



UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE INGENIERÍA



Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República por Juan Pedro Carriquiry, en cumplimiento parcial de los requerimientos para la obtención del título de Magister en Ingeniería de la Energía.

Impactos en la batería de un vehículo eléctrico debido a la entrega de energía remanente a una red eléctrica inteligente (V2G)

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Carlos Armenta Deu

Universidad Complutense de Madrid

DIRECTOR ACADÉMICO:

Dr. Ing. Mario Vignolo

Universidad de la República

1 de marzo de 2023

Montevideo - Uruguay

Índice general

Índice de figuras	7
Índice de cuadros	11
1. Introducción	3
2. Introducción a los vehículos híbridos y eléctricos a batería.	7
2.1. Introducción	7
2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).	8
2.2.1. Configuración serie del vehículo híbrido.	8
2.2.2. Configuración híbrido paralelo	10
2.2.3. Configuración del sistema híbrido serie-paralelo.	11
2.2.4. Clasificación por el grado de hibridación.	15
2.3. Vehículos eléctricos puros o vehículos eléctricos a batería (BEV).	16
3. Baterías para vehículos eléctricos.	19
3.1. Introducción.	19
3.2. Componentes de una celda.	20
3.2.1. Electrodo negativo.	20
3.2.2. Electrodo positivo	20
3.2.3. Electrolito y separador.	21
3.3. Operación de una celda.	21
3.3.1. Tensión de celda	21
3.3.2. Capacidad de la batería (Ah).	26
3.3.2.1. Capacidad teórica.	26
3.3.2.2. Capacidad real.	26
3.3.3. Energía almacenada en una batería.	28
3.3.3.1. Energía libre.	28
3.3.3.2. Energía teórica.	28
3.3.3.3. Energía específica real.	29
3.3.4. Corriente de descarga y C-rate.	30
3.3.4.1. Corriente de descarga.	30
3.3.4.2. C-rate.	31

3.3.5.	Temperatura de operación	32
3.3.6.	Estado de carga (SoC).	32
3.3.7.	Profundidad de descarga (DoD).	33
3.3.8.	Estado de Salud (SoH).	34
3.3.8.1.	Calendar Life o vida útil calendario	34
3.3.8.2.	Cycling Life o ciclabilidad	35
3.3.8.3.	Capacity Fade (CF) o Pérdida de Capacidad	35
3.3.8.4.	Power Fade (PF) o Pérdida de Potencia	35
3.4.	Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.	36
3.4.1.	Baterías de Niquel - Hidruro Metálico (Ni-MH).	37
3.4.2.	Baterías de Litio.	39
3.4.2.1.	Introducción.	39
3.4.2.2.	Baterías iones de Litio.	39
3.4.2.3.	Electrodos para baterías de litio-ion.	42
3.4.2.4.	Composición del electrodo negativo.	42
3.4.2.5.	Composición del electrodo positivo.	44
3.4.2.6.	Electrolito.	47
3.4.2.7.	Separadores.	47
3.4.3.	Baterías Litio-Polímero.	49
3.5.	Degradación en baterías de iones de Litio.	49
3.5.1.	Mecanismos de envejecimiento y sus causas.	50
3.5.1.1.	Efecto de temperaturas extremas.	51
3.5.1.2.	Efecto del rango de funcionamiento del Estado de Carga (SoC).	52
3.5.1.3.	Efecto de la profundidad de descarga (DoD).	53
3.5.1.4.	Efecto de la intensidad de corriente o ratio de descarga (C-rate).	56
3.5.1.5.	Interacción intensidad de corriente (C-rate) y temperatura.	57
3.5.1.6.	Efecto de la recarga rápida y de recarga a bajas temperaturas.	59
3.6.	Requisitos de seguridad y ensayos para baterías de vehículos eléctricos.	61
3.6.1.	Ensayos mecánicos.	62
3.6.1.1.	Prueba de choque mecánico.	62
3.6.1.2.	Ensayo de caída.	62
3.6.1.3.	Ensayo de penetración.	62
3.6.1.4.	Ensayo de inmersión.	63
3.6.1.5.	Ensayo de aplastamiento.	63
3.6.1.6.	Ensayo de vuelco o rotación.	63
3.6.1.7.	Ensayo de vibración.	63
3.6.2.	Ensayos eléctricos.	64
3.6.2.1.	Ensayo de cortocircuito externo.	64
3.6.2.2.	Ensayo de sobrecarga y sobredescarga.	64
3.6.2.3.	Ensayo de estabilidad térmica.	65
3.6.2.4.	Ensayo de choque térmico.	65
3.6.2.5.	Ensayo de sobrecalentamiento.	65

3.6.2.6.	Prueba de temperatura de frío extremo.	66
3.6.2.7.	Prueba de incendio.	66
3.6.2.8.	Ensayos de evaluación de peligro químico.	66
3.7.	Sistema de gestión de la batería o Battery Management System (BMS).	67
3.8.	Modelado de baterías.	68
3.8.1.	Introducción.	68
3.8.2.	Modelado mediante equivalente de Thévenin.	69
3.8.3.	Modelo dinámico.	70
3.8.4.	Modelado mediante la ecuación de Peukert.	71
3.8.5.	Modelado del estado de salud (SoH).	71
4.	Ciclos de conducción para vehículos.	75
4.1.	Introducción.	75
4.2.	Ciclos de conducción estandarizados.	76
4.2.1.	Ciclos de Conducción Europeos.	76
4.2.1.1.	Ciclo de Conducción ECE15.	76
4.2.1.2.	Ciclo de Conducción EUDC.	76
4.2.1.3.	Ciclo de Conducción EUDCL.	77
4.2.1.4.	Ciclo de Conducción NEDC.	77
4.2.1.5.	Ciclo de Conducción HYZEM.	77
4.2.1.6.	Ciclo de Conducción RDE.	77
4.2.2.	Ciclos de conducción estadounidenses.	78
4.2.2.1.	Ciclos de Conducción FTP 72 / EPA UDDS / LA-4.	78
4.2.2.2.	Ciclo de Conducción FTP 75.	78
4.2.2.3.	Ciclo de Conducción FUDS (vehículo eléctrico).	79
4.2.2.4.	Ciclo de Conducción SFUDS (vehículo eléctrico).	80
4.2.2.5.	Ciclo de Conducción GSFUDS: Generic Simplified Federal Urban Driving Schedule.	82
4.2.2.6.	Ciclo de Conducción HFEDS.	84
4.2.2.7.	Ciclo de Conducción IM-240.	84
4.2.2.8.	Ciclo de Conducción LA-92.	84
4.2.2.9.	Ciclo de Conducción NYCC.	84
4.2.2.10.	Ciclo de Conducción US-06.	84
4.2.3.	Ciclo Global de Conducción WLTP - Worldwide harmonized light vehicles test procedure.	85
5.	Potencia y energía extraídas de la batería.	87
5.1.	Introducción.	87
5.2.	Descripción general del movimiento del vehículo.	87
5.3.	Fuerzas resistivas sobre el vehículo.	88
5.3.1.	Resistencia a la rodadura.	88
5.3.2.	Resistencia de arrastre aerodinámico.	91
5.3.3.	Resistencia a la pendiente.	92

5.4.	Ecuación dinámica.	93
5.5.	Cálculo de torque.	93
5.6.	Cálculo de potencia del motor propulsor.	94
5.7.	Potencia y energía extraída de la batería.	96
6.	Cargadores de baterías para Vehículos Eléctricos.	99
6.1.	Introducción.	99
6.2.	Casos de conexión para la recarga.	100
6.2.1.	Caso A.	100
6.2.2.	Caso B.	100
6.2.3.	Caso C.	100
6.3.	Modos de carga.	100
6.3.1.	Modo 1	101
6.3.2.	Modo 2	101
6.3.3.	Modo 3	101
6.3.4.	Modo 4	102
6.4.	Conectores para vehículos eléctricos.	102
6.4.1.	Tipo Schuko	103
6.4.2.	Tipo 1 (SAE J1772)	103
6.4.3.	Tipo 2 (Mennekes)	103
6.4.3.1.	Descripción de los pines en conector Tipo 2	103
6.4.4.	Tipo 3 (Scame)	104
6.4.5.	Tipo GB/T	104
6.4.6.	Tipo CHAdeMO	104
6.4.7.	Tipo Combo 2	105
6.4.8.	Resumen de los conectores presentados.	105
6.5.	Tipos de cargadores para vehículos eléctricos.	106
6.5.1.	Cargadores para cargas en AC.	107
6.5.2.	Cargadores para cargas en DC.	107
6.5.3.	Cargadores bidireccionales.	107
6.6.	Comunicación SAVE - vehículo eléctrico.	109
6.6.1.	Esquema básico de los sistemas de carga.	109
6.6.2.	Protocolo de comunicación OCPP.	110
6.6.2.1.	Proceso de encendido del SAVE.	111
6.6.2.2.	Inicio o parada de una carga de VE.	111
6.6.3.	Protocolo SAE J1772.	113
6.6.3.1.	Implementación de circuitos según protocolo SAE J1772.	114
6.6.3.2.	Visualización del comportamiento del circuito.	115
6.6.4.	Protocolo de comunicación en modo V2G.	117

7. Análisis Técnico del V2G	119
7.1. Introducción.	119
7.2. Descripción general del sistema V2G.	120
7.3. Instalaciones eléctricas requeridas para el V2G.	122
7.4. Impactos del V2G sobre la batería del vehículo eléctrico.	128
7.4.1. Introducción.	128
7.4.2. Principales impactos negativos del modo V2G sobre la batería del vehículo eléctrico.	129
7.4.2.1. Impacto de los ratios adversos de carga y descarga (C-rate).	130
7.4.2.2. Efecto adverso de la temperatura en el modo V2G.	131
7.4.2.3. Efecto adverso de la profundidad de descarga (DOD) y el expendio de energía en el modo V2G.	132
7.4.2.4. Efecto adverso de la operación a elevados estados de carga.	134
7.5. Posibles consecuencias negativas en el desempeño del vehículo, como consecuencia de la degradación de sus baterías.	136
7.6. Optimización del funcionamiento en modo V2G.	138
7.7. Simulaciones de la degradación en Matlab-Simulink.	144
7.7.1. Simulaciones de la degradación de la batería del vehículo en modo conducción.	144
7.7.2. Evaluación del SOH en función de la distancia recorrida.	148
7.7.3. Simulaciones de la degradación de la batería debido al uso en modo V2G.	149
8. Análisis Económico de los Impactos del V2G.	153
8.1. Introducción.	153
8.2. Modelo de negocio.	154
8.2.1. Supuestos asumidos y presentación del modelo de negocio.	155
8.2.2. Vehículo seleccionado para el modelo de negocio.	157
8.2.3. Inversiones requeridas.	159
8.2.4. Valor residual del proyecto.	160
8.2.5. Costo de reemplazo de un banco de baterías de Litio-ion.	162
8.3. Resultados de la evaluación económica.	164
8.4. Análisis de sensibilidad.	167
8.5. Incentivos y herramientas de promoción del V2G.	170
9. Conclusiones	171
10. Bibliografía	175

Índice de figuras

2.1.	Esquema del modelo híbrido serie. Elaboración propia con base en [1].	9
2.2.	Esquema representativo de la configuración híbrido paralelo. Elaboración propia con base en [1].	10
2.3.	Representación esquemática del modelo híbrido serie-paralelo. Elaboración propia con base en [1].	12
2.4.	Representación esquemática del modelo híbrido serie-paralelo complejo. Fuente: [1].	13
2.5.	Representación esquemática del sistema de engranajes planetario utilizado en el vehículo tipo serie-paralelo complejo. Fuente: [1].	14
2.6.	Esquema básico de un vehículo eléctrico a batería (BEV). Fuente: [2]	17
3.1.	Esquema básico de una celda electroquímica. Fuente: [3].	20
3.2.	Potencial estándar de reacción de electrodos a 25°C. Fuente: [3].	22
3.3.	Potencial de operación de una celda en función de la corriente. Fuente: [3] . . .	24
3.4.	Valores de tensión característicos de una celda o batería. Elaboración propia con base en [3].	25
3.5.	Rango útil de funcionamiento de una batería durante el proceso de descarga. Fuente: [2].	27
3.6.	Capacidad de celdas o baterías en función de la intensidad de corriente de descarga. Elaboración propia con base en [3].	28
3.7.	Densidad de energía Vs. Energía específica para diferentes tipos de baterías. Fuente: [3].	30
3.8.	Regímenes de descarga de una batería que permiten el aumento de la cantidad de carga entregada. Fuente: [3].	31
3.9.	Porcentaje de la capacidad nominal que entrega una celda para distintas temperaturas de operación. Fuente: [3].	32
3.10.	Estrategias de uso de baterías para distintos tipos de vehículos. Se aprecia cómo distintas profundidades de descarga tendrán incidencia en la vida útil. Fuente: [2].	34
3.11.	Energía específica y potencia específica de diferentes tipos de baterías. Fuente: [4].	37
3.12.	Principio de funcionamiento de la batería de Li-ion, a) durante el proceso de carga, b) durante el proceso de descarga. Adaptado de [5].	40

3.13. Valores de tensión de algunos compuestos metálicos de intercalación, en comparación con el valor de referencia del litio metálico. Elaborado a partir de [6]. . .	44
3.14. Representación esquemática de las principales características de algunas de las celdas presentadas, según la composición química del electrodo positivo. Adaptado de [7].	48
3.15. Comportamiento simulado del Estado de Salud de una batería debido al ciclado a diferentes temperaturas de operación. Fuente: [8].	52
3.16. Caída en la capacidad (%) en función del tiempo para distintos porcentajes de estado de carga (1) 15 %, (2) 55 %, (3) 85 %. Fuente: [9]	53
3.17. Capacidad nominal (%) en función del tiempo para distintos niveles de profundidad de descarga (DoD). Fuente: [9].	54
3.18. Caída en la capacidad nominal (%) en función del tiempo para distintos niveles de profundidad de descarga (DoD), corregido por la cantidad de Ah entregados. Fuente: [9].	55
3.19. Pérdida de capacidad para una serie de profundidades de descarga, a temperatura de 34°C. Cada uno de los tres cuadros corresponde a una corriente de descarga (2C, 3.5C, 5C). Fuente: [10].	56
3.20. Capacidad normalizada de una celda de litio-ion LiNiCoAlO ₂ (NCA), de 3 Ah de capacidad, sometida a diferentes regímenes de ensayo. Fuente: [11].	57
3.21. Pérdida de capacidad a cuatro temperaturas (10°C, 22°C, 34°C, 46°C) a un ratio de descarga de 6.5C. La profundidad de descarga es 50 % para todos los puntos de la figura. Fuente: [10]	58
3.22. Pérdida de capacidad para una serie de tasas de descarga (0.5 C, 2 C, 3.5 C, 5 C, 6.5 C) a una temperatura de 46°C. La profundidad de descarga es del 50 % para todos los datos en la figura. Fuente: [10].	59
3.23. Caída en la vida útil cuando se somete la celda a recarga a bajas temperaturas. Fuente: [12].	60
3.24. Ejemplo de una secuencia de medición y control implementada en un BMS. Fuente: [13].	68
3.25. Equivalente Thevenin de la batería.	69
3.26. Esquema eléctrico usado para el modelado del comportamiento dinámico de una celda electroquímica. [14].	70
4.1. Representación gráfica del ciclo estandarizado NEDC. Fuente: [15].	77
4.2. Representación gráfica del ciclo estandarizado UDDS	78
4.3. Representación gráfica del ciclo estandarizado FTP75	79
4.4. Representación gráfica del ciclo estandarizado FUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al freno regenerativo. Fuente: [16].	80
4.5. Representación gráfica del ciclo estandarizado SFUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al freno regenerativo. Fuente: [16].	81

4.6.	Representación gráfica del ciclo estandarizado GSFUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al frenado regenerativo. Fuente: [16].	83
4.7.	Representación gráfica del ciclo estandarizado WLTP, donde se aprecian cuatro sectores diferenciados correspondientes a zona de baja, media, alta y extra alta velocidad. Fuente: [17].	86
5.1.	Esquema de las fuerzas actuantes sobre un vehículo que sube una pendiente. Fuente: [2].	88
5.2.	Fuerzas actuantes sobre la superficie de una rueda, a) en terreno duro y b) en terreno blando. Fuente: [2].	89
5.3.	Coefficientes aerodinámicos para algunos tipos de vehículos y carrocerías. Fuente: [2].	92
5.4.	Curvas características de torque y potencia en un motor eléctrico. Adaptado de [2].	95
5.5.	Sistema traccionario elemental con frenado regenerativo. Fuente: [1].	96
6.1.	Representación gráfica de los cuatro modos de carga presentados en la sección. Fuente: elaboración propia con base en [18].	102
6.2.	Modo de conexión de los pines del conector Tipo 2.	104
6.3.	Representación visual de los conectores expuestos en el presente capítulo. Fuente: [19].	106
6.4.	Tabla original comercial de un cargador bidireccional de la empresa ENDESA.	108
6.5.	Flujo de Carga y protocolos intervinientes entre el centro de gestión de carga, el SAVE y el vehículo eléctrico.	109
6.6.	Lógica de encendido del SAVE [18].	111
6.7.	Lógica de autorización del usuario mediante el SAVE [18].	112
6.8.	Circuito interno del SAVE conforme al protocolo SAEJ1772	115
6.9.	Simulación Circuito de Comunicación SAE en Vacío (SAE J1772).	116
6.10.	Simulación Circuito de Comunicación SAE Conectado al Vehículo (SAE J1772).	116
6.11.	Simulación Circuito de Comunicación SAE con el Vehículo Listo para Cargar (SAE J1772).	117
7.1.	Posible esquema de conexionado de un sistema V2G con sus principales componentes y flujos de energía y comunicación. Elaboración propia.	121
7.2.	Probabilidad de que el vehículo se encuentre bajo conducción (azul, fijo) o detenido (rojo, discontinuo). Fuente: [20].	122
7.3.	Esquema general del conexionado y funcionamiento del V2G. Elaboración propia.	123
7.4.	Esquema básico de una instalación eléctrica para la recarga en modo V2G. Elaboración propia.	124
7.5.	Esquema unifilar orientativo propuesto en el Capítulo XXIX del Reglamento de Baja Tensión de UTE.	126

7.6.	Requisitos sobre armónicos y compatibilidad electromagnética establecidos en el Capítulo XXIX del RBT de UTE.	127
7.7.	Requisitos sobre armónicos y compatibilidad electromagnética establecidos en el Capítulo XXIX del RBT de UTE.	128
7.8.	Ajuste lineal de las curvas de influencia de la tasa de corriente de carga sobre la degradación de la celda NMC. Fuente: [21].	130
7.9.	Influencia de la profundidad de la descarga en la degradación relativa de la capacidad de la celda NMC. Fuente: [20].	133
7.10.	Pérdida de capacidad en función del SOC después de 18 meses de almacenamiento para la celda NCA. Fuente: [22].	134
7.11.	Pérdida de capacidad en función del SOC para la celda NCA. Se presentan los tres rangos de operación para SoC bajo, medio y alto. Adaptado de [22].	135
7.12.	Representación esquemática del algoritmo empleado en [23] para evaluar la descarga en modo V2G.	140
7.13.	Circuito equivalente empleado para el modelado del comportamiento de la batería de un VE empleado para el estudio de los impactos debido al V2G. Fuente: [23].	142
7.14.	Comparación de la pérdida de capacidad (CF, en azul) y la pérdida de potencia (PF, en rojo) entre el ciclo optimizado V2G (línea punteada) y el caso de referencia no optimizado (línea llena). El gráfico corresponde al caso $\Delta SoC_{Drive} = 15\%$. Fuente: [23].	143
7.15.	Ciclo de conducción real relevado en la ciudad de Montevideo. Elaboración propia.	146
7.16.	Esquema general del modelo implementado en Matlab-Simulink. Adaptado de [24].	146
8.1.	Extracto del pliego tarifario de UTE correspondiente a la tarifa Medianos Consumidores, subcategoría MC1.	155
8.2.	Esquema de uso del vehículo eléctrico según los diferentes rangos horarios. Elaboración propia.	157
8.3.	Extracto de la ficha técnica del vehículo seleccionado para el estudio. Fuente: información del representante.	158
8.4.	Imágenes proporcionadas por el representante de los exteriores e interiores del vehículo seleccionado.	159
8.5.	Curva de depreciación de vehículos eléctricos utilizada para la evaluación. Fuente: [25].	161
8.6.	Valores del VAN, resultantes del análisis de sensibilidad al aumentar los precios de venta de EE (hora punta) y los beneficios de la Ley 16.906.	168
8.7.	Valores de la TIR resultantes del análisis de sensibilidad al aumentar los precios de venta de EE (hora punta) y los beneficios de la Ley 16.906.	169
8.8.	Valores del VAN y de la TIR resultantes del análisis de sensibilidad al mejorar el valor residual del vehículo.	169

Índice de cuadros

2.1. Clasificación de vehículos híbridos según el grado de hibridación. Fuente: [1]. . .	15
3.1. Valores prácticos y teóricos de magnitudes de tensión, capacidad y energía específica para un conjunto de diferentes tipos de baterías. Fuente: [3].	29
3.2. Comparativo entre algunas características de las baterías NiMH y Li-ion. Fuente: [5]	38
3.3. Características principales de la batería de litio-ion. Fuente: [3].	41
3.4. Características físicas y eléctricas de algunas celdas cilíndricas de litio-ion, de electrodos de $C/LiCoO_2$. Fuente: [3].	42
3.5. Dependencia del SOC y la temperatura para el parámetro d , a un C-rate de 2C	72
4.1. Valores tabulados del ciclo estandarizado SFUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al freno regenerativo. Fuente: [16].	82
4.2. Comparativo de los principales parámetros de los ciclos de conducción FUDS, SFUDS y GSFUDS. Adaptado de [16].	84
5.1. Valores de coeficiente de rozamiento para distintas condiciones de pavimentación. Fuente: [2].	90
6.1. Descripción de los pines de conexión de un conector Tipo 2.	104
6.2. Caracterización de los conectores más utilizados en el mundo. Fuente: [19]. . . .	105
6.3. Caracterización de cargadores en función de su potencia máxima entregada. . .	107
6.4. Secuencia de Estados Según el Protocolo SAE. Extraído de la norma SAE J1772.	113
6.5. Duty Cycle del PWM vs Corriente de Carga Máxima. Extraído de la norma SAE J1772.	114
6.6. Condiciones de operación Mosfet. Extraído de la norma SAE J1772.	115
7.1. Principales características de los vehículos eléctricos utilizados en las simulaciones. Fuente: [24].	145
7.2. SOH de las baterías luego de recorrer 2, 4 y 6 ciclos WLTP diarios durante 5, 7 y 9 años. Fuente: [24].	148
7.3. SOH de las baterías al realizar un recorrido diario y V2G. Fuente: [24].	149

7.4.	Presentación de los resultados de deterioro incremental en el SOH de las baterías debido exclusivamente al impacto del V2G (tres últimas columnas), según las simulaciones realizadas acordes al modelo utilizado. Fuente: [24].	150
8.1.	Inversiones estimadas para el modelo de negocio que incluye un sistema V2G.	159
8.2.	Inversiones estimadas para el modelo de negocio que incluye un sistema VE, donde el vehículo es sometido únicamente a ciclos de conducción.	160
8.3.	Datos de entrada para los cálculos económicos y financieros del caso.	165
8.4.	Valores resultantes de la evaluación económica para el proyecto con operación en modo V2G.	166
8.5.	Valores resultantes de la evaluación económica para el proyecto con operación en modo alquiler sin V2G.	167



Glosario de términos y abreviaciones

- VE o EV: Vehículo Eléctrico.
 - BEV: vehículo eléctrico a batería o eléctrico puro.
 - VH o HV: Vehículo Híbrido.
 - HEV: vehículo híbrido eléctrico.
 - PHEV: vehículo eléctrico híbrido enchufable.
 - V2G: Vehicle-to-Grid (vehículo a red).
 - G2V: Grid-to-Vehicle (red a vehículo).
 - V2H: Vehicle-to-Home (vehículo a hogar).
 - V2L: Vehicle-to-Load (vehículo a carga eléctrica).
 - V2V: Vehicle-to-Vehicle (vehículo a vehículo).
 - V2X: Vehicle-to-X (vehículo a una carga genérica).
 - SAVE o EVSE: Sistema de Alimentación de Vehículos Eléctricos (o cargador de VE).
 - MCI o ICE: motor de combustión interna.
 - VCI: vehículo de combustión interna.
 - ME: motor eléctrico.
 - PSD: tren planetario de engranajes.
 - CVT: transmisión continuamente variable.
 - VCU, UCI, UCC o UCV: unidad central de control del vehículo
 - SOC: estado de carga.
 - DOD: profundidad de la descarga.
 - SOH: estado de salud.
 - C-rate: intensidad de carga/descarga en función de la capacidad.
 - EFC o FEC: ciclo completo de carga/descarga equivalente en una celda o batería.
 - RCD: degradación relativa de la capacidad.
 - BMS: sistema de gestión o gerenciamiento de la batería.
-

- OCV: tensión de circuito abierto.
 - R_{int} : resistencia interna.
 - EOL: final de vida de la batería.
 - BOL: comienzo de la vida de la batería.
 - EE: energía eléctrica.
 - CCE o SDC: ciclo de conducción estandarizado
 - FC: carga rápida.
 - XFC: carga rápida extrema o carga súper rápida.
 - OCPP 1.6: Protocolo de comunicación entre el SAVE y centro de control de carga.
 - JSON: Objeto en Notación JavaScript. Es un formato de texto, para envío de datos.
 - PDU: Mensaje en formato JSON con los campos determinados en OCPP 1.6
 - IEC 61851-1: Protocolo de comunicación entre SAVE y Vehículo Eléctrico.
 - SAE J1772: Protocolo de comunicación entre SAVE y Vehículo Eléctrico.
 - OBC: On-Board Charger (convertidor a bordo del vehículo eléctrico)
 - ISO/IEC 15118: Protocolo de comunicación entre SAVE y Vehículo Eléctrico.
-

Resumen

Se está observando actualmente en el sector transporte, el uso cada vez en mayor número de vehículos eléctricos para diversos tipos de desplazamientos, lo cual representa una alternativa creciente al uso de combustibles fósiles, que está introduciendo relevantes cambios en el sector energético y en la industria automotriz. El cambio que se prevé tiene implicaciones más allá del mercado del automóvil, y tendrá importantes repercusiones en el mercado eléctrico y en el reemplazo del consumo de derivados del petróleo como se conoce hasta hoy. Una de las inquietudes que surgen en relación a los vehículos eléctricos está relacionada al vínculo entre el vehículo y la red, y a la posibilidad que tendrán los vehículos de recargarse y entregar energía diaria excedentaria a la red eléctrica, en horarios y a precios suficientemente convenientes. Sin embargo, no es conocido aún de qué forma podría impactar en la batería de un vehículo eléctrico, el hecho de vincular de forma inteligente el vehículo a la red, si se decide vender energía eléctrica al distribuidor en cierta franja horaria a un precio dado, para luego comprar energía en otra franja horaria a un precio menor al precio de venta. Resulta de lo anterior que no se conoce la disponibilidad que tendrán los propietarios de los vehículos eléctricos de vender energía excedentaria al distribuidor, ni tampoco a qué precio, dado que no se conocen los impactos que pueda provocar en la batería del vehículo eléctrico la conexión a una red inteligente para comprar y vender energía eléctrica.

El presente trabajo busca determinar y cuantificar de qué forma puede impactar en la batería de un vehículo eléctrico la conexión del vehículo a una red inteligente, para cargarse y luego entregar a la red cierta cantidad de energía remanente en la batería (V2G, del inglés vehicle-to-grid, o vehículo-a-red en español). Para esto, el trabajo busca determinar el estado de la tecnología de las baterías utilizadas en los vehículos eléctricos y caracterizar el tipo de baterías más utilizadas actualmente. Del mismo modo, se relevan los ciclos de conducción más utilizados en el mundo y sus principales características luego de una explicación minuciosa de las características principales de los vehículos híbridos y eléctricos y la forma adecuada de la determinación del consumo de potencia y energía durante la conducción. Finalmente, se analizan las implicaciones del V2G en las baterías de los vehículos eléctricos y se propone por último un modelo de negocios en el cual se monetizan los ingresos y egresos, teniendo en cuenta asimismo los impactos de la degradación agregada en las baterías como consecuencia del uso de los vehículos eléctricos en modo conducción, en contraposición con el modo en el cual se agrega el V2G.

Capítulo 1

Introducción

Cada vez en mayor cantidad se observan vehículos eléctricos tanto en la vía pública como en diferentes medios físicos y digitales. Si bien los retos científicos y tecnológicos son muchos y de distinta naturaleza, una de las inquietudes que surgen en relación a los vehículos eléctricos está centrada en el vínculo entre el vehículo y la red eléctrica, y la posibilidad que tendrán los vehículos de recargarse y entregar periódicamente energía excedentaria a la red, en horarios y a precios suficientemente convenientes. Sin embargo, no es conocido aún de qué forma podría impactar en la batería de un vehículo eléctrico la vinculación de forma inteligente del vehículo a la red, si se decide vender energía eléctrica al distribuidor en cierta franja horaria, para luego comprar energía en otra franja horaria.

De lo anterior surge el concepto denominado V2G, proveniente del inglés Vehicle-To-Grid, que representa el intercambio bidireccional de energía entre la red eléctrica y el vehículo eléctrico, lo cual permite no sólo la recarga del vehículo, sino además también la entrega de energía almacenada en las baterías hacia la red eléctrica. Adicionalmente, el término V2G ha adoptado otras variantes denominadas genéricamente V2X, representando en tal caso la "X" o bien un hogar (H), o bien otro vehículo (V) o bien cualquier otro dispositivo o instalación factible de recibir energía almacenada en la batería del vehículo eléctrico (L). Dadas las posibles variantes que se abren en este campo, se hace necesario incursionar en todas las implicaciones que pueda existir, tanto técnicas, tecnológicas, regulatorias o medioambientales. Asimismo, debido al aumento de carga que implica el aumento de la flota eléctrica sobre el sistema eléctrico, surge la necesidad de evaluación de los cambios requeridos en la infraestructura actual y la determinación de una planificación estratégica de puntos de recarga de vehículos eléctricos, tanto unidireccionales como bidireccionales (V2G).

En el presente trabajo se realiza un relevamiento de los distintos avances tecnológicos desarrollados en los vehículos eléctricos en los últimos años, recorriendo las tecnologías disponibles comercialmente y reconociendo aquellas opciones que se presentan como más ventajosas desde el punto de vista de sus prestaciones, incluyendo en un análisis desde el punto de vista técnico a nivel de usuario residencial y comercial. Adicionalmente, dada la creciente capacidad de almacenamiento de energía eléctrica en las baterías de los vehículos eléctricos, se incursiona en el estado de la tecnología de las baterías utilizadas en los vehículos eléctricos y se analiza la

posibilidad de vincular la energía acumulada en los vehículos con la red eléctrica, de forma de que el intercambio sea conveniente y factible desde punto de vista técnico.

El foco de esta tesis está puesto en una revisión holística del vehículo eléctrico y sus baterías, incursionando en los diferentes tipos de vehículos eléctricos y las diferentes tecnologías de almacenamiento energético en baterías. Dentro de los tipos de vehículos eléctricos, se realiza una descripción tanto de vehículos eléctricos puros como de vehículos eléctricos híbridos, incursionando en los diferentes formatos y arquitecturas. Para la descripción de los tipos de vehículos eléctricos se presentan los principales componentes y las diferentes clasificaciones.

En el capítulo correspondiente a las baterías, se presenta el funcionamiento de la celda electroquímica, unidad elemental que compone un paquete de baterías, introduciendo las principales variables que son utilizadas tanto durante la operación como para el estudio de las celdas. Del mismo modo, se presentan las principales tecnologías que han sido empleadas en los últimos años en vehículos híbridos y eléctricos, las cuales son las de Níquel hidruro-metálico y las de iones de Litio. Se presentan sus principales elementos constituyentes así como también su funcionamiento y las reacciones electroquímicas que intervienen. Además de lo anterior, son presentados los restantes elementos de un paquete de baterías y los principales mecanismos y fenómenos que intervienen y ocasionan su degradación, con el foco puesto en las baterías de iones de Litio. Se presentan entonces de forma pormenorizada los diferentes mecanismos de degradación y envejecimiento que se pueden observar, así como son presentado también los diferentes ensayos mecánicos, químicos y eléctricos a los cuales pueden estar sometidas las celdas o baterías para su aprobación o para su uso. Finalmente, a los efectos de acceder al estudio y análisis de celdas y baterías, se presentan algunos de los modelos eléctricos equivalentes utilizados para estudiar el comportamiento de almacenadores electroquímicos.

Por otra parte, con el fin de estudiar de qué manera se evalúa, pronostica y analiza el consumo de energía de los vehículos, son presentadas las ecuaciones que describen las fuerzas que intervienen en el desplazamiento de los vehículos, así como además son presentados también los ciclos de conducción estandarizados, existentes en diferentes regiones del globo. Dentro del movimiento lineal de los vehículos, tres principales características son las relevantes: máxima potencia por aceleración, máxima potencia por subida de pendiente y máxima potencia por velocidad final; todas ellas queda descriptas por las ecuaciones presentadas. Asimismo, respecto a los ciclos de conducción, en primer lugar se realiza la definición y la presentación de los que se entienden más populares o más relevantes, abriéndose el debate acerca de su fidelidad respecto a una conducción real así como además su adecuación a los vehículos eléctricos. En tal sentido, se presenta una referencia en la cual se ha diseñado, ejecutado y validado un ciclo de conducción en la ciudad de Montevideo hecho en un vehículo eléctrico perteneciente a la empresa pública proveedora de energía eléctrica. Tal caso ha sido tomado como medio de análisis para, a través de simulaciones realizadas, derivar la degradación de la batería del vehículo y pronosticar (para el caso conservador no optimizado) la degradación de las baterías y el estado de salud al cabo de ciertas exigencias.

Dado el objeto de estudio de esta tesis, adquiere relevancia la interfase entre el vehículo eléctrico y la red eléctrica, es decir, los cargadores de vehículos eléctricos tanto unidireccionales como bidireccionales. Por tal motivo, se desarrolla un capítulo en el cual se describen los distintos

tipos de conectores para vehículos eléctricos y sus características, los diferentes tipos y modos de carga, así como además aspectos de comunicación, tanto entre el vehículo y el cargador como también entre el cargador y el gestor de la red eléctrica, el cual podría virtualmente acceder a la gestión de la demanda. Asimismo, son presentadas los principales conceptos de las instalaciones eléctricas requeridas para la implementación del V2G, así como además algunas nociones acerca de la reglamentación vigente en Uruguay, la cual no permite actualmente este modo de operación. Finalmente, el modelo de negocio de un caso de estudio es presentado, describiendo las características de un negocio hipotético planteado para Uruguay, en el cual la toma de decisiones es basada tanto en aspectos comerciales, económicos y financieros, afectados estos por el impacto en la degradación de las baterías de los vehículos eléctricos debido al V2G.

Dentro de los principales hallazgos a los que se llega como consecuencia del presente trabajo, se encuentra que las baterías de los vehículos eléctricos son un activo económico actualmente subempleado en relación a la capacidad que tienen como almacenadores de energía eléctrica, los cuales podrían contribuir de forma muy significativa a resolver algunos problemas, tanto desde el punto de vista de la red eléctrica como desde el punto de vista de la infraestructura para la generación de energía, al tiempo que podrían llegar a reeditar a los propietarios de los vehículos. El V2G, en tal caso, debería ser implementado mediante adecuados algoritmos de optimización que permitan, por un lado, optimizar la gestión de las baterías desde la óptica de la red, minimizando al mismo tiempo la degradación de las baterías, obteniendo en consecuencia los máximos beneficios. Desde el punto de vista de las tecnologías disponibles, ya puede encontrarse comercialmente soluciones accesibles que permiten la implementación del V2G, por lo que se entiende que resta una adecuación regulatoria y la implementación de incentivos fiscales y/o tarifarios para que el V2G se vuelva, en Uruguay, una alternativa factible y reeditable.

Capítulo 2

Introducción a los vehículos híbridos y eléctricos a batería.

2.1. Introducción

En el presente capítulo se describen brevemente los distintos tipos de vehículos eléctricos e híbridos a batería, presentando sus principales características y principales aspectos de su arquitectura. Se exponen las distintas configuraciones de sistemas de propulsión que existen para los vehículos híbridos y eléctricos, sus ventajas y desventajas, y sus características técnicas. La siguiente sección presentará las tipologías y arquitectura de los vehículos híbridos y eléctricos, indicando en cada caso sus principales componentes. Seguidamente, se presentan las clasificaciones de los diferentes vehículos híbridos en sus distintas configuraciones, siguiendo finalmente con la descripción del vehículo eléctrico puro o vehículo eléctrico a batería (BEV por sus siglas en inglés).

Los vehículos eléctricos (VE o EV en inglés) y los vehículos híbridos se caracterizan por utilizar al menos un motor eléctrico para la tracción y baterías, ultra capacitores, tanque de hidrógeno u otra tecnología como fuente de almacenamiento energético. Luego de haber reducido la limitación tecnológica vinculada con el almacenamiento de energía, los vehículos híbridos y eléctricos tienden a ocupar un lugar importante en el mercado automotriz, sustituyendo en muchos casos a los vehículos convencionales basados en motores de combustión interna (MCI o ICE en inglés). Los EV presentan un conjunto de ventajas sobre los vehículos convencionales, tales como ausencia de emisiones de gases de efecto invernadero durante la conducción (emisiones por tubo de escape), independencia del petróleo y una operación con menores niveles de contaminación sonora. 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 autonomía puede situarse típicamente entre los 50 y los 400 kilómetros, o incluso más. Actualmente se encuentran en vías de desarrollo distintos tipos de baterías que están permitiendo superar estos valores en algunos modelos o en prototipos.

Otra característica relevante de los vehículos híbridos y eléctricos, que mejora el desempeño

2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).

en el ámbito urbano, es la incorporación del frenado regenerativo, que aprovecha la energía cinética del vehículo en el momento del frenado para recargar la batería, evitando disipar esta energía en forma de calor como sucede con los vehículos convencionales.

2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).

La definición de vehículo híbrido según el foro mundial para la armonización de las reglamentaciones sobre vehículos (WP.29) de las Naciones Unidas es *"aquel vehículo con al menos dos sistemas de almacenamiento de energía y al menos dos convertidores de energía"*. 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 desempeño no siendo aptos para realizar viajes extensos. Para estos fines existen los vehículos híbridos los cuales están constituidos por al menos un motor eléctrico y al menos un motor de combustión interna. Además, están también disponibles comercialmente los vehículos a pila de combustible (Fuel Cell Vehicles), los cuales son también vehículos híbridos que incorporan un tanque de hidrógeno y baterías como fuente de almacenamiento, además del motor eléctrico.

Estos vehículos comparados con los convencionales de combustión interna son más eficientes, consumen menos combustible y emiten menor cantidad de gases de efecto invernadero por el tubo de escape (tailpipe), además de ser más silenciosos en ciertas condiciones. De acuerdo a cómo se dispongan los acoplamientos del motor eléctrico y del MCI existen varias arquitecturas en el sistema de tracción. Las configuraciones más extendidas en la industria automotriz son la configuración serie, paralelo y serie-paralelo. Adicionalmente, existe una clasificación por el *"grado de hibridación"*, que va desde un híbrido *"mild"* hasta un híbrido *"enchufable"* los cuales son presentados en la sección 2.2.4.

2.2.1. Configuración serie del vehículo híbrido.

En la configuración serie del vehículo híbrido solamente un convertidor de energía (motor eléctrico) puede proporcionar potencia de propulsión al vehículo y no existe conexión mecánica entre el motor de combustión interna y las ruedas del vehículo. Como puede verse en la figura 2.1, en esta configuración el MCI acciona un generador eléctrico que recarga la batería, la cual, a su vez, es la que alimenta el motor eléctrico de propulsión.

2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).

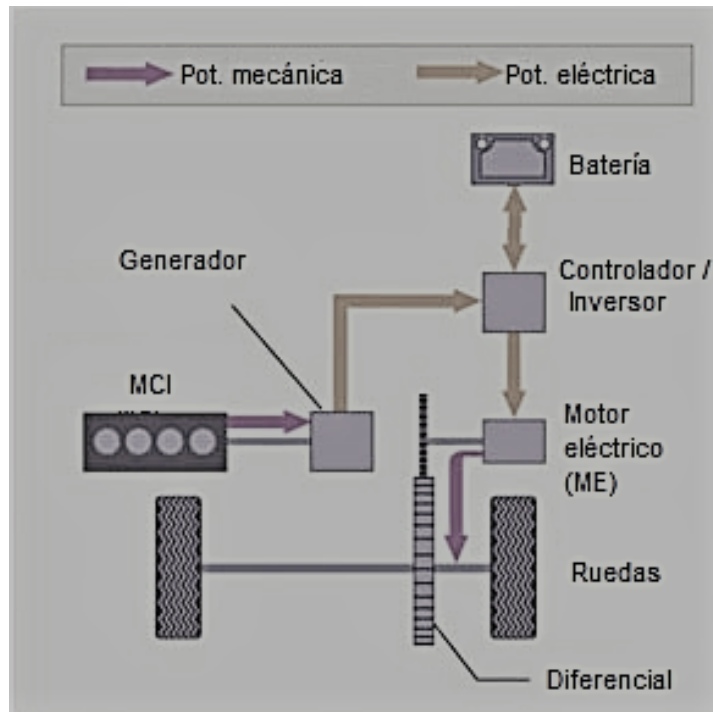


Figura 2.1: Esquema del modelo híbrido serie. Elaboración propia con base en [1].

Como se observa en la figura 2.1, el flujo de energía eléctrica está constituido por un MCI acoplado a un generador el cual alimenta o bien las baterías o bien al motor eléctrico, lo cual es definido por la unidad de control. Justamente, como interfaz entre el el generador y las baterías se encuentra un inversor/controlador que administra el flujo de energía eléctrica.

Las principales ventajas del sistema híbrido serie son:

- Es posible seleccionar el punto de funcionamiento del MCI (rpm, par).
- Implica una reducción del tamaño del MCI, ya que no está diseñado para el pico de potencia.
- La tracción es puramente eléctrica.
- Existe un amplio rango de funcionamiento en modo puramente eléctrico (todo el rango).
- Puede implementarse la recuperación de la energía del frenado.
- Es una configuración fácil de implementar, con menores exigencias técnicas que otras configuraciones.
- El sistema de gestión de la transmisión es relativamente simple.

2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).

Como contrapartida, las principales desventajas del sistema híbrido serie son:

- Bajo rendimiento energético.
- Necesidad de utilizar dos máquinas eléctricas (generador y motor eléctrico), lo que implica mayor costo, masa y volumen.
- Modificaciones significativas comparado con el tren de potencia convencional.
- Gran almacenamiento energético en baterías (mayor costo, masa y volumen)

2.2.2. Configuración híbrido paralelo

La configuración híbrido paralelo es aquella en que mas de una fuente de energía puede proporcionar potencia de propulsión al mismo tiempo o en diferentes momentos. El MCI y el motor eléctrico se configuran en paralelo, con un acoplamiento mecánico que combina los pares de ambas fuentes de energía. En la figura 2.2 se puede apreciar el esquema de conexión de este sistema de propulsión.

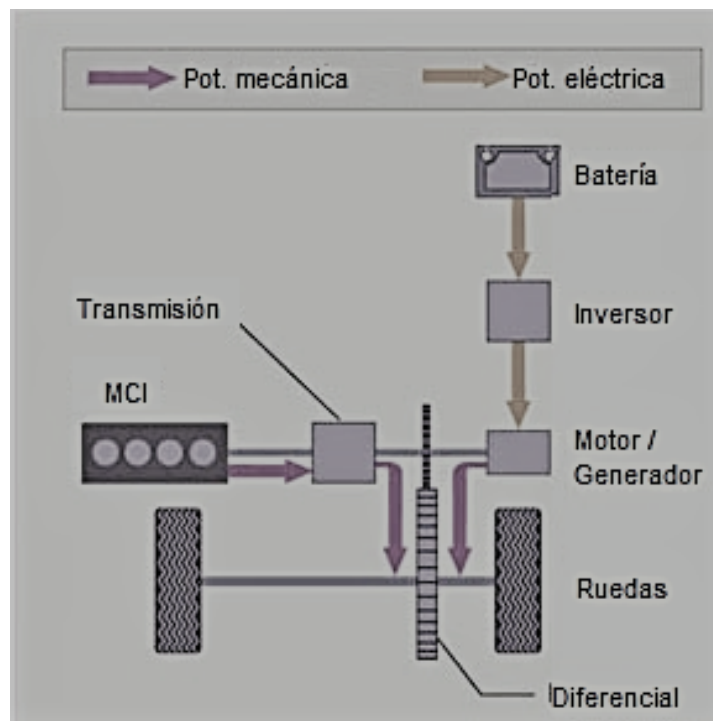


Figura 2.2: Esquema representativo de la configuración híbrido paralelo. Elaboración propia con base en [1].

