.H.; Brockman, J.J.; Kusko, A. Vehicular Technology Conference, 1978. 28th IEEE. Volume 28, 22-24 March 1978 Page(s):156 - 156
- [15] Optimization of parallel regenerative braking control strategy. Zhang Jingming; Song Bao-yu; Niu Xiaojing; Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE 3-5 Sept. 2008 Page(s):1 - 4

- [16] Signal interfacing for hybrid electric vehicular electronics and an implementation study. Hartavi, A.E.; Can Uygan, I.M.; Sezer, V.; Acarman, T.; Guvenc, L.; Kilic, V.; Yildirim, M.; *Vehicular Electronics and Safety*, 2008. ICVES 2008. IEEE International Conference on 22-24 Sept. 2008 Page(s):151 - 156
- [17] A control method of accelerator of an electric vehicle. Sugisaka, M.; Tanaka, H.; Hara, M.; *SICE-ICASE*, 2006. International Joint Conference 18-21 Oct. 2006 Page(s):5300 - 5303
- [18] <http://motor.terra.es/especiales-coches/articulo/coches-electricos-ecologicos-61026.htm>
- [19] <http://es.wikipedia.org/wiki/VehiculoElectrico>
- [20] <http://siguiendolassenales.blogspot.com/2008/11/un-poco-de-historia-autos-elctricos.html>
- [21] <http://www.sloshspot.com/>
- [22] <http://wonkatehabla.blogspot.com>
- [23] <http://www.evwind.es/>
- [24] *Autos Híbridos y Eléctricos*, Sergio Santana, Martín Mora, Gastón Hernandez, Gonzalo Casaravilla, Fernando Berrutti. Proyecto de fin de carrera de Ingeniería Eléctrica, año 2010, Montevideo, Uruguay.
- [25] *Modern Electric, hybrid electric and fuel cell vehicles-fundamentals theory and design* Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, and Ali Emadi, 2nd ed., CRC Press LLC, New York, 2009. ISBN: 0849331544.
- [26] <http://www.mecanicavirtual.org/index.php/>
- [27] Ronald M. Dell. *Clean Energy*. Royal Society of Chemistry, Cambridge., 2004.
- [28] Grolier. *The Automobile*. New Book of Popular Science 6th ed, Republic of China., 1978.
- [29] L. Guzzella and C. H. Onder. *Introduction to Modeling and Control of Internal Combustion Engine Systems*. Springer, Berlin, 2004.
- [30] F. Angulo-Brown, J. Fernández-Betanzos, and C. A. Pico. Compression ratio of an optimized Otto cycle model. *Eur. J. Phys.*, 15(1):38–42, 1994.
- [31] F. Angulo-Brown, J. A. Rocha-Martínez, and T. D. Navarrete-González. A non-endoreversible Otto cycle model: improving power output and efficiency. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 29:80–83, 1996.
- [32] F. Angulo-Brown, T. D. Navarrete-González, and J. A. Rocha-Martínez. An irreversible Otto cycle model including chemical reactions. In C. Wu, L. Chen, and J. Chen, editors, *Recent Advances in Finite-Time Thermodynamics*, Commack, New York, 1999. Nova Science Publishers.
- [33] A. Calvo Hernández, A. Medina, J. M. M. Roco, and S. Velasco. On an irreversible air standard Otto-cycle model. *Eur. J. Phys.*, 16:73–75, 1995.

- [34] A. Calvo Hernández, J. M. M. Roco, A. Medina, and S. Velasco. An irreversible and optimized four stroke cycle model for automotive engines. *Eur. J. Phys.*, 17:11–18, 1996.
- [35] J. M. M. Roco, A. Medina, A. Calvo Hernández, and S. Velasco. Ciclo Otto con irreversibilidades. *Revista Española de Física*, 12:39–43, 1998.
- [36] P. L. Curto-Risso, A. Medina, and A. Calvo Hernández. Theoretical and simulated models for an irreversible Otto cycle. *J. Appl. Phys.*, 104:094911(1–11), 2008.
- [37] M. Mozurkewich and R. S. Berry. Optimal paths for thermodynamic systems: The ideal Otto cycle. *J. Appl. Phys.*, 53 (1):34–42, 1982.
- [38] S. Özkaynak, S. Götkun, and H. Yavuz. Finite-time thermodynamic analysis of a radiative heat engine with internal irreversibility. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 27:1139–43, 1994.
- [39] S. Özkaynak. The theoretical efficiency limits for a combined cycle under the condition of maximum power output. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 28:2024–28, 1995.
- [40] J. Chen. The maximum power output and maximum efficiency of an irreversible Carnot heat engine. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 27:1144–49, 1994.
- [41] J. B. Heywood. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw-Hill, 1988.
- [42] H. W. Barnes-Moss. *A Designer's Viewpoint in Passenger Car Engines, Conference Proceedings*, pages 133–147. Institution of Mechanical Engineers, London, 1975.
- [43] B. W. Millington and E. R. Hartles. Frictional losses in diesel engines. *SAE paper 680590*, 77, 1968.
- [44] Y. Ge, L. Chen, F. Sun, and C. Wu. Reciprocating heat-engine cycles. *Applied Energy*, 81:397, 2005.
- [45] X. Qin, L. Chen, F. Sun, and C. Wu. The universal power and efficiency characteristics for irreversible reciprocating heat engine cycles. *Eur. J. Phys.*, 24:359–366, 2003.
- [46] James Larminie; Andrew Dicks; *Fuel Cell Systems Explained*; Editorial John Wiley y Sons. Ltd; Año 2000; England
- [47] Supramaniam Srinivasan; *Fuel Cell From Fundamentals to Application*; Editorial Springer; United States of America; Año 2009
- [48] Robert A. Huggins; *Advanced Batteries - Material science Aspects*; Editorial Springer; Año 2009 United States of America
- [49] Masaki Yoshio; Ralph J. Brodd; Akiya Kozawa (Eds.); *Lithium - Ion Batteries Science and Technologies*; Editorial Springer; United States of America
- [50] *The state of the art of electric, hybrid and fuel cell vehicles* C.C. Chan, Proceedings of IEEE, Vol. 95 No.4, April 2007
- [51] Aifantis K.E., Hackney S.A., Kumar R.V. High Energy Density Lithium Batteries: Materials, Engineering, Applications. 2010. Wiley-VCH.