2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).

En esta configuración, el acoplamiento mecánico generalmente puede ser como acoplamiento de par, como acoplamiento de velocidad o ambos. En el acoplamiento de par, el acoplador mecánico añade los pares de MCI y del ME juntos y entrega el par total a las ruedas. El par del MCI y del ME pueden ser controlados de forma independiente. Pero las velocidades del MCI, ME y del vehículo están vinculadas conjuntamente con una relación fija que no se puede controlar independientemente debido a la restricción de conservación de la potencia. En el acoplamiento de velocidad, las velocidades del MCI y del ME se pueden añadir juntas y todos los pares están vinculados. No se pueden controlar de forma independiente.

Las principales ventajas del sistema híbrido paralelo son:

- Buen rendimiento energético.
- Pocas modificaciones comparadas con el tren de potencia convencional.
- Posibilidad de tracción con el MCI.
- Menor número de componentes.
- Requiere menor capacidad de baterías.

Las principales desventajas del sistema híbrido paralelo son:

- El MCI debe operar en un rango amplio.
- No es posible eliminar totalmente los transitorios del MCI.
- Menores posibilidades de reducir el tamaño del MCI.
- Poca o nula tracción eléctrica si se quiere mantener componentes de reducido tamaño.
- La recuperación de la energía debido al frenado es limitado (menor que en el sistema serie, debido al tipo de motor y batería que en general se usa).
- Gestión compleja de la transmisión (cambios, modos, dinámica)
- Suele ser más dificultosa la instalación de los componentes.
- Acoplamientos mecánicos complejos.

2.2.3. Configuración del sistema híbrido serie-paralelo.

Esta configuración es aquella en la que el MCI también se utiliza para cargar la batería. Hay una conexión adicional entre el generador y el motor eléctrico, comparado con la configuración serie, y un generador adicional comparado con el híbrido paralelo. Es necesaria la presencia de uno o varios embragues para interrumpir los acoplamientos mecánicos para poder modificar la configuración a serie o paralelo.

2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).

Si bien es una combinación entre las configuraciones serie y paralelo, el éxito depende de maximizar las ventajas de ambas configuraciones, minimizando las desventajas, lo que supone un especial esfuerzo en el diseño de los componentes y, debido a esto, una gestión y control altamente complejos. En el arranque solo se utiliza el ME. Durante la condición normal de conducción el MCI propulsa solo el vehículo. En aceleración el ME asiste al MCI. Durante el frenado o deceleración el ME funciona como generador para cargar la batería (freno regenerativo) y en parada el MCI puede funcionar para cargar la batería a través del generador.

Al no haber caja de velocidades parece razonable que el modo paralelo se utilice a altas velocidades cuando el MCI puede conectarse directamente al eje de transmisión, mientras que el modo serie es mas usual a bajas velocidades. En ambos casos, ya que hay un embrague, el MCI puede desconectarse durante la deceleración para optimizar la energía recuperada. La presencia del o los embragues, según el vehículo, directamente colocados en el eje principal requiere de una gestión muy precisa en los transitorios esto esta directamente relacionado con garantizar un buen confort en la conducción. La figura 2.3 presenta la forma como se relacionan los componentes.

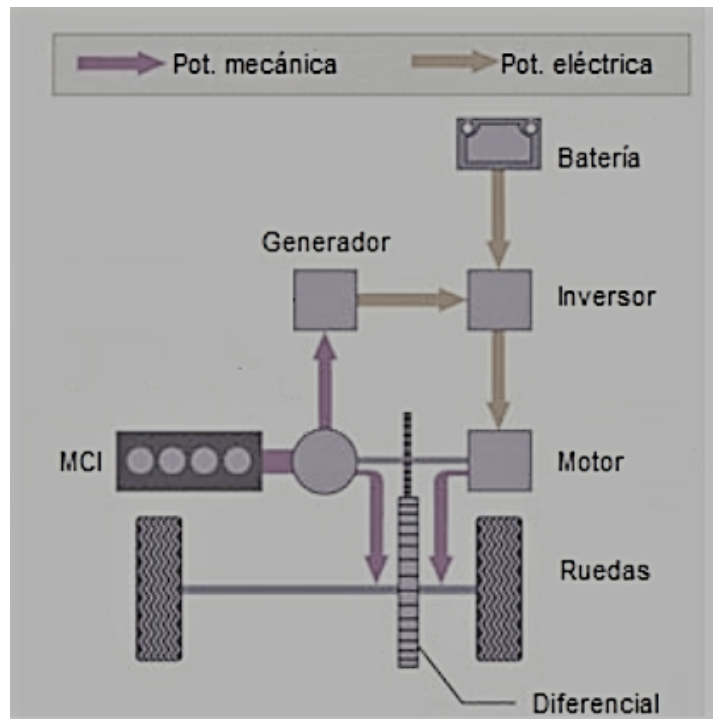


Figura 2.3: Representación esquemática del modelo híbrido serie-paralelo. Elaboración propia con base en [1].

Por su parte, la configuración híbrido serie-paralelo complejo utiliza tanto el acoplamiento de par como el acoplamiento de velocidad, el cual es un tren planetario de engranajes compuesto de un engranaje central (sol), un anillo exterior y una serie de engranajes colocados entre el sol

2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).

y el anillo denominado planetas; el tren planetario es en inglés denominado PSD o Power Split Device. El PSD elimina la necesidad de una caja de cambios tradicional y otros componentes de transmisión. Actúa como una transmisión continuamente variable (CVT) pero con una relación de transmisión fija. El PSD permite que el automóvil use la energía de un motor de combustión interna, así como 2 motores eléctricos/generadores (MG1 y MG2), todos girando a velocidades diferentes y variables. El PSD permite que el más pequeño de los dos motores/generadores, MG1 (conectado al sol del sistema planetario), actúe como motor de arranque para el MCI, eliminando así otro componente típico vehículo convencional. La figura 2.4 presenta la forma como se relacionan los componentes, mientras que la figura 2.5 presenta el sistema de engranajes planetario junto con las ecuaciones de par y velocidad correspondientes.

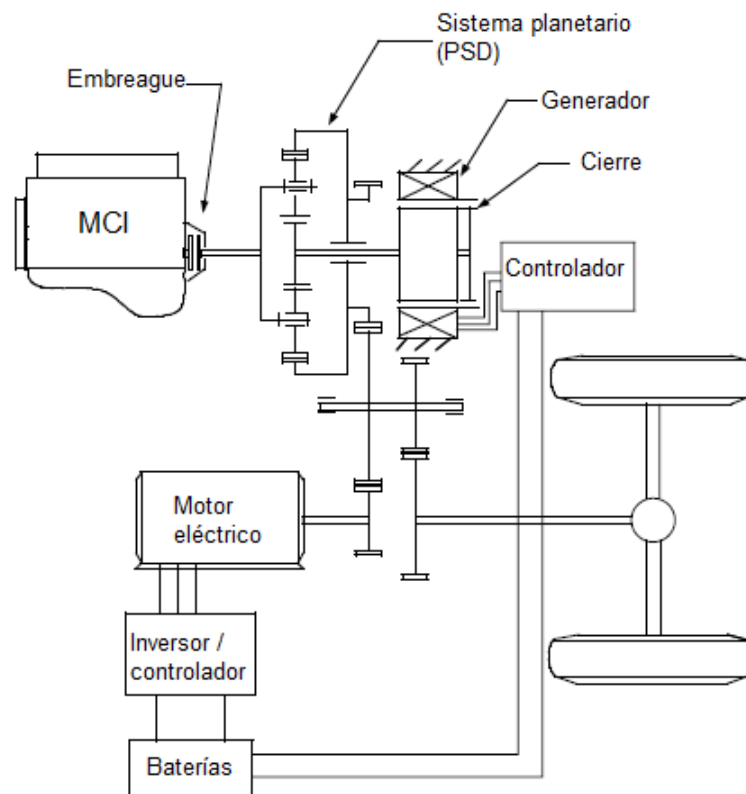


Figura 2.4: Representación esquemática del modelo híbrido serie-paralelo complejo. Fuente: [1].

En el sistema serie-paralelo complejo, el MG2 (conectado al anillo del sistema planetario) es el más grande de los 2 motores/generadores eléctricos y también se conoce como motor de tracción porque su velocidad tiene una relación fija con la velocidad de las ruedas. Existe una relación directa entre la velocidad de giro del MG2 y la velocidad del vehículo, mientras que cambiar la velocidad del MCI no necesariamente se ve afectada la velocidad del automóvil. El

2.2. Vehículos eléctricos híbridos (HEV).

MCI puede girar más rápido o más lento, dependiendo de cuánta potencia se necesite, y con la resistencia o la asistencia de los motores eléctricos, el automóvil puede alcanzar la velocidad deseada mientras mantiene el MCI funcionando en un punto de alta eficiencia.

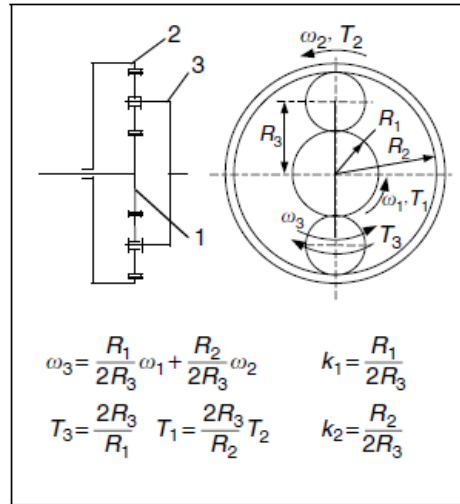


Figura 2.5: Representación esquemática del sistema de engranajes planetario utilizado en el vehículo tipo serie-paralelo complejo. Fuente: [1].

En la figura 2.5, 1 representa el sol, 2 el anillo y 3 los planetas, los cuales son unidos entre sí mediante un elemento denominado yugo.

Las principales ventajas del sistema híbrido serie-paralelo son:

- Buen rendimiento energético.
- Posibilidad de tracción con el MCI.
- Requiere menor capacidad de baterías.

Las principales desventajas del sistema híbrido serie-paralelo son:

- El MCI debe operar en un rango relativamente amplio.
- Muchas diferencias comparadas con el tren de potencia convencional.
- Gran número de componentes.
- Menores posibilidades de reducir el tamaño del MCI.
- Poca tracción eléctrica si se quiere mantener componentes de reducido tamaño.
- Gestión compleja de la transmisión (cambios, modos, dinámica)
- Sistema de control y acoplamientos mecánicos complejos.

2.2.4. Clasificación por el grado de hibridación.

Una forma comunmente utilizada para la clasificación de distintos tipos de vehículos eléctricos es la que refiere al grado de hibridación como se muestra en la tabla 2.2.4. En la misma son señaladas las distintas funciones que se verifican en cada uno de los tipos de VHE, indicando de izquierda a derecha el aumento en el nivel de electrificación del vehículo y la denominación correspondiente en la columna izquierda. Se enumera asimismo a continuación, de forma descriptiva, las características de cada uno de los tipos de vehículo:

- **Micro híbrido.** Vehículo de combustión interna (VCI) con sistema de ahorro de combustible y reducción de emisiones de gases contaminantes. Uso de ME sólo para el sistema arranque-parada (start-stop), ME apaga y enciende el MCI cuando el vehículo se encuentra detenido.
- **Híbrido ligero.** VCI con características híbridas limitadas: sistema arranque-parada con ME, niveles modestos de asistencia al MCI, o frenado regenerativo. No proporciona propulsión completamente eléctrica.
- **Híbrido Total.** Puede funcionar sólo con el MCI, con el ME o combinación de estos (en serie, paralelo, o serie-paralelo). Carecen de conexión eléctrica para recargar su batería. La misma se carga durante las fases de frenada y bajada, y también utilizando parte de la energía producida por el MCI. Poseen una batería más grande y de mayor capacidad para funcionar sólo con el ME. Menos autonomía que el Plug-in híbrido (5 km).
- **Plug-in híbrido o Enchufable.** Vehículo híbrido con baterías recargables. A diferencia de los otros híbridos, el Plug-in híbrido presenta una conexión eléctrica para recargar su batería, como en el caso de los BEVs. Posee un MCI para cargar la batería cuando sea necesario (híbrido en serie) o para operar cuando sea requerido (híbrido en paralelo o serie-paralelo). Poseen batería grande que le brinda una mejor autonomía (20-55 km en modo 100 % eléctrico). Su mercado se encuentra en auge, la mayoría de los fabricantes presentan un modelo de estas características.

Tipo	Start-stop	Freno regen./ Arranque eléctrico	Modo EV	Recargable
Micro híbrido	Si	No	No	No
Híbrido ligero	Si	Si	No	No
Full híbrido	Si	Si	Si	No
Plug-in híbrido	Si	Si	Si	Si

Cuadro 2.1: Clasificación de vehículos híbridos según el grado de hibridación. Fuente: [1].

Se puede observar cómo, según esta clasificación, el grado de hibridación aumenta y se complejiza a medida que se aumenta en la escala. El micro híbrido o *mild hybrid* presenta apenas un sistema start-stop que permite apagar el MCI durante las paradas, el híbrido ligero agrega

2.3. Vehículos eléctricos puros o vehículos eléctricos a batería (BEV).

una pequeña batería recargable que aprovecha la energía del frenado mediante un pequeño motor generador que puede también ser propulsor, el full híbrido ya supone una configuración como alguna de las presentadas anteriormente, y finalmente la última categoría corresponde al vehículo híbrido enchufable, el cual puede recargar las baterías tanto durante la conducción como desde la red eléctrica.

Cabe señalar que, dependiendo del tipo de vehículo híbrido, y dependiendo de la lógica de control implementada en la computadora del vehículo, este puede funcionar en modo *Charge Sustaining* (mantenimiento de la carga) o en modo *Charge Depleting* (agotamiento de la carga), lo cual ocurre principalmente en vehículos híbridos enchufables. El modo *Charge Sustaining* mantiene la carga de la batería en un rango de flotación, estableciendo la curva de carga y descarga en forma de diente de sierra, siendo típicamente un modo implementado para vehículos no enchufables. Por otra parte, el modo *Charge Depleting* es típicamente implementado en vehículos híbridos enchufables, los cuales tienen un rango de autonomía en modo sólo eléctrico y la computadora opta por abastecerse solamente de la batería, o bien sin encender el MCI o bien sin hacer uso de éste para la recarga de la batería.

2.3. Vehículos eléctricos puros o vehículos eléctricos a batería (BEV).

Los vehículos eléctricos a batería no disponen de MCI, sino que son únicamente propulsados por un motor eléctrico. Además, la energía eléctrica para la propulsión proviene de baterías, donde la tecnología de iones de litio es la más extendida hasta el momento, sin perjuicio de investigaciones que puedan arrojar resultados promisorios mediante el uso de otras tecnologías. En la figura 2.6 se presenta un esquema básico donde se utiliza un solo motor de propulsión y son presentados los subsistemas de propulsión, subsistema de almacenamiento de energía, y subsistema de elementos auxiliares.

2.3. Vehículos eléctricos puros o vehículos eléctricos a batería (BEV).

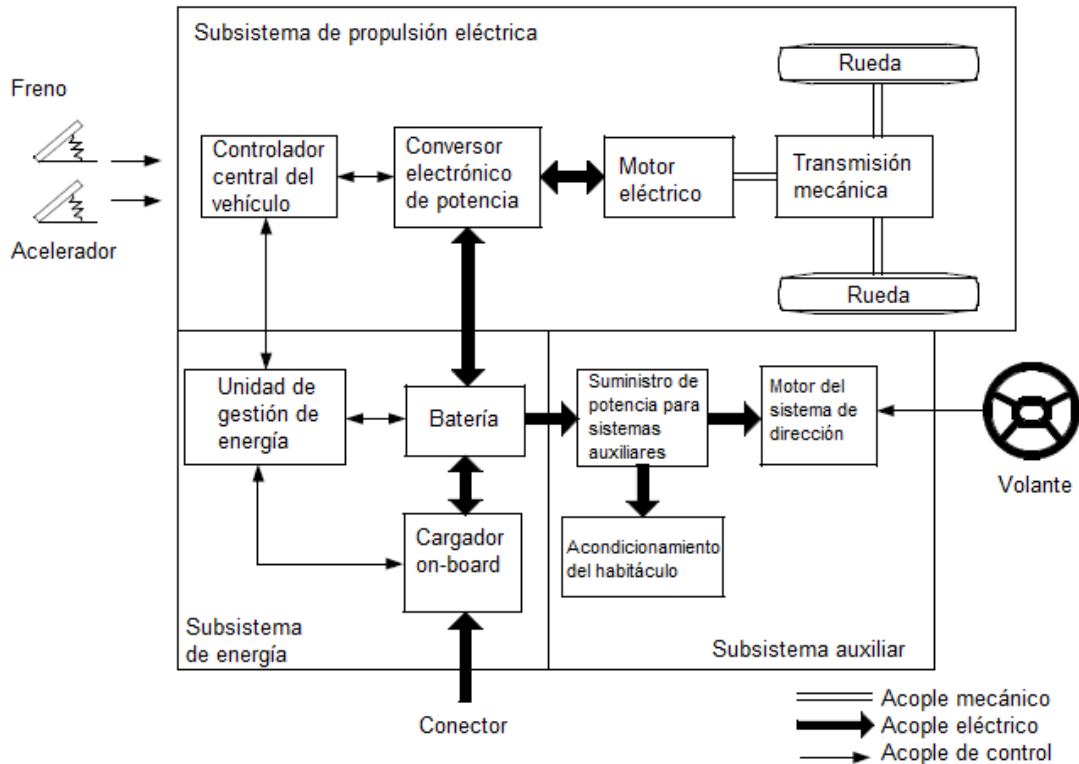


Figura 2.6: Esquema básico de un vehículo eléctrico a batería (BEV). Fuente: [2] .

En la figura 2.6, dentro de los tres subsistemas presentados se puede observar cada uno de sus elementos principales. En el subsistema de propulsión, se observa el motor eléctrico acoplado a la transmisión mecánica que acciona a su vez las ruedas del vehículo. Asimismo, puede verse cómo el motor es alimentado a través del convertidor electrónico de potencia el cual es controlado por la unidad de control central (VCU o vehicle control unit en inglés),

Del mismo modo, pueden ser observados los principales componentes del sistema de almacenamiento de energía, integrado por la batería y el cargador de a bordo, además de la unidad de gestión de energía que se comunica a su vez con la VCU. Finalmente, el subsistema auxiliar está compuesto por una unidad que suministra energía a todos los sistemas auxiliares, entre los que se encuentra el acondicionamiento y la dirección del vehículo, entre otros. Todo esto, a su vez, tiene como entradas el suministro exterior de energía eléctrica mediante un sistema de alimentación para vehículos eléctricos (SAVE), así como además las señales de aceleración, freno y otros comandos accionados por el conductor del vehículo.

Capítulo 3

Baterías para vehículos eléctricos.

3.1. Introducción.

A la hora de considerar los requerimientos que deben cumplir las baterías para vehículos eléctricos, hay que tener en cuenta la energía específica (kWh/kg), la densidad de energía (kWh/L), la potencia específica (kW/kg) y la densidad de potencia (kW/L). También deben ser tenidos en cuenta aspectos como la inversión inicial, el costo total para el propietario, la eficiencia, los requisitos de mantenimiento, el impacto ambiental, la seguridad, el rango de temperatura de operación, entre otros aspectos.

Dentro de estos requerimientos, los valores de energía específica y densidad de energía son clave dado que determinan la autonomía del vehículo eléctrico a batería. Asimismo, son también críticos la densidad de potencia, los ciclos de vida, la vida calendario, y la inversión inicial cuantificada en dólares por kWh. Por otra parte, para vehículos eléctricos híbridos (HEV) es más relevante la densidad de potencia que la densidad energética de la batería, dado que la autonomía la proporciona el combustible líquido. En tanto, la batería debe responder en potencia a las rampas de aceleración y pendientes que afronta el vehículo.

En cuanto a los restantes requerimientos, todos ellos adquieren mayor o menor relevancia dependiendo de las características de diseño del vehículo; particularmente los aspectos de seguridad y/o reglamentación (*S&R*) son puntos que deben ser indefectiblemente cumplidos por el fabricante.

Las principales características de operación de las baterías que se estudiarán en el presente capítulo son: capacidad, voltaje, energía específica, potencia específica, eficiencia energética, estado de carga (SoC) y estado de salud o envejecimiento (SoH).

En el presente capítulo se hará referencia tanto a celdas como a baterías, entendiendo que una batería es un conjunto de celdas dispuestas en serie y/o en paralelo con los correspondientes elementos de medición y control. Las baterías recargables son denominadas baterías secundarias, mientras que las baterías no recargables son denominadas baterías primarias. Dado que los vehículos eléctricos utilizan baterías secundarias y no usan baterías primarias, en el presente trabajo se hará referencia exclusivamente a las primeras (baterías secundarias), y no se hará referencia a las baterías primarias.

3.2. Componentes de una celda.

Las baterías para vehículos eléctricos son dispositivos electroquímicos que convierten energía química en energía eléctrica durante el proceso de descarga, y convierten energía eléctrica proveniente de la red, en energía química durante la recarga. Se componen típicamente por un conjunto de celdas electroquímicas iguales conectadas entre sí, las cuales se componen de los siguientes elementos básicos: electrodo negativo, electrodo positivo, electrolito y separador. La figura 3.1 muestra el esquema básico de una celda electroquímica, donde se aprecia el electrodo positivo, el electrodo negativo, el electrolito, el pasaje de electrones por la carga externa y la migración de iones a través del electrolito.

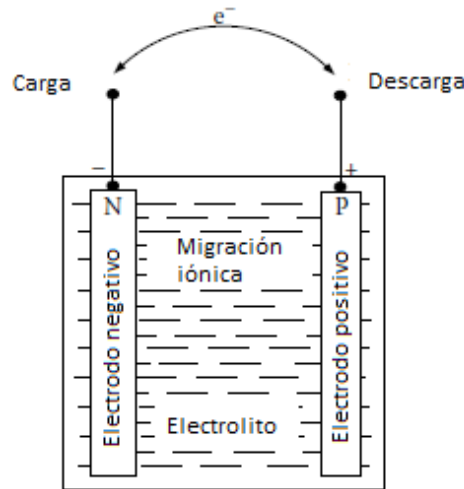


Figura 3.1: Esquema básico de una celda electroquímica. Fuente: [3].

3.2.1. Electrodo negativo.

El ánodo o electrodo negativo es el electrodo que cede electrones al circuito externo durante la descarga, y se oxida durante la reacción electroquímica. El electrodo negativo se selecciona teniendo en cuenta las siguientes características: eficiencia y rendimiento coulométrico (Ah/g), conductividad, estabilidad, facilidad de fabricación y bajo costo. En la práctica, los metales se utilizan principalmente como material del ánodo, actualmente en combinaciones carbonadas. Dentro de los metales, el litio es el metal más liviano con un alto valor de equivalencia electroquímica, y se ha convertido en el material más atractivo (ver 3.4.2.4) ya que se han desarrollado electrolitos y sistemas adecuados para controlar su actividad [3].

3.2.2. Electrodo positivo

3.3. Operación de una celda.

El cátodo o electrodo positivo es el electrodo que acepta electrones del circuito externo y se reduce durante la reacción electroquímica. El electrodo positivo debe ser un agente oxidante eficiente, ser estable en contacto con el electrolito y tener un voltaje de trabajo adecuado. Si bien el oxígeno para la reducción del cátodo podría extraerse directamente del aire ambiente como en la batería de zinc/aire, la mayoría de los materiales comunes del cátodo son óxidos metálicos o compuestos de intercalación, entre otros sistemas especiales (ver 3.4.2.5) [3].

Las combinaciones más ventajosas de materiales de ánodo y cátodo son las más ligeras, con mayor diferencia de potencial y capacidad de almacenamiento. Sin embargo, tales combinaciones no siempre suelen ser prácticas desde el punto de vista de la fabricación debido a la reactividad entre los distintos componentes de la celda y el alto costo de los materiales, entre otros factores.

3.2.3. Electrolito y separador.

En cuanto al electrolito, éste debe favorecer la conductividad iónica y prevenir el cortocircuito entre cátodo y ánodo. Asimismo, el electrolito no debe reaccionar con ninguno de los materiales o compuestos de los electrodos. Es necesario prever el aislamiento eléctrico entre el ánodo y el cátodo para prevenir el cortocircuito, lo cual es implementado en la práctica a través de un separador. Este separador debe ser permeable al electrolito, de forma tal que sea favorecida la conductividad iónica.

El objetivo del separador es aislar eléctricamente los electrodos positivos y negativos. Los separadores deben impedir el pasaje de electrones, deben poseer buenas propiedades mecánicas, estabilidad química y costo aceptable. Además, deben ser fácilmente humectables en el electrolito y deben tener buena estabilidad química en contacto con éste.

3.3. Operación de una celda.

Cuando una carga eléctrica es conectada en bornes de una celda o batería, los electrones fluyen a través de la carga externa desde el ánodo, el cual se oxida. Los electrones liberados son aceptados por el cátodo, el cual se reduce. El circuito eléctrico es completado en el electrolito mediante el flujo de los aniones y cationes entre el ánodo y el cátodo. La figura 3.1 presentó las condiciones de operación de una celda, donde se puede ver que en descarga los cationes se transportan del electrodo negativo al positivo, mientras que los electrones lo hacen a través de la carga eléctrica externa.

3.3.1. Tensión de celda

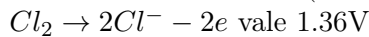
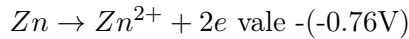
Para una celda o batería, suelen emplearse diferentes referencias de potencial según la necesidad. El primero de los valores de potencial a las que debe hacerse referencia en este capítulo es el valor teórico de potencial de celda. El voltaje teórico (E°) es el valor de potencial en función de los materiales del ánodo y del cátodo, en condición estándar de temperatura. Es posible obtener el valor del potencial E° en cada electrodo de forma teórica en función de la electronegatividad de sus elementos, según queda indicado en la cuadro 3.2.

3.3. Operación de una celda.

Reacción	E^0, V	Reacción	E^0, V
$\text{Li}^+ + e \rightleftharpoons \text{Li}$	-3.01	$\text{Tl}^+ + e \rightleftharpoons \text{Tl}$	-0.34
$\text{Rb}^+ + e \rightleftharpoons \text{Rb}$	-2.98	$\text{Co}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Co}$	-0.27
$\text{Cs}^+ + e \rightleftharpoons \text{Cs}$	-2.92	$\text{Ni}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ni}$	-0.23
$\text{K}^+ + e \rightleftharpoons \text{K}$	-2.92	$\text{Sn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sn}$	-0.14
$\text{Ba}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ba}$	-2.92	$\text{Pb}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pb}$	-0.13
$\text{Sr}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Sr}$	-2.89	$\text{D}^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{D}_2$	-0.003
$\text{Ca}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Ca}$	-2.84	$\text{H}^+ + e \rightleftharpoons \frac{1}{2}\text{H}_2$	0.000
$\text{Na}^+ + e \rightleftharpoons \text{Na}$	-2.71	$\text{Cu}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.34
$\text{Mg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mg}$	-2.38	$\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2e \rightleftharpoons 2\text{OH}^-$	0.40
$\text{Ti}^+ + 2e \rightleftharpoons \text{Ti}$	-1.75	$\text{Cu}^+ + e \rightleftharpoons \text{Cu}$	0.52
$\text{Be}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Be}$	-1.70	$\text{Hg}^{2+} + 2e \rightleftharpoons 2\text{Hg}$	0.80
$\text{Al}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Al}$	-1.66	$\text{Ag}^+ + e \rightleftharpoons \text{Ag}$	0.80
$\text{Mn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Mn}$	-1.05	$\text{Pd}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Pd}$	0.83
$\text{Zn}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Zn}$	-0.76	$\text{Ir}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Ir}$	1.00
$\text{Ga}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{Ga}$	-0.52	$\text{Br}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Br}^-$	1.07
$\text{Fe}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Fe}$	-0.44	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4e \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$	1.23
$\text{Cd}^{2+} + 2e \rightleftharpoons \text{Cd}$	-0.40	$\text{Cl}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{Cl}^-$	1.36
$\text{In}^{3+} + 3e \rightleftharpoons \text{In}$	-0.34	$\text{F}_2 + 2e \rightleftharpoons 2\text{F}^-$	2.87

Figura 3.2: Potencial estándar de reacción de electrodos a 25°C. Fuente: [3].

A modo de ejemplo, para la reacción $\text{Zn} + \text{Cl}_2 \rightarrow \text{ZnCl}_2$, obteniendo de tabla los valores de potencial de los electrodos en condiciones estándar, se tiene:



Por lo que el potencial teórico obtenido para la celda es $E^\circ = 2.12\text{V}$.

Cuando las condiciones son diferentes a las condiciones estándar, el voltaje de la celda es obtenido de la ecuación de Nerst (3.1),

$$E = E^0 - \frac{RT}{nF} * \ln \frac{a_C^c a_D^d}{a_B^b a_A^a} \quad (3.1)$$

Donde a_i es la actividad de los elementos relevantes involucrados en la reacción, R es la constante de los gases y T es la temperatura absoluta (°K).

La medición directa del potencial de un electrodo simple (absoluto) es considerado en la práctica imposible. Para establecer una escala de potenciales de media celda o estándar, se debe establecer un potencial de referencia "cero" con el cual se pueden medir los potenciales de un solo electrodo. Por convención, el potencial estándar de la reacción H_2/H^+ se toma como cero y

3.3. Operación de una celda.

todos los potenciales estándar se refieren a este potencial. La figura 3.2 enumera los potenciales estándar de varios materiales utilizados tanto en ánodos como en cátodos. De la observación de dichos potenciales puede verse que el litio se encuentra en el extremo más negativo respecto a la referencia (H_2), mientras que el fluor se encuentra en el extremo más positivo.

Dada una formulación electroquímica para una celda o batería, sería deseable que toda la energía almacenada en su interior pudiera ser liberada durante la descarga, de forma tal que sea transformada en energía útil. Sin embargo, existe una serie de pérdidas que impiden esta realización, las cuales pueden enumerarse del siguiente modo [26]:

- Polarización por activación: La polarización por activación se refiere a reacciones electroquímicas que están controladas por una etapa lenta dentro de la secuencia de etapas de reacción en la interfase electrolito metal. Es decir, existe una energía de activación crítica necesaria para remontar la barrera de energía asociada con la etapa más lenta.

- Polarización por concentración: La polarización por concentración se asocia con las reacciones electroquímicas que son controladas por la difusión de iones en el electrolito. La polarización por concentración surge de la diferencia de concentración entre los reactivos y los productos, tanto en la superficie del electrodo como en su volumen.

Estos dos efectos de polarización consumen parte de la energía libre, que es desaprovechada, por lo que no toda la energía almacenada en los electrodos es completamente convertida en energía eléctrica útil. En la práctica, es difícil determinar los valores de ambos fenómenos de polarización debido a la complicada estructura física de los electrodos.

Otro factor que afecta de forma importante el desempeño de la batería es la impedancia interna de la celda, también llamada polarización óhmica o caída IR. Este fenómeno provoca una caída de potencial en la celda durante la operación, al tiempo que provoca la generación de calor residual que consume parte de la energía interna de la celda.

Conocidos estos fenómenos de polarización, se entiende que cuando una celda o una batería es conectada a una resistencia externa R , el voltaje de celda E queda representado por la ecuación 3.2

$$E = E_0 - [(\eta_{ct})_a + (\eta_c)_a] - [(\eta_{ct})_c + (\eta_c)_c] - iR_i = iR \quad (3.2)$$

Donde

- E_0 es el potencial de circuito abierto, calculado a partir de la ecuación de Nernst considerando el potencial estándar a la temperatura de trabajo correspondiente.
- $(\eta_{ct})_a, (\eta_{ct})_c$ corresponde a la polarización por activación o sobrepotencial por transferencia de carga,
- $(\eta_c)_a, (\eta_c)_c$ es la polarización por concentración,
- i es la corriente de operación por la celda en carga,
- R_i es la resistencia interna de la celda.

Solamente a muy bajas intensidades de corriente, la polarización y la resistencia interna IR son pequeñas y la celda puede operar a valores de potencial cercanos a valores de circuito abierto,

3.3. Operación de una celda.

entregando de este modo una cantidad de energía cercana al valor teórico. En aplicaciones para vehículos eléctricos las intensidades de corriente son elevadas, por lo que la energía entregada por la batería se encuentra en consecuencia alejada de valores teóricos.

En la figura 3.3 puede verse de forma gráfica cómo los fenómenos de polarización y las pérdidas óhmicas interfieren y modifican el potencial de una celda en operación, impidiendo la total conversión de energía química en energía eléctrica.

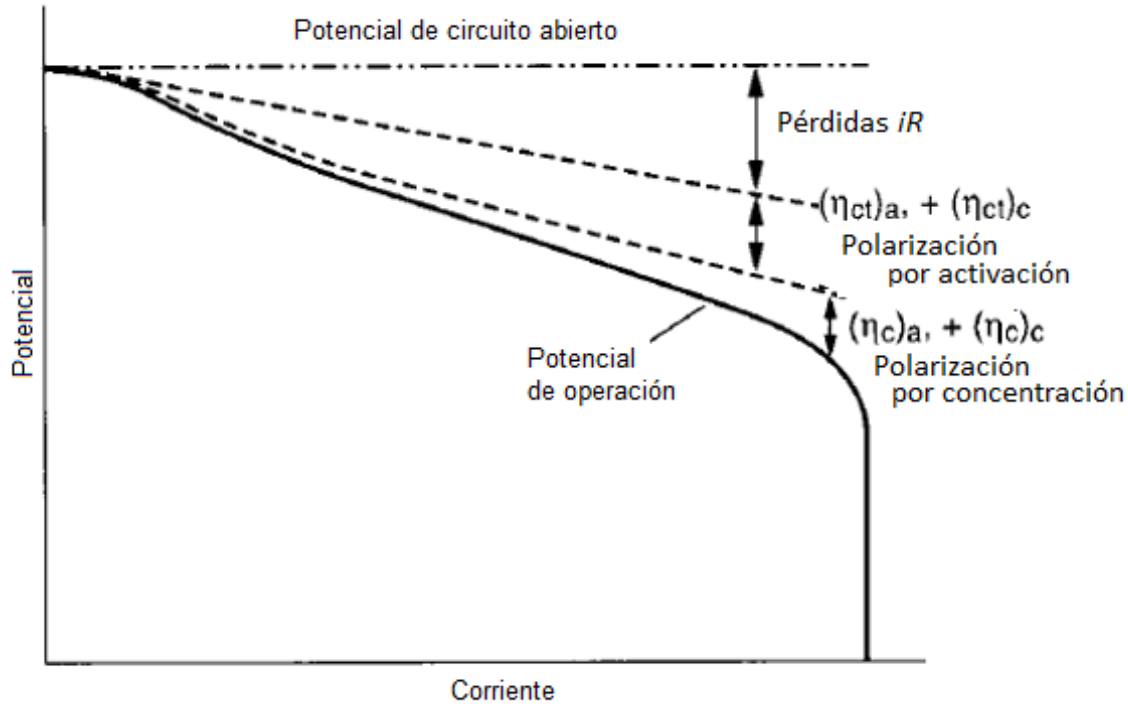


Figura 3.3: Potencial de operación de una celda en función de la corriente. Fuente: [3] .

Otros valores característicos de tensión, utilizados en relación a las celdas y baterías son presentados a continuación y expuestos en la figura 3.4. Muchos de estos valores son una referencia importante a la hora de comercializar celdas y baterías, así como también algunos de ellos son valores característicos relevantes para la operación de los packs. A modo de ejemplo, los valores de tensión de corte, tanto en procesos de carga como en procesos de descarga son una de las variables fundamentales ingresadas en los circuitos integrados de control de los paquetes de baterías.

Voltaje teórico. El voltaje teórico de una celda depende de los materiales utilizados tanto en el cátodo como en el ánodo, así como también de la concentración de las especies que intervienen, la composición del electrolito y la temperatura de operación. Se obtiene a partir del

3.3. Operación de una celda.

cálculo del voltaje de oxidación y reducción en sus electrodos [3].

Voltaje de circuito abierto u OCV (Open Circuit Voltage). Es el voltaje en bornes de la batería, en condición sin carga. Generalmente es cercano al voltaje teórico [3].

Voltaje en el punto medio. Es el voltaje a una profundidad de la descarga igual a la mitad entre la celda completamente cargada y la celda en el fin de la descarga [3].

Tensión de circuito cerrado. Es la tensión en una condición de carga dada, durante la operación de una celda. Esta tensión puede adquirir cualquier valor dentro de los valores posibles, y se ubica tanto en procesos de carga como de descarga ya que no es más que la tensión de la celda en cualquier condición de operación [3].

Voltaje nominal. Es el voltaje generalmente aceptado como típico de funcionamiento de una celda o batería que informa un fabricante (i.e.: 12V, 1.5V, etc.). Este valor depende de la composición química de la celda o batería [3].

Tensión de corte o voltaje de fin de descarga. Se designa como el final de la descarga, justo en el punto en el que la tensión comienza a caer de forma brusca. Se corresponde con el voltaje al cual se ha suministrado la mayor parte de la capacidad de la celda o batería (generalmente el 90 % del total). Someter a una celda a tensiones menores a este valor puede conducir a un daño irreversible [3].

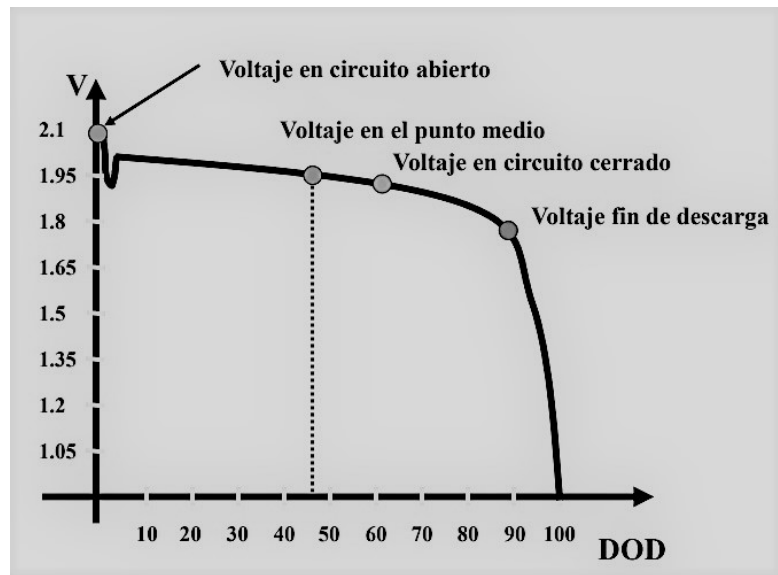


Figura 3.4: Valores de tensión característicos de una celda o batería. Elaboración propia con base en [3].

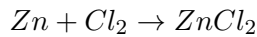
3.3. Operación de una celda.

3.3.2. Capacidad de la batería (Ah).

3.3.2.1. Capacidad teórica.

La capacidad teórica es medida en Coulombios o en Ampere-hora, y deviene de la cantidad de material activo en el cátodo y ánodo de una celda. El material del electrolito, aspectos constructivos u otros factores, no son considerados en el cálculo de la capacidad teórica.

Los valores de Ah o de Coulombios involucrados por cada gramo de reacción, son obtenidos de tabla. De este modo, para el ejemplo anterior se tiene:



$$(1,22\text{g}/\text{Ah}) + (1,32\text{g}/\text{Ah}) \rightarrow (2,54\text{g}/\text{Ah}), \text{ o bien } 0.394 \text{ Ah/g.}$$

Por los motivos que se presentan en 3.3.2.2, la capacidad real se ve reducida debido a los fenómenos que intervienen en una celda real.

3.3.2.2. Capacidad real.

Usualmente, la capacidad de almacenamiento de la batería es informada por los fabricantes como capacidad coulométrica (Ampere-hora), lo cual es definido como la integral de la intensidad de corriente en el tiempo, medido a corriente constante. De este modo, la capacidad de una batería o cantidad de carga es la cantidad de Ah entregados por la batería desde un estado 100 % cargada (100 %SoC) hasta el voltaje de corte.

A modo de ejemplo, si un fabricante informa que una batería tiene una capacidad de 100 Ah, significa que la batería podría proporcionar una corriente de 10 A durante 10 h, o de 1 A durante 100 h, etc. Esto en la práctica no ocurre dado que la capacidad depende de la tasa de descarga [3], por lo que el fabricante debe indicar a qué velocidad de descarga la batería entrega la cantidad de carga informada.

3.3. Operación de una celda.

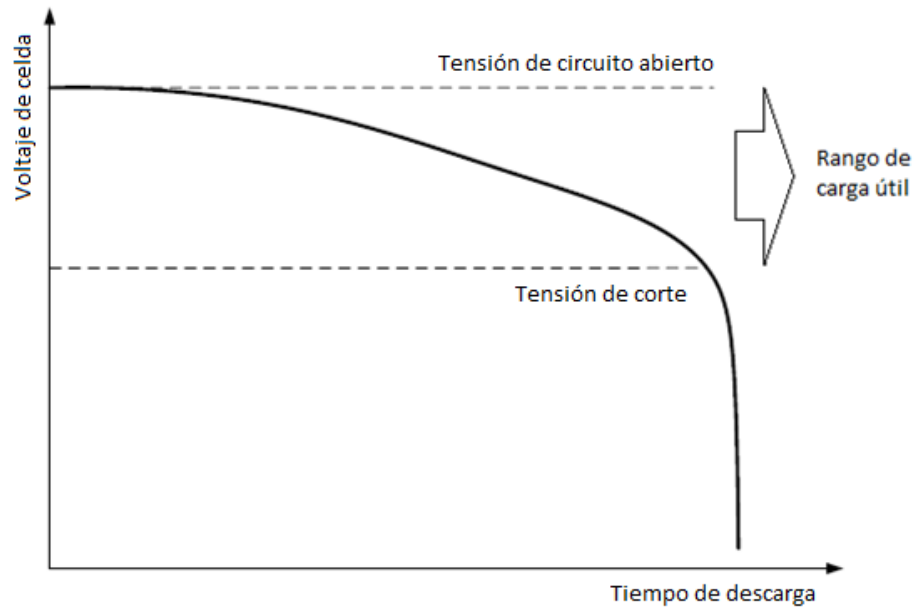


Figura 3.5: Rango útil de funcionamiento de una batería durante el proceso de descarga.

Fuente: [2].

La figura 3.5 indica el rango útil de funcionamiento de una batería durante un proceso de descarga a corriente constante. Se observa cómo la tensión de funcionamiento va desde la tensión de circuito abierto hasta una tensión de corte, el cual coincide con un determinado porcentaje de la capacidad remanente (Ah) en la batería.

Como fue señalado, la capacidad de la batería es dependiente de la velocidad de descarga, es decir, al aumentar la intensidad de corriente la capacidad de la batería se ve disminuida. Esto se debe a que las pérdidas IR y los efectos de la polarización aumentan con el aumento de corriente, según fue presentado en 3.3.1, y la descarga se produce a un voltaje menor [3]. La figura 3.6 muestra cómo a mayor intensidad de corriente de descarga, la capacidad que entrega la batería (Ah) se ve disminuida, siendo representado con los números 1 a 5 el incremento en la intensidad de corriente de descarga.

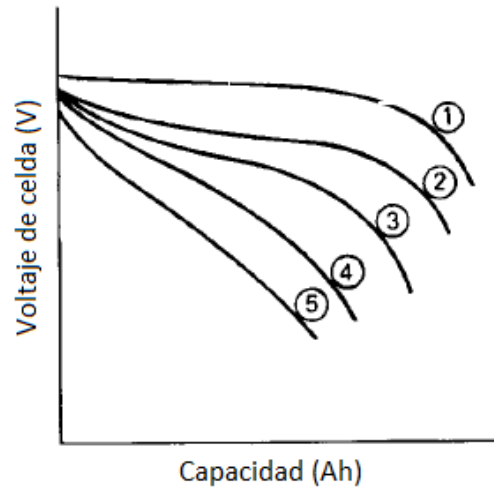


Figura 3.6: Capacidad de celdas o baterías en función de la intensidad de corriente de descarga. Elaboración propia con base en [3].

Para los regímenes de descarga imperantes en los vehículos eléctricos, se tendrá instantes en los que la batería se ve descargada a una velocidad 1C (ver 3.3.4.2), pero también habrá instantes en los que la velocidad será mayor, ocasionando menor cantidad de carga entregada en dichos instantes. Como contrapartida, habrá instantes en los que la velocidad de descarga será menor a 1C por lo que la batería entregará más carga en esos instantes. El balance global será estudiado en el capítulo 4.

3.3.3. Energía almacenada en una batería.

3.3.3.1. Energía libre.

Cuando ocurre una reacción química, la energía libre del sistema decrece. En una celda electroquímica, dicha energía libre depende del par ánodo-cátodo, según la ecuación (3.3),

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (3.3)$$

donde F es la constante de Faraday, E^0 es el potencial estándar que depende de la reacción en cada electrodo, y n es el número de electrones involucrados en la reacción.

3.3.3.2. Energía teórica.

Teniendo en cuenta la capacidad teórica (Ah/g) y el voltaje teórico (V), es posible obtener la cantidad de energía específica teórica que puede entregar una celda o batería (Wh/g), como el producto de ambas magnitudes.

3.3. Operación de una celda.

Siguiendo el ejemplo del Zn/Cl_2 , se tiene:

$$\text{Energía específica teórica} = 2.12 \text{ V} * 0.394 \text{ Ah/g} = 0.835 \text{ Wh/g o } 835 \text{ Wh/kg}$$

3.3.3.3. Energía específica real.

De la cantidad de energía específica teórica contenida en una celda, solamente una fracción de esta es posible obtener en la práctica. Esto es debido en parte a la participación del electrolito, separadores y otros materiales intervinientes. Asimismo, como fue indicado en 3.3.1, el voltaje durante la descarga no es el voltaje teórico de la celda, así como tampoco se produce la descarga hasta tensión cero, reduciendo así aún más la cantidad de energía extraída. Otro factor influyente es que los materiales activos en una batería no suelen estar equilibrados estequiométricamente, lo cual reduce la energía específica porque se utiliza una cantidad en exceso de uno de los materiales activos de la reacción química.

Dada la influencia de estos factores se obtiene finalmente que la capacidad real de una batería alcanza solamente entre un 25 y 35 % de la energía específica teórica disponible en los materiales activos. Esto puede ser observado en la cuadro 3.1 donde se muestran valores teóricos y prácticos de tensión, capacidad y energía específica de varios tipos de baterías. A modo de ejemplo, para la batería de litio-ion se tiene un valor de energía específica teórica de 410 Wh/kg, mientras que el valor práctico de esta magnitud es de 150 Wh/kg [3]. Para el caso de la celda Li-metal la diferencia es aun mayor ya que la tecnología de este tipo de celda no se encuentra suficientemente madura como para disminuir la brecha entre prestaciones teóricas y prácticas.

Tipo de celda	Ánodo	Cátodo	Valores teóricos			Valores prácticos		
			V	Ah/kg	Energía específica (Wh/kg)	Voltaje nominal (V)	Energía específica (Wh/kg)	Densidad de energía (Wh/L)
Plomo-ácido	<i>Pb</i>	<i>PbO₂</i>	2.1	120	252	2.0	35	70
Niquel-cadmio	<i>Cd</i>	<i>Ni óxido</i>	1.35	181	244	1.2	35	100
Ni-MH	<i>MH</i>	<i>Ni óxido</i>	1.35	178	240	1.2	75	240
Li-ion (LCO)	<i>Li_xC₆</i>	<i>Li_{1-x}CoO₂</i>	4.1	100	410	4.1	150	400
Li-metal	<i>Li</i>	<i>MnO₂</i>	3.5	286	1001	3.0	120	265

Cuadro 3.1: Valores prácticos y teóricos de magnitudes de tensión, capacidad y energía específica para un conjunto de diferentes tipos de baterías. Fuente: [3].

Dadas las consideraciones en relación a la brecha entre valores reales de magnitudes frente a los valores teóricos, es posible establecer un gráfico de densidad de energía (Wh/L) en función de energía específica (Wh/kg), en el cual se puede realizar un comparativo entre distintas tecnologías. El comparativo presentado en la figura 3.7 muestra la densidad energética y la energía específica de distintos tipos de tecnología, desde el plomo ácido a la batería de litio-ion (desarrollos actuales) y litio metal (desarrollos futuros) [27].

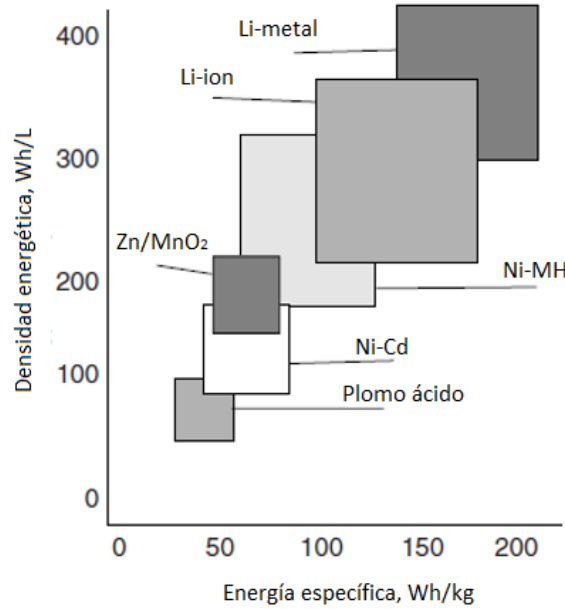


Figura 3.7: Densidad de energía Vs. Energía específica para diferentes tipos de baterías.
Fuente: [3].

Si bien es tradicional el uso de la capacidad coulométrica de la batería en amperio-hora para establecer su tamaño, para vehículos híbridos y eléctricos la capacidad de energía se considera más importante que la capacidad coulométrica. Esto es debido a que la energía eléctrica consumida por el motor eléctrico suele ser medida en unidades de kWh, por lo que se busca utilizar las mismas unidades para establecer la cantidad de energía entregada por la batería. Con esto, la energía suministrada desde la batería se puede expresar como

$$E_C = \int_0^t V(i, SoC) i(t) \cdot dt \quad (3.4)$$

donde SoC es el estado de carga según es definido en 3.3.6, $V(i, SoC)$ es el voltaje en los terminales de la batería (que es una función de la corriente de la batería y del SoC), e $i(t)$ es la intensidad de corriente que circula [2].

3.3.4. Corriente de descarga y C-rate.

3.3.4.1. Corriente de descarga.

Cuando la corriente de descarga de una batería aumenta, las pérdidas por polarización, concentración e IR aumentan, el voltaje baja y la vida útil de la batería se ve reducida, dado que se presenta un sobrepotencial asociado a irreversibilidades y aumenta su degradación (ver 3.5). Del mismo modo, como fue indicado anteriormente y expuesto en la figura 3.6, al aumentar la

3.3. Operación de una celda.

intensidad de descarga la cantidad de carga entregada por la batería se ve reducida.

Cuando una celda o batería es descargada a una tasa de descarga pronunciada, con elevadas corrientes de descarga, en un momento dado alcanzará el voltaje de fin de carga o el voltaje de corte. Si en ese punto la batería continúa siendo usada, pero a una tasa de descarga menor, entonces su voltaje se elevará y la batería contará con una capacidad adicional hasta un nuevo voltaje de corte. Así sucesivamente, la batería podrá entregar cierta capacidad adicional si es disminuida la tasa de descarga. La figura 3.8 muestra una forma en la que puede darse el proceso de descarga en forma de diente de sierra. Este procedimiento de extensión de la cantidad de carga mediante el uso de un algoritmo adecuado, permite extender el rango o la autonomía de un vehículo eléctrico cuando el estado de carga es crítico, lo cual se logra reduciendo las condiciones de velocidad y aceleración del vehículo.

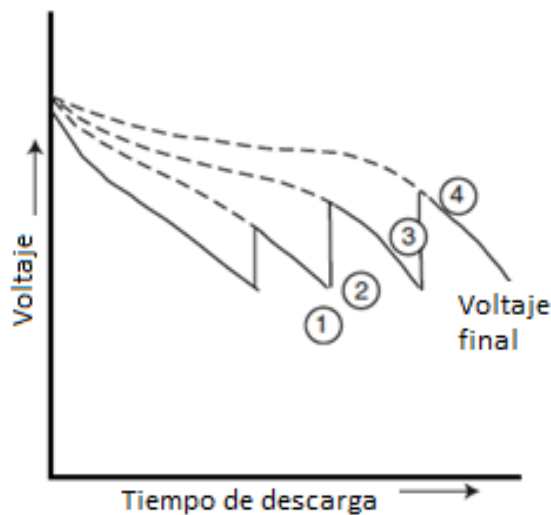


Figura 3.8: Regímenes de descarga de una batería que permiten el aumento de la cantidad de carga entregada. Fuente: [3].

3.3.4.2. C-rate.

El C-rate representa la tasa de carga o descarga de una celda o batería, mediante una fracción o múltiplo de la capacidad de almacenamiento. Por ejemplo, una celda de 100 Ah que es descargada a $C/5$ o bien $0.2C$ es soentida a una corriente de descarga de 20A.

Dado lo anterior, el C-rate se define como,

$$C - rate = I/C \quad (3.5)$$

Donde I es la corriente de carga o descarga (A), C es el valor de la capacidad definida por el fabricante (Ah) y C-rate representa la tasa de descarga.

3.3.5. Temperatura de operación

La temperatura a la que se descarga una batería tiene un efecto importante en su capacidad entregada y en el voltaje de operación. Esto se debe a la reducción de la actividad química y al aumento de la resistencia interna a bajas temperaturas, y lo contrario a temperaturas elevadas. La figura 3.9 ilustra varias curvas de descarga a la misma corriente, pero a diferentes temperaturas para una misma batería, donde T_4 es la temperatura ambiente. Como puede verse, bajar la temperatura provoca una disminución de la capacidad y un aumento de la pendiente de la curva de voltaje. Para cada sistema se tendrá una familia de curvas distinta, pero por lo general el mejor rendimiento se obtiene entre 20°C y 40°C para impedir la degradación acelerada de las celdas.

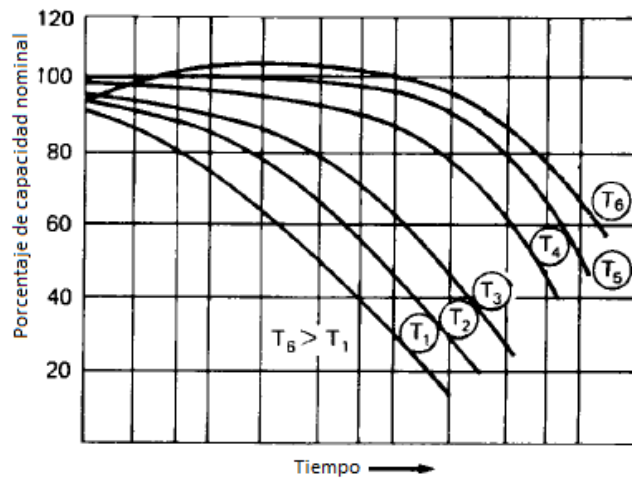


Figura 3.9: Porcentaje de la capacidad nominal que entrega una celda para distintas temperaturas de operación. Fuente: [3].

3.3.6. Estado de carga (SoC).

Un parámetro importante de una batería es el estado de carga (SoC). Se entiende que una batería completamente cargada tiene un SoC del 100% y una batería completamente descargada tiene un SoC de 0%. Sin embargo, el término "completamente descargado" a veces causa confusión, debido a las diferentes capacidades a diferentes velocidades de descarga y diferentes voltajes de corte, como se indicó anteriormente.

El SoC es una relación entre la cantidad de carga remanente (Ah) y la capacidad de la batería completamente cargada (Ah). Así, el SoC de una batería durante la descarga se puede expresar como

$$SoC = SoC_0 - \frac{\int_0^T i_{desc.}(t) dt}{Q(i)}, \quad (3.6)$$

3.3. Operación de una celda.

donde SoC_0 es el valor inicial del SoC (tanto sea para una batería nueva o usada) y donde $Q(i)$ es la capacidad de la batería (Ah) al ritmo actual i .

Dado lo anterior, los algoritmos para la determinación del SoC de los vehículos eléctricos deberán incorporar el valor instantáneo de la capacidad en función de la intensidad ($Q(i)$ en Ah) y de la intensidad de corriente, así como también el valor inicial de SoC para un diferencial de tiempo dt .

3.3.7. Profundidad de descarga (DoD).

La profundidad de descarga (DoD, Depth of Discharge) es un indicador de la cantidad de carga que ha sido extraída de la batería en relación a su capacidad, siendo el complemento del SoC, de forma tal que $DoD + SoC = SoC_0$. Se trata de una cantidad adimensionada, expresada comúnmente como un porcentaje mediante la ecuación 3.7,

$$DoD = \frac{\int_0^T i_{desc.}(t)dt}{Q(i)}, \quad (3.7)$$

Debe ser notado que la profundidad de la descarga (DoD) está estrechamente relacionada con la degradación de la batería, como se verá en el capítulo 3.5. Por tal motivo, las estrategias de uso y diseño de los sistemas deben prever mayores o menores profundidades de descarga para lograr reducir la degradación y aumentar la vida útil de las baterías. Así, rangos de uso de las baterías serán mayores o menores en función de los resultados buscados, alcanzándose mayores o menores profundidades de descarga.

El aumento del rango de estado de carga utilizable reducirá drásticamente el costo inicial ya que la batería será de menor tamaño, pero como contrapartida redundará en la reducción de la vida útil de la batería [28].

La figura 3.10 muestra cómo diferentes estrategias de uso de la batería (en función del tipo de vehículo), determinan la profundidad de la descarga que se aplica. Resulta de estas estrategias que las baterías de vehículos híbridos adecuadamente dimensionadas podrán tener mayor rango de vida útil (>20.000 ciclos). Entretanto, para vehículos eléctricos puros o bien para híbridos enchufables, si las profundidades de descarga superan el 50 % entonces la degradación de la batería hará reducir en gran medida su vida útil.

3.3. Operación de una celda.

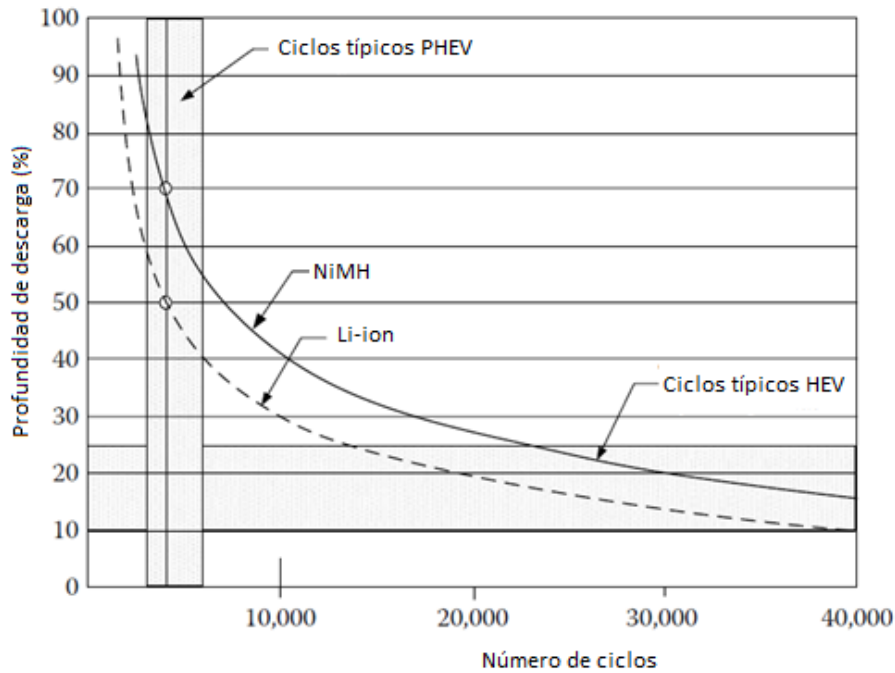


Figura 3.10: Estrategias de uso de baterías para distintos tipos de vehículos. Se aprecia cómo distintas profundidades de descarga tendrán incidencia en la vida útil. Fuente: [2].

3.3.8. Estado de Salud (SoH).

El estado de salud (en inglés, State of Health, SoH) es el parámetro de celda o batería que indica el nivel de degradación o envejecimiento, en comparación con la celda o batería en condición nueva. Las unidades en las que se determina el SoH son puntos porcentuales, siendo $SoH=100\%$ la condición en la cual la batería se encuentra nueva, o bien cuando la batería entrega la cantidad de carga y potencia indicadas por el fabricante.

A diferencia de la definición de SoC que está de acuerdo con casi todos los investigadores en esta área, el SoH de la batería se ha definido de diferentes maneras en la literatura. A los efectos de entender el SoH se establecen los conceptos de *Calendar Life o vida útil calendario*, *Cycling Life o ciclabilidad*, *Capacity Fade (CF) o Pérdida de Capacidad* y *Power Fade (PF) o Pérdida de Potencia*, los cuales se asocian con el estado de salud de una batería [29].

3.3.8.1. Calendar Life o vida útil calendario

En esta definición, la edad de una batería y su final de vida (EoL por sus siglas en inglés), se presenta en términos de meses o años [29]. Al igual que otros dispositivos, la vida útil de una batería se ve afectada por diferentes escenarios de uso y la vida útil de una batería puede

3.3. Operación de una celda.

terminar antes de la predicción del calendario. En particular, las condiciones de almacenamiento y reposo de una batería, y en particular el estado de carga en tales situaciones, afectan la vida útil calendario según se presenta en 3.5.1.2.

3.3.8.2. Cycling Life o ciclabilidad

En esta definición, la vida útil de la batería se calcula a partir del número de ciclos que la batería puede soportar en determinadas condiciones [29]. Tal definición puede usarse en la práctica cuando las condiciones de carga y descarga son consistentes y reproducibles.

Sin embargo, un conteo de ciclos preciso puede ser difícil o imposible en algunas aplicaciones como la automotriz, donde la batería no se cicla regularmente debido a las condiciones de conducción variables. En tales aplicaciones suele ser implementada una medición por ciclo completo equivalente (FCE por sus siglas en inglés), donde se establece mediante modelos cierta equivalencia entre un ciclo completo de carga/descarga y cierta cantidad y tipos de ciclos parciales que impacten de forma equivalente en la vida útil de la batería.

3.3.8.3. Capacity Fade (CF) o Pérdida de Capacidad

La degradación de la batería de iones de litio comienza justo después de la fabricación de la batería debido a las reacciones electroquímicas que tienen lugar dentro de la batería. Este proceso conduce a la degradación del material activo de la batería y, en consecuencia, aumenta la resistencia interna de la batería, lo que significa más pérdidas internas de la batería y disminución de la capacidad.

Una estimación de la capacidad de una batería, puede proporcionar información útil sobre la edad de la batería. Esto sería posible comparando la capacidad de la batería en cierto momento T (C_T), con su valor inicial cuando la batería es nueva (C_0), de forma tal que

$$CF(\%) = \frac{Capacidad_T(Ah)}{Capacidad_0(Ah)}, \quad (3.8)$$

lo cual define la pérdida de capacidad (CF).

3.3.8.4. Power Fade (PF) o Pérdida de Potencia

Otra alternativa para la determinación del SoH de la batería se basa en la pérdida de potencia o "power fade" por su término en inglés (PF). PF refiere a cómo la capacidad de entregar potencia de la batería disminuye debido al proceso de envejecimiento. Esta definición también se presenta como estado de potencia o "state of power" (SoP). La potencia que una batería puede entregar directamente depende de la resistencia interna de la batería en tanto el envejecimiento de la batería conduce a un aumento de la resistencia óhmica interna en casi todos los tipos de batería. En consecuencia, este parámetro se puede utilizar como indicador del

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

estado de la batería. Cuanto mayor sea la resistencia interna, menor será la potencia disponible de la batería.

La razón se debe a mayor caída de tensión en los terminales de la batería causada por la mayor resistencia interna. Asumiendo un modelo de batería simple que consta de una resistencia (R) en serie con una fuente de tensión ideal (OCV), el voltaje terminal de la batería (V_t) se obtiene mediante la ecuación $V_t = R * I$, lo cual muestra el efecto directo de la resistencia óhmica en la caída de la tensión de operación, tal cual es presentado en 3.8.2.

Hay una serie de estudios en la literatura como el presentado en [29] en los que se evalúa el efecto del envejecimiento de una batería a través de su resistencia interna, considerando que la batería ha llegado al final de su vida útil cuando la resistencia óhmica interna se convierte en el doble de su valor inicial. Usando tal definición, el SoH de la batería se puede formular como

$$SoH(\%) = 1 - \frac{R_T - R_0}{R_0}, \quad (3.9)$$

siendo R_0 la resistencia inicial (nueva) de la batería y R_T la resistencia interna en el momento $T > 0$. Por otra parte, la determinación del SoH en relación al PF puede ser asimismo definido como un simple cociente de potencias, comparando la potencia máxima original de la batería con la potencia máxima en un momento $T > 0$.

Con respecto a las definiciones de SoH, se han desarrollado diferentes técnicas en la literatura para su estimación. Por lo general, se utiliza una o una combinación de las definiciones mencionadas anteriormente junto con una técnica de medición y/o estimación adecuada. Una gran diferencia entre la estimación de SoC y SoH es la cuestión del tiempo; el SoC puede cambiar de 100 a 0% en pocas horas mientras que el SoH podría cambiar en este rango en varios años o décadas. Finalmente, cabe señalar que la resistencia óhmica se relaciona mejor con el envejecimiento y degradación de la batería que la resistencia por polarización [29], por lo que resulta un parámetro más útil para la determinación del SoH.

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

A la hora de clasificar celdas o baterías, es usual hacerlo por los componentes utilizados en la fabricación de los electrodos, así como también, en menor medida, hacer referencia al electrolito empleado. Así, tradicionalmente se ha hablado de baterías de plomo-ácido (en referencia a electrodo y electrolito), Ni-Cd, Ni-MH, Li-ion y Li-Polímero, entre otras denominaciones.

Como se ha visto anteriormente, distintas configuraciones y métodos constructivos hacen que las prestaciones de las baterías se vean alteradas por estas variables, encontrándose unas más apropiadas que otras según sea el uso dado y las necesidades de cada caso.

Dentro de las alternativas disponibles, las características de cada tipo de batería serán más o menos aptas para el uso previsto, y la selección en último caso va resultar en una solución de compromiso donde el costo será uno de los factores dominantes.

Para el transporte eléctrico y en particular para los vehículos eléctricos, tanto la energía específica (Wh/kg) como la densidad energética (Wh/L) son aspectos clave en la fase de diseño. Así, la figura 3.11 muestra los rangos de potencia específica y energía específica de diferentes

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

tipos de baterías disponibles actualmente, donde se puede apreciar las ventajas de las baterías de litio-ion en tal sentido, en comparación con otras alternativas [30].

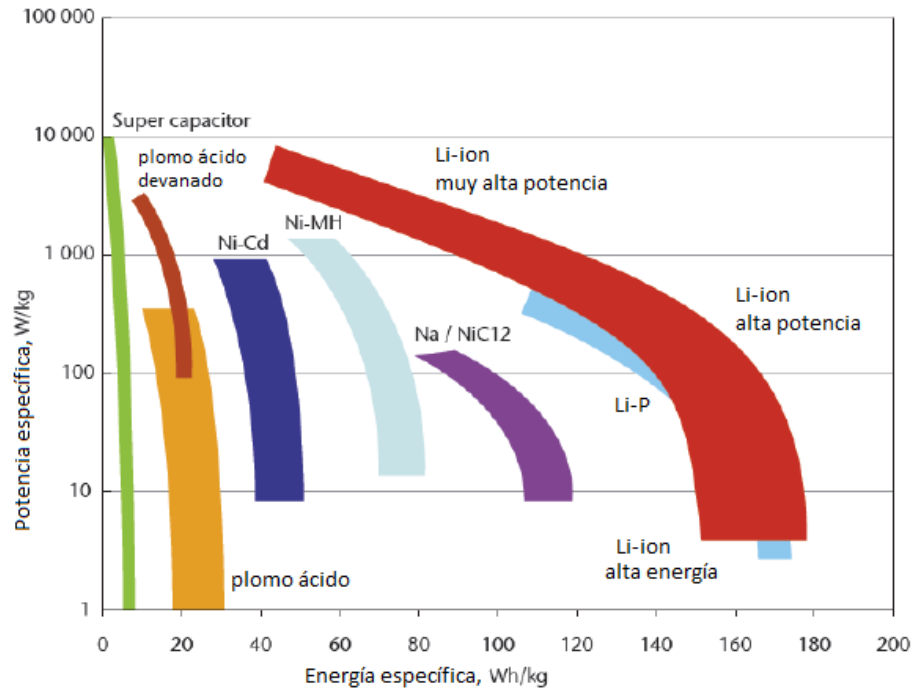


Figura 3.11: Energía específica y potencia específica de diferentes tipos de baterías. Fuente: [4].

La tecnología de litio-ion es considerada como la más promisoría en la mayoría de la bibliografía científica actual, para desarrollos a corto y mediano plazo. Por tal motivo, y sabiendo que su uso es el más extendido actualmente entre los vehículos eléctricos, se pondrá el foco en esta tecnología.

Para profundizar en el comparativo de distintas tecnologías de baterías, es útil realizar una comparación entre las baterías más usadas actualmente en vehículos eléctricos puros (BEV) y vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV). Estas baterías son las de iones de litio utilizadas en los BEV y las de NiMH utilizadas tiempo atrás en vehículos híbridos (enchufables y no enchufables) como el Toyota Prius. El cuadro 3.2 muestra los valores característicos (prácticos) de tensión, energía específica y autodescarga, entre otros. Se aprecia las ventajas comparativas de la tecnología Li-ion, lo cual es contrarrestado por los costos de adquisición correspondientes a cada tipo de batería.

3.4.1. Baterías de Niquel - Hidruro Metálico (Ni-MH).

La batería Ni-MH se presentó por primera vez en el mercado en 1992, luego de haber sido presentada la batería de iones de litio. Su principal característica constructiva está en el uso

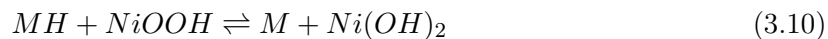
3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

	Tipo de batería	
	NiMH	Li-ion
Tensión nominal (V)	1.3	3.7
Energía específica (Wh/kg)	75	160
Autodescarga (%/mes)	30	5
Ciclo de vida	Bueno	Bueno
Efecto memoria (Wh/kg)	Sí	No

Cuadro 3.2: Comparativo entre algunas características de las baterías NiMH y Li-ion. Fuente: [5]

de hidrógeno, absorbido en un hidruro de metal, el cual es empleado como material base del electrodo negativo. Dadas sus características químicas, la batería Ni-MH está libre de toxicidad.

La reacción general en una batería de Ni-MH es:



Cuando se descarga la batería, el hidruro de metal en el electrodo negativo es oxidado para formar una aleación de metal, y oxihidróxido de níquel en el electrodo positivo se reduce a hidróxido de níquel. Durante la carga, se produce la reacción inversa. En la actualidad, la tecnología de batería Ni – MH tiene un voltaje nominal de 1.2V y alcanza una energía específica de 65 Wh/kg y una potencia específica de 200 W/kg. Un componente clave de la batería Ni-MH es la aleación de metal de almacenamiento de hidrógeno, que debe formularse para obtener un material que sea estable para un gran número de ciclos.

Hay dos tipos principales de aleaciones de metales que se utilizan en las celdas de Ni-MH. Estas son aleaciones de tierras raras basadas en níquel de lantano, conocidas como AB5, y aleaciones de titanio y circonio, conocido como AB2. Las aleaciones AB2 tienen una mayor capacidad que las aleaciones AB5. Sin embargo, la tendencia es utilizar aleaciones AB5 debido a las mejores características de retención de carga y estabilidad.

Las principales ventajas actuales de la tecnología Ni-MH son:

- energía específica elevada (70–95 Wh/kg)
- potencia específica más alta que otras celdas de la familia del níquel (200–300 W/kg)
- perfil de descarga plana (menor caída de tensión)
- admite recarga rápida

Como contrapartida, la batería Ni-MH todavía sufre de un alto costo inicial y se ve afectada también por efecto memoria debido a la presencia de níquel en electrodos. Pueden además ser exotérmicas durante la carga. A pesar de estas desventajas, la batería Ni-MH ha sido de gran relevancia para el desarrollo de vehículos eléctricos híbridos como el Toyota Prius, Honda Insight, y muchos otros modelos de esta naturaleza.

3.4.2. Baterías de Litio.

3.4.2.1. Introducción.

El litio es el más liviano de todos los metales y presenta características muy interesantes para aplicaciones en movilidad eléctrica. Desde un punto de vista electroquímico, permite un muy alto voltaje termodinámico que resulta en una energía específica muy alta y potencia específica elevada.

Típicamente, al menos uno de los electrodos de la batería de litio se integra por un compuesto de intercalación. Los compuestos de intercalación son compuestos que se forman a partir de la inserción, más o menos reversible, de una especie "huésped" (guest), que pueden ser átomos, iones o moléculas, en una red cristalina sólida, que recibe el nombre de matriz anfitriona (host). Durante el proceso de carga y descarga, la red anfitriona conserva su integridad estructural en el curso de la intercalación y des-intercalación, lo cual permite a los huéspedes alojarse y desalojarse.

Las baterías basadas en Litio tienen una alta capacidad gravimétrica y volumétrica, así como elevada densidad de potencia. Esto se debe a que, en primer lugar, el Litio tiene el potencial de reducción más bajo que cualquier elemento, lo que permite que las baterías basadas en Litio tengan el mayor potencial de celda posible. En segundo lugar, el litio es el tercer elemento más ligero y tiene uno de los radios iónicos más pequeños de cualquier ion cargado.

Hay dos tecnologías principales de baterías basadas en litio, que son la batería de litio-polímero y la batería de litio-ion. En los siguientes apartados se hará referencia a sus características principales y a los aspectos fundamentales de su funcionamiento.

3.4.2.2. Baterías iones de Litio.

La tecnología de la batería de iones de litio ha experimentado una evolución sin precedentes y se la considera como la batería con más futuro a mediano plazo, encontrándose aún en etapa de desarrollo. Dadas sus características y prestaciones, la batería de iones de litio ya ha ganado aceptación en diversas aplicaciones para transporte eléctrico.

Las celdas de baterías de litio están compuestas por electrodos de óxido metálico de litio en el electrodo positivo y carbono litiado en el electrodo negativo. Estos materiales son adheridos mediante un aglutinante a una hoja metálica que opera como colector de corriente, que son típicamente de cobre para el electrodo negativo y aluminio para el electrodo positivo. Los electrodos positivos pueden existir en forma de capas o en forma de túneles, mientras que los electrodos negativos tienen una estructura en forma de capas similar al grafito. Cuando la batería es ciclada, los iones de litio (Li^+) se intercambian entre los electrodos positivo y negativo. Dado este esquema, se dice que los iones de Li^+ se "mecen" entre el ánodo y el cátodo a través de un electrolito que favorece la conducción iónica. Durante la descarga, el electrodo negativo se comporta como ánodo y los iones de litio se transportan desde el electrodo negativo al positivo; entretanto, los electrones circulan a través de la carga eléctrica externa. Durante el proceso de carga, el electrodo positivo se comporta como ánodo y los iones de litio se transportan al electrodo negativo.

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

Durante los procesos de carga y descarga, tienen lugar en los electrodos procesos de oxidación y reducción (redox). Tomando como ejemplo la batería de litio $Li_xCoO_2/LiPF_6/Li_xC_6$, la figura 3.12 indica que durante el proceso de carga el electrodo positivo se oxida perdiendo x electrones ($Li_{1-x}CoO_2$) y el electrodo negativo se reduce capturando x electrones (Li_xC_6). Lo opuesto ocurre en el proceso de descarga.

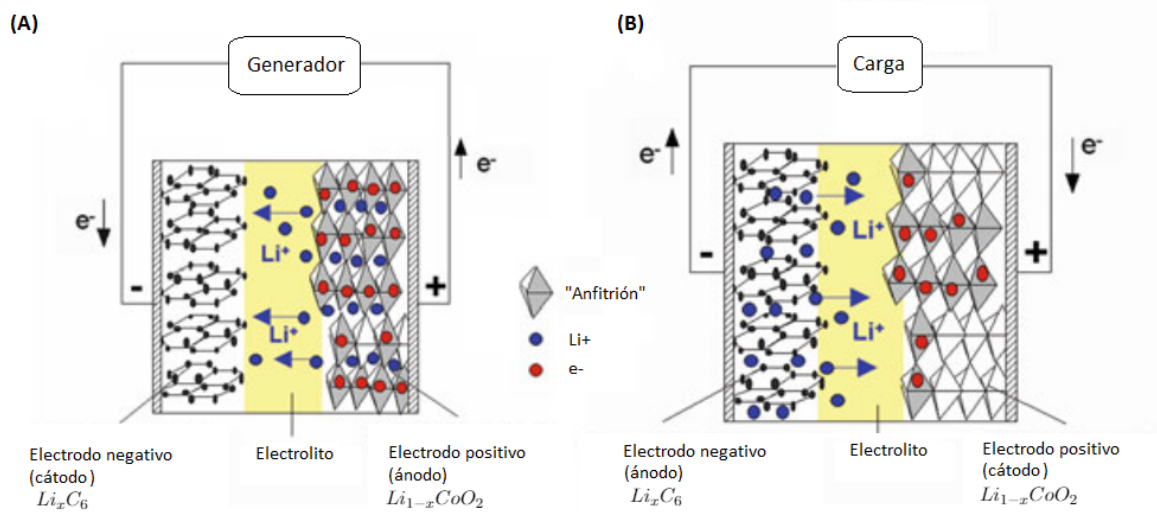


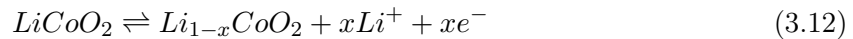
Figura 3.12: Principio de funcionamiento de la batería de Li-ion, a) durante el proceso de carga, b) durante el proceso de descarga. Adaptado de [5].

Siguiendo con el ejemplo de la batería de litio con $LiCoO_2$ en el electrodo positivo, y carbono litiado en el electrodo negativo, las reacciones químicas para la carga y la descarga son:

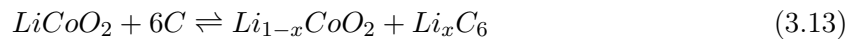
Para el electrodo negativo:



Para el electrodo positivo:



Para la reacción global:



Donde las flechas superiores corresponden al proceso de descarga y las inferiores al proceso de carga.

Características típicas de funcionamiento de la batería de litio ion

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

Las características generales de funcionamiento de la batería de litio se muestran en la cuadro 3.3 [3]. Entre los principales aspectos destacables están los elevados valores de densidad energética y energía específica, así como también elevado voltaje de operación. También ofrecen buena capacidad a alta velocidad de descarga (hasta 5C continuo o 25C en pulsos), por lo que ofrecen una alta densidad de potencia. Además, tienen baja tasa de auto descarga, varios años de vida calendario, no tienen efecto memoria y cuentan con un amplio rango de temperatura de operación. Todo esto a un costo tal que ha permitido hasta el momento su implementación en movilidad eléctrica, aunque existe consenso en que los costos deben ser aun menores que los actuales.

Característica	Rango de operación
Voltaje de celda	4.2 a 2.5 V
Energía específica	100 a 158 Wh/kg
Densidad de energía	245 a 430 Wh/L
Densidad de potencia	2000 a 3000 W/L
Potencia específica	700 a 1300 W/Kg
Ciclos de vida a 100 % DoD	3000
Ciclos de vida a 20-40 % DoD	más de 20000
Esperanza de vida calendario	más de 5 años
Temperatura de operación	-40°C a 60°C
Efecto memoria	No

Cuadro 3.3: Características principales de la batería de litio-ion. Fuente: [3].

Respecto al envejecimiento debido a la profundidad de descarga, debe ser notado que típicamente las celdas se degradan al aumentar la profundidad [3], lo cual es visto detalladamente en el capítulo 3.5.

La figura 3.4 muestra distintos tipos de celdas cilíndricas empleadas para construcción de baterías de litio-ion. Dentro de las celdas más comunes, la más extendida actualmente es la celda 18650, ya que cuenta con los valores más elevados de densidad de energía, aunque es superada en energía específica por la celda 26650. La celda 18650 ofrece una capacidad de 800 mAh y mantiene la capacidad total después de 20000 ciclos realizados a la tasa de carga 10C (6 min) y tasa de descarga 5C (12 min). Mantiene la capacidad del 95 % después de 30000 ciclos a una tasa de carga 15C (4 min) y una tasa de descarga 5C, ambas al 100 % de profundidad de descarga (DoD) y al 100 % del estado de carga (SoC) [3].

Sin embargo, desarrollos actuales de baterías realizadas conjuntamente entre Tesla y Panasonic, están arribando a un nuevo desarrollo de celda cuyas dimensiones en diámetro y largo son algo mayores que la celda 18650, alcanzando 21 mm de diámetro y 70 mm de longitud. La denominación de esta celda es 21700 y está siendo construida para la colocación en el Model 3 de Tesla. El pack de baterías del Model 3 se compone de 2976 celdas 21700, para alcanzar una capacidad de almacenamiento energético de 50 kWh [31].

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

Tipo	14650	17670	18650	26650
Altura (mm)	65	67	65	65
Diámetro (mm)	14	17	18	26
Energía específica (Wh/kg)	128	132	155	354
Densidad energética (Wh/L)	333	306	410	131

Cuadro 3.4: Características físicas y eléctricas de algunas celdas cilíndricas de litio-ion, de electrodos de $C/LiCoO_2$. Fuente: [3].

3.4.2.3. Electroodos para baterías de litio-ion.

Cuando se habla actualmente de baterías para vehículos eléctricos y otros usos, es habitual encontrar en la jerga nuevas denominaciones para las baterías de iones de litio. Así, es habitual hablar de LFP ($LiFePO_4$), baterías de litio NCM, LTO, entre otras denominaciones comunes. Esta nomenclatura refiere habitualmente a aspectos constructivos de la celda o batería, y más específicamente al contenido de los materiales que constituyen los electrodos. Para permitir la aplicación de nuevos tipos de materiales en los electrodos, se han utilizado varias estrategias diferentes. Entre las más comunes se encuentran la reducción dimensional, los compuestos de intercalación, el doping y funcionalización, el control morfológico, el coating para encapsulado y la modificación del electrolito [6]. En esta sección, se analiza una gama de materiales representativos de cátodos y ánodos, a partir de los materiales disponibles en el mercado y de materiales novedosos prometedores a futuro.

3.4.2.4. Composición del electrodo negativo.

En relación a los materiales que componen los ánodos en celdas de litio, una opción no muy extendida ha sido el uso de metal litio o aleaciones metálicas. Si bien el litio metálico tiene la capacidad específica elevada, es más reactivo que la aleación litio aluminio y que otras aleaciones ensayadas. El metal litio ha sido utilizado principalmente en celdas pequeñas o planas, ya que es difícil escalar a diseños más grandes y/o enrollados porque la mayoría de las aleaciones de litio son frágiles y no se pueden conformar en láminas delgadas.

Otra opción largamente extendida es el carbono en distintas formas (coke, grafito, carbones de baja cristalinidad) que se utiliza actualmente en baterías comerciales. El carbono litiado almacena iones litio en forma reversible entre láminas de átomos de carbono, desarrollando un potencial muy bajo con relación al par Li^+/Li , lo cual enaltece la tensión de celda. La capacidad teórica máxima que proporciona el grafito se calcula a partir de la inserción de un átomo de litio por cada seis átomos de carbono (LiC_6 , 372 Ah/Kg). Estos compuestos de carbono son atractivos desde un punto de vista de la seguridad, ya que no hay litio metálico presente en la celda. Luego, se selecciona un compuesto de intercalación adecuado para el electrodo positivo de modo que se obtenga un alto voltaje de celda. Durante la operación de la celda, los iones de litio circulan entre los electrodos durante el ciclo de carga y descarga y no se deposita litio metálico durante la carga. Como se indicó anteriormente, el carbono litiado cuenta con la ventaja de tener un potencial cercano al de metal de litio pero evita las dificultades del metal de litio, con

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

lo cual una celda con un ánodo de carbono litiado tendrá un potencial similar al de una celda con ánodo de metal litio.

Una tercer opción usada en ánodos de celdas de litio son los compuestos metálicos de transición. Los compuestos metálicos de transición tienen estructuras en capas en las que los iones de litio se intercalan y desintercalan durante la carga y descarga, con potenciales electroquímicos cercanos a los de los materiales de carbono litiado. La figura 3.13 muestra los potenciales electroquímicos de algunos compuestos metálicos de transición litiados. Los potenciales electroquímicos de Li_xWO_2 , Li_xMoO_2 y Li_xTiS_2 son cercanos a los del carbono litiado y son claramente diferentes de los valores de $\text{Li}_x\text{Mn}_2\text{O}_4$, Li_xCoO_2 y Li_xNiO_2 . WO_2 , MoO_2 o TiS_2 se pueden usar como ánodos y LiMn_2O_4 , LiCoO_2 o LiNiO_2 como cátodos. Las células de este tipo se han desarrollado utilizando ánodos de TiS_2 y cátodos de LiCoO_2 en un electrolito orgánico [3]. Recientemente, algunos fabricantes de baterías han optado por electrodos negativos formados por compuestos metálicos de transición con titanato de litio (LTO, $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$). La celda LTO es una celda de iones de litio que utiliza nanocristales de titanato de litio en lugar de carbono, en la superficie de su ánodo. Esta celda tiene la ventaja de tener altos niveles de seguridad y de ser más rápida de cargar que otras baterías de iones litio, por lo que son usadas en ciertas versiones de vehículos eléctricos como el i-MiEV de Mitsubishi y el Honda Fit EV [32]. La celda LTO tiene en su ánodo un área de superficie de aproximadamente 100 metros cuadrados por gramo, en comparación con 3 metros cuadrados por gramo de carbono, lo que permite que los electrones entren y salgan del ánodo rápidamente. Esto hace posible la recarga rápida y proporciona altas corrientes cuando es necesario [33]. Además, las celdas de titanato de litio tienen una duración de entre 3000 y 7000 ciclos de carga, mucho más que otras baterías de iones de litio [34]. Como contrapartida, las celdas LTO tienen la desventaja de poseer un voltaje de celda reducido (hasta 1.4 V respecto al litio metálico), lo que conduce a una energía específica más baja que otras opciones en tecnologías de ión-litio [35].

La figura 3.13 muestra distintos valores de tensión de algunos compuestos metálicos de intercalación, en comparación con el valor de referencia del litio metálico. En la figura, varios valores de referencia pueden ser observados.

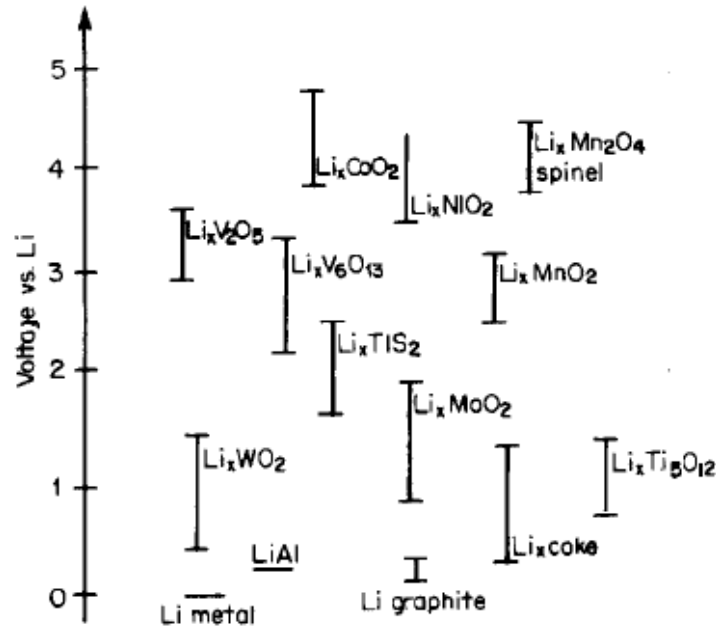


Figura 3.13: Valores de tensión de algunos compuestos metálicos de intercalación, en comparación con el valor de referencia del litio metálico. Elaborado a partir de [6].

3.4.2.5. Composición del electrodo positivo.

Las baterías de litio-ion actualmente comercializadas cuentan con un electrodo positivo con óxido metálico de litio como material activo. Como se mencionó anteriormente, los compuestos de intercalación son compuestos que se forman a partir de la inserción de un huésped o invitado en una red cristalina sólida, que recibe el nombre de matriz anfitriona (host). Los iones invitados se pueden insertar y eliminar de la red host de forma reversible. En una batería de iones de litio, Li^+ es el ion invitado y los compuestos de la red anfitriona son calcogenuros metálicos, óxidos de metales de transición, o compuestos polianiónicos. Estos compuestos de intercalación se pueden dividir en varias estructuras cristalinas como capas, espinela, olivina y tavorita [6].

En la actualidad, las baterías comercializadas son nombradas según el material activo existente en el cátodo, dado que es esta una de las principales características dominantes de la celda. Los compuestos más extendidos para el óxido metálico de litio del cátodo son: LCO para óxido de litio y cobalto, LMO para óxido de litio y manganeso, NCM para níquel cobalto óxido de manganeso, NCA para níquel cobalto óxido de aluminio, LCP para fosfato de litio y cobalto, LFP para fosfato de litio y hierro, LFSF para fluorosulfato de litio y hierro, y LTS para sulfuro de titanio y litio.