- [52] Nazri G-A., Pistoia G. *Lithium Batteries: Science and Technology*. 2003. Springer Science and Business Media.
- [53] Cheng S., Zhang J., Zhao M., Cao C. *Journal of Alloys and Compounds* 1999. 292-295. 814-820.
- [54] Xu Y. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2004. 29, 749-757.
- [55] Hammouche A., Karden E., De Donker R.W. *Journal of Power Sources*. 2004. 127, 105-111.
- [56] Anik M. *Journal of Alloys and Compounds*. 2010. 491, 565-570.
- [57] *Máquinas Eléctricas*, Stephen J. Chapman, 4ta ed, 2005, Mc Graw-Hill Companies, Inc.
- [58] *Electric Vehicle Technology Explained*, James Larminie, John Lowry, 2003, Wiley
- [59] *Role of High Power Semiconductor Devices in Hybrid Electric Vehicles*, Madhwi Kumari, P.R. Thakura and D.N. Badodkar. IEEE 978-1-4244-7882-8/11, 2011.
- [60] *A Bidirectional Power Converter for Battery of Plug-in Hybrid Electric Vehicles*, Zheng Chen, Ziling Nie, Yuhong Fu, and Chris Chunting Mi, Department of Electric and Computer Engineering, University of Michigan-Dearborn, IEEE 978-1-4244-5226-2/10
- [61] *Design of a Bidirectional Buck-Boost DC/DC Converter for a Series Hybrid Electric Vehicle Using PSCAD/EMTDC* D.R Northcott, S. Filizandeh, A.R. Chevrefils, IEEE 978-1-4244-2601-0/09
- [62] *Dynamic Modeling and Control of Hybrid Electric Vehicle Powertrain Systems*, B.K. Powel, K.E. Bailey, S.R. Cikanek, October 1998.
- [63] *Design and construction of a bidirectional DCDC converter for an EV application*, Magnus Hedlund, Uppsala Universitet, Febrero 2010
- [64] *Bidirectional DC-DC converter fed drive for electric vehicle system*, Premananda Pany, R.K. Singh, R.K. Tripathi, *International Journal of Engineering, Science and Technology* Vol. 3. No. 3, 2011, pp. 101-110.
- [65] *Control strategy of active power filters using multiple voltage source PWM converters*, IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-22, pp. 460-465, Akagi, H. and Nabae, A., 1986.
- [66] *Pulse Width Modulation for Power Converters: Principles and Practice*, Holmes, D., Lipo, T., 2003
- [67] *Benchmarking of regenerative braking for a fully electric car*, Varocky, B.J., Nijmeijer, H., Jansen, S., Besselink, I.J.M., Mansvelder, R., 2011. Eindhoven: Eindhoven University of Technology.
- [68] *Impact Of Electric Vehicles* ICF International & Ecologic Institute, April 2011.
- [69] *Estrategia Uruguay III Siglo - Aspectos productivos* Oficina de Planeamiento y Presupuesto - Presidencia de la República, Agosto 2009.