La estructura en capas es la forma más antigua de compuestos de intercalación para los materiales del cátodo en baterías de iones de litio. Sin embargo, la mayoría de las investigaciones actuales sobre cátodos de intercalación se centran en los compuestos de óxido de metal de transición y polianión debido a su mayor voltaje operativo y la mayor capacidad de almacena-

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

miento de energía resultante. Típicamente, los cátodos de intercalación tienen una capacidad específica de 100–200 mAh/g y un voltaje promedio de 3–5V [6].

Celda LCO

La celda LCO fue la primera celda de Li-ion que se comercializó (Sony, 1991), y se fabrica con ánodo de grafito (C6) y cátodo de $LiCoO_2$. Su elevada energía específica (150–190 Wh / kg) y su índice de madurez tecnológica hacen de las baterías LCO una opción popular para dispositivos electrónicos portátiles como teléfonos móviles, tabletas y computadoras portátiles. La durabilidad de 500–1000 ciclos completos se traduce en una vida de calendario de pocos años, que es aceptable para dispositivos tan intensivos en innovación. La principal desventaja de la batería LCO es su baja seguridad inherente; Debido a la baja estabilidad térmica del óxido de cobalto, el escape térmico podría iniciarse ya a 150°C [36]. La baja estabilidad térmica se debe a la liberación exotérmica de oxígeno cuando el cátodo se calienta por encima de cierto punto, lo que resulta en una reacción descontrolada en la que la celda puede entrar en combustión. Si bien este problema es general para los cátodos de óxido de metal de transición, el LCO tiene la estabilidad térmica más baja que cualquier material de cátodo comercial, aunque la estabilidad térmica también depende en gran medida de factores como el diseño y el tamaño de la celda [6].

Además de los problemas de seguridad, el ciclo de vida de la celda LCO es relativamente modesto y el crecimiento del mercado a largo plazo podría verse limitado por un cuello de botella de cobalto [36]. Muchos tipos diferentes de metales (Mn, Al, Fe, Cr) han sido recientemente estudiados como sustitutos parciales de Co, demostrando al momento un rendimiento prometededor pero limitado. Los recubrimientos de diversos óxidos metálicos (Al_2O_3 , B_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2) han sido más efectivos para mejorar la estabilidad del LCO y las características de rendimiento incluso durante los ciclos profundos [6].

Celda LNO

El cátodo de $LiNiO_2$ (LNO) tiene la misma estructura cristalina que el LCO y una capacidad específica teórica similar. Su densidad de energía relativamente alta y su menor costo en comparación con los materiales basados en Co son las principales fuerzas impulsoras de su investigación. Sin embargo, los cátodos de LNO puro no son favorables porque los iones Ni_{2+} tienen una tendencia a sustituir los sitios Li_+ bloqueando las vías de difusión del Li. Se encontró que la sustitución parcial de Ni con Co es una forma efectiva de reducir el trastorno catiónico. El LNO también es más inestable térmicamente que el LCO porque el Ni_{3+} se reduce más fácilmente que el Co_{3+} . Se encontró que la inestabilidad térmica a altos estados de carga (SoC) puede ser mejorada mediante dopaje con Mg y agregando una pequeña cantidad de Al, lo cual mejora además el rendimiento electroquímico [6].

Celda NCA

La química de NCA se introdujo comercialmente en 1999. Está hecha de cátodo $LiNiCoAlO_2$ y ánodo de grafito. Normalmente, los cátodos NCA utilizan una mezcla de 80 % de níquel, 15 % de cobalto y 5 % de aluminio, y por lo tanto, la dependencia del cobalto es relativamente

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

moderada en comparación con las baterías de LCO. Las baterías NCA tienen una energía específica excepcional (200–250 Wh/kg), así como elevada potencia específica, y pueden soportar 1000–1500 ciclos completos. Las baterías NCA se usan en vehículos eléctricos, y hay proyecciones para el uso conectado a la red (V2G). Esta química de celda es utilizada por Tesla en algunos de sus modelos eléctricos [36].

Celda NMC

Las baterías NMC están hechas de cátodo LiNiMnCoO_2 y un ánodo de grafito. En comparación con NCA, la batería NMC tiene una densidad de energía más baja, generalmente en el rango de 140 a 250 Wh / kg, mientras que presenta una vida útil más larga (1000–2000). Las proporciones de níquel, manganeso y cobalto podrían variar para influir en las características de la batería y proporcionar soluciones a medida para aplicaciones específicas [59]. Aumentar la proporción de níquel favorece el aspecto energético específico, mientras que aumentar la proporción de manganeso aumenta el poder específico. Aunque la batería de la NMC se comercializó por primera vez en 2004, domina las aplicaciones EV y PHEV, a la vez que se utiliza en electrónica portátil, herramientas eléctricas y dispositivos médicos. También hay proyecciones para usos de conexión a red.

Celda LMO

El cátodo LMO (LiMnO_2) también puede ser prometedor porque el Mn es mucho más barato y menos tóxico en comparación con el Co o el Ni. El LMO anhidro en capas fue preparado años atrás (1996) mejorando los métodos acuosos previos que indujeron impurezas, estequiometrías diferentes, escasa cristalinidad y cambio de estructura indeseable durante el ciclado ([7] citado en [6]). Sin embargo, el rendimiento de ciclado del LMO todavía no es satisfactorio porque la estructura en capas tiene tendencia a cambiar a la estructura de espinela durante la extracción del ion de litio ([7] citado en [6]) y porque el Mn se filtra fuera del LMO durante el ciclado [37].

Las baterías LMO tienen una vida útil más larga que las LCO, generalmente en el rango de 1000–1500 ciclos, pero menor densidad de energía (100 a 140 Wh/kg). Debido a la mayor estabilidad térmica del óxido de manganeso, las baterías de LMO son más seguras y la fuga térmica se produce a aproximadamente 250°C. Además, la batería no contiene cobalto (material costoso) y se basa en materiales abundantes y ecológicos. Las baterías de LMO se utilizan principalmente en bicicletas eléctricas, herramientas eléctricas y dispositivos médicos [36].

Celda NMO

Los esfuerzos en desarrollo de materiales menos costosos que el LCO han resultado en la formulación de cátodo NMO ($\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{0,5}\text{O}_2$). Éste podría ser una buena alternativa al LCO ya que reduciría los costos usando materiales más baratos que los metales de transición utilizados en otros cátodos. El cátodo NMO recientemente sintetizado por el método de intercambio iónico mostró una concentración muy baja de defectos, y una capacidad de 180 mAh/g a una tasa de descarga de 6C [6].

De forma resumida, la figura 3.14 muestra una representación de las principales características operativas de celdas, según la química del cátodo. Se aprecia cómo algunas de las celdas

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.

presentadas se destacan por su capacidad energética, mientras otras lo hacen por su desempeño en potencia. También se ve cómo otras celdas tienen mejor desempeño en seguridad o bien en durabilidad. Se aprecia que, si bien la celda LCO es la más madura de las presentadas, en general ha sido superada por muchas otras en las restantes características presentadas.

3.4.2.6. Electrolito.

Dentro de los tipos de electrolito utilizados en baterías de iones de litio se pueden encontrar los siguientes: electrolitos líquidos, electrolitos en gel, electrolitos poliméricos y electrolitos cerámicos.

Los electrolitos líquidos son soluciones de sales de litio en solventes orgánicos, típicamente carbonatos. En una batería de ion-litio que emplea un electrolito líquido, el electrolito se absorbe casi completamente en el electrodo y en los materiales separadores. Por otra parte, el electrolito de polímero es un material libre de líquido y solvente, donde se forma una fase conductora iónicamente disolviendo una sal en un polímero de alto peso molecular. Las ventajas potenciales de los electrolitos poliméricos incluyen buenas propiedades de seguridad resultantes de su baja volatilidad y alta viscosidad, ya que no contienen un componentes volátiles. El electrolito de gel es un material conductor iónico en donde una sal y un solvente se mezcla con un polímero de alto peso molecular (al igual que en el electrolito polímero), conformando un material en forma de gel. Los electrolitos en gel desarrollados para baterías de iones de litio suelen ser películas de PVDF-HFP, sal de LiPF₆ o LiBF₄ y solvente de carbonato, pudiéndose agregar sílice a la película de PVDF-HFP para mejorar la integridad estructural. Una posible ventaja de los electrolitos en gel es que la fase líquida se absorbe dentro del polímero, por lo que es menos probable que se produzcan fugas de la celda o batería. En el mercado y en la literatura, los electrolitos en gel a menudo se denominan electrolitos de polímeros en gel, y las celdas que emplean electrolitos en gel (o gel de polímero) se denominan polímeros en gel o simplemente celdas de polímero. Por último, los electrolitos cerámicos se refieren a materiales inorgánicos de estado sólido que son iónicamente conductores.

Las formulaciones de electrolitos en las celdas de ion-litio actuales suelen utilizar de dos a cuatro solventes. Las formulaciones con múltiples solventes pueden proporcionar un mejor rendimiento, mayor conductividad y un rango de temperatura más amplio que el posible con un solo solvente. Por ejemplo, el carbonato de etileno (EC) se asocia con una capacidad irreversible baja y una pérdida de capacidad baja cuando se usa junto con electrodos negativos grafiticos. Las formulaciones de solventes múltiples a menudo incluyen EC, incorporando así sus propiedades, mientras que usan otros solventes para disminuir el punto de congelación y la viscosidad de la mezcla.

3.4.2.7. Separadores.

Las celdas de iones de litio utilizan películas delgadas (10 a 30 μm), microporosas cuyo objetivo es aislar eléctricamente los electrodos positivos y negativos. Habitualmente las celdas de electrolito líquido que se encuentran disponibles en el mercado utilizan materiales microporosos de poliolefina dado que proporcionan buenas propiedades mecánicas, estabilidad química y costo

3.4. Tipos de baterías utilizadas en vehículos eléctricos.



Figura 3.14: Representación esquemática de las principales características de algunas de las celdas presentadas, según la composición química del electrodo positivo. Adaptado de [7].

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

aceptable. Los materiales de poliolefina microporosos utilizados están hechos de polietileno, polipropileno o láminas de polietileno y polipropileno. También están disponibles materiales recubiertos con surfactante, diseñados para ofrecer una mejor humectación del electrolito.

Los requisitos para los separadores en celdas de litio-ion deben incluir: buenas propiedades mecánicas para la construcción, resistencia a la punción por materiales de electrodos, tamaño efectivo de poros menos de $1\mu\text{m}$, fácil humectación por parte del electrolito, estabilidad ante el contacto con el electrolito.

3.4.3. Baterías Litio-Polímero.

Las baterías de Li-Po son una variación de las baterías de iones de litio (Li-ion). Utilizan metal de litio en el electrodo positivo, y un óxido metálico de transición (MyO_z) para el electrodo negativo. El óxido de intercalación de metales de transición (MyO_z) posee una estructura en capas en la que se pueden insertar o eliminar iones de litio durante los procesos de carga y descarga. Se utiliza un electrolito de polímero sólido delgado (SPE), que ofrece las ventajas de una mayor seguridad y flexibilidad en el diseño.

La reacción electroquímica general es:



En la descarga, los iones de litio formados en el electrodo negativo migran a través de la SPE y se insertan en la estructura cristalina en el electrodo positivo. Durante la carga el proceso se invierte. Al utilizar un electrodo negativo de lámina de litio y un electrodo positivo de óxido de vanadio (V_6O_{13}), la celda $\text{Li}/\text{SPE}/\text{V}_6\text{O}_{13}$ es la más atractiva dentro de la familia de Li-polímero. Funciona a una tensión nominal de 3V y tiene una energía específica de 155 Wh/kg y una potencia específica de 315 W/kg. Las ventajas correspondientes son una tasa de autodescarga muy baja (aproximadamente 0.5% por mes), capacidad de fabricación en una variedad de formas y tamaños, y diseño seguro. Sin embargo, tiene el inconveniente de un rendimiento relativamente débil a baja temperatura debido a la dependencia de la temperatura de la conductividad iónica [38].

Las baterías Li-Po se caracterizan por ser ligeras y por poder almacenar una gran cantidad de energía, y su aspecto característico es en forma plana dada la composición laminar de sus electrodos. Por su parte, sufren los mismos problemas de seguridad que las baterías de iones de litio, es decir que existe riesgo de explosión e inflamación en contacto con la humedad del aire y con el agua. Asimismo, si la batería se calienta excesivamente por efecto de sobrecargas o por otra causa, puede dañar su envoltura e inflamarse.

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

Una propiedad importante de una batería es su durabilidad en distintas condiciones de uso y/o almacenamiento. La degradación de la batería se produce en todas las condiciones, pero difiere en severidad según el uso que se realiza. Las condiciones de operación difíciles, como temperaturas de operación bajas o altas, sobrecarga, descarga profunda y alto amperaje aceleran

la degradación. Las baterías sufren envejecimiento por calendario y envejecimiento por ciclado; el primero ocurre incluso si la batería está almacenada y, por lo tanto, depende básicamente de las condiciones externas, más específicamente de la temperatura, aunque también del SoC al momento del reposo. El envejecimiento por ciclado también está sujeto a las condiciones de carga y descarga de la batería. La caída en capacidad y potencia en baterías de iones de litio se debe a un conjunto de causas que interactúan entre sí, las cuales no siempre conviene ser estudiadas de forma independiente, sino que son abordadas en conjunto.

La causa del envejecimiento de las baterías se debe al envejecimiento de sus electrodos. En términos prácticos, el envejecimiento de la batería se debe a la pérdida de litio ciclable y a la pérdida en los materiales activos de los electrodos, y se observa que la capacidad disminuye. La pérdida de litio ciclable está relacionada con reacciones secundarias, mientras que la pérdida de materiales activos de los electrodos se debe a factores tales como la disolución, la degradación estructural y el aislamiento de partículas. Por parte del electrolito, su envejecimiento ocurre en el contacto con los electrodos, por lo que su evaluación se realiza al estudiar el envejecimiento de los electrodos [39].

Típicamente, se entiende que una batería llega al final de su vida útil cuando la pérdida de capacidad alcanza un límite tal que ve impedida la satisfacción de los requerimientos técnicos. En la práctica, para vehículos eléctricos el fin de la vida útil queda definido cuando se alcanza un cierto porcentaje de su capacidad o potencia originales, lo cual ocurre en general en el entorno del 80 % [40]. Para vehículos eléctricos puros (BEV), el fin de la vida útil de la batería queda definida cuando se alcanza un porcentaje de su capacidad, dado que es requerido ciertos niveles elevados en cantidad de energía. Por otra parte, para vehículos eléctricos híbridos (HEV), es conveniente que la degradación sea determinada en términos de resistencia interna, lo que se vincula con los niveles de potencia. Por último, para vehículos híbridos enchufables (PHEV), es conveniente la determinación de la degradación tanto en niveles de pérdida de capacidad como en términos de resistencia interna [8].

3.5.1. Mecanismos de envejecimiento y sus causas.

Los mecanismos electroquímicos que provocan el envejecimiento de celdas y baterías de litio son muy diversos, y existe interacción singular entre cada uno de ellos. Dentro de los mecanismos más relevantes, en el presente capítulo serán estudiados los vinculados a temperaturas extremas, variaciones en el estado de carga (SoC), variaciones en la profundidad de descarga (DoD) y variaciones en el ratio de descarga (C-rate).

Los mecanismos de degradación más comunes encontrados en los electrodos y en el electrolito se pueden agrupar en cuatro categorías: (1) formación de película superficial, tanto en ánodo como en cátodo y en la interfase de separación del electrolito (SEI); (2) cambios estructurales, incluido el trastorno catiónico, las transiciones de fase y similares; (3) cambios mecánicos, incluyendo craqueo de partículas, molienda electromecánica, formación de gases y más; y (4) reacciones parasitarias que incluyen la corrosión del colector de corriente y la degradación del aglutinante [8].

Si se observa las celdas de iones de litio para baterías que se emplean normalmente en vehículos eléctricos, se visualiza que las composiciones del ánodo (grafito) y el electrolito (LiPF₆)

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

en solución de carbonato mixto) son casi idénticos para todos los fabricantes, por lo que es de esperar que los mecanismos de degradación sean similares. Por el contrario, los compuestos empleado en el cátodo son relativamente discímiles (LFP, NCM, NCA, LMO, etc.), por lo que los mecanismos de envejecimiento en el cátodo serán específicos de cada configuración [8].

3.5.1.1. Efecto de temperaturas extremas.

El US Department of Energy FreedomCAR and Vehicle Technologies Program establece un rango de operación de baterías de entre -30°C y 52°C [41], así como un rango límite de tolerancia de entre -46°C y 66°C . Estos límites representan un desafío importante para la tecnología disponible actualmente en baterías para vehículos eléctricos.

Los mecanismos de degradación por temperatura en celdas con diferentes tipos de electrodos y electrolitos son similares [39], por lo que se simplifica el análisis del fenómeno cuando intervienen distintas configuraciones de electrodo y electrolito. Puede verse en consecuencia que el aumento en la temperatura de operación de una celda o batería implicará una reducción significativa en el estado de salud (SoH) de la batería o, lo que es lo mismo, un aumento en la degradación. A modo de referencia, la figura 3.15 muestra las pérdidas en el SoH de una batería de litio-ion cuando aumenta la temperatura de operación [8]. Estas temperaturas de celda pueden ser debidas tanto a incidencia de factores externos (como temperatura ambiente), así como también a factores intrínsecos al funcionamiento de cada celda. Dado esto último, debe ser tenido en cuenta que el aumento de temperatura interna de una celda puede deberse a factores de funcionamiento, como por ejemplo el rango de funcionamiento del estado de carga o la velocidad de carga y descarga de la celda.

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

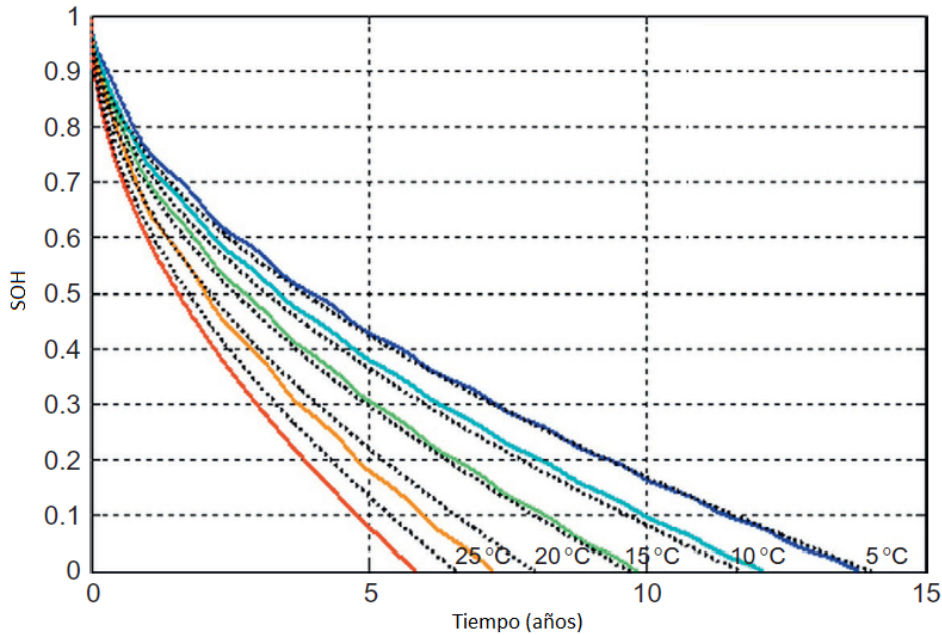


Figura 3.15: Comportamiento simulado del Estado de Salud de una batería debido al ciclado a diferentes temperaturas de operación. Fuente: [8].

El gráfico presenta el comportamiento simulado del SoH de una batería de un vehículo eléctrico sometido a ciertos regímenes de ciclos y almacenamiento a diferentes temperaturas en diferentes ciudades (líneas de color representan diferentes temperaturas). Las líneas discontinuas muestran el envejecimiento a temperatura ambiente constante.

3.5.1.2. Efecto del rango de funcionamiento del Estado de Carga (SoC).

El rango de funcionamiento de una celda, o bien el % de carga de una celda en operación, tienen crucial efecto en el envejecimiento, lo cual es de suma importancia en vehículos eléctricos, dada su amplia variabilidad de modos de uso [42].

El mantenimiento del SoC en niveles elevados (cercano al 100% SoC) conduce a niveles de degradación significativos, dado que reducen la estabilidad de los electrodos y del electrolito. Del mismo modo, el mantenimiento del SoC en niveles bajos o muy bajos ocasionan la corrosión del colector de corriente, aumentando los niveles de degradación asociada a la pérdida de capacidad y al aumento de resistencia interna. Por tal motivo, el mantenimiento del SoC en valores cercanos a los extremos resulta perjudicial y provoca el aumento en la degradación [42].

La figura 3.16 muestra un ejemplo para una celda del LiFePO₄ donde se observa la incidencia del estado de carga (SoC) en la pérdida de capacidad. El resultado indica claramente que el almacenamiento de la batería a valores elevados de SoC puede conducir a una caída más rápida de la capacidad de almacenamiento original de la batería [9]. Debe ser tenido en cuenta que la pérdida de capacidad para diferentes valores de estado de carga, tiene sentido principalmente

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

para casos de baterías que son depositadas por largos períodos o largos intervalos de tiempo. Para baterías que están sometidas a ciclados, ver el impacto en la capacidad dados distintos niveles de profundidad de descarga.

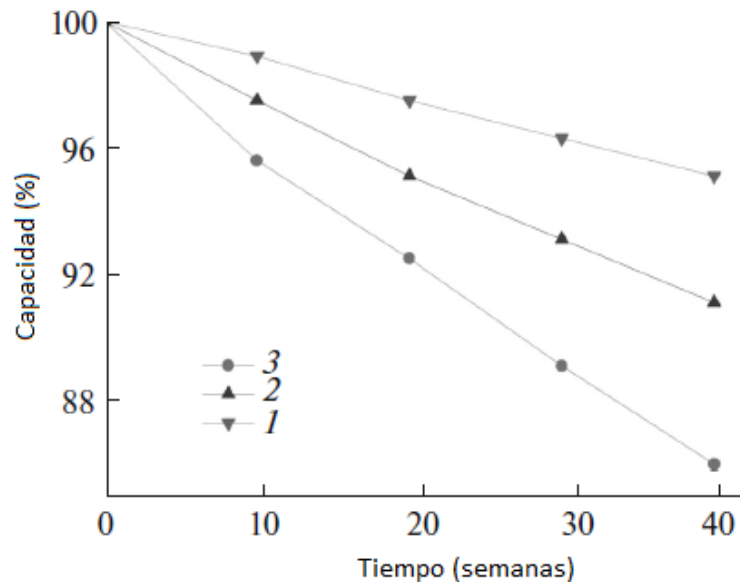


Figura 3.16: Caída en la capacidad (%) en función del tiempo para distintos porcentajes de estado de carga (1) 15 %, (2) 55 %, (3) 85 %. Fuente: [9]

3.5.1.3. Efecto de la profundidad de descarga (DoD).

Las referencias bibliográficas indican que la incidencia de la profundidad de descarga (DoD) sobre el envejecimiento en baterías de litio-ion depende de las características de cada celda. A modo de ejemplo, para una celda de iones de litio de cátodo $LiFePO_4$ y ánodo de grafito de 1700 mAh de capacidad, se tendrá una incidencia de la profundidad de descarga como se indica en la figura 3.17, donde a primera vista aparece una diferencia considerable. Sin embargo, si se realiza una corrección en la capacidad de la celda, multiplicando la cantidad de ciclos por la profundidad de la descarga correspondiente, se obtiene la cantidad total de Ah entregados por la celda. Hecho esto, puede verse que la profundidad de la descarga tiene poco efecto sobre la pérdida de capacidad, es decir, la incidencia de la DoD en la degradación de esta celda es relativamente pequeña, como puede verse en la figura 3.18 [9].

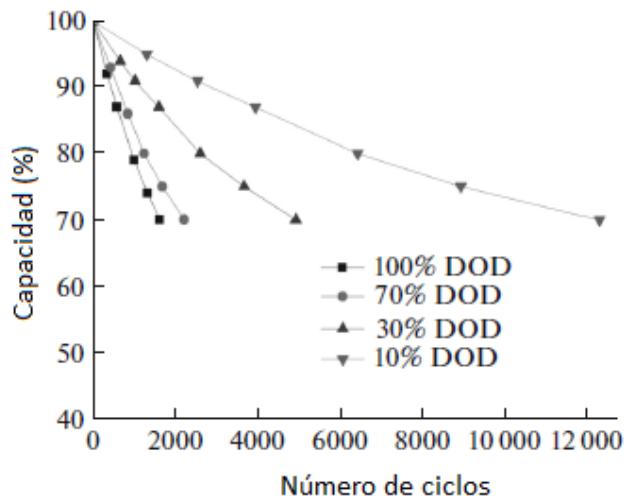


Figura 3.17: Capacidad nominal (%) en función del tiempo para distintos niveles de profundidad de descarga (DoD). Fuente: [9].

Por otra parte, según se establece en [10], para una celda NCM/grafito se observa, como tendencia general, que la pérdida de capacidad aumenta a mayor profundidad de descarga. En particular, a una profundidad de descarga de 10 %, la pérdida de capacidad es sustancialmente menor que a profundidades mayores. Por otro lado, como se verá más adelante, la temperatura y la tasa de descarga (C-rate) tienden a tener impactos más significativos en la pérdida de capacidad que la profundidad de descarga.

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

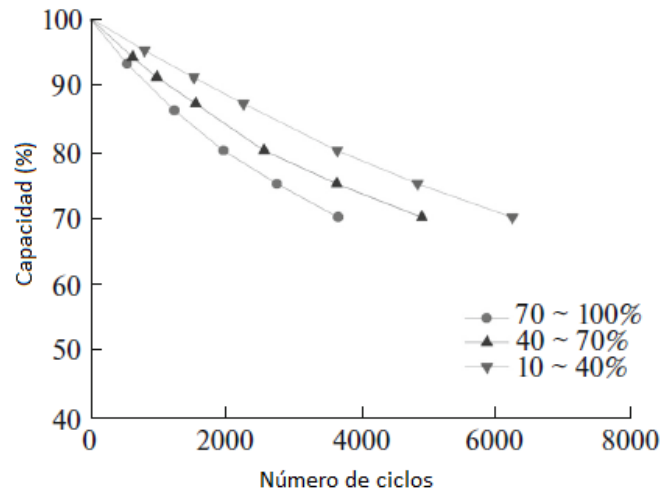


Figura 3.18: Caída en la capacidad nominal (%) en función del tiempo para distintos niveles de profundidad de descarga (DoD), corregido por la cantidad de Ah entregados. Fuente: [9].

La figura 3.19 muestra los efectos de la profundidad de descarga en la pérdida de capacidad, a tres velocidades diferentes (2C, 3.5C y 5C) a 34°C de temperatura. En estos gráficos, la pérdida de capacidad se muestra en función del Ah-rendimiento. El Ah-rendimiento representa la cantidad de carga entregada por la batería durante el ciclo. Para cada C-rate, el Ah-rendimiento es directamente proporcional al tiempo; sin embargo, el mérito de utilizar el Ah-rendimiento es que permite cuantificar y correlacionar los comportamientos de pérdida de capacidad para diferentes tasas de C-rate. Los resultados indicaron que la pérdida de capacidad se vio fuertemente afectada por la velocidad (C-rate), la temperatura y la profundidad de descarga (DoD).

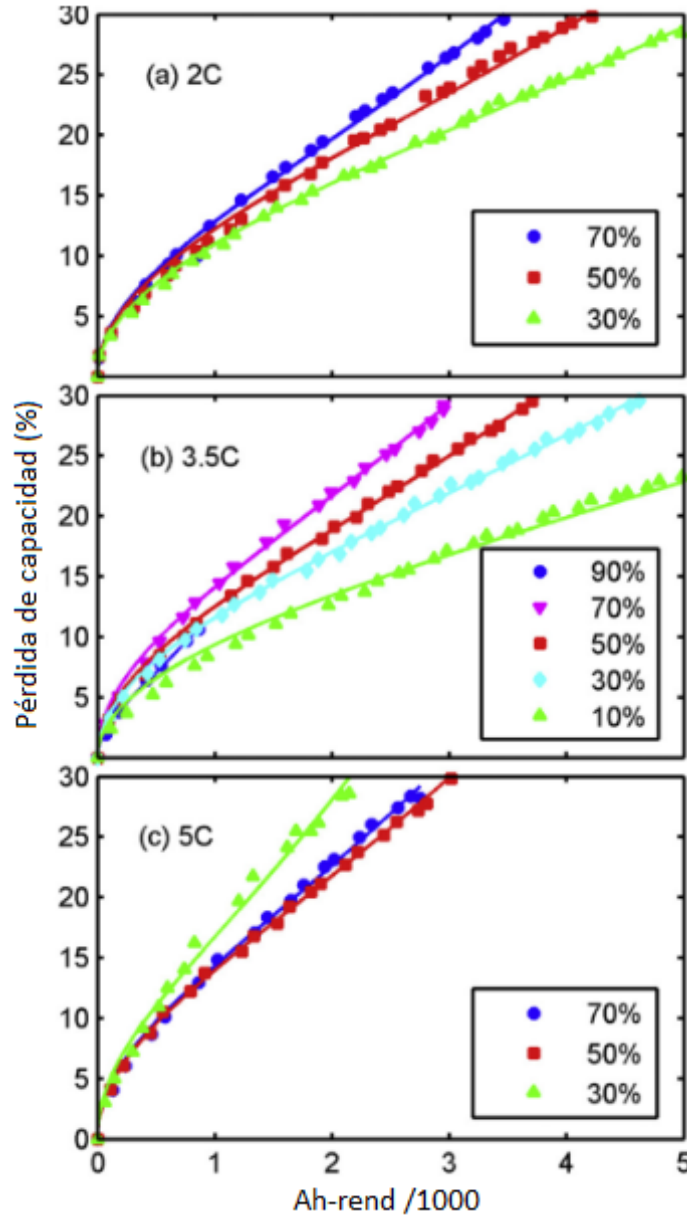


Figura 3.19: Pérdida de capacidad para una serie de profundidades de descarga, a temperatura de 34°C. Cada uno de los tres cuadros corresponde a una corriente de descarga (2C, 3.5C, 5C). Fuente: [10].

3.5.1.4. Efecto de la intensidad de corriente o ratio de descarga (C-rate).

La tasa de descarga de una celda o el C-rate, tienen una incidencia importante en el grado de envejecimiento de celdas y baterías. Trabajos realizados sobre celdas de iones de litio muestran

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

que la capacidad se resiente cuando esta es sometida a grandes intensidades de descarga. A modo de ejemplo, se experimentó con celdas NCA (LiNiCoAlO_2) que fueron sometidas a una descarga pulsada de alta velocidad, una descarga continua de alta velocidad y una descarga de corriente continua de velocidad nominal con el fin de evaluar la pérdida de capacidad. Después de 400 ciclos, la celda de descarga pulsada de alta velocidad mostró importante pérdida de capacidad (en el entorno de 20%), mientras que la celda de descarga continua de alta velocidad mostró una pérdida de capacidad algo menor (en el entorno de 5%), mientras que la celda de control 1C no mostró deterioro [11]. Este comportamiento es representado en la figura 3.20 donde puede verse que el impacto de descarga en pulsos es mayor que el de descarga continua.

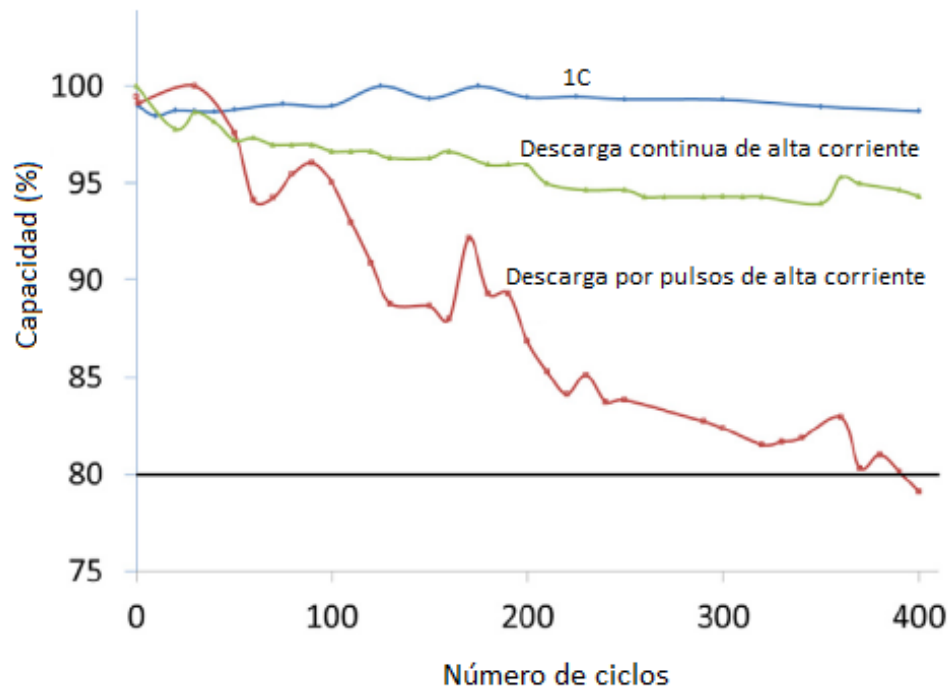


Figura 3.20: Capacidad normalizada de una celda de litio-ion LiNiCoAlO_2 (NCA), de 3 Ah de capacidad, sometida a diferentes regímenes de ensayo. Fuente: [11].

3.5.1.5. Interacción intensidad de corriente (C-rate) y temperatura.

Las referencias bibliográficas consultadas muestran resultados sobre ensayos en distintos tipos de celdas de iones de litio, donde puede ser observado caso a caso, el efecto que tiene la interacción de distintos factores.

A modo de ejemplo, ha sido reportado para baterías NCM/grafito, que la interacción entre el efecto de la temperatura y el efecto del C-rate genera consecuencias que se superponen, encontrándose que a altas tasas de descarga, tanto las temperaturas elevadas (46°C) como las temperaturas bajas (10°C) ocasionan un efecto nocivo y provocan pérdida de capacidad [10]. Este doble efecto queda representado en la figura 3.21, donde se aprecia que a alta potencia las

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

diferencias de temperatura dejan de ser tan relevantes, y que ambos extremos de temperatura son negativos para la celda.

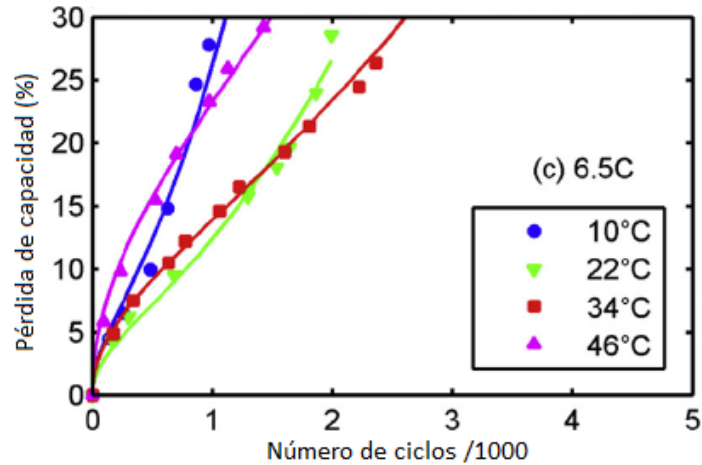


Figura 3.21: Pérdida de capacidad a cuatro temperaturas (10°C, 22°C, 34°C, 46°C) a un ratio de descarga de 6.5C. La profundidad de descarga es 50% para todos los puntos de la figura.

Fuente: [10]

Este resultado puede tener consecuencias relevantes a la hora de realizar la planificación del V2G, dado que muestra el impacto importante que tienen las altas tasas de descarga (altas potencias) sobre la pérdida de capacidad en celdas de litio. Los resultados expuestos son para elevadas tasas de descarga, siendo la recarga a velocidad 2C.

De forma similar a lo que ocurre para altas velocidades de descarga, es consignado que a altas temperaturas de operación dejan de ser importantes los cambios en la tasa de descarga [10], lo cual queda representado en la figura 3.22.

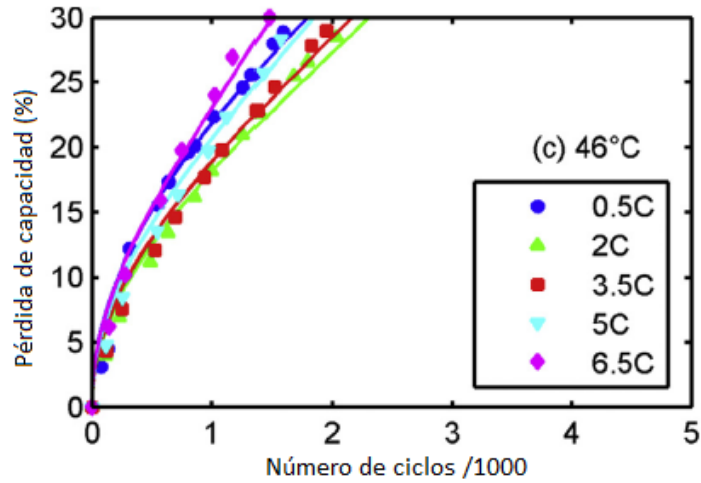


Figura 3.22: Pérdida de capacidad para una serie de tasas de descarga (0.5 C, 2 C, 3.5 C, 5 C, 6.5 C) a una temperatura de 46°C. La profundidad de descarga es del 50 % para todos los datos en la figura. Fuente: [10].

3.5.1.6. Efecto de la recarga rápida y de recarga a bajas temperaturas.

La tecnología de carga rápida de las baterías de iones de litio es fundamental para la aplicación comercial de vehículos eléctricos. Los protocolos de carga tradicionales cargan la celda a una corriente baja debido a que corrientes elevadas de carga pueden causar deposición de litio en el ánodo, lo que resulta en una degradación acelerada de la batería. Además, la corriente elevada puede aumentar tanto la velocidad de generación de calor como la temperatura de la celda, lo cual es otra razón para la degradación de la batería [43].

La deposición de litio (lithium plating) es la formación de litio metálico alrededor del ánodo de las baterías durante los procesos de recarga, lo que genera aumento en el envejecimiento y pérdida de capacidad. Como se vio en el capítulo 3.4.2, durante el proceso de carga los iones de litio del cátodo se insertan en compuestos con estructuras en capas en el ánodo. Durante este proceso de intercalación es cuando tiene lugar la deposición de litio. Existen dos motivos principales para esto: (1) las elevadas corrientes de carga que obliga a los iones de litio a moverse a una velocidad de reacción más rápida y acumularse en la superficie del ánodo y (2) la recarga a baja temperatura. En la condición ambiental de baja temperatura, la velocidad de reacción se vuelve más lenta, lo que afecta a la intercalación de iones de litio.

Se han llevado a cabo estudios para determinar el comportamiento térmico de baterías durante la recarga rápida, encontrándose que existen sectores en las celdas en los que la mala conductividad térmica dificulta la reducción de la temperatura máxima con la sola intensificación del enfriamiento externo. Se ha encontrado asimismo que el protocolo de recarga por pulsos, que fue prometedor para resolver el problema térmico durante la recarga rápida, no es capaz de mitigar los gradientes térmicos, debido a la mayor tasa de generación de calor promedio que con la recarga a corriente constante. Actualmente se encuentra en fase de desarrollo ciertas

3.5. Degradación en baterías de iones de Litio.

optimizaciones de la geometría de las celdas, tanto para la celda prismática como para la celda cilíndrica, con el fin de reducir la temperatura máxima y mitigar las diferencias internas de temperatura. La celda prismática de bajo espesor y la celda cilíndrica delgada se prefieren para el diseño de la batería desde el punto de vista del rendimiento térmico, mientras que el diseño final de la geometría de la celda debe tener en cuenta la resistencia mecánica, la optimización energética, los costos, etc. [44].

Si bien existen recientes trabajos científicos que han eliminado la formación de deposición de litio en celdas de iones de litio, es ampliamente extendida la evidencia que muestra, para distintas celdas convencionales Li-ion, un marcado detrimento en el ciclo de vida cuando las celdas son sometidas a recarga a baja temperatura [12]. La figura 3.23 muestra cómo se ve afectada la vida útil de una celda cuando es sometida a recargas a bajas temperaturas. Se observa cómo la incidencia negativa es notoria para la mayoría de las celdas ensayadas. Si bien en Uruguay no es factible encontrar temperaturas extremadamente bajas como las utilizadas en algunos de estos ensayos ($<0^{\circ}\text{C}$), debe ser verificado que el tipo de baterías usadas no se verá afectada por las mínimas temperaturas en Uruguay, o bien que el vehículo cuenta con un sistema de calentamiento del pack durante la recarga.

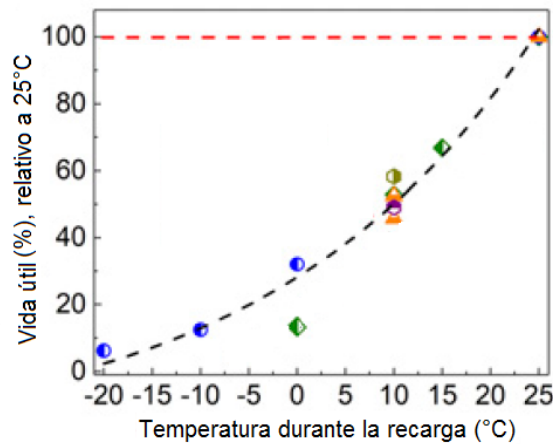


Figura 3.23: Caída en la vida útil cuando se somete la celda a recarga a bajas temperaturas. Fuente: [12].

Estudios realizados en celdas LTO [45] indican que hasta una velocidad de recarga de hasta 6C no existirá degradación de las celdas más allá de lo normal, al menos durante los 1000 primeros ciclos ensayados. Por otra parte, estudios realizados sobre celdas LiFePO₄/grafito indican que la recarga rápida en combinación con la descarga lenta conduce a una vida útil significativamente más corta que para los ciclos simétricos (igual carga que descarga). Por otro lado, la carga lenta en combinación con la descarga rápida es más perjudicial que la carga y descarga rápida, pero solo para temperaturas bajas o medias. Además, se concluye que las altas tasas de carga, las altas temperaturas o los ciclos intensivos no siempre conducen a una vida útil más corta. Un hallazgo singular es que se encontró que la combinación de la descarga

3.6. Requisitos de seguridad y ensayos para baterías de vehículos eléctricos.

a velocidad 1C en combinación con la recarga a velocidad 3.75C degrada estas celdas más rápidamente que un ciclo simétrico con velocidad de 3.75C en ambas direcciones [46]. Por otra parte, para celdas NCM con ánodo de grafito, a bajas temperaturas de recarga fue encontrado que elevadas corrientes no muestran mayor envejecimiento al esperable, lo cual puede deberse a: (1) un elevado aumento de la temperatura interna debido a las altas corrientes y (2) el alcance temprano de la tensión de corte en la recarga [47].

Existe gran cantidad de trabajos científicos realizados que analizan la pérdida de capacidad y el aumento de resistencia interna en celdas de iones de litio sometidas a regímenes de alta corriente de recarga y distintos rangos de temperatura [3] [5] [8] [9]. Si bien parece haber suficiente evidencia respecto al daño que pueden causar las temperaturas extremas, y en particular la recarga a bajas temperaturas, no es definitivo que para cualquier celda de iones de litio la recarga rápida sea nociva, sino que deberá remitirse a cada tipo específico de celda para saber con exactitud el posible daño causado por elevada corriente de recarga.

3.6. Requisitos de seguridad y ensayos para baterías de vehículos eléctricos.

Las baterías de iones de litio deben pasar una serie de pruebas de seguridad para ser certificadas para su uso en vehículos eléctricos. Las pruebas de seguridad se describen en estándares internacionales desarrollados típicamente en base a la investigación y la experiencia previa de la industria automotriz y los organismos reguladores. Estas pruebas se realizan para comprender e identificar posibles puntos débiles y vulnerabilidades de la batería cuando la batería experimenta condiciones fuera de lo normal y para determinar cómo se comportará la batería en condiciones de abuso o uso indebido.

Muchas de las pruebas establecidas en los estándares nacionales o internacionales están dedicadas a la evaluación de las consecuencias de un cortocircuito, que puede ser seguido de fuga térmica, ya que este es uno de los escenarios que puede crear mayor riesgo, tanto para los ocupantes del vehículo como para los socorristas. En algunas pruebas, el cortocircuito se induce externamente, como en el caso de las pruebas de aplastamiento, penetración y caída, y otras pruebas apuntan a inducir el cortocircuito internamente.

Los ensayos son usualmente definidos para ser realizados sobre celdas, módulos o packs de baterías, y se pueden clasificar en las siguientes cuatro áreas: ensayos mecánicos, ensayos eléctricos, ensayos ambientales y ensayos químicos.

Cabe destacar que los ensayos de seguridad para baterías que se presentan en este capítulo no contemplan acciones que puedan provocar la degradación de las baterías con el consecuente envejecimiento, sino que se trata de ensayos que ocasionan el daño inmediato o la salida de servicio de la batería.

3.6.1. Ensayos mecánicos.

3.6.1.1. Prueba de choque mecánico.

La prueba de choque mecánico tiene como objetivo evaluar la robustez de una batería en una situación de aceleración y / o desaceleración repentina de un vehículo. Durante el ensayo, el elemento sometido a prueba está expuesto a fuerzas de choque definidas en términos de aceleración y duración del choque adaptadas a diferentes condiciones; desde la conducción normal en uso, la conducción a alta velocidad, hasta el choque del vehículo. Existe una gran diversidad en las condiciones de las pruebas (dirección, aceleración máxima, duración, estado de carga de la batería) en las diferentes normas y regulaciones [48].

3.6.1.2. Ensayo de caída.

Esta prueba simula una situación en la que una batería se extrae de un vehículo eléctrico y se cae accidentalmente. Los requerimientos de los estándares establecen los tipos de superficie, altura de caída y SoC. Durante la prueba, la batería se deja caer sobre una superficie plana rígida o sobre un objeto cilíndrico hecho de acero. La forma de este objeto cilíndrico se supone que representa un poste o columna contra la que la batería podría impactar. La altura de caída varía considerablemente en los distintos estándares, desde 1 metro hasta 10 metros, por lo que se espera que los resultados de las pruebas sean muy divergentes [48].

En algunas normas, los sistemas de almacenamiento que deben ser retirados del vehículo para ser recargados son obligados a realizar esta prueba. En tal caso, la prueba debe repetirse tres veces sobre el mismo artículo ya que la probabilidad de que la batería se caiga es mayor que si no fuera necesario retirarla del vehículo. Si bien este escenario parece muy probable en cierto tipo de vehículos eléctricos como por ejemplo motos eléctricas y bicicletas eléctricas, la prueba de caída no se incluye en muchos de los estándares de baterías para VE's.

3.6.1.3. Ensayo de penetración.

En este ensayo se introduce una barra de acero afilada a través de la batería a una cierta velocidad de penetración. Aunque la consecuencia de la prueba es un cortocircuito, este cortocircuito es inducido mecánicamente, por lo que esta prueba generalmente se clasifica dentro de las pruebas mecánicas y no dentro de las pruebas eléctricas. A medida que el clavo penetra a través de las celdas, se crean cortocircuitos y se libera calor. Durante el ensayo, múltiples capas de electrodos están en contacto eléctrico, por lo que se produce un daño relativamente importante en un corto período de tiempo con disipación de calor.

Dependiendo del tipo de prueba (celda, módulo o pack), la profundidad de la penetración y la dimensión del clavo varían según lo descrito en muchos de los estándares. En la mayoría de los casos, se requiere una varilla de 3 mm de diámetro para celdas y una varilla de 20 mm de diámetro para módulos o packs. La profundidad de penetración es al menos a través de toda la celda para ensayos de celda y a través de las celdas o 100 mm (lo que sea mayor) para las pruebas de módulos o paquetes. Luego de la penetración, el clavo debe quedar incrustado.

3.6. Requisitos de seguridad y ensayos para baterías de vehículos eléctricos.

La utilidad de esta prueba es cuestionada por muchos en la comunidad científica, debido a: (1) la prueba no es representativa de un evento real, (2) la prueba no representa un cortocircuito interno espontáneo y (3) hay muchos parámetros que pueden afectar fuertemente el resultado de la prueba, como por ejemplo la velocidad del clavo, dimensión y material del clavo y SoC de la batería. Por todas las razones, esta prueba no se incluye en muchas de las normas y reglamentos de automoción [48].

3.6.1.4. Ensayo de inmersión.

La prueba de inmersión se ha desarrollado para simular una situación en la que una batería está sumergida o cuando los conjuntos de baterías instalados en la parte inferior del vehículo están parcialmente inundados. Para realizar esta prueba, la batería (completamente cargada) se sumerge completamente en agua salada con una composición similar a la del agua de mar (por ejemplo, 5 % en peso de NaCl) a 25°C durante un período de al menos 1–2 hs. o hasta que se extinga cualquier efecto visible (por ejemplo, burbujeo).

3.6.1.5. Ensayo de aplastamiento.

En esta prueba, la fuerza de aplastamiento aplicada emula un accidente de vehículo o cualquier fuerza externa que pueda dañar la carcasa de la batería y causar su deformación. En la prueba de aplastamiento, también conocida como prueba de integridad de la caja de la batería, una placa aislada eléctricamente ejerce presión sobre la batería hasta que se alcanza una cierta deformación (por ejemplo, aplastamiento al 85 %) de la dimensión inicial y después de 5 minutos, continúa aplastando hasta el 50 % de la dimensión inicial o hasta que se observe una caída brusca de voltaje [48].

Algunas normas indican que la fuerza que debe aplicarse en la prueba de aplastamiento debe limitarse a 1000 veces el peso de la batería mientras que otras tienen una fuerza fija independientemente del tamaño de la batería a ensayar. La implementación de la primera opción podría llevar a algunos problemas al probar las baterías de tracción, ya que las fuerzas máximas de menos de 1000 veces el peso de la batería podrían no ser suficientes para lograr la compresión requerida (por ejemplo, 50 % de la dimensión de la batería) [48].

3.6.1.6. Ensayo de vuelco o rotación.

Esta prueba simula el vuelco de un vehículo que podría ocurrir en un accidente. Para realizar la prueba, la batería o el módulo se gira lentamente (por ejemplo, 6°/seg) durante una revolución completa (360°) para evaluar la presencia de cualquier fuga (por ejemplo, electrolito de la batería o líquido refrigerante). Luego, la batería se gira en incrementos de 90° hasta alcanzar otra rotación completa [48].

3.6.1.7. Ensayo de vibración.

El propósito de esta prueba es evaluar el efecto de los perfiles de vibración a largo plazo, representativos de la conducción, tanto en términos de durabilidad como en términos de iden-

tificación de fallas de diseño. Los perfiles de vibración varían considerablemente en un amplio rango de frecuencias y amplitudes. La prueba de barrido sinusoidal se usa comúnmente para identificar las resonancias del producto, mientras que la vibración aleatoria simula los escenarios de la vida cotidiana que una batería experimentaría. Los perfiles de vibración derivan de normas y regulaciones para vehículos convencionales y hay, de hecho, muy pocos trabajos publicados sobre perfiles de vibración diseñados específicamente para EV y HEV. Tanto las referencias [48] como [49] presentan ensayos de vibraciones específicos en los cuales se testea la batería bajo tales condiciones.

3.6.2. Ensayos eléctricos.

3.6.2.1. Ensayo de cortocircuito externo.

El propósito de esta prueba es evaluar el desempeño de seguridad de una celda o batería cuando se aplica un cortocircuito externo. La prueba puede evaluar la activación del dispositivo de protección contra sobrecorriente o la capacidad de las celdas para soportar la corriente sin llegar a una situación peligrosa (por ejemplo, fuga térmica, explosión o incendio). Los principales factores de riesgo son la generación de calor a nivel de celda (fuga térmica) y la formación de arcos eléctricos que pueden dañar los circuitos o el aislamiento.

Durante la prueba, un elemento de baja resistencia se conecta externamente en los terminales del dispositivo hasta que un elemento de protección de sobrecorriente, si existe, limita la corriente. Normalmente, los fusibles e interruptores automáticos se utilizan para proteger contra sobrecorrientes a nivel de módulo o pack de batería. A nivel de celda se usan dispositivos integrados de interrupción de corriente (en inglés, current interruption devices o CID) o coeficiente térmico positivo (en inglés, positive thermal coefficient o PTC), que desconectan el colector de corriente interno de su terminal o limitan el paso de corriente si la presión interior y/o la temperatura alcanzan cierto límite.

Respecto al SoC de la celda o batería en el momento de la prueba, se tiene que en el peor de los casos se logra con un SoC alto, ya que la corriente de cortocircuito será máxima y la temperatura de inicio será la más baja. En consecuencia, la mayoría de los estándares requieren que los ensayos se realicen al 100 % del SoC [48].

3.6.2.2. Ensayo de sobrecarga y sobredescarga.

Para evaluar la funcionalidad del sistema de protección de sobrecarga/sobredescarga, la batería se carga o descarga más allá de los límites recomendados por el fabricante. Este ensayo se ve destacado por el hecho de que casi todas las normas y regulaciones evaluadas requieren su aplicación.

Los factores que afectan el resultado de la prueba son, entre otros, la tasa de carga o descarga y el SoC inicial y final. Para la prueba de sobrecarga, se aplica una corriente controlada a la batería hasta un límite de carga establecido, o hasta que el dispositivo ensayado interrumpa o limite la carga. Aunque la mayoría de los estándares proporcionan una descripción general para todos los tipos de dispositivos de almacenamiento de energía, otros describen pruebas específicas para aplicaciones de EV, HEV y PHEV [49] [48].

3.6. Requisitos de seguridad y ensayos para baterías de vehículos eléctricos.

Aunque pueden ocurrir daños graves a nivel de celda con una sobrecarga significativa (por ejemplo, 2 veces la capacidad nominal), los ciclos repetidos de carga y descarga con una sobrecarga moderada (110 % SoC) también pueden provocar un cortocircuito interno y un fallo de la celda en solo 10 ciclos. En cuanto a la sobredescarga, los riesgos de seguridad durante la descarga excesiva son la inversión de polaridad que conduce a la oxidación del colector de corriente del ánodo (cobre) y al revestimiento del cátodo. Incluso una sobredescarga menor puede causar la formación de dendritas y finalmente un cortocircuito [50]. Durante la prueba de sobredescarga, se descarga una batería completamente cargada hasta que el dispositivo probado interrumpe o limita la descarga.

La gran variabilidad de los parámetros de prueba que se encuentran en diferentes normas puede llevar a que los resultados de las pruebas dependan de la regulación seguida. Por esta razón, se requiere la armonización de los parámetros de prueba para poder comparar los resultados.

3.6.2.3. Ensayo de estabilidad térmica.

Esta prueba evalúa la estabilidad de una batería a una temperatura elevada para identificar la temperatura donde comienza la fuga térmica. Para esta prueba, la temperatura de la celda se incrementa secuencialmente en pasos de 5°C con un tiempo de mantenimiento de 30 minutos en cada paso incremental, hasta que la temperatura alcance cierto valor límite por encima de la temperatura máxima de funcionamiento de la batería o hasta que la misma se dañe o se destruya. Para módulos y packs, los incrementos de temperatura se establecen en 10°C con un tiempo de mantenimiento de 120 min. Algunas otras normas evalúan el rendimiento del sistema a una temperatura elevada, no con el objetivo de alcanzar el daño del dispositivo sino la evaluación de la estabilidad térmica a cierta temperatura [48] [49].

3.6.2.4. Ensayo de choque térmico.

Esta prueba está diseñada para evaluar los cambios en la integridad de la batería o celda, que surgen de la expansión y contracción de los componentes al exponerse a cambios extremos y repentinos de temperatura. Durante un choque térmico, la batería se expone a dos límites de temperatura y se mantiene en cada límite de temperatura durante un período de tiempo específico. Las pruebas de choque térmico descritas en las normas tienen diferentes límites de temperatura, que oscilan entre -40°C y +85°C. En general, se establece que el dispositivo de protección contra temperaturas extremas esté desactivado durante el ensayo. Referencias como [49] presentan una serie de ensayos tales como la prueba de temperatura de supervivencia que somete a la batería a una serie de exigencias técnicas específicas, evaluando de esa manera el comportamiento de la misma.

3.6.2.5. Ensayo de sobrecalentamiento.

La prueba de sobrecalentamiento tiene como objetivo evaluar el efecto de la falla del control de temperatura o la falla de otras características de protección contra el sobrecalentamiento interno durante la operación. Para esta prueba, a una batería completamente cargada, cuyo

3.6. Requisitos de seguridad y ensayos para baterías de vehículos eléctricos.

sistema de control térmico está desactivado, se le realiza una serie de ciclos específicos. Como consecuencia, la temperatura aumentará y la prueba se detiene cuando: (a) se interrumpe la carga o descarga, (b) la temperatura se estabiliza o (c) hay evidencia de daño [48].

3.6.2.6. Prueba de temperatura de frío extremo.

Esta prueba busca evaluar el efecto de la exposición de baterías a bajas temperaturas. A bajas temperaturas, el electrolito tiene una conductividad iónica pobre y el ánodo experimenta un alto potencial, lo que puede llevar a la formación de dendritas. Solamente una norma, la USABC:1999, establece las condiciones para este ensayo, donde se producen descargas hasta -40°C a diferentes DoD. El líquido refrigerante está presente, pero no circula durante la prueba. La prueba se detiene si se evidencian condiciones anormales [51].

3.6.2.7. Prueba de incendio.

El objetivo de la prueba de incendio es exponer una batería o un vehículo al fuego y evaluar el riesgo de explosión. La fuente del incendio puede ser combustible derramado ya sea del propio vehículo o de un vehículo cercano. Dependiendo de la norma consultada, esta prueba se denomina prueba de fuego de combustible, calor radiante, fuego de proyectil, simulación de fuego externo, exposición a fuego de vehículo simulado, riesgo de alta temperatura o prueba de resistencia al fuego [48].

3.6.2.8. Ensayos de evaluación de peligro químico.

Dada la composición química de las celdas de litio o bien de otro tipo, es esperable que bajo ciertas condiciones anómalas las celdas o baterías emitan gases peligrosos. Los gases que se liberan de celdas de litio pueden estar compuestos por monóxido de carbono, dióxido de carbono, metano, hidrógeno, oxígeno, etano, etileno, ácido fluorhídrico, etc. [50]. La exposición de personas a tales gases puede provocar lesiones, como por ejemplo la irritación de los ojos, quemaduras químicas, envenenamiento, abrasión, lesiones en la piel, etc. Por lo tanto, es importante identificar y cuantificar las sustancias que se liberan de la batería durante el uso indebido y garantizar que las cantidades liberadas no sean peligrosas para los ocupantes del vehículo y/o socorristas de primeros auxilios en caso de accidente. A los efectos de determinar la composición de las emisiones de gases peligrosos en ciertas condiciones, un gran número de estándares establecen ciertos ensayos donde se establecen las condiciones y los límites de emisiones admisibles.

Los ensayos de medición de emisiones de gases pueden ser complementarios con otros ensayos (mecánicos, eléctricos o ambientales), de forma tal que las emisiones sean medidas cuando se produce el daño o el funcionamiento anómalo de una celda o batería durante la ejecución del ensayo.

3.7. Sistema de gestión de la batería o Battery Management System (BMS).

Uno de los principales desafíos en relación a las baterías de litio-ion, es la estabilidad a altas temperaturas. Si bien algunas baterías pueden soportar hasta 70°C por breves períodos, la degradación o envejecimiento es importante a temperaturas elevadas, como se muestra en la sección 3.5.1.1. Estas temperaturas elevadas son producidas cuando la tasa de descarga es elevada y en consecuencia existe elevada corriente eléctrica circulante por la celda, lo que es en sí mismo causa de degradación como fue presentado en la sección 3.5.1.4.

En las baterías de ion-litio actuales, los problemas de sobrecarga, sobredescarga y sobrecalentamiento se han abordado en gran medida mediante la incorporación de circuitos integrados de administración en las baterías para brindar protección contra estos efectos. Estos circuitos integrados de medición y control es denominada BMS sigla proveniente del inglés Battery Management System. Estos circuitos pueden, además, realizar funciones de indicador de nivel de porcentaje de carga disponible, y pueden registrar el historial de la batería con el fin de brindar información para algoritmos de gestión. El BMS generalmente monitorea el voltaje de cada celda o grupos de celdas en una batería y además los circuitos incluyen típicamente un termistor u otro termostato para el control de sobrecalentamiento restaurable e incluyen asimismo un fusible térmico para el control de sobrecalentamiento no restaurable. Se entiende por sobrecalentamiento restaurable el punto de temperatura a partir del cual el sistema se restaura y vuelve a estar operativo una vez la temperatura vuelve a su rango de operación, y se entiende por sobrecalentamiento no restaurable aquel punto de temperatura el cual, una vez excedido, el sistema no es restaurado automáticamente [52].

Una enumeración completa de los aspectos en los que interviene un BMS de un banco de baterías de iones de litio es:

- Protección contra sobrecarga
- Protección contra sobredescarga
- Protección contra la sobretensión
- Protección contra cortocircuitos
- Protección contra exceso de temperatura
- Función de balanceo de celdas
- Función comunicación con el software del vehículo o herramientas de diagnóstico
- Cálculo o estimación del SoC
- Cálculo de la potencia máxima de descarga
- Cálculo de la potencia máxima de carga

- Estimación del SoH (estado de salud)

Como entrada para la ejecución de los algoritmos, el BMS emplea mediciones de temperatura, tensión y corriente en cada celda, o bien en agrupaciones de celdas. A modo de ejemplo, la secuencia seguida por el BMS de un vehículo híbrido se presenta en la figura 3.24. En la misma, puede verse que Los límites de potencia se calculan a partir del SoC y tensión en celdas, para proteger la batería.

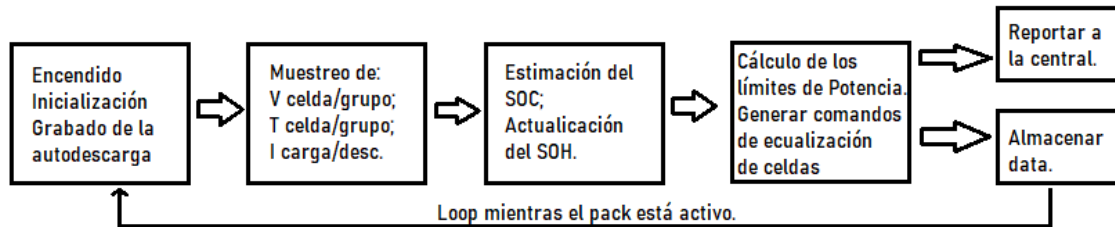


Figura 3.24: Ejemplo de una secuencia de medición y control implementada en un BMS.

Fuente: [13].

Los BMS que tienen un sistema eculizador de celdas generan señales de comando basadas en las mediciones, y luego el circuito actúa realizando el balanceo de carga en cada celda. Los límites son reportados al controlador central (SCM) para delimitar las condiciones de conducción. El BMS incorpora una función de "data logger" (almacenador de datos) donde se guarda el historial de ciertas variables para realizar la estimación del SoH, diagnósticos y análisis de fallas.

3.8. Modelado de baterías.

3.8.1. Introducción.

En la presente sección se realiza una introducción al modelado del comportamiento eléctrico de celdas electroquímicas, a través de los cuales es posible realizar estudios energéticos de las baterías así como también evaluar su comportamiento eléctrico y su respuesta en potencia. Se comienza con el modelado básico mediante el un equivalente de Thévenin, el cual consiste de una fuente de tensión ideal en serie con una resistencia, la cual varía en función de diferentes parámetros como la temperatura y el estado de carga. La siguiente subsección introduce una variante a dicho modelo en el cual participa más de una resistencia y un condensador. A continuación se presenta el modelo teórico del comportamiento mediante la ecuación de Peukert y se cierra la sección mediante la introducción de un modelo específico que introduce las variables del SoC y la temperatura. Dentro de las celdas estudiadas en el ejemplo de la última subsección, se consideran aquellas que contienen óxido de Níquel, Manganeso y Cobalto (NMC), óxido de Litio y fosfato de Hierro (LFP) y óxido de Manganeso (LMO).

3.8.2. Modelado mediante equivalente de Thévenin.

Para el modelado de las celdas que componen las baterías se considera el circuito de la figura 3.25, que consta de un circuito equivalente de Thévenin sencillo. A través del mismo es posible modelar el comportamiento de una celda o batería cuando es sometida a diferentes regímenes de carga y descarga.

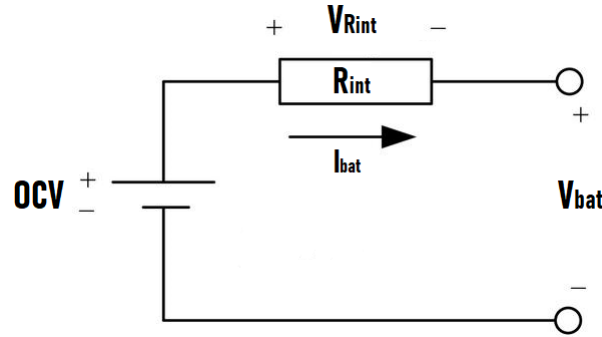


Figura 3.25: Equivalente Thevenin de la batería.

El circuito equivalente de la figura 3.25 puede representar tanto una celda como una batería compuesta por un arreglo en series y paralelos de celdas unitarias. La corriente por la batería (I_{bat}) será la que demanda el motor para cumplir con el ciclo de conducción que quede determinado, descontando las pérdidas en los elementos existentes entre éste y la batería. La corriente demandada durante la descarga dependerá de la potencia eléctrica que el motor demande en cada instante. En algunos modelos que se plantean, la corriente por la batería I_{bat} incorpora una corriente de autodescarga y la corriente que demanden los servicios auxiliares del vehículo, como luces, aire acondicionado y otros.

En el circuito de la figura 3.25, el valor de OCV (Open Circuit Voltage) representa el voltaje de circuito abierto de la celda o de la batería (tensión en bornes cuando se encuentra sin carga externa conectada), R_{int} representa la resistencia interna de la batería o la celda y V_{Rint} es el valor de la caída de tensión en dicha resistencia. El valor utilizado para referirse al voltaje en bornes de la batería se representa como V_{bat} . Tanto OCV como V_{Rint} pueden ser consideradas constantes en casos muy específicos, o pueden ser ajustadas en función de ciertas variables como la temperatura, estado de carga, profundidad de descarga, intensidad de corriente o envejecimiento, entre otras variables.

En las baterías de litio, la corriente de autodescarga varía en función del estado de carga (a mayor SoC se incrementa la autodescarga) y en función de la temperatura (a mayor temperatura aumenta la autodescarga). Algunos modelos consideran, por ejemplo, una autodescarga del X % mensual [53], suponiendo que la batería o celda se encuentra en un rango dado de temperaturas (por ejemplo, entre $25\sim 35^{\circ}\text{C}$) así como también dentro de un rango dado de estado de carga y SoC medios. Con esta estimación se realiza el cálculo de la corriente de autodescarga por unidad de tiempo (s), que se suma a las corrientes que determinan la demanda total a la batería.

3.8.3. Modelo dinámico.

La figura 3.25 presentada con el modelo de Thévenin introdujo un circuito equivalente elemental muy simple para una batería, aunque con cierta utilidad incluso hoy en día. Una de las limitaciones de ese tipo de circuito es que no logra explicar el comportamiento dinámico de la batería y sirve solamente para situaciones cuasiestáticas.

Con el fin de mejorar el modelo básico de Thévenin, se presenta en la figura 3.26 un esquema eléctrico el cual modela el comportamiento dinámico de una celda electroquímica, por lo que se considera más refinado que el modelo anterior y simula de forma satisfactoria los efectos dinámicos que ocurren en una celda. Se trata de un modelo que introduce no solamente elementos resistivos, dependientes de la temperatura y del estado de carga, sino que agrega elementos capacitivos que aportan mayor grado de verosimilitud en términos de la respuesta en el tiempo ante demandas variables de potencia.

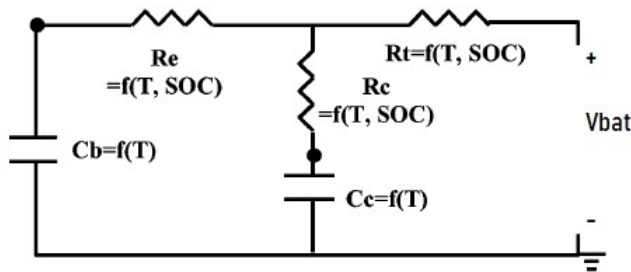


Figura 3.26: Esquema eléctrico usado para el modelado del comportamiento dinámico de una celda electroquímica. [14].

El modelo eléctrico presentado en este ejemplo consta de dos condensadores (C_b y C_c) y tres resistencias (R_e , R_c y R_t). El condensador C_b es muy grande y representa la capacidad de la batería para almacenar carga químicamente. El condensador C_c es pequeño y se introduce para representar principalmente los efectos superficiales de una celda, como lo es la cantidad instantánea de corriente que puede suministrar una batería en función de las constantes de tiempo asociadas con la difusión de materiales y reacciones químicas. Los parámetros varían con el SoC y con la temperatura [14].

Cabe indicar que los modelos dinámicos como el que ha sido presentado en esta sección adquieren diferentes topologías en función del tipo de celda que sea modelada, sus características químicas y constructivas. La topología adquiere además diversas formas en función del fenómeno que se quiera estudiar introduciendo, en general, elementos resistivos y capacitivos en series y paralelos, además de fuentes de corriente o fuentes de tensión o bien algún otro tipo de elemento específico que sea adecuado al fenómeno que se quiera estudiar. En general, los modelos dinámicos de celdas o baterías intentan predecir el comportamiento en términos de tensión en sus bornes, capacidad remanente o energía remanente, cuando las mismas son sometidas a diferentes

regímenes de descarga, a diferentes intensidades de corriente, en función de la temperatura y del estado de carga o de la profundidad de la descarga.

3.8.4. Modelado mediante la ecuación de Peukert.

Como fue indicado en el capítulo 3, la capacidad de una celda o batería se ve reducida en tanto aumenta la corriente de descarga. Este fenómeno es particularmente importante en los vehículos eléctricos dado que las corrientes extraídas de las baterías en tales aplicaciones suelen ser muy elevadas, resultando en consecuencia que la capacidad pueda resultar menor a lo esperado. La posibilidad de modelar la pérdida de capacidad en relación a la corriente de descarga es crucial no solamente para el diseño de los elementos del tren de potencia de los vehículos eléctricos sino también para el diseño e implementación de los sistemas de medición de la cantidad de carga (hardware y software) de una batería.

Una buena forma de modelar la capacidad de una batería en función de la corriente de descarga es la ecuación 3.15, denominada ecuación de Peukert. En dicha ecuación, I representa la corriente de descarga, T representa el tiempo de descarga medido usualmente en horas y C_p representa la Capacidad de Peukert, siendo k un coeficiente que depende de las características químicas de cada celda o batería (para celdas de plomo-ácido, $k=1.2$) el cual se denomina Coeficiente de Peukert.

$$C_p = I^k t \quad (3.15)$$

La forma de entender el funcionamiento de la ecuación de Peukert es asumiendo que existe un valor de capacidad, la Capacidad de Peukert, que es constante y está dado por la ecuación 3.15. La Capacidad de Peukert C_p es obtenida a corriente constante I a lo largo de un proceso de descarga cuya duración de tiempo es igual a t . Debe ser notado que este modelo implica que cualquier batería que sea descargada a una corriente de 1A, la Capacidad de Peukert (Ah) será igual al tiempo de descarga t (h).

Dado un tipo de batería cuyas celdas están compuestas por ciertas características químicas y constructivas, si se conoce el Coeficiente de Peukert y las condiciones nominales establecidas por el fabricante es posible determinar la Capacidad de Peukert C_p . A partir de la Capacidad de Peukert y readecuando la ecuación 3.15, es posible obtener el tiempo total de descarga para cualquier corriente de descarga a partir de la ecuación 3.16, la cual resulta de la Ecuación de Peukert previamente enunciada.

$$t = \frac{C_p}{I^k} \quad (3.16)$$

3.8.5. Modelado del estado de salud (SoH).

Existen diversos modelos que buscan estimar el estado de salud de las baterías, los cuales son presentados en la literatura actual [54] [55] [56] [57]. La publicación desarrollada por la Universidad de Chalmers [54], luego de realizar diversos ensayos y estudios, propone una función que ajusta la capacidad remanente en la batería luego de realizar cierto número de ciclos de

3.8. Modelado de baterías.

descarga para las baterías cuyo cátodo es del tipo NMC. El modelo utiliza como variables de entrada el SoC inicial, el SoC final, los C_{rates} , la temperatura de la batería, la profundidad de descarga (DoD) y la cantidad de ciclos completos equivalentes (FCE, full cycle equivalent), los cuales equivalen a una descarga y una posterior carga completa (del 100 % al 0 % y del 0 % al 100 %).

La función que ajusta la capacidad máxima (Ah) remanente en la batería se muestra en la ecuación 3.17:

$$Cap(SoC, C_{rate}, T, FCE) = a \cdot e^{b \cdot FCE} + c \cdot e^{d \cdot FCE} \quad (3.17)$$

Los parámetros a , b , c y d se ajustan mediante ensayos a distintos C_{rates} y temperaturas, de forma de ajustar el modelo con resultados experimentales. Se observa que a depende del SoC, b depende del SoC y del C_{rates} , c depende del parámetro a y por último d (tabulado) depende de la temperatura, el C_{rates} y el intervalo del SoC en el que se encuentre la descarga, según lo siguiente:

- $$a(SOC) = 6,2 \frac{SOC}{90} + 0,093. \quad (3.18)$$

- $$b(SOC, C_{rate}) = \left(0,98 \times \left(\frac{C_{rate}}{2} \right)^{3,3} + 0,01741 \cdot \left(\frac{SOC}{20} \right) \right) \cdot \left(\frac{-0,6045}{SOC^{2,4}} - 5,512 \cdot 10^{-4} \right) \cdot \left(\frac{SOC}{20} \right)^{(0,05 \cdot C_{rate}^3 - 0,35 \cdot C_{rate}^2 + 1)} \quad (3.19)$$

- $$c = 26 - a. \quad (3.20)$$

La tabla 3.5 presenta la dependencia del parámetro d a 25°C y 35°C a un C_{rate} de 2C, para diferentes rangos del estado de carga que van desde 0 a 90 % del SoC, en intervalos de 10 % en 10 %.

Intervalo del SOC (%)	0-10	10-20	20-30	30-40	40-50	50-60	60-70	70-80	80-90
d(25°C, 2C)	[-6.620	-3.210	-2.410	-3.700	-5.000	-2.550	-0.100	-0.010	-0.001].10 ⁻⁶
d(35°C, 2C)	[-3.042	-1.000	-0.400	-4.730	-9.000	-7.67	-6.331	-7.000	-0.7].10 ⁻⁶

Cuadro 3.5: Dependencia del SOC y la temperatura para el parámetro d , a un C_{rate} de 2C

Asimismo, la tabla 3.21 presenta la corrección del parámetro d para diferentes valores del SoC y del C-rate.

$$\begin{aligned}
 d(Crate < 1, SOC < 50) &= d(2C, SOC) + (Crate - 1)(d(2C, 10 - 20) - d(1C, 10 - 20)), \\
 d(Crate < 1, SOC \geq 50) &= d(2C, SOC) + (Crate - 1)(d(2C, 60 - 70) - d(1C, 60 - 70)), \\
 d(Crate < 2, SOC < 50) &= d(2C, SOC) + (2 - Crate)(d(2C, 10 - 20) - d(1C, 10 - 20)), \\
 d(Crate < 2, SOC \geq 50) &= d(2C, SOC) + (2 - Crate)(d(2C, 60 - 70) - d(1C, 60 - 70)), \\
 d(Crate > 2, SOC < 50) &= d(2C, SOC) + \frac{Crate - 2}{2}(d(2C, 10 - 20) - d(4C, 10 - 20)), \\
 d(Crate > 2, SOC \geq 50) &= d(2C, SOC) + \frac{Crate - 2}{2}(d(2C, 60 - 70) - d(4C, 60 - 70)).
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

La ecuación fue ajustada mediante los datos experimentales relevados al realizar las cargas (a una tasa de $\frac{C}{8}$) y las descargas (a tasas de 1C, 2C, 4C) y diferentes niveles de SoC (tramos de a 10 %), para las temperaturas de 25°C y 35°C [54]. Para hallar el SoH, se utiliza el concepto de *Capacity Fade* presentada anteriormente en la sección 7.1.

Para determinar la cantidad de ciclos n de vida útil, se considera un valor de SoH del 80 %, típicamente establecido por la mayoría de los fabricantes y asumido de forma generalizada en la literatura. Luego, el FCE puede obtenerse de la ecuación 3.17. Una vez hallado el valor de FCE, es posible obtener la cantidad de ciclos reales n de la siguiente forma:

$$n = \frac{FCE \cdot 100}{DoD} \tag{3.22}$$

La ecuación anterior, permite hallar cuántos "n ciclos de vida" se pueden hacer antes que el SoH de la batería llegue al 80 %.

Capítulo 4

Ciclos de conducción para vehículos.

4.1. Introducción.

Un ciclo de conducción es una serie de puntos de velocidad en función del tiempo en los cuales un vehículo es ensayado. Existen típicamente dos clases de ciclos de conducción: los *ciclos transitorios*, que representan la conducción del vehículo en ciudad, con gran cantidad de cambios en velocidad y aceleración, y los *ciclos modales*, que representan conducción esencialmente fuera de ciudades con tramos más o menos prolongados a velocidad constante.

El diseño de un ciclo de conducción debe ser tal que represente fehacientemente el comportamiento del vehículo en calle o carretera. Los ciclos de conducción se utilizan para reducir los costos de realizar las pruebas en la vía pública, con todo lo que esto implica, además de los riesgos correspondientes. Por tal razón, el diseño de un ciclo de conducción a ser ejecutado sobre un dinamómetro de rodillos busca emular el comportamiento real de un vehículo en un banco de ensayos, e incluso en una simulación por computadora. El ensayo de velocidad en función del tiempo es la versión comprimida del tiempo real insumido para llevar a cabo la prueba en carretera. Estos ciclos de manejo se usan específicamente para pruebas en dinamómetro del chasis o rodillos porque en poco tiempo se pueden utilizar los resultados y se pueden realizar pruebas repetidas con facilidad, con seguridad y a bajo costo.

Con el objetivo de evaluar las condiciones operativas de un vehículo durante su uso, distintos organismos han establecido ciclos estandarizados de manejo, en los cuales un vehículo es sometido a un ensayo en condiciones controladas. Estos ciclos estandarizados de conducción (Standardized Driving Cycles o SDC por su sigla en inglés), constan de una secuencia de velocidad en función del tiempo que el vehículo debe cumplir cuando es ensayado en un dinamómetro de rodillos, al tiempo que se miden parámetros de operación relevantes. El origen de los SDC estuvo motivado por la necesidad de medir, regular y controlar las emisiones de dióxido de carbono y otros gases como los NO_x en vehículos con motor Diesel, así como medir también el consumo de combustible declarado por el fabricante.

Dada la tendencia en el aumento de la flota de vehículos eléctricos en distintas regiones, los ensayos aplicados para medición de consumo de combustible y emisiones de gases han comenzado a ser modificados para adecuarse a nuevos requerimientos. Para el vehículo eléctrico

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

en particular, algún ciclo de conducción estandarizado debe ser tomado como referencia en la declaración que el fabricante realiza en cuanto a la autonomía o rango del vehículo (km) así como también su consumo energético (Wh/km).

Desde su concepción, los SDC han sido extensamente criticados por tratarse de un ensayo no representativo de las condiciones reales de conducción, por lo que, tanto las emisiones por el tubo de escape como el consumo de combustible, han sido mucho mayores en la realidad que en la declaración del fabricante. Este mismo riesgo existe hoy en relación a los nuevos ciclos de conducción para vehículos eléctricos. Si bien los fabricantes declaran cierta autonomía y consumo energético de sus vehículos según cierto estándar, la realidad puede ser diferente dependiendo del estilo de conducción de cada conductor.

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

Existe gran cantidad de diferentes normas y regulación vigente (más de 250 estándares) que establecen diversos ciclos de conducción en distintas partes del mundo. Dentro de la estandarización más conocida se tiene, en Estados Unidos la EPA (United States Environmental Protection Agency) con su reglamentación federal (FTP o Federal Test Procedure), en Japón la norma JC08, y para varias regiones se ha creado recientemente la norma WLTP (predominante actualmente en Europa), entre muchas otras normas existentes. Algunas de las principales normas se verán en la presente sección a modo de reseña, poniendo el foco en aquellas que tienen mayor aplicación en vehículos eléctricos.

4.2.1. Ciclos de Conducción Europeos.

Los ciclos de conducción establecidos en Europa pertenecen tanto a ciclos transitorios como a ciclos modales, por lo que hay partes en estos ciclos en que la velocidad es constante. Dentro de los ciclos europeos se puede hacer la siguiente subdivisión:

4.2.1.1. Ciclo de Conducción ECE15.

Este ciclo representa la conducción urbana. Se caracteriza por baja velocidad de vehículo (50 km/h max.), baja carga de motor y baja temperatura de combustible de escape.

4.2.1.2. Ciclo de Conducción EUDC.

Este ciclo describe una ruta suburbana. Al final del ciclo el vehículo acelera hasta velocidad de carretera. Tanto velocidad como aceleración son mayores que en el ECE15 pero sigue siendo un ciclo modal.

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

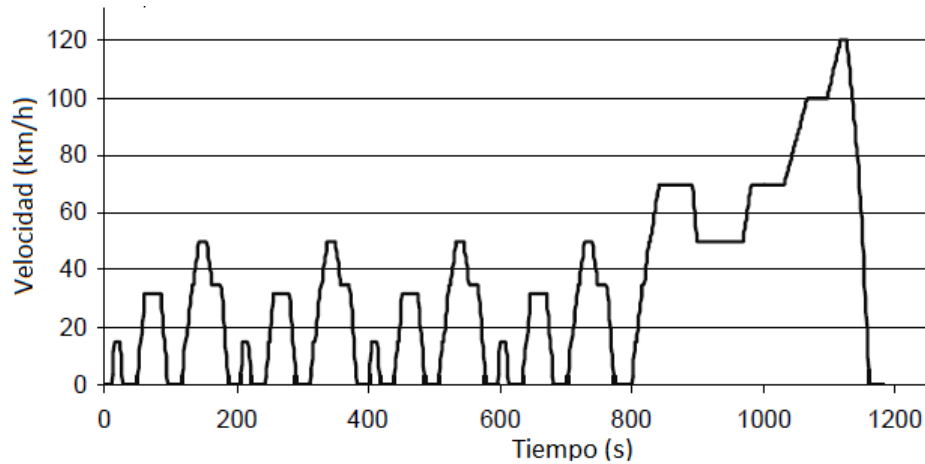


Figura 4.1: Representación gráfica del ciclo estandarizado NEDC. Fuente: [15].

4.2.1.3. Ciclo de Conducción EUDCL.

El UDCL es un ciclo suburbano para vehículos de baja potencia. Es similar al EUDC pero la velocidad máxima es 90 km/h.

4.2.1.4. Ciclo de Conducción NEDC.

Este es un ciclo combinado de cuatro ciclos ECE15 seguidos por un EUDC o un EUDCL. El NEDC también es conocido como Ciclo ECE. La figura 4.1 muestra una representación gráfica del ciclo de conducción NEDC, donde puede verse las transiciones de velocidad en función del tiempo de ciclo [15].

4.2.1.5. Ciclo de Conducción HYZEM.

Los ciclos mencionados anteriormente son ciclos estilísticos, los cuales no pueden representar patrones de conducción reales. Los ciclos HYZEM son ciclos transitorios, donde las partes en las que la velocidad es constante son mucho menores que en ciclos modales. Los ciclos HYZEM se derivan de los patrones reales de conducción en toda Europa, por lo que son una mejor representación para las condiciones reales de conducción que los ciclos de las normas europeas antes mencionadas. Estos ciclos se utilizan con frecuencia pero no son oficiales y consisten en un ciclo urbano, un ciclo extra-urbano y un ciclo de carretera.

4.2.1.6. Ciclo de Conducción RDE.

Dentro de los ciclos Europeos se destacan asimismo los ciclos RDE (Real Driving Emissions Cycles), los que se encuentran dentro de la normativa WLTP.

4.2.2. Ciclos de conducción estadounidenses.

En general, los ciclos de conducción estadounidenses tienen un perfil más bien del tipo *transitorio* y no tanto del tipo *modal*. Al igual que los ciclos HYZEM, estos ciclos de tipo transitorio dan una mejor representación de los patrones reales de conducción. Dentro de los ciclos estadounidenses más conocidos se encuentran:

4.2.2.1. Ciclos de Conducción FTP 72 / EPA UDDS / LA-4.

Este ciclo se desarrolló a comienzos de los años setenta para describir las rutas urbanas. El ciclo consiste en un fase de inicio fría (motor de combustión interna en frío) la que es seguida por una fase transitoria con muchos picos de velocidad que comienzan desde el reposo midiendo las emisiones. Luego, se utilizan ciertos factores ponderadores para normalizar las emisiones. El FTP 72 usualmente se denomina EPA UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) o LA-4, cuya curva de velocidad en función del tiempo se muestra en la figura 4.2.

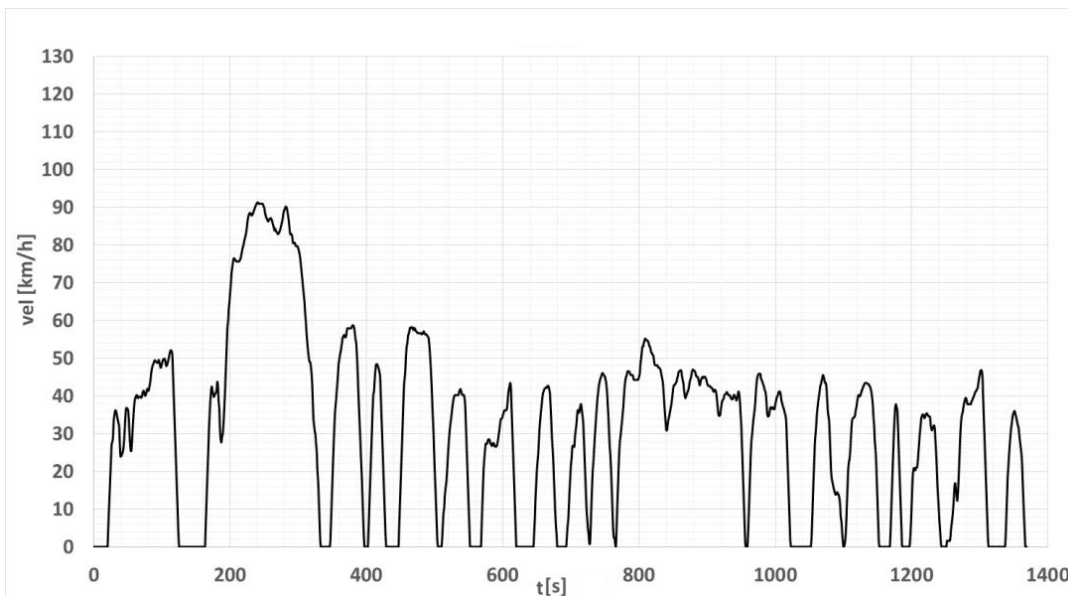


Figura 4.2: Representación gráfica del ciclo estandarizado UDDS

4.2.2.2. Ciclo de Conducción FTP 75.

El FTP 75 es el FTP 72 con una tercera fase extra. Esta fase es idéntica a la primera fase del FTP 72 pero ejecutada con el motor en caliente. La figura 4.3 muestra la curva de velocidad en función del tiempo que debe emular un vehículo para cumplir con el estándar FTP-75.

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

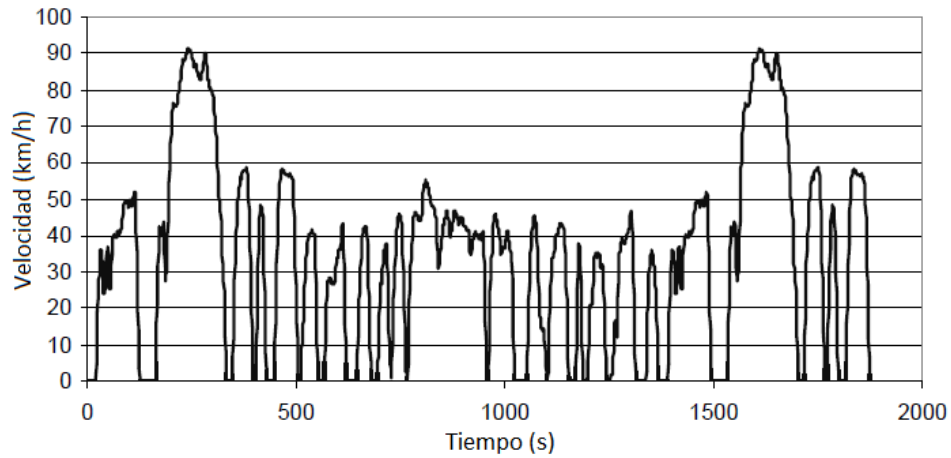


Figura 4.3: Representación gráfica del ciclo estandarizado FTP75

4.2.2.3. Ciclo de Conducción FUDS (vehículo eléctrico).

Según el consorcio USABC (U.S. Advanced Battery Consortium), el test FUDS es el mejor procedimiento de ensayo disponible actualmente para vehículos eléctricos [49]. Se trata de un estándar con altos picos de demanda de potencia para la tracción, así como también inyección de potencia a la batería debido al frenado regenerativo. Desde el punto de vista de la conducción, el ciclo FUDS es idéntico al test EPA UDDS definido en 40 CFR parte 86 apéndice 1 (también llamado LA-4), indicado en la figura 4.2. La figura 4.4 muestra el gráfico de potencia en función del tiempo para el ciclo estandarizado FUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al freno regenerativo.