- [70] *Anuario estadístico de transporte* Dirección nacional de transporte - Ministerio de transporte y obras públicas, 2007.
- [71] *Plan Estratégico de Energía para Montevideo (PEDEM)* Convenio IM-UDELAR/FI - Intendencia Municipal de Montevideo, Julio 2010
- [72] *Parque automotor del país - 1993 a 2005* Instituto Nacional de Estadística.
- [73] Master Thesis *Impact of the electric vehicle on the electric system* Méline Rousselle, KTH Electrical Engineering, 2009
- [74] Programa de movilidad eléctrica (España). [www.movele.es](http://www.movele.es)
- [75] <http://www.chevrolet.es/nuestros-modelos/volt/>
- [76] Mapa de Montevideo <http://uy.kalipedia.com/geografia-uruguay/tema/graficos-area-metropolitana-montevideo.html>
- [77] Trabajo de fin de curso *Simulación de Sistemas de Energía 2011 Modelado en SimSee de demanda del parque automotor eléctrico* Pablo Caldeiro, Diego Oroño, Carlos Tutté. Instituto de Ingeniería Eléctrica - FING - UdelaR. Julio 2011.
- [78] Stochastic Modeling of Power Demand due to EVs Using Copula, Alicja Lojowska, Student Member, IEEE, Dorota Kurowicka, Georgios Papaefthymiou, Member, IEEE and Lou van der Sluis, Senior Member, IEEE
- [79] The impacts of extra load from EVs in the Netherlands: A North-West Europe case study Alicja Lojowska, Ana Roxana Ciupuliga, Georgios Papaefthymiou and Ecofys Germany GmbH Electric Power Systems Group, Delft University of Technology- The Netherlands
- [80] Probabilistic Modeling of EV Charging and Its Impact on Distribution Transformer Loss of Life Sachin Argade, Visvakumar Aravinthan, Ward Jewell Department of Electrical Engineering and Computer Science Wichita State University Wichita, KS, USA
- [81] Plug-in HEV Charging for Maximum Impact of Wind Energy on Reduction of CO2 Emissions in Propulsion Rakesh Patil, Jarod Kelly, Hosam Fathy, Zoran Filipi
- [82] Distribution of PEV Charging Resources to Balance Transformer Life and Customer Satisfaction Q. Gong, S. Midlam-Mohler, V. Marano, G. Rizzoni. Center for Automotive Research The Ohio State University Columbus, OH, USA
- [83] Administración del Mercado Eléctrico [www.adme.com.uy](http://www.adme.com.uy)
- [84] Política energética 2005 - 2030 - Ministerio de Energía y Minería - [www.miem.gub.uy](http://www.miem.gub.uy)
- [85] REVE: Regulación eólica con vehículos eléctricos. <http://www.evwind.com>
- [86] Simulación de Sistemas de Energía, Ruben Chaer, Curso 2011.
- [87] *Estudio Del Consumo De Energía Del Sector Transporte - Estudios de base para el diseño de estrategias y políticas energéticas: relevamiento de consumos de energía sectoriales en términos de energía útil a nivel nacional* MIEM/DNE - Fundación Bariloche - Programa de Estudios e Investigaciones en Energía, Diciembre 2008.

- [88] *Evaluación De La Disponibilidad De Residuos O Subproductos De Biomasa A Nivel Nacional* Ing. Carlos Faroppa - MIEM/DNE, Setiembre 2010.
- [89] *Cost-causality based tariffs for distribution networks with distributed generation*, Mario Vignolo. PhD Tesis, año 2007, Montevideo, Uruguay.
- [90] *Análisis De Oportunidades De Incorporación De Proyectos De Eficiencia Energética De Alto Impacto*, Ernesto Elenter. Tesis de Maestría, año 2012, Montevideo, Uruguay.
- [91] *Proyecto PDT S/C/OP/16/04 - Generacion Distribuida En El Uruguay: Evaluacion De Fortalezas, Oportunidades Y Tratamiento Regulatorio*, Gonzalo Casaravilla, Mario Vignolo, Tomas Di Lavello, Ciro Mata, Ruben Mendez, Rúben Chaer, Beno Ruchansky, Jacques Montouliu, Mario Ibarburu, Alfredo Piria, Daniel Tasende, Estela Gianarelli, año 2006, Montevideo, Uruguay.
- [92] *Allocation of losses in distribution systems with embedded generation*, Mutale, J., Strbac, G., Curcic, S., Jenkins, N., IEEE Proc.-Gener. Transm. Distrib. 147(1), 1-8, 2000, Montevideo, Uruguay.
- [93] *IEC 61000-3-2: Electromagnetic Compatibulity (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment unput current lower than 16 A per phase*. 2001. International Electrotechnical Commission.
- [94] *IEC 61000-3-12: Electromagnetic Compatibulity (EMC) - Part 3-12: Limits - Limits for harmonic currents produced by equipment connected to public low-voltage systems with input current >16 A and <75 A*. 2004. International Electrotechnical Commission.
- [95] *A Statistical Method for Predicting the Net Harmoic Currents Generated by a Concentration of Electric Vehicle Battery Chargers* P.T Staats; W. M. Grady; A. Arapostathis; R.S. Thallam, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 12, No. 3, July 1997.
- [96] *IEEE 519 - 1992: Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems* 1992. IEEE.
- [97] *Reglamento de Calidad de Servicio de Distribución de Energía Eléctrica* Octubre 2010. URSEA.
- [98] *Resolución ENRE N° 99/97- Anexo. Base Metodológica para el Control de la Emisión de Perturbaciones Producto Técnico - Etapa 2* Enero 1997. ENRE.
- [99] *Vehículo Eléctrico: de la teoría a la práctica. Experiencias en la Conversión de un Vehículo de la Flota de UTE a Eléctrico* Ing. Gastón Hernández y Lic. Cr. Fernando Costanzo, Junio 2012.