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

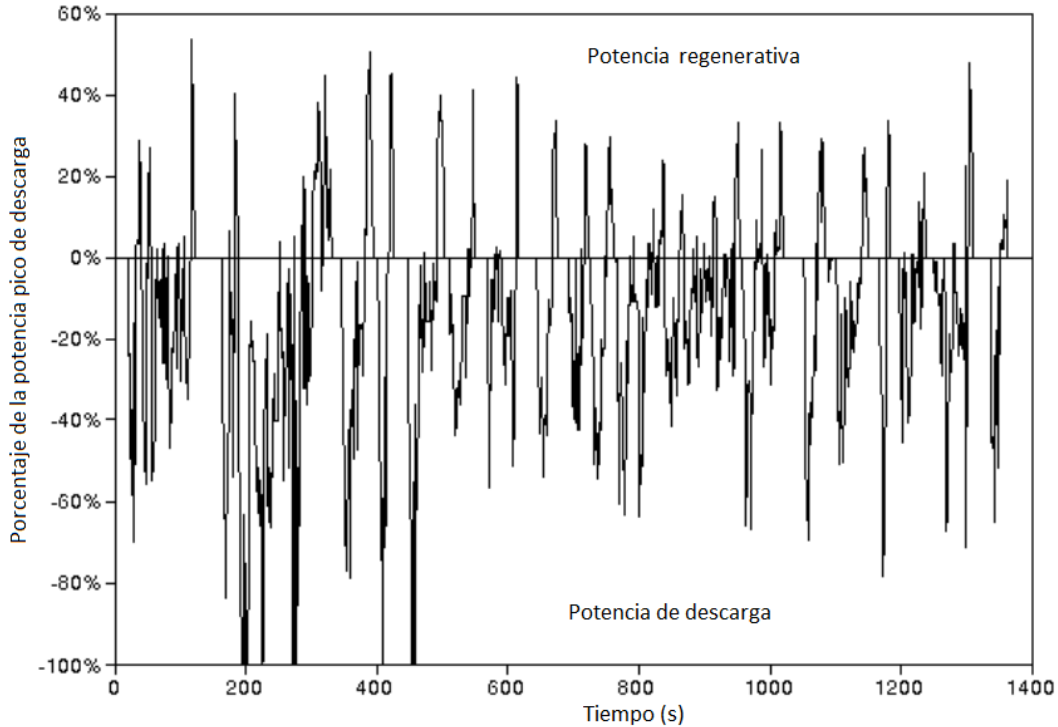


Figura 4.4: Representación gráfica del ciclo estandarizado FUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al freno regenerativo. Fuente: [16].

Para llevar adelante este ensayo, la batería debe ser cargada y la temperatura estabilizada de acuerdo con el procedimiento recomendado por el fabricante o según lo especificado en el protocolo de ensayos. A partir de la carga completa, la batería se descarga aplicando el perfil FUDS, escalado a una potencia de prueba máxima según lo especificado (nominalmente 120 W/kg). El perfil FUDS de 1372 segundos de duración se aplica continuamente sin período de descanso, hasta que se alcanza el punto final de descarga especificado en el plan.

4.2.2.4. Ciclo de Conducción SFUDS (vehículo eléctrico).

El estándar SFUDS (Simplified Federal Urban Driving Schedule) ha sido específicamente desarrollado para ensayos de vehículos eléctricos a partir del estándar FUDS y desarrollado inicialmente para un vehículo en particular, una minivan denominada IDSEP (Improved Dual Shaft Electric Propulsion).

El objetivo de la creación del SFUDS a partir del FUDS fue (1°) reducir el costo del hardware requerido para probar las baterías de vehículos eléctricos, (2°) extraer mejor información para el análisis y (3°) disminuir la incertidumbre en la determinación del rango al acortar el ciclo.

La figura 4.5 muestra el perfil de carga y descarga de una batería según el ciclo SFUDS. Para este ciclo, el 100% representa el 80%DOD con el fin de evitar daños en la batería. La

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

prueba se denomina DST_n , donde n es el valor de escala de la potencia pico de la batería, en W/kg. Los valores del ensayo se muestran asimismo en la tala 4.2.2.5.

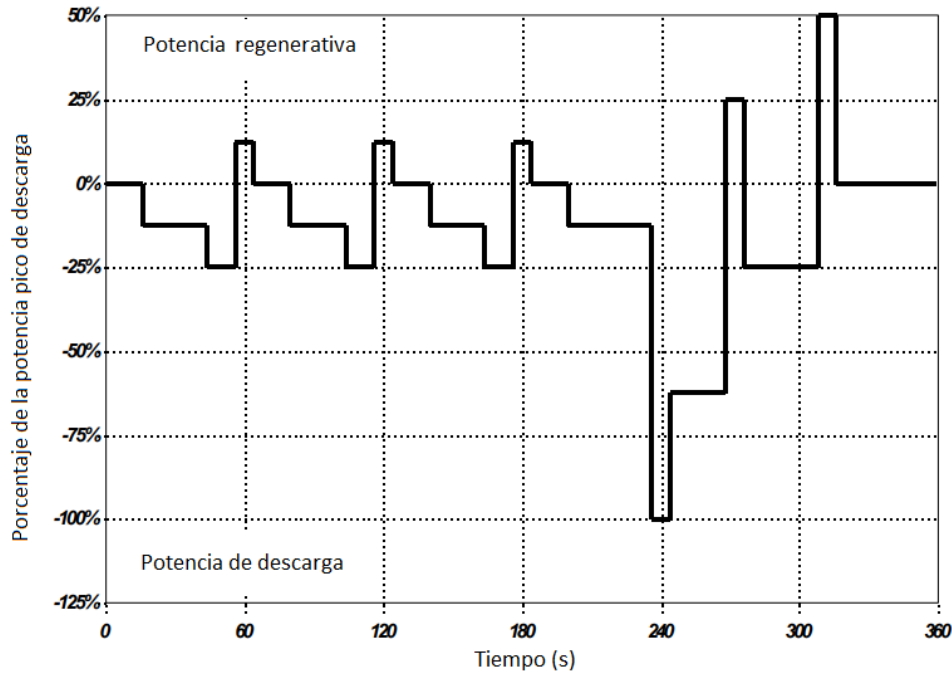


Figura 4.5: Representación gráfica del ciclo estandarizado SFUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al freno regenerativo. Fuente: [16].

El ciclo SFUDS en comparación con el ciclo original FUDS ofrece una alternativa razonable ya que proporciona la misma información sobre el rango (autonomía) y la vida útil de la batería. La comparación entre ambos ciclos produjo una variación aceptable para los parámetros más importantes. La potencia máxima es la misma por definición y la potencia promedio difiere solo en un 2%. El consumo de energía está dentro de 1 Wh/km, sin contar la regeneración, y 3% con regeneración. La velocidad promedio es un 2% más baja que la de FUDS y la máxima varía solo 2.6 km/h.

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

Paso	Duración (s)	Potencia (%)	Paso	Duración (s)	Potencia (%)
1	16	0	11	12	-25
2	28	-12.5	12	8	+12.5
3	12	-25	13	16	0
4	8	+12.5	14	36	-12.5
5	16	0	15	8	-100
6	24	-12.5	16	24	-62.5
7	12	-25	17	8	+25
8	8	+12.5	18	32	-25
9	16	0	19	8	+50
10	24	-12.5	20	44	0

Cuadro 4.1: Valores tabulados del ciclo estandarizado SFUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al freno regenerativo. Fuente: [16].

4.2.2.5. Ciclo de Conducción GSFUDS: Generic Simplified Federal Urban Driving Schedule.

El ciclo de conducción GSFUDS ha sido creado a partir del SFUDS pero, a diferencia de este último, el GSFUDS no fue diseñado para un vehículo en particular sino que es genérico.

El ciclo GSFUDS utiliza el concepto de potencia promedio, P_{prom} , que se calcula al dividir la energía neta de la batería por la duración de la descarga, menos los períodos de descanso. Los otros factores que afectan a P_{prom} están relacionados con la velocidad del vehículo. Dado que el perfil de velocidad en función del tiempo se mantiene constante, se supone que la relación de potencia normalizada P/P_{prom} no cambiará significativamente de un vehículo a otro [16].

El ensayo GSFUDS tiene la misma secuencia de 20 pasos con 6 niveles de potencia que el SFUDS, utilizando los números enteros de la relación P/P_{prom} . El perfil del ciclo se indica en la figura 4.6. En el gráfico, valores unitarios representan los períodos en los que el vehículo demanda la potencia promedio, mientras que el pico alcanza hasta 8 veces el promedio y el frenado regenerativo una vez el promedio.

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

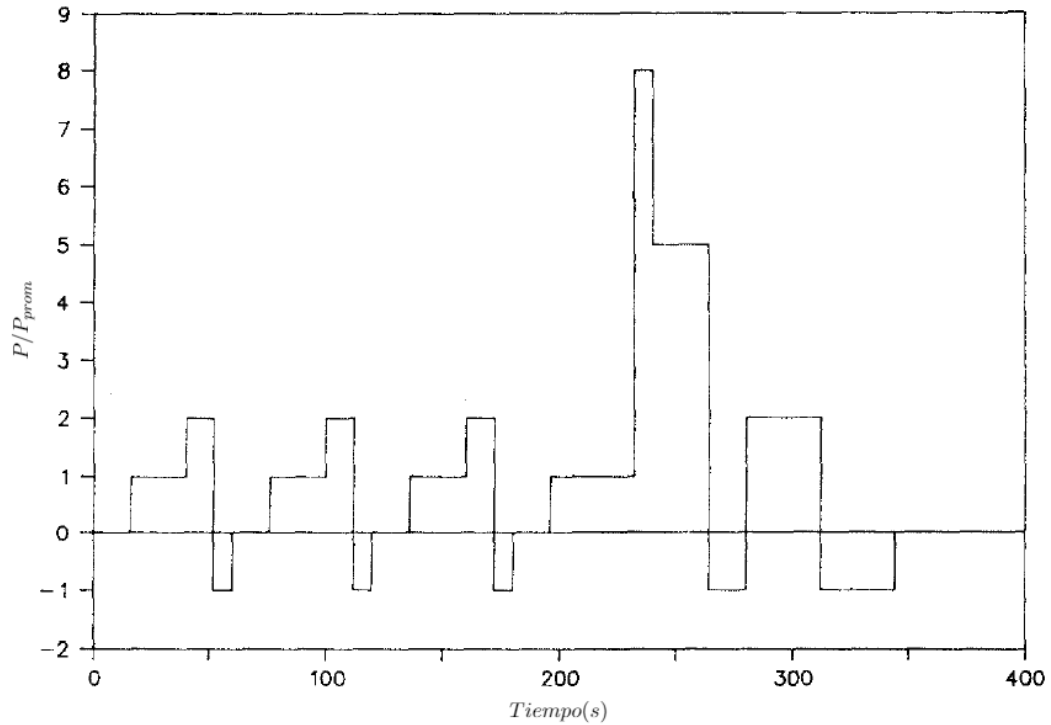


Figura 4.6: Representación gráfica del ciclo estandarizado GSFUDS, donde se aprecian picos de demanda de potencia así como también inyección de potencia a la batería debido al frenado regenerativo. Fuente: [16].

La tabla muestra un comparativo de los principales parámetros de los ciclos de conducción FUDS, SFUDS y GSFUDS. En términos generales se aprecia la similitud en los parámetros indicados, siendo la ventaja del ciclo SFUDS la facilidad de la implementación en laboratorio mediante el uso de un potencióstato, mientras que el ciclo GSFUDS es una versión genérica que se independiza del vehículo utilizado, manteniendo las ventajas del SFUDS [58].

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

	Ciclo de conducción		
	FUDS	SFUDS	GSFUDS
Potencia (W/kg)			
prom.	10.1	9.9	10
máx.	79	79	80
Velocidad (km/h)			
prom.	31.2	30.6	31.3
máx.	91.1	87.5	87.7
Energía consumida (Wh/kg)	225	224	223
Duración de ciclo (hs)	0.38	0.1	0.1
Distancia recorrida (km)	11.9	3.1	3.1

Cuadro 4.2: Comparativo de los principales parámetros de los ciclos de conducción FUDS, SFUDS y GSFUDS. Adaptado de [16].

4.2.2.6. Ciclo de Conducción HFEDS.

Este ciclo representa una conducción extra-urbana y de carretera.

4.2.2.7. Ciclo de Conducción IM-240.

La prueba IM-240 es un ciclo pensado para dinamómetro de chasis, desarrollado y recomendado por la EPA de los EE. UU. para realizar pruebas de emisiones de vehículos livianos en uso en programas de inspección y mantenimiento ($I + M$).

4.2.2.8. Ciclo de Conducción LA-92.

El LA-92 representa, al igual que el FTP-72, una ruta urbana. El LA-92 se desarrolló en 1992 debido a que el ciclo existente FTP-72 resultó ser una representación no realista de los patrones de conducción urbanos. A modo de ejemplo, el LA 92 tiene una velocidad media más alta que el FTP-72

4.2.2.9. Ciclo de Conducción NYCC.

Este representa una ruta urbana a través de New York. Una característica de este ciclo es la baja velocidad media.

4.2.2.10. Ciclo de Conducción US-06.

Este ciclo, también llamado ciclo de conducción agresiva, se desarrolló para describir un patrón de conducción con altas cargas de motor.

4.2.3. Ciclo Global de Conducción WLTP - Worldwide harmonized light vehicles test procedure.

El ciclo de conducción WLTP (Worldwide harmonized light vehicles test procedure) es una norma establecida para determinar el consumo de combustible y los niveles de emisiones de gases tóxicos y de CO₂ de vehículos convencionales a combustión, así como el consumo de energía y el rango de autonomía de vehículos eléctricos. Esta norma se emitió por primera vez en 2015, elaborada por expertos en automoción de la Unión Europea, Japón e India, bajo las directrices de la UNECE (United Nations Economic Commission for Europe).

El procedimiento WLTP, representado en la figura 4.7, proporciona una guía para las condiciones de pruebas en dinamómetro de rodillos y en carretera, estableciendo las condiciones para los cambios de marcha, peso total del automóvil, calidad del combustible, temperatura ambiente y tipo y presión de los neumáticos.

Durante la prueba se aplican tres ciclos diferentes según la clase de vehículo, definida por la relación potencia/peso (PWr), medido en kW del motor por tonelada de peso vacío del vehículo.

- Clase 1: vehículos de baja potencia con $PWr \leq 22$

- Clase 2: vehículos con $22 < PWr \leq 34$

- Clase 3: vehículos de alta potencia con $PWr > 34$

En la actualidad, los automóviles más comunes tienen una relación potencia/peso de 40–100 kW/tonelada, por lo que pertenecen a la clase 3, mientras que las furgonetas pertenecen en general a la clase 2. En cada clase hay varias pruebas de manejo diseñadas para representar la operación de vehículos en circuitos urbanos, extraurbanos y autopistas [17].

Aunque los estándares WLTP representan una mejora sensible sobre los ciclos NEDC, estos siguen siendo demasiado suaves en comparación con las condiciones reales de conducción. Por ejemplo, el tiempo más rápido de 0 a 50 kilómetros por hora es de 15 segundos, cuando es sumamente habitual que los conductores aceleren desde el reposo hasta 50 kilómetros por hora en 5 a 10 segundos. Por su parte, los autobuses y camiones utilizan actualmente el ciclo WHVC (World Harmonized Vehicle Cycle), una normativa para vehículos Heavy Duty.

4.2. Ciclos de conducción estandarizados.

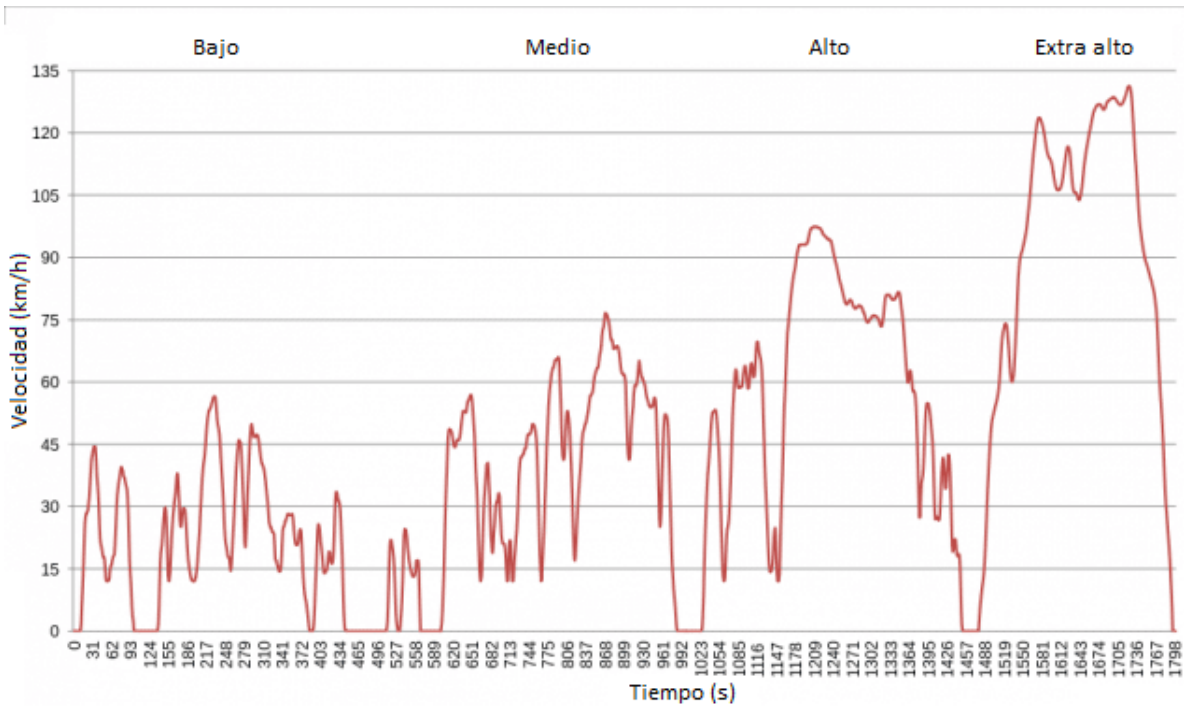


Figura 4.7: Representación gráfica del ciclo estandarizado WLTP, donde se aprecian cuatro sectores diferenciados correspondientes a zona de baja, media, alta y extra alta velocidad.

Fuente: [17].

Capítulo 5

Potencia y energía extraídas de la batería.

5.1. Introducción.

Los fundamentos matemáticos de la operación del vehículo describen el comportamiento del vehículo en base a los principios generales de la mecánica. Un vehículo eléctrico consta de miles de componentes y es un sistema complejo. Para describir completamente su comportamiento, se necesitan conocimientos mecánicos y matemáticos sofisticados que se presentan en las siguientes secciones. Dado que el presente trabajo propone discutir los trenes de potencia eléctricos, la discusión de los fundamentos de los vehículos se limitará al movimiento unidimensional. Por lo tanto, este capítulo se centrará en el rendimiento del vehículo, la velocidad, la pendiente, la aceleración, el consumo de energía y el frenado vehicular.

5.2. Descripción general del movimiento del vehículo.

El movimiento de un vehículo en una dirección, está determinado por la sumatoria de las fuerzas actuando sobre el vehículo. La totalidad de estas fuerzas actuantes son mostradas en la figura 5.1 donde el vehículo se desplaza en sentido ascendente en una pendiente. El esfuerzo de tracción, denominado en la figura como F_t , que actúa sobre las ruedas del vehículo, hace que este se mueva hacia adelante.

Cuando el vehículo se esta moviendo en una dirección y sentido en una pendiente, existen 3 componentes de fuerza que se oponen al movimiento: (1) la fuerza de rozamiento en los neumáticos, (2) la resistencia aerodinámica F_w , y (3) la componente del peso debido a la inclinación de la superficie del camino $Mg \cdot \text{sen}(\alpha)$. Según la segunda ley de Newton, la aceleración del vehículo se puede escribir de la siguiente manera [2]:

5.3. Fuerzas resistivas sobre el vehículo.

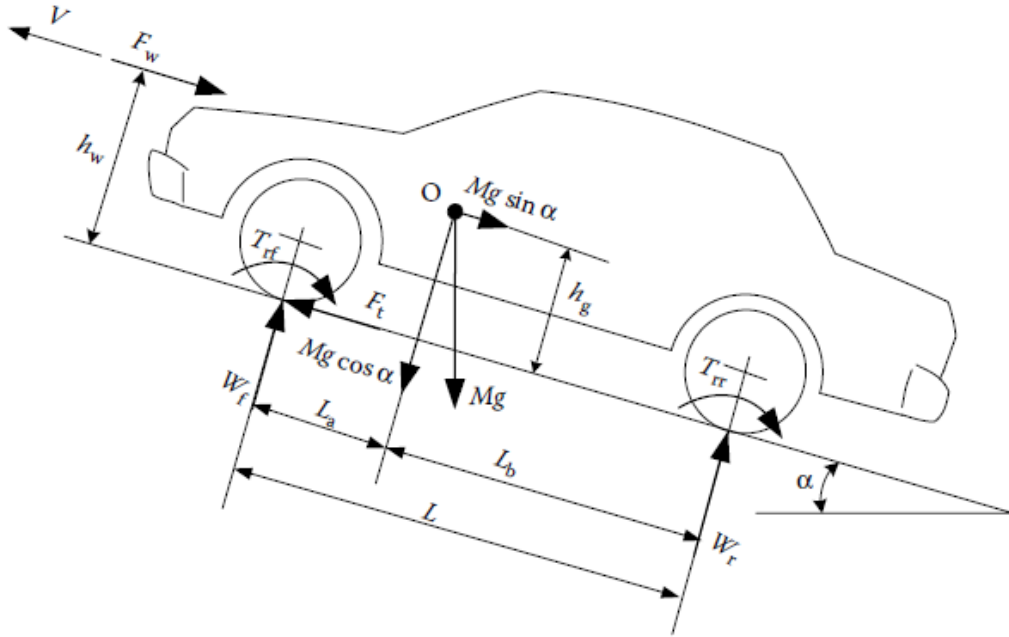


Figura 5.1: Esquema de las fuerzas actuantes sobre un vehículo que sube una pendiente.

Fuente: [2].

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\sum F_t - \sum F_r}{\delta M} \quad (5.1)$$

Donde V es la velocidad del vehículo, $\sum F_t$ el esfuerzo de tracción total del vehículo (asociado al torque del motor), $\sum F_r$ es la resistencia total, M la masa total del vehículo, y δ es el factor de masa equivalente que convierte las inercias rotativas de las componentes rotacionales en masas traslacionales [2].

5.3. Fuerzas resistivas sobre el vehículo.

Como se indicó en 5.2, la resistencia del vehículo que se opone al movimiento, está compuesta por la resistencia a la rodadura causada por el rozamiento entre el suelo y los neumáticos (delantero y trasero), la resistencia aerodinámica F_w , y la fuerza debido al peso según la inclinación del terreno la cual, se verá, se calcula como $Mg \cdot \text{sen}(\alpha)$ [2]. Estos tres tipos de fuerzas son analizados en las subsecciones siguientes.

5.3.1. Resistencia a la rodadura.

La resistencia a la rodadura causada por el rozamiento entre las cubiertas de la rueda con el suelo, se traducen en T_{rf} (Torque de rozamiento de la rueda de adelante) y T_{rr} (Torque

5.3. Fuerzas resistivas sobre el vehículo.

de rozamiento de la rueda trasera). Cuando la cubierta está rodando, desde la mitad hacia adelante está siendo cargada, y de la mitad hacia atrás se está descargando. En consecuencia, la histéresis de esta presión causa una distribución asimétrica de fuerzas de reacción. La presión en la parte de adelante de la cubierta es mayor que la presión en la parte de atrás, como se muestra en la figura 5.2, y la fuerza de reacción del suelo se desplaza casi completamente a la mitad delantera [2].

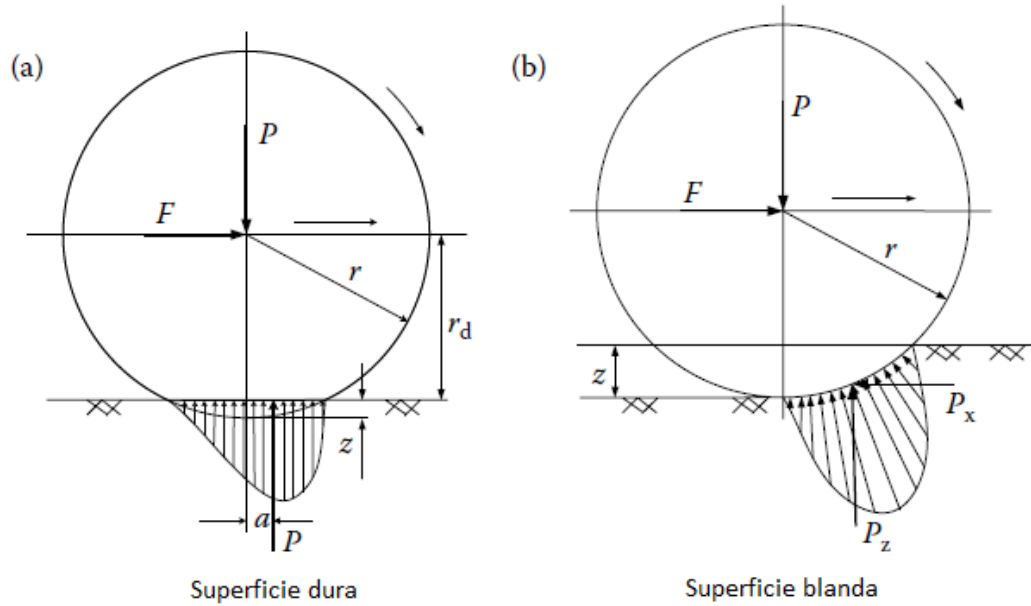


Figura 5.2: Fuerzas actuantes sobre la superficie de una rueda, a) en terreno duro y b) en terreno blando. Fuente: [2].

En consecuencia, el par producido por la fuerza resultante de la presión sobre los neumáticos durante el desplazamiento hacia adelante, se denomina momento de resistencia de rodadura, y puede expresarse como [2]:

$$T_r = P \cdot a \quad (5.2)$$

siendo a la distancia ortogonal entre el centro de la rueda y el punto de aplicación de la fuerza peso (P) en contacto con la superficie del suelo. Para mantener el movimiento del vehículo, es necesario compensar el par producido por la resistencia a la rodadura, aplicando una fuerza que actúe en el centro de la rueda. Esta fuerza (F) se expresa de la siguiente manera [2]:

$$F = \frac{T_r}{r_d} = \frac{P \cdot a}{r_d} = P \cdot f_r \quad (5.3)$$

donde r_d es el radio efectivo de la rueda y $f_r = a/r_d$ es llamado cociente de rozamiento.

5.3. Fuerzas resistivas sobre el vehículo.

De esta manera, el momento de resistencia de rodadura puede ser reemplazado por una fuerza horizontal actuando en el centro de la rueda en la dirección opuesta al movimiento. Esta fuerza equivalente es denominada fuerza de resistencia de rodadura, y se expresa como [2]:

$$F = P \cdot f_r \quad (5.4)$$

donde P es la fuerza normal. Cuando el vehículo está situado en una pendiente, la carga normal P se reemplaza por la componente que es perpendicular al suelo de la superficie, esto es,

$$F_r = P \cdot f_r \cdot \cos(\alpha) \quad (5.5)$$

donde α es el ángulo de la pendiente [2].

La fuerza de resistencia de rodadura depende del coeficiente de fricción f_r , que es una función del material de la rueda, de su estructura, de la temperatura, de la presión de aire interna, de su geometría, del material y la rugosidad del suelo y la presencia o ausencia de líquidos en la interfaz. Valores típicos del coeficiente de rozamiento f_r se muestran en la tabla 5.1 [2], sin tener en cuenta la relación con la velocidad.

Condiciones	Coeficiente de rozamiento (f_r)
Neumáticos de automóvil sobre hormigón o asfalto	0.013
Neumáticos de automóvil sobre camino de pedregullo o piedra partida	0.02
Camino tarmacadam (carpeta asfáltica)	0.025
Camino sin pavimentar	0.05
Camino de césped	0.1-0.35
Neumáticos de camión sobre hormigón o asfalto	0.006-0.01
Rueda sobre riel de acero	0.001-0.002

Cuadro 5.1: Valores de coeficiente de rozamiento para distintas condiciones de pavimentación. Fuente: [2].

Alternativamente al uso de valores tabulados, se ha propuesto fórmulas empíricas para calcular el coeficiente de rozamiento de rodadura en superficies duras. Por ejemplo, para un automóvil de pasajeros en una carretera de hormigón, el coeficiente f_r puede ser calculado según la siguiente expresión:

$$f_r = f_0 + f_s \cdot \left(\frac{V}{100}\right)^{2,5} \quad (5.6)$$

donde $f_0 + f_s$ dependen de la presión de aire en los neumáticos [2].

Para velocidades de hasta 128 km/h y para un amplio rango de presión de aire en los neumáticos, es apropiado usar una versión simplificada para el cálculo del coeficiente de resistencia a la rodadura, a través de la siguiente expresión [2]:

$$f_r = 0,01\left(1 + \frac{V}{160}\right) \quad (5.7)$$

5.3.2. Resistencia de arrastre aerodinámico.

Un vehículo que se desplaza inmerso en una masa de fluido como el aire, encuentra una fuerza que se opone al movimiento. Esta fuerza se denomina arrastre aerodinámico y está determinada principalmente por (1) la forma del vehículo y (2) la rugosidad de la superficie del vehículo.

Forma del vehículo: el movimiento hacia adelante del vehículo empuja el aire frente a él. Sin embargo, el aire no puede moverse instantáneamente y, por lo tanto, su presión aumenta, lo que da como resultado una presión de aire alta. Además, el aire detrás del vehículo no puede llenar instantáneamente el espacio dejado por el movimiento hacia adelante del vehículo. Esto crea una zona de baja presión de aire. Por lo tanto, el movimiento ha creado dos zonas de presión que se oponen al movimiento de un vehículo empujándolo hacia adelante (alta presión en el frente) y tirando de él hacia atrás (baja presión en la parte trasera) [2].

Fricción de la superficie del vehículo: el aire en contacto con la superficie del vehículo se mueve casi a la misma velocidad que éste, mientras que el aire lejos del vehículo el aire permanece inalterado por el movimiento vehicular. En el medio, las partículas de aire se mueven acorde a un gradiente de velocidades. La diferencia de velocidad entre dos partículas de aire produce una fricción que da como resultado el segundo componente de resistencia aerodinámica. La fuerza de arrastre aerodinámico F_w descrita por la ecuación 5.10 es una función de la velocidad relativa del vehículo ($V - V_w$), el área frontal del vehículo A_f , la forma del vehículo C_D , y la densidad del aire ρ , [2]:

$$F_w = \frac{1}{2}\rho A_f C_D (V - V_w)^2 \quad (5.8)$$

donde V_w es la componente de la velocidad del viento en la dirección del movimiento del vehículo, y los valores típicos del coeficiente C_D de la forma del vehículo pueden encontrarse en la figura 5.3 [2].

5.3. Fuerzas resistivas sobre el vehículo.

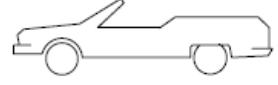
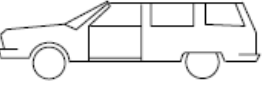
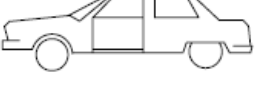




Tipo de Vehículo	Coefficiente aerodinámico C_d
 Convertible abierto	0.5...0.7
 Furgoneta	0.5...0.7
 Sedán o berlina	0.4...0.55
 Cuerpo en forma de cuña, lámparas integradas, flujo de aire optimizado	0.3...0.4
 Lámparas y ruedas cubiertas diseño aerodinámico	0.2...0.25
 Deportivo	0.23
 Diseño óptimo aerodinámico	0.15...0.20
Camiones	0.8...1.5
Buses	0.6...0.7
Buses aerodinámicos	0.3...0.4
Motocicletas	0.6...0.7

Figura 5.3: Coeficientes aerodinámicos para algunos tipos de vehículos y carrocerías. Fuente: [2].

5.3.3. Resistencia a la pendiente.

La resistencia a la subida es una fuerza de origen gravitacional que se opone al movimiento del vehículo cuando la superficie está en subida, o ayuda al movimiento cuando la superficie está en bajada. Esta componente depende de la masa M del vehículo y de la inclinación α del terreno, y puede expresarse como [2]:

$$F_g = Mg \sin(\alpha) \tag{5.9}$$

Asimismo, la resistencia debida a la pendiente y a la resistencia de rodadura pueden ser agrupadas de la siguiente manera [2]:

$$F_{rd} = F_f + F_g = Mg(f_r \cos(\alpha) + \sin(\alpha)) \tag{5.10}$$

5.4. Ecuación dinámica.

En la dirección del movimiento, las fuerzas actuantes en un vehículo son las fuerzas de tracción y las fuerzas que se oponen al movimiento. Las fuerzas de tracción en el eje delantero (F_{tf}) y trasero (F_{tr}) se asocian directamente al torque que proporciona el motor. En el caso que el vehículo sea de tracción delantera, $F_{tr} = 0$, y en el caso que sea de tracción trasera, $F_{tf} = 0$.

Las fuerzas que se oponen al movimiento son las fuerzas de resistencia a la rodadura de las ruedas delanteras y traseras (F_{rf} y F_{rr} , asociadas a los torques T_{rf} y T_{rr}), el arrastre aerodinámico F_W , y la resistencia debido a la fuerza peso F_g ($Mg\sin(\alpha)$). La ecuación 5.1 indica la dinámica del movimiento del vehículo, y puede ser actualizada como se muestra en 5.11, a partir del desarrollo de las fuerzas indicado en 5.3 [2].

$$\delta M \frac{dV}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_{rf} + F_{rr} + F_W + F_g) \quad (5.11)$$

donde cada término de la ecuación ha quedado descripto.

5.5. Cálculo de torque.

El torque aplicado en las ruedas del vehículo, transmitido desde el motor, puede ser expresado de la siguiente manera [2]:

$$T_w = i_g \cdot i_0 \cdot \eta_r \eta_d \cdot T_p \quad (5.12)$$

Donde T_w es el torque traccionario aplicado en las ruedas del vehículo, T_p es el torque de salida que produce el motor eléctrico, i_g es la relación de velocidades de la transmisión (caja reductora) definida como $i_g = N_{in}/N_{out}$, donde N_{in} es la velocidad angular de entrada y N_{out} la velocidad angular de salida, i_0 es la relación de velocidades de los engranajes finales (como por ejemplo, los engranajes de un diferencial) definido del mismo modo que i_g , y η_r y η_d representan el rendimiento de los engranajes del reductor y del diferencial respectivamente [2].

A la hora de dimensionar el motor de tracción de un vehículo eléctrico, es requisito conocer el torque que debe ser aplicado en las ruedas para cumplir con los requerimientos de fuerza del vehículo, F_t . Conocidos los requerimientos de fuerza F_t y el radio efectivo de las ruedas r_d , el torque requerido puede calcularse como [2],

$$T_w = F_t \cdot r_d \quad (5.13)$$

donde $F_t = F_{tf} + F_{tr}$ se obtiene de la ecuación 5.11 una vez conocida la masa y aceleración del vehículo, el factor δ , y las fuerzas resistivas involucradas. El factor rotacional de inercia (factor δ), puede ser calculado a través de la siguiente expresión [2]:

$$\delta = 1 + \frac{I_w}{Mr_d^2} + \frac{i_0^2 i_g^2 I_p}{mr^2} \quad (5.14)$$

En caso de no estar disponibles los parámetros de la ecuación 5.14, para un vehículo de pasajeros, se puede estimar utilizando la siguiente relación:

5.6. Cálculo de potencia del motor propulsor.

$$\delta = 1 + \delta_1 + \delta_2 i_0^2 i_g^2 \quad (5.15)$$

donde δ_1 puede estimarse en 0.04 y δ_2 en 0.0025.

A los efectos del dimensionamiento del motor propulsor de un vehículo, el torque del motor traccionario puede ser calculado entonces como [2]:

$$T_p = \frac{T_w}{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_r \eta_d} = \frac{F_t \cdot r_d}{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_r \eta_d} \quad (5.16)$$

con lo que, sustituyendo la expresión dada en la ecuación 5.11, se obtiene el valor del torque del motor a partir de la aceleración y de la masa del vehículo (considerando la masa inercial), a partir de la relación de transmisión y su eficiencia, y a partir de las fuerzas resistivas involucradas [2].

$$T_p = \left(\delta M \frac{dV}{dt} + (F_{rf} + F_{rr} + F_W + F_g) \right) \cdot \frac{r_d}{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_r \eta_d} \quad (5.17)$$

con lo cual:

$$T_p = \left(\delta M \frac{dV}{dt} + Mg \cdot \cos(\alpha) \cdot 0,01 \left(1 + \frac{V}{160} \right) + \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V - V_w)^2 + Mg \cdot \sen(\alpha) \right) \cdot \frac{r_d}{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_r \eta_d} \quad (5.18)$$

5.6. Cálculo de potencia del motor propulsor.

Para aplicaciones vehiculares, el desempeño óptimo de un motor es aquel en el cual se entrega potencia constante en todo el rango de velocidades de operación, con lo cual el torque decrece de forma hiperbólica con la velocidad. El torque del motor traccionario debe estar asimismo limitado para evitar el deslizamiento de las ruedas en el arranque o durante aceleraciones, pero debiendo adecuadamente responder ante demandas. El motor eléctrico es una de las plantas motrices que mejor se adaptan a los requerimientos de torque y potencia de un automóvil. La curva de par y la curva de potencia de un motor eléctrico es mostrada en la figura 5.4 [1].

5.6. Cálculo de potencia del motor propulsor.

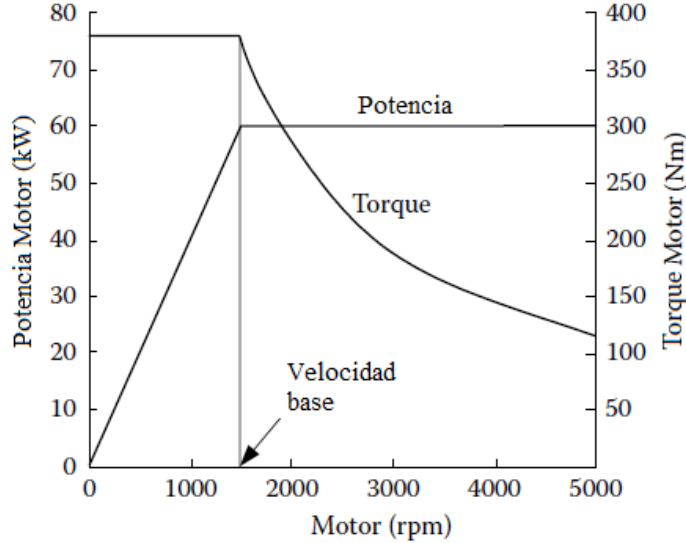


Figura 5.4: Curvas características de torque y potencia en un motor eléctrico. Adaptado de [2].

Generalmente, el arranque de un motor eléctrico es a torque máximo o cercano al máximo, desde velocidad cero. En el rango de velocidad cero a velocidad base, el motor eléctrico produce un par aproximadamente constante. Excedida la velocidad base, la potencia de salida es aproximadamente constante, mientras que el par disminuye de forma hiperbólica con la velocidad. Como el perfil de par y de potencia de un motor eléctrico está cerca del ideal, se puede emplear una transmisión de una o dos velocidades para cumplir con el requisito de desempeño del vehículo [1]. Dada la demanda de par descrita por la ecuación 5.18, es posible obtener la ecuación de potencia del motor eléctrico realizando el producto del par por la velocidad angular del motor. Dicho producto da por resultado la ecuación de potencia que debe entregar el motor para cumplir los requerimientos [2]:

$$P_p = F_t \cdot \omega_m \cdot \frac{r_d}{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_r \eta_d} \quad (5.19)$$

donde ω_m es la velocidad angular del motor, en radianes por segundo.

Si se vincula la velocidad de rotación del motor con la velocidad de desplazamiento del vehículo, se tendrá que

$$\omega_m = V \cdot \frac{i_g \cdot i_0}{r_d} \quad (5.20)$$

con lo cual, la ecuación de potencia puede ser expresada como

$$P_p = \left[\delta M \frac{dV}{dt} + Mg \cdot \cos(\alpha) \cdot 0,01 \left(1 + \frac{V}{160} \right) + \frac{1}{2} \rho A_f C_D (V - V_w)^2 + Mg \cdot \sen(\alpha) \right] \cdot \frac{V}{\eta_r \eta_d} \quad (5.21)$$

donde r_d es el radio de las ruedas, el término entre paréntesis rectos representa la fuerza requerida por el vehículo, y $\eta_r \eta_d$ representa el rendimiento de los sistemas de transmisión [2].

5.7. Potencia y energía extraída de la batería.

Conocida la potencia que tiene que entregar el motor eléctrico en punta de eje, obtenida a partir de la ecuación 5.21, puede obtenerse la potencia que debe entregar la batería del siguiente modo [1]:

$$P_{bat} = \frac{P_{ME}}{\eta_{ME}} \quad (5.22)$$

siendo η_{ME} el rendimiento del motor eléctrico, y donde debe ser tenido en cuenta que la potencia máxima de la batería $P_{bat,max}$ debe ser mayor o igual a la potencia máxima del motor eléctrico $P_{ME,max}$.

Como fue indicado en 3.3.3.3, la energía eléctrica consumida por el motor eléctrico es comúnmente medida en kWh, por lo que se busca utilizar las mismas unidades para establecer la cantidad de energía entregada por la batería, obtenida a partir de la ecuación 3.4. Alternativamente, la energía que entrega la batería en un trayecto puede ser obtenida a partir de la integral de potencia entregada, a partir de la siguiente expresión [1]:

$$E_{bat} = \int_0^t P_{bat}(t) \cdot dt \quad (5.23)$$

lo cual es fácilmente calculable si se reemplaza el valor de P_{bat} por P_{ME}/η_{ME} , donde P_{ME} se obtiene a partir de la ecuación 5.21 ($P_{ME} = P_p$). En un tren traccionario para vehículo eléctrico como el indicado en la figura 5.5, el sistema de frenado regenerativo permite recargar ciertas cantidades de energía durante la frenada [1].

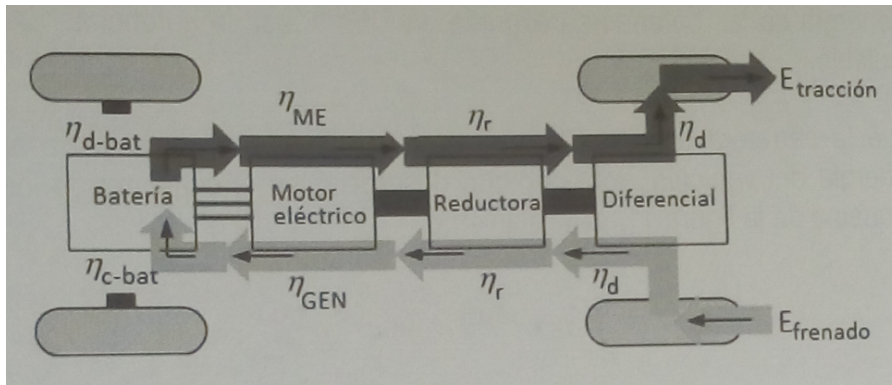


Figura 5.5: Sistema traccionario elemental con frenado regenerativo. Fuente: [1].

Teniendo en cuenta las pérdidas que se producen en la batería, en el motor y en la transmisión, la potencia de salida de la batería puede ser expresada como [1]:

5.7. Potencia y energía extraída de la batería.

$$P_{bat,salida} = F_t \cdot \omega_m \cdot \frac{r_d}{i_g \cdot i_0 \cdot \eta_r \cdot \eta_d \cdot \eta_{ME} \cdot \eta_{d-bat}} \quad (5.24)$$

lo cual coincide con la ecuación 5.19, salvo que se ha agregado el rendimiento de desacarga de la batería η_{d-bat} y el rendimiento del motor eléctrico η_{ME} .

Análogamente, cuando existe la posibilidad de realizar frenado regenerativo, la batería se verá recargada por el sistema en una fracción λ del total de energía de frenado disponible, con $0 < \lambda < 1$. Por lo tanto, la potencia de entrada a la batería por concepto de frenado regenerativo será [1]:

$$P_{bat,entrada} = \lambda \cdot \eta_r \cdot \eta_d \cdot \eta_{ME} \cdot \eta_{c-bat} \cdot F_t \cdot \omega_m \cdot \frac{r_d}{i_g \cdot i_0} \quad (5.25)$$

donde η_{c-bat} representa el rendimiento de carga de la batería, y λ representa el porcentaje de la energía requerida para frenar el vehículo que es aprovechada por el sistema e inyectada a la batería. λ es denominado factor de frenada regenerativa [1].

Realizando la suma algebraica de la energía saliente y entrante de la batería, se obtiene la energía total requerida para un ciclo de conducción.

$$E_{bat} = \int_{traccin} P_{bat,salida}(t) \cdot dt + \int_{frenado} P_{bat,entrada}(t) \cdot dt \quad (5.26)$$

donde las expresiones de $P_{bat,salida}$ y $P_{bat,entrada}$ se obtienen a partir de las ecuaciones 5.24 y 5.25 respectivamente.

Capítulo 6

Cargadores de baterías para Vehículos Eléctricos.

6.1. Introducción.

Para realizar la recarga de las baterías de un vehículo eléctrico es necesario utilizar un equipo que suministre energía eléctrica al vehículo. Dicho equipo se denomina Sistema de Alimentación de Vehículos Eléctricos (SAVE o EVSE, por sus siglas en inglés), y son usualmente denominados cargadores de vehículo eléctrico. Conceptualmente, el SAVE es un equipo que suministra potencia y energía eléctrica al vehículo, pero cabe notar que cada vehículo eléctrico suele estar equipado internamente con un convertidor que permite cargar las baterías, suministrando tensión y corriente continua. Los SAVE no son rectificadores sino que permiten realizar cargas seguras y controladas a través de la comunicación con el vehículo, además de incorporar funciones relacionadas con la autenticación de usuarios, gestión de la demanda.

Unos de los principales aspectos que surgen a la hora de pensar en un punto de recarga, es el tipo de conector y el estándar que aplica en cada caso, de forma tal que exista compatibilidad entre el SAVE y el vehículo eléctrico. Existe una variedad muy amplia de conectores en el mercado, lo que representa un desafío importante para los usuarios y para la planificación de la infraestructura de recarga. La estandarización de los conectores puede representar certezas para los consumidores a la hora de acceder a cualquier punto de la red de recarga. Se señala que no todos los conectores soportan la conducción de la misma corriente ni tampoco todos admiten cargas en corriente continua (DC), las cuales permiten recargas Super-Rápidas o Ultra-Rápidas. El despliegue de una red de recarga pública debe incluir una distribución apropiada, disponer de un correcto mantenimiento, estar bien señalizados y de fácil acceso, asegurando su disponibilidad. Asimismo, es necesario contar con medios de pago que faciliten a los usuarios el uso sin inconveniente.

En el presente capítulo son presentados los distintos modos de carga y los diferentes tipos de cables y conectores, señalando los estándares que son aplicados en cada caso. También se presentan diversos tipos de cargadores, desde aquellos que permiten realizar recargas nocturnas (overnight charging) hasta aquellos que son utilizados para recargas súper rápidas en corriente

6.2. Casos de conexión para la recarga.

continúa que permiten la recarga de oportunidad (opportunity charging), pasando por los cargadores de velocidad intermedia. Se presentan asimismo distintos tipos de curvas de carga de baterías para finalizar con la comunicación que se establece entre el cargador y la red eléctrica y entre el cargador y el vehículo eléctrico para establecer los procesos de carga o descarga, según corresponda.

6.2. Casos de conexión para la recarga.

Dentro de los tipos de cables que existen para cargar vehículos eléctricos, están los Tipo A, Tipo B y Tipo C. Cada tipo de cable se corresponde con un nivel de carga determinado, buscando asegurar en todo momento un suministro seguro y de calidad. En las siguientes subsecciones son presentados estos tres tipos. Cabe notar que cualquiera sea el caso de conexión (A, B o C) los puntos públicos de carga deben adoptar uno o más estándares de forma tal que los vehículos puedan ser cargados en tales puntos de recarga, tanto sean estatales o en superficies privadas como supermercados, parkings o shopping centers, entre otros.

6.2.1. Caso A.

El caso A, es aquel donde el cable es solidario al VE [59]. Según puede advertirse en su clasificación, se trata de uno de los tipos de cables utilizados en el modo de carga 1 presentado en 6.1.

6.2.2. Caso B.

El caso B, es aquel que no es parte ni del auto ni del SAVE. Para poder utilizar los SAVEs los usuarios deben disponer de sus propios cables [59]. En estos casos, los conectores en los extremos pueden ser diferentes, adaptándose a ambas conexiones (VE y cargador). Este tipo de cable suelen ser utilizados tanto en el modo 2 como en el modo 3 de carga. En términos de potencia, los SAVEs que utilizan este tipo de cable, generalmente alcanzan una potencia máxima de 22kW.

6.2.3. Caso C.

En el caso C, los cables son solidarios al SAVE [59]. Estos casos suelen ser utilizados para cargas de potencias igual o superiores a 43kW en AC y más de 60kW en DC, aunque también son aptos para potencias menores. Por seguridad, todos los cargadores que operan bajo el modo 4 utilizan el cable tipo C.

6.3. Modos de carga.

Los modos de carga se definen en función del nivel de comunicación entre el vehículo eléctrico y la infraestructura de recarga y el control que se puede tener del proceso de transferencia de energía, ya sea para programarla, ver su estado, detener el proceso, reanudarlo, o incluso inyectar

6.3. Modos de carga.

energía a la red. En ese sentido se distinguen 4 modos diferentes los cuales son enumerados del 1 al 4. Cabe mencionar que a lo largo de los diferentes capítulos del presente trabajo se ha utilizado la denominación "*modo V2G*", lo cual no necesariamente encuentra vinculación directa con los modos 1 a 4 descritos en el presente capítulo. No obstante lo anterior, el "*modo V2G*" o un sistema de recarga bidireccional que permita no sólo la recarga de la batería sino también admita entregar energía eléctrica desde el vehículo a la red, necesariamente debe contar con un sistema sofisticado de comunicación entre el vehículo, el SAVE y la red, de forma tal que todos los procesos sean adecuadamente monitoreados y controlados. Esto sólo es posible en los modos 3 y 4 descritos en las siguientes secciones. Los cuatro modos de carga existentes son presentados en las subsecciones siguientes, mientras que la figura 6.1 ilustra cada uno de ellos en la imagen correspondiente [18].

6.3.1. Modo 1

En el modo 1 no existe comunicación entre el vehículo y la red y la recarga se realiza mediante la conexión del auto al suministro eléctrico sin intervenir en el proceso de carga ningún equipo de comunicación. Normalmente, el modo 1 es utilizado para cargas de baja potencia y para vehículos pequeños, como por ejemplo transporte de 2 o 3 pasajeros, o vehículos ligeros para logística urbana. El tipo de conector más utilizado en este modo es el tipo Schuko [18].

6.3.2. Modo 2

En el modo 2 el grado de comunicación con la red es relativamente bajo. El cable cuenta con un dispositivo intermedio de control (piloto) que sirve para verificar la correcta conexión del vehículo a la red de carga. Al igual que en el modo 1, este modo es utilizado para cargas de baja potencia, generalmente monofásicas. Respecto a los vehículos es posible conectar vehículos convencionales (4 o 5 pasajeros, o vehículos de carga urbana). Normalmente el conector utilizado es el Schuko, pero podría realizarse mediante otro tipo de conectores. Tanto en el modo 1 como en el modo 2, las protecciones eléctricas deben ser instaladas externamente en el tablero eléctrico de alimentación [18].

6.3.3. Modo 3

En el modo 3 se cuenta con un grado elevado de comunicación entre el vehículo y la red. Los dispositivos de control y protecciones se encuentran dentro del propio punto de recarga, y además el cable incluye un piloto de comunicación integrado; por su parte, la transformación de corriente alterna (proveniente de la red eléctrica) en corriente continua es realizada por el cargador on-board del vehículo. En este caso, la potencia máxima de carga puede llegar hasta los 43kW en AC. Para este punto ya es posible conectar vehículos de mayor porte que en los modos 1 y 2. Respecto a los conectores, es posible utilizar cualquiera de los presentados en la sección 6.4, como por ejemplo conectores SAEJ1772, Mennekes, Scame, etc. Cabe indicar que un sistema

6.4. Conectores para vehículos eléctricos.

V2G puede ser implementado en el modo de carga 3 ya que es posible establecer descargas controladas en corriente alterna, controlando de buena manera el C-rate y la profundidad de la descarga que se quiera implementar [59].

6.3.4. Modo 4

En el modo 4 existe el mismo grado de comunicación con la red que en el modo 3, mientras que la diferencia radica en la potencia. El modo 4 permite la carga super-rápida, la cual es actualmente posible únicamente en corriente continua (DC). Dentro del cargador se encuentra un convertor para la rectificar la corriente alterna pasando a corriente continua. Este modo de carga permite alcanzar los 188kW de potencia mediante el conector GB-T y hasta 250kW con los supercargadores Tesla. Normalmente este modo de carga es utilizado por BEVs de muy altas prestaciones y coches de pasajeros y autobuses eléctricos. La implementación de un sistema V2G en el modo 4 no resulta conveniente a menos que se establezcan sistemas de control sofisticados y avanzados, que permitan un control de la descarga de las baterías que sea lo suficientemente confiable para todas las unidades involucradas [59] [18].

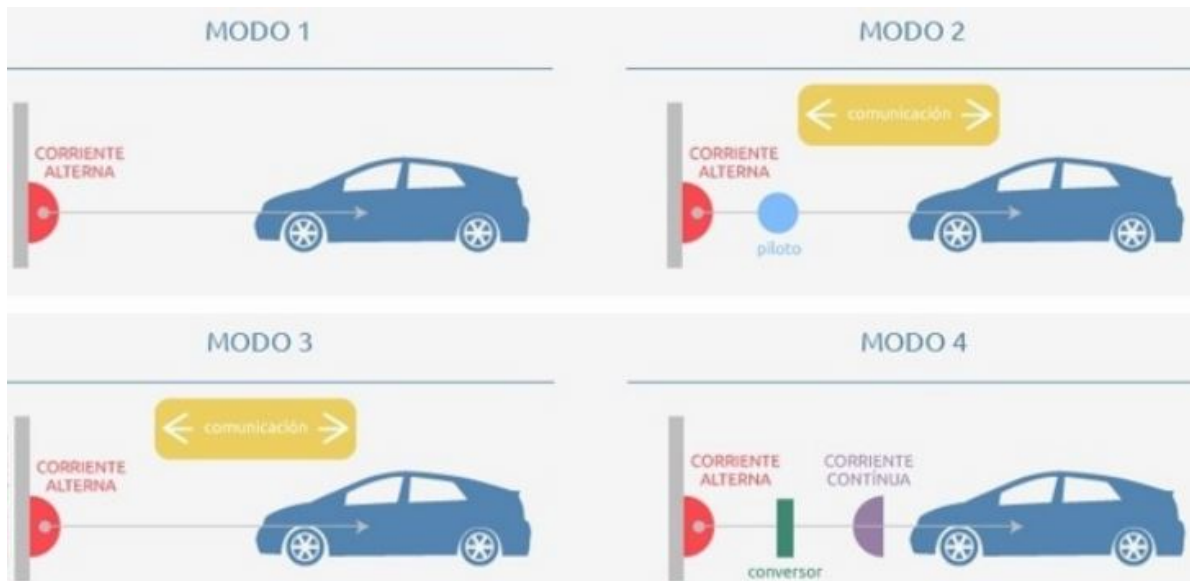


Figura 6.1: Representación gráfica de los cuatro modos de carga presentados en la sección.

Fuente: elaboración propia con base en [18].

6.4. Conectores para vehículos eléctricos.

Existen actualmente varios tipos de conectores utilizados en los VE. Prácticamente cada fabricante de VE o cada región ha desarrollado uno propio, totalmente diferente de sus compe-

6.4. Conectores para vehículos eléctricos.

tidores, lo cual se ha vuelto un problema ya que el desarrollo de los puntos de carga públicos son un factor esencial en la adopción de los VE por parte de los consumidores. La pregunta que surge, en consecuencia, es qué conector utilizar. En Uruguay se estableció a través de la norma UNIT1234 las características de los conectores a utilizar en los SAVEs [60].

Dependiendo del modo de carga, tipo de cable y el socket del cual disponga el VE será el conector que se utilice. Las tensiones y las corrientes admitidas por ellos son variadas y dependen de cada conector. A continuación se detallan los principales tipos de conectores disponibles en el mercado y sus características técnicas.

6.4.1. Tipo Schuko

El conector tipo Schuko está validado en Uruguay por la norma UNIT 1234, la cual tiene por finalidad establecer los formatos normalizados para los elementos utilizados en la carga de los vehículos eléctricos. Esta norma se basa en la norma Internacional IEC 62196-2 de la cuál se ha seleccionado un conjunto limitado de hojas de normalización de forma de evitar la profusión de formatos. La ficha y tomacorriente tipo Schuko hasta 16 A está habilitado por esta norma para las recargas a nivel doméstico [60] [59].

6.4.2. Tipo 1 (SAE J1772)

El conector Tipo 1 (Type 1), SAEJ1772, está también abarcado por la norma UNIT 1234 (IEC 62196-2). Sus características permiten una tensión hasta 250V monofásica, hasta 32A. Este conector posee 3 pines de contacto de potencia (L1, N, PE) y 2 contactos de señal (CP y CS) [60] [61].

6.4.3. Tipo 2 (Mennekes)

El conector Tipo 2 (Type 2), conocido como Mennekes, está comprendido por la norma UNIT 1234 (IEC 62196-2). Sus características nominales de tensión son hasta 250 V monofásico o 380-480V trifásico, y su corriente máxima admisible es hasta 70A. Este conector posee 5 pines de contacto de potencia (L1, L2, L3, N, PE) y 2 contactos de señal (CP y PP). Para contacto monofásico, los pines L2 y L3 pueden ser omitidos. La figura 6.3 muestra la ubicación y finalidad de cada uno de los pines de este conector [60] [59].

6.4.3.1. Descripción de los pines en conector Tipo 2

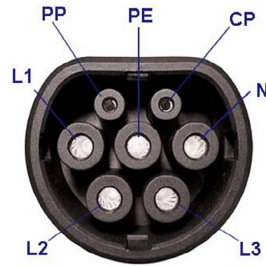


Figura 6.2: Modo de conexión de los pines del conector Tipo 2.

Símbolo	Nombre	Función
L1	Fase 1	Conexión eléctrica de potencia
L2	Fase 2	Conexión eléctrica de potencia
L3	Fase 3	Conexión eléctrica de potencia
N	Neutro	Conexión eléctrica de potencia
PE	Protección Eléctrica (Tomad de tierra)	Protección eléctrica contra contacto Indirecto
CP	Control Pilot	Comunicación y Control
PP	Proximity Pilot	Comunicación y Control

Cuadro 6.1: Descripción de los pines de conexión de un conector Tipo 2.

6.4.4. Tipo 3 (Scame)

El conector Tipo 3 (Scame 3C) tiene 5 pines de potencia (L1, L2, L3, N, PE) y 2 pines de control (CP, PP). La corriente máxima admisible es 32A y la máxima tensión es 500V. Posee obturadores de protección que impiden el acceso a los bornes, además de bloqueo de extracción y tapa. Este conector cumple los estándares IEC 62196-1y2 e IEC/EN 61851-1 [18].

6.4.5. Tipo GB/T

El conector chino GB/T está diseñado para carga en corriente continua. Posee 2 pines de potencia (+,-) y 7 pines de comunicación. Sus características nominales indican hasta 1000V de tensión y 125A de corriente. Cumple con las normas chinas GB/T y con la IEC 61851 [18].

6.4.6. Tipo CHAdeMO

6.4. Conectores para vehículos eléctricos.

Este conector japonés es Utilizado para una recarga en corriente continua. Posee 10 pines (2 de Potencia, 7 de comunicación y 1 sin asignación). Sus características nominales indican hasta 200A y 500V, logrando recargas ultra-rápidas. Cumple con la norma IEC 62169-3 [18].

6.4.7. Tipo Combo 2

Con el fin de adaptar los conectores tipo 1 y tipo2 para que puedan incorporar con los mínimos cambios posibles de diseño la carga en continua, se adicionaron 2 pines para la transferencia de energía en continua. De esta forma se crean 2 tipos de conectores adicionales, el Combo 1 (CCS1) y el combo 2 (CCS2) [60] [18].

6.4.8. Resumen de los conectores presentados.

La tabla 6.2 muestra un resumen de los tipos de conectores referenciados en el presente capítulo, indicándose los niveles de tensión y corriente admisibles para cada caso, así como también la norma cumplida por el conector. Del mismo modo, la figura 6.3 muestra la geometría de cada uno de los tipos de conectores más extendidos actualmente en el mercado.

Conector	Tensión máx	Corriente máx	Normativa
Schuko	230Vac (M)	16 A (3,7kW-M)	CEE 7/4
Tipo 1 (SAE J1772)	250Vac (M)	32 A (7,4kW-M)	IEC 62196
Tipo 2 (Mennekes)	500Vac (T)	63 A (43kW-T)	IEC 62196 - UNIT1234
Tipo 3 (Scame)	480Vac (T)	32 A (22kW-T)	IEC 62196
GB-T	750Vdc	250 A (188kW)	GB-T Stanadar for China
CHAdEMO	500Vdc	120 A (60kW)	IEC 62196 - UL2551
CCS 1	850Vdc	125 A (106kW)	IEC 62196

Cuadro 6.2: Caracterización de los conectores más utilizados en el mundo. Fuente: [19].

En la figura 6.3 se presenta la geometría de cada tipo de conector, indicando en qué región son implementados (Japón, China, Europa y Estados Unidos), además de la norma a la cual cada uno corresponde. Sobre la derecha de la imagen es añadido el conector de Tesla, el cual aplica para cualquier región. Sin perjuicio de lo anterior, algunos fabricantes, particularmente los provenientes de China, en oportunidades flexibilizan la construcción de sus vehículos, colocando en los mismos un conector no correspondiente al estándar GB/T.

6.5. Tipos de cargadores para vehículos eléctricos.

Area	U.S.A.	Europa	China	Japon	
Standard	SAE	IEC	GB/T	CHAdeMO	Tesla
AC	 J1772	 62196-2	 20234.2	 J1772	
DC	 J1772	 62196-3	 20234.3	 CHAdeMO	 Tesla

Figura 6.3: Representación visual de los conectores expuestos en el presente capítulo. Fuente: [19].

6.5. Tipos de cargadores para vehículos eléctricos.

Durante la carga de la batería de un vehículo eléctrico, el flujo de potencia activa va desde la red eléctrica hacia la batería. Mientras que, durante la descarga, el flujo de potencia activa va desde la batería hacia la red eléctrica. La carga de un vehículo eléctrico, puede ser gestionada inteligentemente, mediante lo que se denomina carga dinámica, lo cual implica que exista comunicación entre el cargador (SAVE) y una central de gestión, para que la central pueda indicarle al SAVE si está habilitado a cargar en cierto horario, y que la central pueda variar la potencia que el SAVE entrega al vehículo. Esto ya puede ser implementado con un SAVE unidireccional, pero agregando la posibilidad de recibir mensajes desde el centro de control de carga, que cambien la configuración del SAVE para que entregue una corriente máxima distinta.

Existen varios tipos de SAVEs, dependiendo de su uso se pueden encontrar desde equipos pequeños para residencias con potencias máximas de 7,4kW hasta SAVEs para la vía pública que pueden ir desde los 22kW en AC hasta los 250kW en DC. En una primera clasificación es posible dividir entre SAVEs aptos para cargas AC y aquellos que permiten cargas en DC. Los cargadores ubicados en la vía pública en Uruguay son del tipo AC y permiten cargar los VE bajo una potencia máxima de 43kW. Sin embargo, se está llevando a cabo por parte de la empresa UTE la instalación de cargadores DC de forma progresiva.

6.5. Tipos de cargadores para vehículos eléctricos.

6.5.1. Cargadores para cargas en AC.

Los SAVE para carga en AC pueden ser instalados en garages, estacionamientos de edificios, parkings, shopping centers, vía pública, etc. En función de la potencia disponible previo a la instalación de los SAVES, puede llegar a modificarse la instalación eléctrica existente (protecciones, cableado, tableros, etc.) ya que los requerimientos de potencia pueden ser elevados.

6.5.2. Cargadores para cargas en DC.

Los cargadores DC, cuentan con una alimentación en AC, y a través de un rectificador interno convierten la alimentación eléctrica en DC. Luego, dentro del vehículo eléctrico, deben existir las unidades correspondientes que permitan la recarga en corriente continua. No todos los VE permiten la carga en alta potencia. Habitualmente, los cargadores en DC cuentan con convertidores ubicados en una unidad independiente, separados de las unidades de conexión al vehículo eléctrico. Estos cargadores permiten cargar las baterías de los autos en el orden de pocos minutos, lo que contribuye en derribar la barrera del tiempo necesario para la recarga de las baterías. La tabla 6.3 presenta un resumen de los diferentes tipos de cargadores unidireccionales para vehículos eléctricos.

Tipo de carga	Potencia (kW)	Modo	Tipo de cable
Super-Lenta	Hasta 2,2	1-2	A - B
Lenta	2,2 - 22	2-3	A - B
Semi-Rápida	22 - 43	2-3	B - C
Rápida	43 - 50	3	C
Super-Rápida	Mayor a 50	4	C

Cuadro 6.3: Caracterización de cargadores en función de su potencia máxima entregada.

6.5.3. Cargadores bidireccionales.

La descarga de baterías de vehículos eléctricos hacia la red eléctrica puede utilizarse para diversas funcionalidades que se categorizan según el tipo de carga externa que consuma energía: Vehicle-to-Grid (V2G): si se suministra energía eléctrica desde la batería del VE a la red. Vehicle-to-Home (V2H): si se suministra energía eléctrica desde la batería del VE al hogar. Vehicle-to-Load (V2L): si se suministra energía eléctrica desde la batería del VE a los dispositivos eléctricos directamente, funcionando como fuente de energía de emergencia. Para referirse genéricamente a cualquiera de dichos métodos, se utiliza V2X (Vehicle-to-X). Las tecnologías V2H y V2G han comenzado a utilizarse con el objetivo de controlar la reducción de picos de demanda, la distribución de energía en caso de falla eléctrica y la estabilización de la energía de la red. Se han llevado a cabo varios experimentos de demostración y tales tecnologías se están utilizando actualmente. Sabiendo que la tendencia para conseguir un control inteligente del consumo-demanda de energía eléctrica, tanto en V2H como en V2G, es esperable que se tienda a la utilización de cargadores bidireccionales que permitan el flujo de energía en ambos sentidos.

6.5. Tipos de cargadores para vehículos eléctricos.

Un cargador bidireccional, además de cumplir con alguna de las funcionalidades de los SAVE unidireccionales, en particular correspondientes al Modo 3, aunque eventualmente también en el Modo 4, cumple adicionalmente con las siguientes condiciones [18]:

- 1) En el Modo 3, puede tomar de la batería del vehículo eléctrico la corriente alterna AC, caso para el cual el BEV debe tener integrado un convertor DC/AC bidireccional.
- 2) En el Modo 4, puede consumir del BEV corriente en DC y mediante un inversor suministra la corriente alterna a la red, a través de un cargador bidireccional que permita el flujo inverso de potencia.

La figura 6.4 presenta las especificaciones técnicas, en inglés, de un cargador bidireccional comercial diseñado por la empresa ENDESA y fabricado por la empresa MAGNUM CAP. En la tabla de especificaciones son presentadas cada una de las principales características eléctricas y constructivas.

INPUT		ELECTRICAL AND SAFETY SPECS	
Voltage	400 VAC	Power Converter Technology	Active Rectifier IGBT
Voltage range	±10 %	Short-circuit protection	Yes
Frequency	50 Hz ± 5%	Over-current protection	Yes
Nominal input power	10,5 kVA	AC Earth leakage protection	Yes
Max AC current per phase	16 A	DC Earth leakage protection	Yes
CHARGING OUTPUT		Emergency stop button	Yes
Output power	10 kW	Isolation system	Low frequency
Max output current	31 A 400 VDC	Charging/Discharging mode	Mode 4
Output voltage	0 - 500 VDC	Charging protocol	CHAdeMO (TEPCO)
Efficiency	> 93%	Discharging protocol	CHAdeMO MMC & Nissan
Power factor	> 0,9	Plug type connector	JEVS G105
THD	< 3%	CABINET SPECS	
DISCHARGING OUTPUT		Dimensions (W x D x H)	70 x 35 x 164 cm
Output power	10 kVA	Weight	260 Kg
Output voltage	400 VAC	Protection degree	IP54 outdoor
Efficiency	> 90%	ENVIRONMENT CONDITIONS	
Power factor	0,998 (near pure sine)	Temperature	-25 to + 50°C
HMI AND COMMUNICATIONS		Humidity	5% to 95%
Communication protocol	Ocpp 1.5 + Endesa V2G Spec	Altitude	Up to 1000 m
Direct Communications	Modbus RTU RS 485	Sound noise	< 55 dB in all dir
Display	Alphanumeric		
Language	English		

Figura 6.4: Tabla original comercial de un cargador bidireccional de la empresa ENDESA.

En la tabla, pueden ser observadas las principales características eléctricas, tanto para la recarga como para la descarga de las baterías y entrega de energía a la red. También es indicado el protocolo de comunicación, lo cual es presentado en la sección 6.6.2. Del mismo modo, es

6.6. Comunicación SAVE - vehículo eléctrico.

indicado el tipo de conector (JEVS G105, actualmente no muy extendido en los vehículos eléctricos), así como además la masa y las dimensiones del cargador bidireccional.

6.6. Comunicación SAVE - vehículo eléctrico.

En esta sección se presenta una descripción de los procesos de comunicación existentes entre el SAVE y el vehículo eléctrico cuando se producen los procesos de carga de la batería traccionaria. Se presenta asimismo una breve caracterización del hardware y de los algoritmos involucrados. Se realiza asimismo una descripción de las distintas funciones, las cuales pueden interactuar entre el SAVE y el sistema de gestión remoto, o el SAVE y el vehículo. Algunas de estas funciones pueden ser, la autenticación del usuario, el inicio de carga y el corte de suministro en caso de falla. Se incluye también una descripción de las características técnicas de los SAVE para permitir el funcionamiento en modo V2G, describiendo las funciones incorporadas y los protocolos de comunicación asociados a este tipo de intercambio de energía. Es presentado el esquema de funcionamiento de un SAVE

6.6.1. Esquema básico de los sistemas de carga.

El Sistema de Alimentación del Vehículo Eléctrico (SAVE), se compone de un circuito monofásico o trifásico en distintos niveles de tensión (230V, 400V) y distintas potencias (7.4kW, 22kW, 43kW, etc.), e incorporan dispositivos de medición, dispositivos de control de fallas, dispositivos de control de carga, protecciones contra sobrecargas, cortocircuitos y contactos indirectos. Cuentan típicamente además de un sistema de comunicación entre un servidor centralizado que mantiene comunicado el SAVE con el administrador de la red de recarga según el protocolo OCPP. Por otra parte, la comunicación entre el SAVE y el vehículo eléctrico se realiza según el protocolo de comunicación SAE J1772 [61].

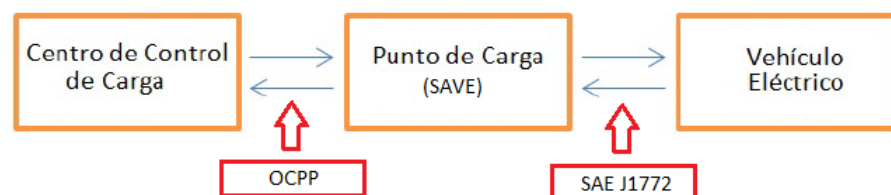


Figura 6.5: Flujo de Carga y protocolos intervinientes entre el centro de gestión de carga, el SAVE y el vehículo eléctrico.

El control de falla que suele ser implementado en los sistemas de carga debe abrir el circuito (mediante la activación de un relé) en el caso de detectar un defecto a tierra o cuando el usuario decida desenchufar la conexión. Por otra parte, para evitar daños al VE durante los procesos de carga suele ser implementada la apertura del circuito cuando exista sobrecarga en el circuito o exista alguna falla de aislación provocando que una sección metálica del equipo quede

bajo tensión. Estas protecciones coinciden con las implementadas en un circuito típico de baja tensión. Otro tipo de protecciones implementadas refieren a la protección de la batería, como la de corte al llegar al 100 % de la carga de la batería del vehículo. También, en sistemas avanzados, debe ser detectado el movimiento del vehículo y cortar el proceso de carga e implementar la desconexión en tales casos.

6.6.2. Protocolo de comunicación OCPP.

El Open Charge Point Protocol (OCPP) es un protocolo de aplicación para la comunicación entre las estaciones de carga de vehículos eléctricos (EV) y un sistema de gestión central, también conocido como red de estaciones de carga, similar a los teléfonos móviles y las redes de telefonía móvil. El protocolo es una iniciativa de la fundación ELaadNL en los Países Bajos. Su objetivo es crear un protocolo de aplicación abierto que permita que las estaciones de carga de vehículos eléctricos y los sistemas de gestión central de diferentes proveedores se comuniquen entre sí. Lo utilizan una gran cantidad de proveedores de estaciones de carga para vehículos eléctricos y sistemas de administración central en todo el mundo.

El protocolo OCPP cuenta con distintas versiones, siendo la última emitida la versión 2.0, que permite la comunicación entre el cargador SAVE y el sistema central de gestión de carga; permite notificar el encendido o apagado del SAVE, solicitar una habilitación (para iniciar una carga o para detenerla), enviar datos de medición, entre otras múltiples funciones.

En el caso del sistema de gestión de carga implementado por UTE, es utilizado el protocolo OCPP 1.6 con mensajes del tipo JSON, dichos mensajes consisten en un formato de texto sencillo para el intercambio de datos; el sistema central actúa como servidor WebSocket y el punto de carga actúa como un cliente WebSocket. WebSocket es una tecnología que proporciona un canal de comunicación bidireccional y full-duplex sobre un único socket TCP. Está diseñada para ser implementada en navegadores y servidores web, pero puede utilizarse por cualquier aplicación cliente/servidor [18].

Usualmente, el cliente comienza la comunicación enviando un mensaje al servidor y requiriendo una respuesta posterior. Sin embargo, una de las ventajas de utilizar WebSocket a diferencia del protocolo HTTP, es que WebSocket permite que la comunicación sea iniciada tanto el servidor como el cliente. Por tal motivo, sin distinguir si es el cliente o el servidor, el primer mensaje (.req) tendrá formato JSON, con ciertos campos obligatorios determinados por el protocolo OCPP. Al recibir el mensaje, la contraparte primero valida los datos del primer mensaje, se procesan los mismos y se responde (.conf) con los campos obligatorios determinados por el protocolo OCPP. En base a los datos recibidos, el sistema central o el cargador ejecutan acciones: se envían otros mensajes JSON, se realizan medidas, o se habilita la comunicación con el VE. Según el protocolo OCPP, cada mensaje JSON tiene un formato definido y cuando se envía un mensaje (.req), siempre se espera una respuesta (.conf). Además, el protocolo también define una lógica de procedimiento entre el primer mensaje JSON, su respuesta respectiva, y el siguiente mensaje JSON, como se presenta en los esquemas de la siguiente subsección [18].

6.6.2.1. Proceso de encendido del SAVE.

Cuando se enciende el SAVE (luego de un reinicio o apagado), el primer mensaje a enviar al servidor será para esperar confirmación de si el SAVE está habilitado, pendiente o rechazado para el uso en ese momento. Como se puede observar en la figura 6.6, el valor del campo *status*, puede ser aceptado, pendiente o rechazado [18].

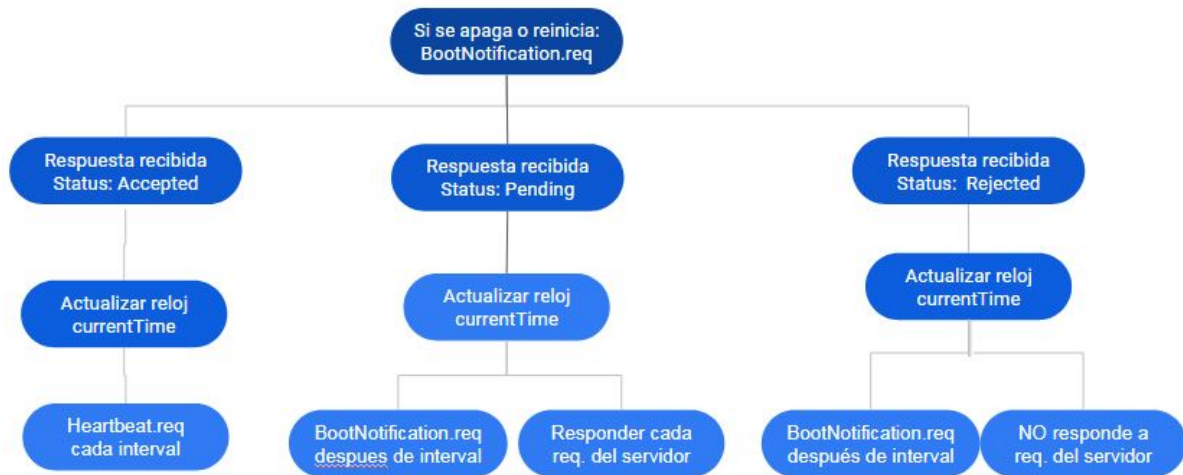


Figura 6.6: Lógica de encendido del SAVE [18].

- si es *Accepted* (aceptado) el siguiente mensaje enviado por el SAVE, será un *Heartbeat.req* entre lapsos de tiempo igual al valor *interval*.
- si es *Pending* (pendiente) el SAVE sólo responderá (.conf) a mensajes JSON comenzados (.req) desde el servidor, por un lapso de tiempo igual al valor *interval*. Después de pasado ese tiempo, el SAVE enviará un nuevo *BootNotification.req*.
- si es *Rejected* (rechazado) el SAVE no va a enviar ningún mensaje JSON, por un lapso de tiempo igual al valor *interval*. Después de pasado ese tiempo, el SAVE enviará un nuevo *BootNotification.req*.

Sin importar la respuesta del campo *status*, se observa que el SAVE actualiza su reloj, con el valor dado por la respuesta en el campo *currentTime* [61] [18].

6.6.2.2. Inicio o parada de una carga de VE.

Antes de iniciar una carga de un VE, el usuario deberá pasar su tarjeta por el lector del SAVE. El *IdTag* obtenido a través del lector, lo enviará el SAVE en el mensaje JSON *Authorize.req* para solicitar al servidor que confirme, en caso que el usuario solicite la carga, si el

6.6. Comunicación SAVE - vehículo eléctrico.

mismo está habilitado o no para hacerlo. Si el *status* es aceptado, se habilita la carga, pero si el *status* tiene un valor distinto, entonces se le muestra al usuario la razón del rechazo. Cuando el usuario quiera detener la carga, deberá pasar nuevamente su tarjeta por el lector del SAVE, y el proceso se repite, como muestra la figura 6.7 [18].

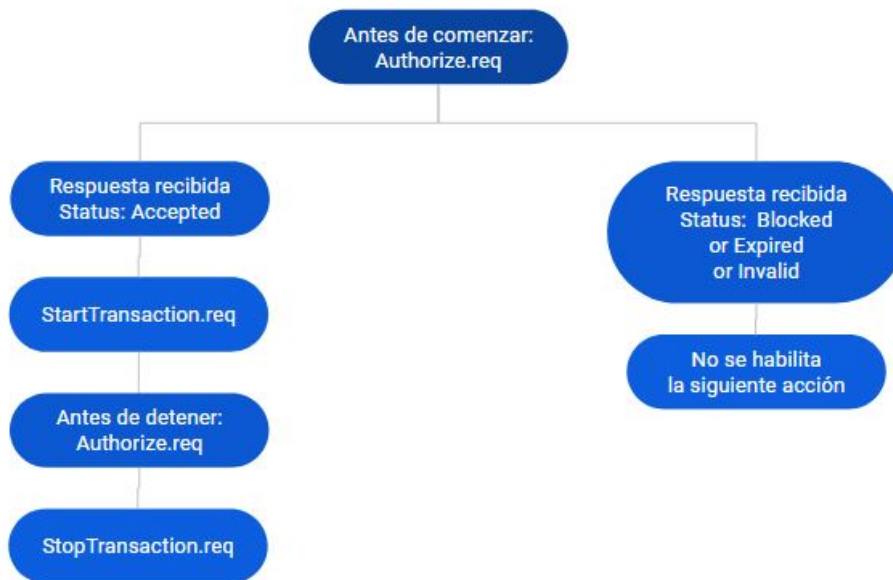


Figura 6.7: Lógica de autorización del usuario mediante el SAVE [18].

6.6. Comunicación SAVE - vehículo eléctrico.

Al recibir un mensaje en formato JSON MeterValues.req, el Sistema Central debe responder con un MeterValues.conf. El Sistema Central aplica controles de validez a los datos contenidos en un MeterValues.req que recibió. El resultado de tales comprobaciones no debe causar que el Sistema Central no responda con un MeterValues.conf. ya que esto solo hará que el punto de carga intente nuevamente el mismo mensaje como se especifica en Respuestas de error a mensajes relacionados con transacciones [18].

6.6.3. Protocolo SAE J1772.

En la presente sección se exponen las principales características de la norma SAE J1772, la cual es utilizada para el desarrollo de la comunicación entre el SAVE y el vehículo eléctrico (BEV). La comunicación entre el SAVE y el VE se da mediante el hilo piloto del circuito de control según la secuencia que se presenta en la tabla 6.4 extraída de la mencionada norma [61].

Designación de Estado	V_{SAVE} (V_{dc} Nominal)	V_{VE} (V_{dc} Nominal)	Descripción de SAVE/VE
Estado A	12,0V	0V	Sin vehículo conectado
Estado B1	9,0V	9,0V	Vehículo conectado, voltaje constante, el SAVE y el VE no están listos para la transferencia de energía.
Estado B2	9,0V	9,0V	Vehículo conectado, voltaje constante, el SAVE listo y el VE no para la transferencia de energía.
Estado C	6,0V	6,0V	Vehículo conectado, SAVE y EV listos para la transferencia de energía, no requiere ventilación.
Estado D	3,0	3,0V	Vehículo conectado, SAVE y VE listos para la transferencia de energía, requiere ventilación.
Estado E	0V	0V	SAVE fuera de servicio y vehículo desconectado
Estado F	-12V	-12V	Otros Problema con SAVE

Cuadro 6.4: Secuencia de Estados Según el Protocolo SAE. Extraído de la norma SAE J1772.

El protocolo SAE J1772 también establece que el cargador debe informarle al vehículo cual es su capacidad de carga máxima, para esto propone la utilización de una señal PWM de $\pm 12V$ y frecuencia 1kHz con un ciclo de trabajo variable. En la tabla tabla 6.5 se presenta la relación entre el duty cycle y la intensidad máxima admitida para la carga [61].

6.6. Comunicación SAVE - vehículo eléctrico.

SAVE Duty Cycle Nominal	Entrada al Vehículo	Máxima Corriente Máxima a Extraer por Vehículo
Duty Cycle = 0 %	Duty Cycle < 3 %	Estado Fo E carga no permitida
Duty Cycle = 5 %	$4,5 \% \leq \text{Duty Cycle} \leq 5,5 \%$	Indicio que la comunicación digital es necesaria
	$7 \% < \text{Duty Cycle} < 8 \%$	Estado de error, Carga no permitida
	$9,5 \% \leq \text{Duty Cycle} \leq 10 \%$	6A
$10 \% \leq \text{Duty Cycle} \leq 20 \%$	$10 \% \leq \text{Duty Cycle} \leq 20 \%$	Corriente Max = (Duty Cycle %) \times 0,6
$20 \% < \text{Duty Cycle} \leq 85 \%$	$20 \% < \text{Duty Cycle} \leq 85 \%$	Corriente Max = (Duty Cycle %) \times 0,6
$85 \% < \text{Duty Cycle} \leq 96 \%$	$85 \% < \text{Duty Cycle} \leq 96 \%$	Corriente Max = (Duty Cycle % - 64) \times 2,5
	$96 \% < \text{Duty Cycle} \leq 96,5 \%$	80A
Duty Cycle = 100 %		Estado B1, C1 o D1 carga no permitida

Cuadro 6.5: Duty Cycle del PWM vs Corriente de Carga Máxima. Extraído de la norma SAE J1772.

6.6.3.1. Implementación de circuitos según protocolo SAE J1772.

En la presente subsección se explican las condiciones que deben reunir los circuitos diseñados para cumplir con los requerimientos del protocolo SAE J1772 descrito anteriormente, así como el procedimiento que debe ser seguido para una correcta implementación. Adicionalmente, se muestran resultados de simulaciones realizadas para verificar un correcto funcionamiento.

En la figura 6.8 se presenta un circuito utilizado para la comunicación entre el SAVE y el vehículo eléctrico. El mismo funciona de acuerdo a lo requerido por el protocolo SAE, comandado por una señal PWM de 0 a 5 V con un duty cycle (ciclo de trabajo) ajustable. Para lograr la señal PWM que controla la salida, pueden ser utilizados distintos tipos de microprocesadores. En términos generales, el comportamiento del circuito se puede resumir en que se obtiene a la salida una señal PWM de $\pm 12V$ (en vacío) a partir de una señal de 0 a 5 V en la entrada, teniendo la salida el mismo duty cycle que la señal de entrada. Para obtener una salida de $\pm 12V$ puede ser utilizada una rama inversora, implementada con un transistor PMOS y un NMOS, referida al punto medio de dos fuentes de 12V conectadas en series como se observa en la figura 6.8 [18].

El circuito de control de los mosfet suele estar diseñado para que los mismos operen en zona de corte o en zona lineal dependiendo del valor de la entrada. Con el control se logra que la salida sea 12V cuando la señal de entrada está en 0V y -12 cuando está en 5V. Este modo de operación se debe a que la salida debe ser de 12V constante cuando no haya vehículo conectado al cargador, de esta manera la señal de control permanece en cero mientras el cargador no esta siendo utilizado [18].

Respecto a los transistores, los mosfets del circuito representado en la figura 6.8 trabajan en la zona de corte o en la zona lineal, para esto la tensión drain-source (V_{ds}), la tensión de gate-source (V_{gs}) y la tensión de gate umbral V_{T_o} deben cumplir las condiciones presentadas en

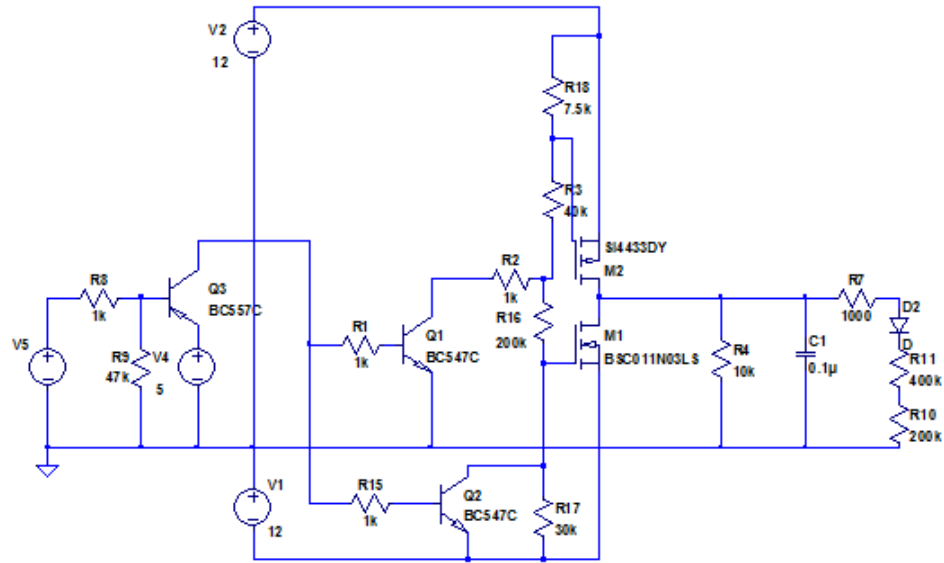


Figura 6.8: Circuito interno del SAVE conforme al protocolo SAEJ1772

la tabla 6.6 [61].

Transistor	Zona de Corte	Zona Lineal
NMOS	$V_{gs} \leq V_{T_o}, V_{ds} > 0$	$V_{gs} > V_{T_o}, 0 < V_{ds} < V_{gs} - V_{T_o}$
PMOS	$V_{gs} \geq V_{T_o}, V_{ds} < 0$	$V_{gs} < V_{T_o}, 0 > V_{ds} > V_{gs} - V_{T_o}$

Cuadro 6.6: Condiciones de operación Mosfet. Extraído de la norma SAE J1772.

6.6.3.2. Visualización del comportamiento del circuito.

En la figura 6.9 se presenta una simulación del comportamiento del circuito descrito en la sección anterior con la salida en vacío y con un duty cycle de 0,75 %. En la misma, puede verse que la salida es 12V cuando la entrada es 0V y es -12V cuando la entrada es 5V [61].

6.6. Comunicación SAE - vehículo eléctrico.

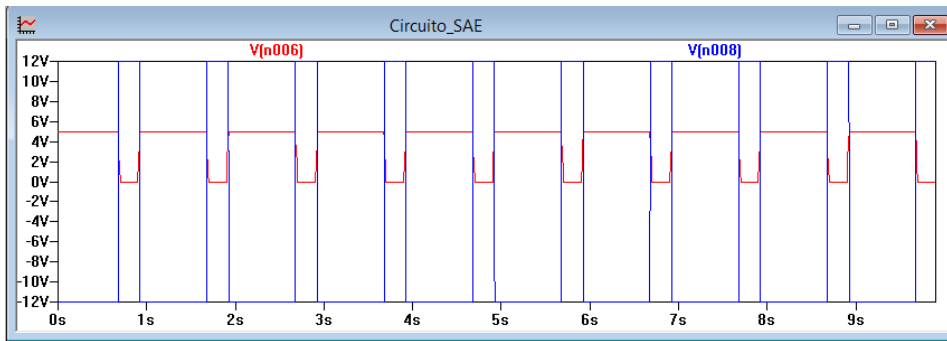


Figura 6.9: Simulación Circuito de Comunicación SAE en Vacío (SAE J1772).

En la figura 6.10 se presenta una simulación del comportamiento del circuito de comunicación SAE cuando se conecta un VE. Como se puede observar la salida pasa a ser 9V cuando la señal de entrada es 0V mientras que sigue siendo $-12V$ con la entrada en 5V, esto se debe al diodo que presenta en la conexión de entrada el vehículo eléctrico [61].

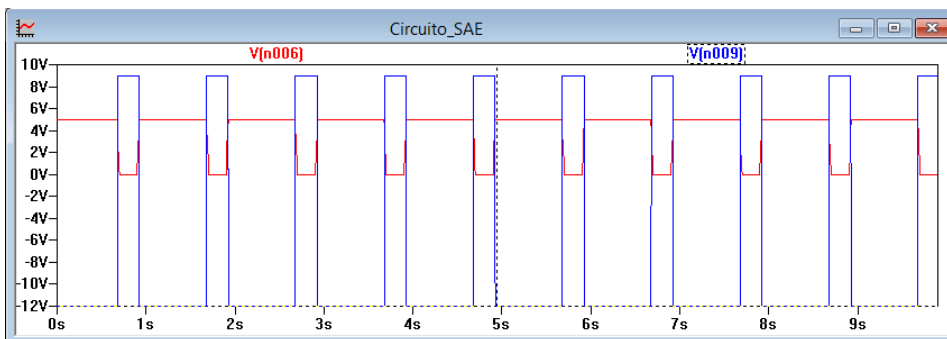


Figura 6.10: Simulación Circuito de Comunicación SAE Conectado al Vehículo (SAE J1772).

En la figura 6.11 se puede observar como la salida pasa a ser 6V cuando el vehículo conecta la resistencia que indica que esta listo para ser cargado [61].

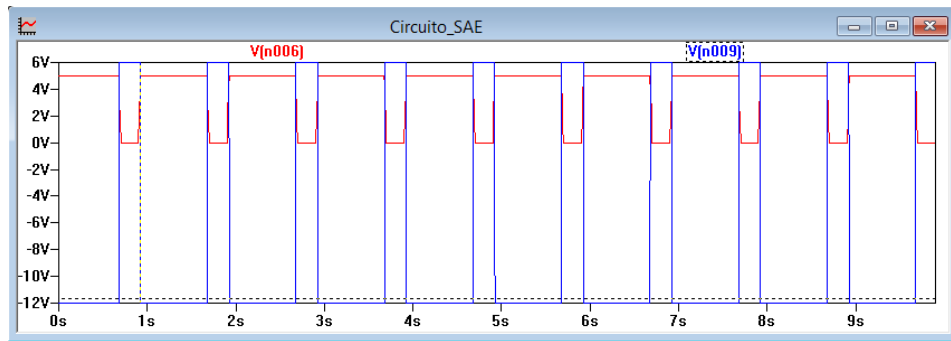


Figura 6.11: Simulación Circuito de Comunicación SAE con el Vehículo Listo para Cargar (SAE J1772).

6.6.4. Protocolo de comunicación en modo V2G.

El estándar ISO/IEC 15118 fue creado en 2009 con el fin de cubrir la necesidad de disponer de un estándar internacional complementario al IEC61851-1, que proporcione comunicación digital bidireccional entre el vehículo eléctrico y la red, basado en protocolos de Internet. El objetivo principal de la norma 15118 es establecer un mecanismo de control de carga más avanzado y que funcione de manera autónoma entre los VE y las infraestructuras de carga. El estándar se encuentra actualmente en desarrollo y se entiende que proporcionará medios para distintos esquemas de autenticación (por ejemplo, tarjetas RFID), manejo automático de servicios de carga, así como servicios de valor agregado, programación de cargas, planificación anticipada, etc. Está estructurado de acuerdo con el modelo OSI (open system interconnection) de la norma ISO7498-1. El estándar 15118 es de interés para la Open Charge Alliance, ya que proporciona la planificación de intercambio de energía y permite controlar la cantidad de energía que un EV puede obtener de una estación de carga, en la que es necesaria alguna forma de comunicación entre el vehículo y la red. De esta norma, es especialmente destacable la segunda parte, que especifica los mensajes que se intercambiarán entre los participantes del intercambio, los datos asociados y los tipos de datos via TCP/IP. La autorización para el cobro se proporciona ya sea por medio de identificación externa (EIM por sus siglas en inglés) como una tarjeta RFID, o por el mecanismo Plug and Charge (PnC) que utiliza un certificado de pre-contrato, eliminando la necesidad de otros medios de autorización.

La serie ISO 15118 se compone de los siguientes capítulos:

- ISO 15118-1: 2019 Vehículos de carretera. Interfaz de comunicación vehículo a red. Parte 1: Información general y definición de caso de uso.
- ISO 15118-2: 2014 Vehículos de carretera. Interfaz de comunicación de vehículo a red. Parte 2: Requisitos del protocolo de red y aplicación.
- ISO 15118-3: 2015 Vehículos de carretera. Interfaz de comunicación de vehículo a red. Parte 3: Requisitos de la capa de enlace físico y de datos.

6.6. Comunicación SAVE - vehículo eléctrico.

- ISO 15118-4: 2018 Vehículos de carretera. Interfaz de comunicación de vehículo a red. Parte 4: Prueba de conformidad del protocolo de red y aplicación.
- ISO 15118-5: 2018 Vehículos de carretera. Interfaz de comunicación de vehículos a la red. Parte 5: Pruebas de conformidad de la capa de enlace físico y de datos.
- ISO 15118-8: 2018 Vehículos de carretera. Interfaz de comunicación de vehículo a red. Parte 8: Requisitos de la capa física y de la capa de enlace de datos para la comunicación inalámbrica.

En resumen, el estándar ISO 15118, que es tomado por la Open Charge Alliance y por el código OCPP, es aplicable a la transferencia de energía desde el SAVE al VE o desde la batería del VE al SAVE, ya sea para suministrar energía al hogar, a otras cargas, o a la red. Este documento proporciona una visión general y una comprensión común de los aspectos que influyen en la identificación, asociación, control de carga o descarga y optimización, pago, nivelación de carga, ciberseguridad y privacidad. Sin embargo, la norma ISO15118 no especifica la comunicación interna del vehículo entre la batería y su equipamiento interno como por ejemplo el cargador, inversor, etc.

Capítulo 7

Análisis Técnico del V2G

7.1. Introducción.

Uno de los posibles beneficios de los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) o de los vehículos eléctricos a batería (BEV) es proporcionar electricidad en modo inverso (V2G) para uso fuera del vehículo cuando está estacionado. Dentro de los posibles beneficios de esta modalidad están los servicios auxiliares, suavizar la generación variable de energía eólica y otras energías renovables (peak shaving), y proporcionar almacenamiento distribuido conectado a la red como reserva contra cortes inesperados, además de la función de almacenamiento off-grid. Para determinar la viabilidad de este tipo de aplicación, es fundamental cuantificar el efecto en la degradación y el rendimiento de las baterías. La mayoría de las mediciones anteriores han indicado que la capacidad de la batería de iones de litio disminuye como resultado de los ciclos, y la magnitud de esta pérdida depende tanto del número de ciclos como de la profundidad de descarga (DoD) a la que se somete la batería durante estos ciclos [2]. Si bien estas características se comprenden bien para las celdas a base de LiNiCoO₂ / grafito utilizadas en el mercado de la electrónica de consumo (así como para los sistemas de plomo ácido y NiMH), hay muchos menos datos publicados para la generación actual y futura de celdas, las que pueden tener una amplia adopción en los paquetes de baterías de PHEV y BEV. Los datos que se han publicado indican que es posible hacer celdas de iones de litio con mucha menos capacidad de desvanecimiento y dependencia de la profundidad de descarga de lo que se supone comúnmente [3]. Sin embargo, estos resultados son insuficientes para determinar la economía de las ventas de energía V2G porque provienen de ciclos que no son representativos del uso de la batería para conducir y el uso de la batería para la energía de la red. Para proporcionar datos más representativos, en este trabajo se examinó la degradación de la batería de una celda que ya se está implementando en el paquete de baterías PHEV Hymotion (una conversión de PHEV del mercado de accesorios), la celda ANR26650M1 del fabricante de los sistemas A123. Se examinó la respuesta de múltiples conjuntos de estas celdas (de diferentes lotes) para medir su comportamiento tanto en conducción simulada como en conducción combinada / modos de venta de energía V2G. El objetivo final es determinar el rendimiento y los costos financieros asociados con el ciclado de baterías para el uso de energía V2G en combinación con ciclos de

conducción típicos de PHEV o BEV. Las simulaciones de patrones de descarga han permitido determinar si existe una diferencia entre la descarga dinámica (que representa la conducción del vehículo) y la descarga a corriente constante que representa la entrega de energía eléctrica a la red.

7.2. Descripción general del sistema V2G.

V2G (del inglés *vehicle-to-grid*) o simplemente vehículo a la red, refiere a un sistema en el que los vehículos eléctricos enchufables, como ser los vehículos eléctricos a batería (BEV), los híbridos enchufables (PHEV) o los vehículos eléctricos de pila de combustible de hidrógeno (FCEV), se conectan a la red de forma tal que se produce el proceso inverso a la recarga de sus baterías, entregando energía eléctrica a la red, además de ser recargados mediante la misma conexión eléctrica pero en instantes diferentes. El sistema V2G permite que los vehículos eléctricos tomen y entreguen energía eléctrica a la red, la cual puede ser generada a partir de fuentes de energía renovables (como solar o eólica), con una producción que fluctúa según el clima y la hora del día. Si bien la participación de energías renovables no es un requisito excluyente para el funcionamiento del vehículo eléctrico en modo V2G, se asume muy conveniente ya que suele ser relacionado con la minimización de los consumos de energía eléctrica en horarios pico y la entrega de remanentes durante el valle ("*peakshaving*" y "*valleyfilling*" por sus términos en inglés).

El modo V2G se implementa mediante vehículos eléctricos conectados a la red a través de un conector estandarizado y un sistema de alimentación bidireccional. Dado que en ciertos momentos los automóviles eléctricos se encuentran estacionados, éstos pueden usarse para permitir que la electricidad fluya desde la batería del vehículo eléctrico a la red de eléctrica de distribución y viceversa. Un posible esquema de conexión se presenta en la figura 7.1, donde se muestra la figura de un vehículo eléctrico conectado a la red mediante un cargador bidireccional. La red a la que se vincula el vehículo eléctrico mediante el cargador bidireccional puede ser la red eléctrica de un hogar, la red de un edificio o puede ser asimismo una red de distribución pública. Además de los flujos de energía en ambos sentidos, se representan los flujos de comunicación entre el vehículo eléctrico y el SAVE, el cual se comunica además con la central de distribución a los efectos de controlar adecuadamente los procesos de carga y descarga de la batería.

7.2. Descripción general del sistema V2G.

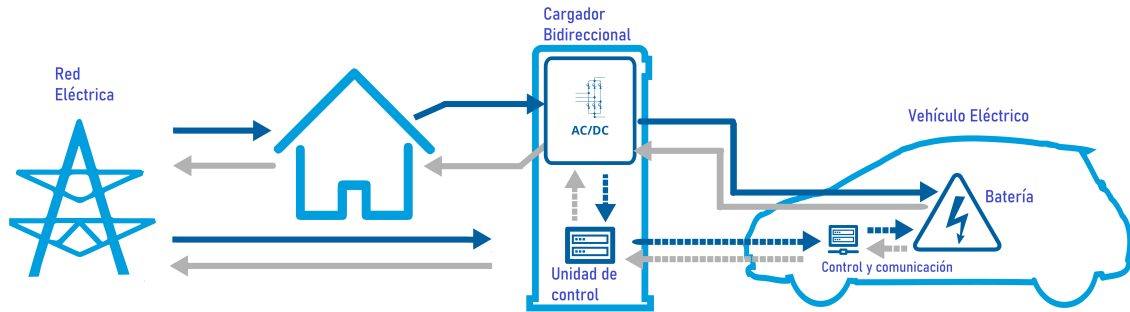


Figura 7.1: Posible esquema de conexionado de un sistema V2G con sus principales componentes y flujos de energía y comunicación. Elaboración propia.

Las baterías de los vehículos eléctricos tienen un número finito de ciclos de carga y descarga, así como una vida útil en términos temporales, por lo que el uso de vehículos como almacenamiento en la red puede afectar el estado de salud de la batería, lo cual se encuentra bajo estudio. Una de las posibles hipótesis plantea que si se realizan ciclos en la batería dos o más veces al día, bajaría la capacidad y acortaría la vida útil. Sin embargo, la capacidad de la batería es una función compleja de factores como la química de la batería, la velocidad de carga y descarga, la temperatura, el estado de carga y la antigüedad en términos de pasaje del tiempo aún con la batería sin ser usada. Dado que la tasa de descarga podría influir en la degradación de las baterías, la entrega de energía a la red podría implicar un impacto reducido en la batería si la tasa es lenta. Se ha reportado incluso en ciertos trabajos científicos [23] que el uso de vehículos eléctricos en modo V2G podría mejorar la vida útil de sus baterías bajo ciertas circunstancias muy particulares.

Dentro del esquema de funcionamiento del sistema en modo V2G, se hace necesario identificar las franjas horarias en las cuales el vehículo se conecta a la red para tomar energía y recargar sus baterías, así como también las franjas horarias en las cuales el vehículo se encuentra disponible para entregar energía a la red. Para llevar adelante la identificación de estas franjas horarias, la Encuesta Nacional de Viajes del Reino Unido 2006-2010 [62] ofrece patrones de viaje para 1,4 millones de viajes en Londres. Las características medias del viaje en cuanto a velocidad, distancia recorrida y duración son 29 km/h, 11 km y 0,38 h, respectivamente. Dentro de los resultados de esta encuesta se encuentra que la mayoría de los viajes por la mañana comienzan a las 08:00 hs. y que por la tarde comienzan a las 15:00 hs., y asume que ambos viajes del día tienen las mismas características de velocidad, distancia recorrida y duración. A partir de dicha encuesta, se generó una distribución que ilustra tanto la probabilidad de encontrar un determinado vehículo bajo conducción, así como también encontrarlo estacionado [20] en cualquier momento del día entre las 00:00 y las 24:00 horas. El resultado se muestra en la figura 7.2.

7.3. Instalaciones eléctricas requeridas para el V2G.

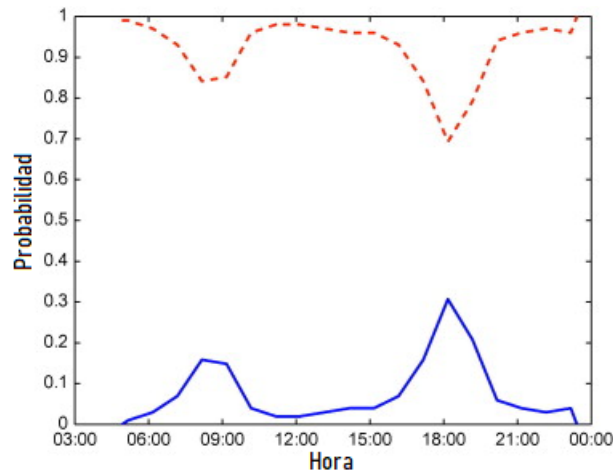


Figura 7.2: Probabilidad de que el vehículo se encuentre bajo conducción (azul, fijo) o detenido (rojo, discontinuo). Fuente: [20].

Examinando las probabilidades de encontrar un vehículo tanto en situación de manejo como en situación de reposo, puede ser inferido que los horarios en los cuales la disponibilidad para la conexión en modo V2G es mayor sería tanto en la franja horaria correspondiente a la madrugada y noche (entre las 20:00 hs. y las 08:00 hs. del siguiente día, aproximadamente), así como además el horario correspondiente al entorno del mediodía entre las 11:00 y las 15:00 horas, aproximadamente. Hay que considerar que en tales franjas horarias el vehículo debe ser también recargado, reduciendo significativamente el margen horario para entregar energía a la red eléctrica.

7.3. Instalaciones eléctricas requeridas para el V2G.

Las instalaciones eléctricas que se requieren para realizar la conexión en modo V2G consta de un sistema de alimentación de vehículo eléctrico (SAVE) con capacidad de realizar la operación inversa a la recarga, es decir, apto para volcar energía eléctrica de la batería del vehículo a la red eléctrica. Este sistema es responsable de extraer energía de la red y almacenarla adecuadamente en el paquete de baterías a bordo del vehículo eléctrico, y también de la operación inversa, pudiendo realizar la entrega a la red de la energía almacenada en la batería, así como también, en algunos casos, la ejecución de servicios auxiliares tales como el control de tensión y frecuencia o la compensación de energía reactiva. Las características técnicas de los cargadores bidireccionales fueron presentadas en la sección 6.5.3 del capítulo 6.

Por otra parte, en relación a la vinculación de las líneas de transmisión, las líneas de distribución y los diferentes tipos de cargas (entre los que se encuentran los vehículos eléctricos y otro tipo de cargas y generadores distribuidos), la figura 7.3 presenta un esquema típico que representa el conexionado y funcionamiento del modo vehicle-to-grid, V2G. El mismo consta de una serie de centrales de generación, las cuales se vinculan mediante transformadores a líneas

7.3. Instalaciones eléctricas requeridas para el V2G.

de transmisión. Mediante transformadores también, las líneas de transmisión se vinculan con líneas de distribución a las cuales se conectan, a su vez, módulos de generación distribuida (eólicas, solares o de otra naturaleza), las que inyectan energía a la red de distribución. Por otra parte, se muestra en el esquema un consumo residencial que toma de la red energía eléctrica, y también un centro de recarga de vehículos eléctricos el cual toma energía de la red en ciertos horarios y vuelca energía a la red en otros.

El centro de recarga del vehículo eléctrico, en este caso, es presentado como una instalación dedicada a tal fin, la cual permite tanto la recarga del vehículo eléctrico como la entrega de energía eléctrica a la red. Cabe indicar que el diagrama presentado en la figura 7.3 es un esquema de conexión ilustrativo, entre otros posibles. A modo de ejemplo, un sistema V2G puede estar asociado a un consumo residencial que permita la entrega de energía a la red, además de permitir el consumo para la recarga de la batería. Del mismo modo, la generación solar y eólica en particular, o la generación distribuida en general, pueden estar asociados al consumo residencial, siempre que exista en la residencia las instalaciones eléctricas que permitan el flujo bidireccional, así como también los elementos de seguridad y medición que correspondan.

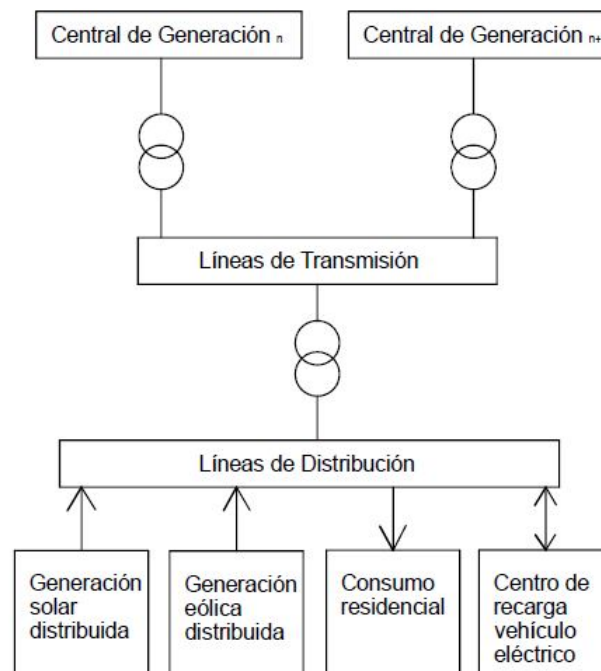


Figura 7.3: Esquema general del conexionado y funcionamiento del V2G. Elaboración propia.

Una instalación eléctrica de carácter residencial dispuesta a tales fines es presentada en la figura 7.4, la cual se representa mediante un diagrama unifilar, donde algunos elementos de control y accionamiento han sido omitidos para una mejor visualización. En la imagen presentada, el vehículo eléctrico está conectado a una red eléctrica trifásica mediante un conector estanda-

7.3. Instalaciones eléctricas requeridas para el V2G.

rizado que deriva del sistema de alimentación del vehículo. Además de la alimentación trifásica, que incluye el neutro en la instalación ejemplificada, se observa en el diagrama un interruptor termomagnético y un interruptor diferencial, más un medidor bidireccional de energía capaz de medir el flujo de energía en ambos sentidos (energía entregada a la red y energía tomada de la red), el cual podrá contar con un módem para realizar la telemedición. Estos elementos pueden estar incorporados al sistema de alimentación del vehículo eléctrico que se conecta a su vez a la red eléctrica de distribución. Para el caso de un vehículo eléctrico diseñado para volcar corriente continua a la red, además de los elementos provistos en el diagrama deberá incorporarse un inversor DC/AC el cual deberá contar con protecciones adicionales.

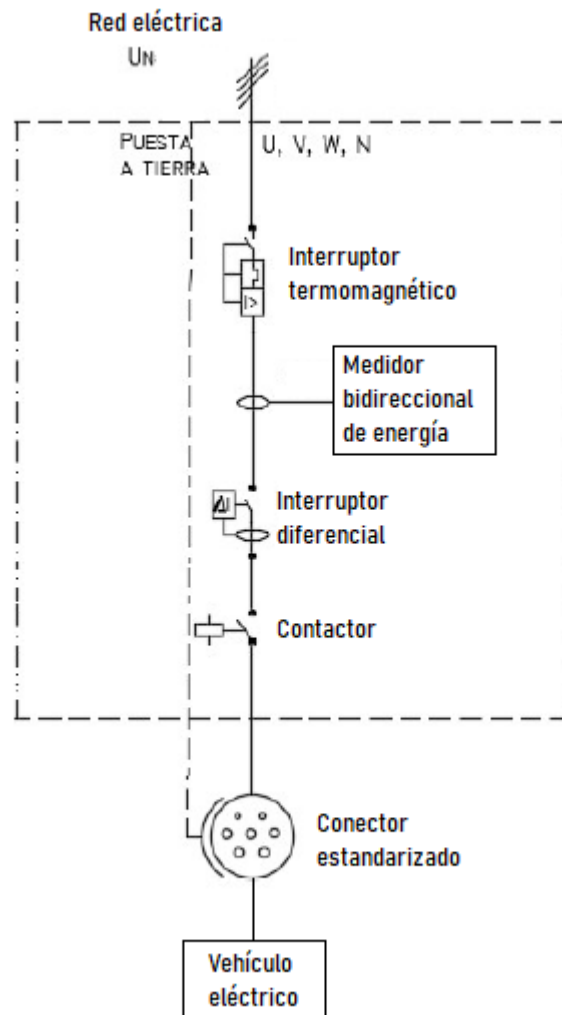


Figura 7.4: Esquema básico de una instalación eléctrica para la recarga en modo V2G.
Elaboración propia.

7.3. Instalaciones eléctricas requeridas para el V2G.

Si bien en Uruguay no está de momento permitida la entrega de energía eléctrica desde un vehículo a la red de UTE, la reglamentación admite el almacenamiento para autoconsumo, lo cual está reglamentado en el Capítulo XXIX del Reglamento de Baja Tensión. Tal reglamento se refiere a los requisitos técnicos que deben cumplir las Instalaciones para Autoconsumo, constituidas por una Instalación Acumuladora (por ejemplo, baterías de iones de litio u otra tecnología) y/o una Instalación Generadora, en instalaciones interiores de suscriptores, para su conexión en paralelo con la Red de Distribución de Baja Tensión perteneciente a UTE y sin inyectar energía eléctrica a la red. La figura 7.5 presenta el unifilar de la instalación orientativo que se propone en el Capítulo XXIX del Reglamento. El unifilar contempla la instalación de una Instalación Generadora (IG), como puede ser, por ejemplo, una planta solar o fotovoltaica, y una Instalación de Almacenamiento (IA), pudiendo instalarse solo una de estas o eventualmente ambas en un mismo ramal.

7.3. Instalaciones eléctricas requeridas para el V2G.

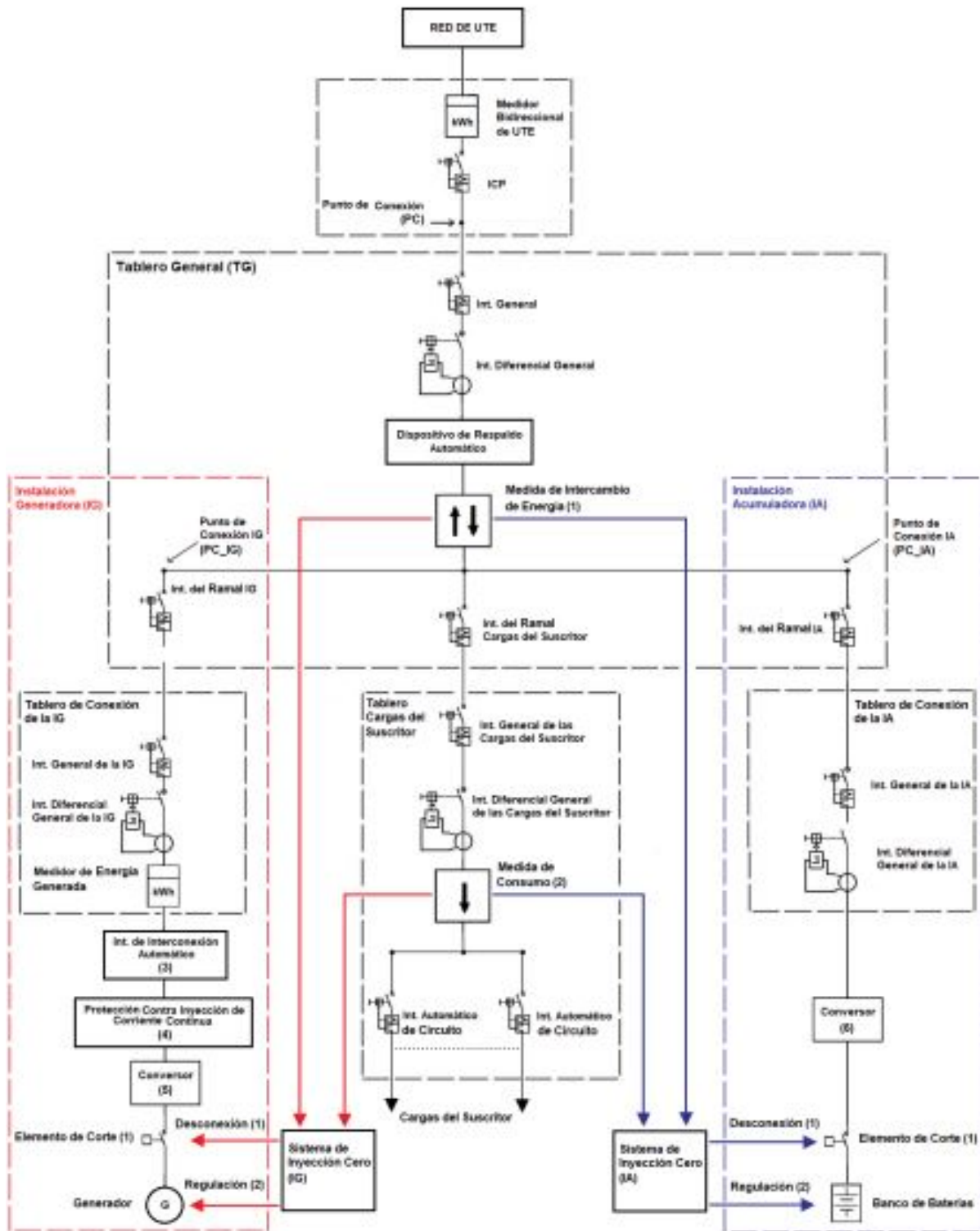


Figura 7.5: Esquema unifilar orientativo propuesto en el Capítulo XXIX del Reglamento de Baja Tensión de UTE.

7.3. Instalaciones eléctricas requeridas para el V2G.

Se destaca que la instalación de autoconsumo (IAC) podrá funcionar normalmente conectada en paralelo con la Red de UTE, sin inyectar energía eléctrica a la red. La IAC puede ser utilizada como respaldo del suministro del Suscriptor, cuando la instalación interior esté desconectada de la Red de UTE.

El punto de conexión (PC) de la IG y de la IA deberán implementarse con una bornera o juego de barras, sin ser admitida la conexión utilizando los bornes de los interruptores. Cada ramal de la IAC (IG o IA) se conectará en único punto físico a la instalación interior del Suscriptor, mediante un interruptor termomagnético. Se establece que el Suscriptor puede disponer de Conversores híbridos (con entradas en continua para generación y almacenamiento de energía eléctrica) que se conecten en un único punto al resto de la instalación interior. La conexión debe respetar los requisitos establecidos en el mencionado Capítulo y contar con la aprobación de UTE.

Cabe señalar que en el reglamento de UTE se establece la obligación de un sistema de inyección cero que impida la inyección a la red eléctrica. El sistema de inyección cero se podrá implementar mediante una de las siguientes opciones:

- Desconexión de la IAC mediante un elemento de corte.
- Regulación de la energía entregada por la IAC.

Este sistema podrá realizar el control sobre toda la instalación interior o parte de la misma siempre que incluya a la IAC. En todo momento, la potencia consumida por la instalación interior del Suscriptor ser superior a la potencia entregada por la IAC. El incumplimiento de este requisito, si ocurriese, debe ser corregido en un tiempo inferior a 2 segundos.

En relación a los armónicos y compatibilidad electromagnética, se establecen en el Reglamento ciertos requerimientos de calidad de onda para las Unidades Generadoras y para las Unidades Acumuladoras. Cada Unidad Generadora y Unidad Acumuladora deberá cumplir con las normas indicadas en la tabla de la figura 7.6.

CORRIENTE ASIGNADA DE UNIDAD GENERADORA Y UNIDAD ACUMULADORA	FLICKER	ARMÓNICOS DE CORRIENTE
Hasta 16 A	IEC 61000-3-3	IEC 61000-3-2
Mayor a 16 A, hasta 75 A	IEC 61000-3-11	IEC 61000-3-12
Mayor a 75 A	IEC 61000-3-5	IEC 61000-3-4

Figura 7.6: Requisitos sobre armónicos y compatibilidad electromagnética establecidos en el Capítulo XXIX del RBT de UTE.

En relación a los requerimientos de calidad de onda en el PC, a los efectos de preservar la calidad de onda en el PC, las emisiones de corriente armónica en el PC no deberán superar los valores establecidos en la siguiente tabla de la figura 7.7.

DISTRORSIÓN ARMÓNICA DE CORRIENTE MÁXIMA EN PORCENTAJE DE CORRIENTE						
$I_{h\text{máx}}$ (% de I) - (IEEE 519-2014, Tabla 2)						
	Orden del armónico individual h (impares)					
$I_{CC\text{máx}} / I$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Figura 7.7: Requisitos sobre armónicos y compatibilidad electromagnética establecidos en el Capítulo XXIX del RBT de UTE.

Donde ICC máx es la corriente máxima de cortocircuito trifásico en el PC debido al aporte de la Red de UTE, expresada en Amperes. Para armónicos pares el límite es el 25 % del correspondiente a los impares, según lo establecido en la Norma IEEE 519-2014. En caso de un Suscriptor con suministro monofásico, el valor de corriente I, expresado en A, se calcula como $I = P_{\text{contratada}}/U_n$, considerando la tensión nominal y adoptando un factor de potencia igual a la unidad. Finalmente, dentro de los requisitos mandatorios, se establece que la IAC no provocará en el PC eventos de tensión por fuera de los límites establecidos por la curva de tolerancia ITI (CBEMA) y la curva definida en la norma ANSI C84.1.

Si bien este sistema no permite la inyección a la red (V2G), es una instalación que permitiría el autoconsumo, obteniendo beneficios económicos asimilables al funcionamiento en modo V2G. Tal beneficio estaría dado por tomar de UTE energía en el valle y realizar autoconsumo fuera del valle. En caso de realizar la operación con un VE, deberían ser cumplidos todos los requerimientos técnicos establecidos.

7.4. Impactos del V2G sobre la batería del vehículo eléctrico.

7.4.1. Introducción.

En la presente sección se describen y analizan los principales impactos sobre las baterías de los vehículos eléctricos, como consecuencia de su utilización en modo V2G. Para esto, se realizó un relevamiento de la bibliografía científica disponible, extrayendo las conclusiones más representativas desde el punto de vista de la batería del vehículo eléctrico y excluyendo de forma deliberada los impactos que puedan ser observados sobre las redes eléctricas, lo cual se encuentra fuera del alcance del presente trabajo.

7.4. Impactos del V2G sobre la batería del vehículo eléctrico.

Dentro de las variables que son utilizadas para medir la degradación o envejecimiento de las baterías, es habitual encontrar el Estado de Salud (SoH) como fue presentado en 3.3.8, el cual compara la salud en un momento dado al cabo de n ciclos, con la salud inicial de la batería. A la hora de cuantificar los efectos sobre la batería de un vehículo eléctrico debido al V2G, se consideran la pérdida de capacidad (capacity fade, CF), el aumento de la resistencia interna y la pérdida de potencia (power fade, PF), factores que conducen a perjuicios en el desempeño del vehículo durante los ciclos de conducción.

Un estudio que evalúe la degradación por el uso de las baterías en modo V2G ha de considerar la evolución de la salud de las baterías sólo en modo conducción, sin V2G, y comparar tal evolución con el mismo caso si se aplicara el modo V2G, el cual incluye en sí mismo el modo conducción. Estas condiciones de uso y almacenamiento deben ser adecuadamente comparadas entre sí con el fin de evaluar la magnitud del impacto de los diferentes usos sobre las baterías de los vehículos eléctricos. Del mismo modo, para evaluar el impacto del V2G en la batería, el ciclo de conducción debe ser siempre el mismo para realizar un análisis adecuado. Tanto la capacidad utilizable de una batería como la fracción del paquete utilizado para la conducción diaria son parámetros relevantes para el buen desempeño de la batería de un vehículo eléctrico, mientras que el costo del ciclo de vida así como también el balance neto global de energía, dependerán de cómo se degrada el paquete en función del modo de uso. Debe ser notado que la degradación de las celdas tiene fuerte dependencia asimismo con la temperatura de operación de las baterías, con la química de las celdas y con las condiciones de almacenamiento cuando el vehículo se encuentra aparcado durante cierto período de tiempo.

En el presente capítulo se exponen tanto los hallazgos científicos en términos de impactos positivos o favorables, como también en términos de impactos negativos o perjudiciales. En cada una de las subsecciones se presentan las referencias correspondientes que avalan una y otra exposición.

7.4.2. Principales impactos negativos del modo V2G sobre la batería del vehículo eléctrico.

Como ha sido señalado en el Capítulo 3, un gran número de trabajos relativos a la degradación de celdas de iones de Litio ha indicado que su capacidad disminuye como resultado del ciclado dependiendo, entre otros factores, del número de ciclos y de la profundidad de descarga (DoD) a la que se somete la batería a lo largo de su vida útil. Por tal motivo, considerando que se asume un ciclo completo con un DOD igual a 80 %, podría ser esperado que el vehicle-to-grid ocasione mayor nivel de degradación en las celdas que el funcionamiento normal, lo cual es analizado en la presente sección.

El grado de avance en la tecnología actual muestra que los vehículos eléctricos y los vehículos eléctricos híbridos enchufables pueden proporcionar energía del vehículo a la red, así como también servicios auxiliares a la red eléctrica [63] [64]. El impacto en varias características de la batería mientras se brindan dichos servicios puede presentar cualidades adversas en relación a la degradación de las baterías debido al modo V2G, dependiendo de qué manera se lleve adelante tal intercambio de energía y la prestación del servicio. El impacto de los servicios V2G en la degradación de la batería de los vehículos eléctricos, para diferentes capacidades de batería,

para diferentes regímenes de carga, descarga y profundidad de descarga de la batería ha sido analizada por diversos autores [20] [65] [66], encontrándose impactos negativos de diversa índole.

7.4.2.1. Impacto de los ratios adversos de carga y descarga (C-rate).

Parte de la bibliografía consultada [67] [68] da indicios de que las altas corrientes, tanto de carga como de descarga, pueden acelerar el proceso de degradación de las baterías de iones de litio. Sin embargo, los valores de estos parámetros (tanto del C-rate de carga como del C-rate de descarga) suelen estar limitados en implementaciones de V2G, por lo que sus impactos en el proceso de degradación de la batería pueden ser considerados muy menores e incluso ser despreciados en la mayoría de los escenarios.

A modo de ejemplo, para una celda NMC estudiada bajo condiciones isotérmicas [21], se encontró que la tasa de corriente de carga en tal condición de temperatura no influyó en la degradación total, dentro del rango de corrientes 0.33C–2C. Este resultado es presentado en la figura 7.8, en la cual se realizó un ajuste con un polinomio lineal de primer orden. Se puede ver que las pendientes prácticamente coinciden, lo cual permite a los autores afirmar que la influencia de las tasas de carga aplicadas tienen escasa incidencia en la degradación de esta celda en particular, a temperatura constante. Se realizó el mismo análisis para las diferentes tasas de corriente de descarga, llegándose a la misma conclusión.

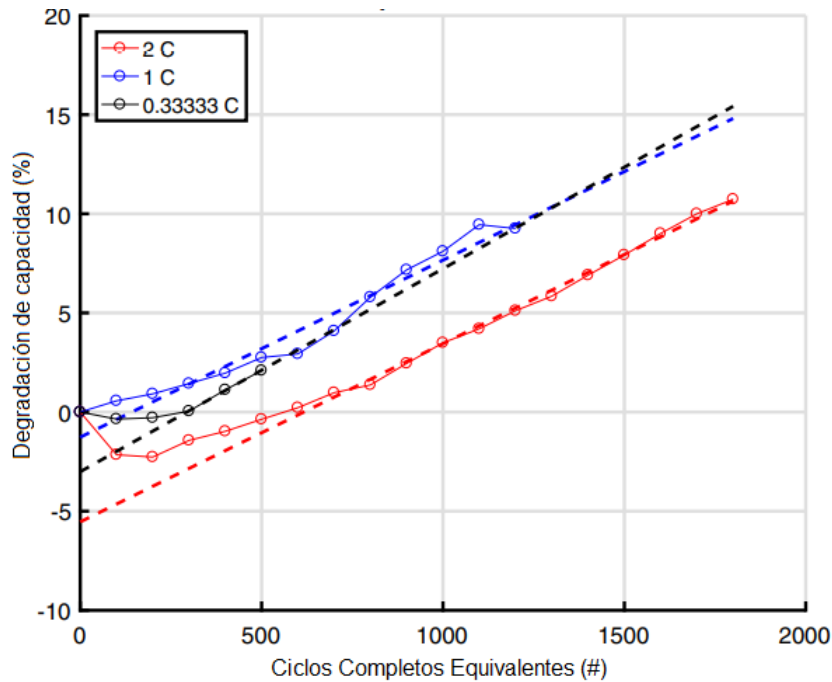


Figura 7.8: Ajuste lineal de las curvas de influencia de la tasa de corriente de carga sobre la degradación de la celda NMC. Fuente: [21].

7.4. Impactos del V2G sobre la batería del vehículo eléctrico.

La figura muestra que la incidencia del C-rate durante la recarga a lo largo de los ciclos completos equivalentes (FEC o Full Equivalent Cycle por su terminología en inglés) presenta magnitudes despreciables en el rango de $C/3$ a $2C$, sobre la degradación de capacidad (RCD o Relative Capacity Degradation por su terminología en inglés). En este estudio, la degradación de la capacidad es un vector promedio de valores de capacidad para cada condición de ensayo, normalizado con respecto al valor de capacidad en su estado inicial (Begin of Life o BOL). Esto significa que todos los resultados que se mostrarán representan la degradación de la capacidad en relación con el 0% (celda nueva) hasta el 20% (celda desechable). Por su parte, el ciclo completo equivalente, consiste en una carga y descarga completas hasta alcanzar la cantidad de carga (Ah) correspondiente al SoH en un momento dado de la vida de la celda o batería.

El resultado presentado anteriormente tiene sentido, como se indicó, cuando las tasas de carga y en particular, de descarga, se ven limitadas por sistemas de control que establezcan los topes correspondientes, lo cual puede ser esperable en un modo de operación V2G en el cual el C-rate sea ajustado. En situaciones en las que el C-rate se aparte de los valores anteriormente especificados (para fijar ideas, C-rates que superen el $3C$), la degradación de las baterías de los vehículos eléctricos puede verse aumentada significativamente, acorde a lo presentado anteriormente en la sección 3.5.1.4.

7.4.2.2. Efecto adverso de la temperatura en el modo V2G.

Como fue presentado en la sección 3.5.1.1, ha sido verificado que el aumento en la temperatura de operación de una celda o batería implica una reducción significativa en el estado de salud (SOH) del elemento, es decir, un aumento en la degradación.

La pérdida de capacidad de las baterías de iones de litio se debe, en parte, al crecimiento de la resistencia de la película del electrodo, lo cual se acelera con la temperatura ambiente elevada [39]. Sin embargo, algunos experimentos sugieren que la vida de las baterías de iones de litio no cambiaría significativamente al trabajar dentro de las temperaturas normales de funcionamiento [68], lo cual podría ser factible verificar y/o controlar en algunas de las implementaciones de funcionamiento en modo V2G.

Por otro lado, como fue mencionado anteriormente, las tasas de carga y descarga suelen ser bajas en aplicaciones V2G y provocan variaciones de temperatura interna no relevantes. En tales circunstancias, este factor puede despreciarse en el modelo de degradación de la batería [69], siempre y cuando exista el debido sistema de control que tome los correspondientes recaudos y evite que los límites de temperatura especificados sean excedidos.

Un sistema de control de temperatura para el modo de funcionamiento V2G es esperable que sea implementado en cualquier instalación destinada a tales fines y es esperable que un vehículo que admita el V2G o el V2X lo implemente. Por una parte, los BMS de las baterías de los vehículos eléctricos tienden a ser cada vez más sofisticados, no solamente testeando valores de tensión de cada celda sino además su temperatura, ya sea de forma individual como en puntos críticos del banco de baterías donde se verifiquen las temperaturas extremas. Por otra parte, es factible que los cargadores bidireccionales implementen sistemas de protección, mediante los cuales se limite la corriente de descarga de la batería en caso de recibir algún tipo de alerta por temperatura, por parte del vehículo eléctrico.

7.4.2.3. Efecto adverso de la profundidad de descarga (DOD) y el expendio de energía en el modo V2G.

A la hora de brindar servicios energéticos en modo V2G, la bibliografía suele referir a dos tipos de servicios: "bulk energy" (es decir, suministrar a la red cantidades importantes de energía) y "ancillary services", lo cual refiere a servicios auxiliares de regulación de frecuencia, flicker, y tensión. Dentro de estos dos tipos de servicios, el primero tiene como característica ser más demandante en cuanto a cantidad de energía expendida que el segundo (en inglés, energy throughput), aumentando en consecuencia la profundidad de la descarga de las baterías de los vehículos eléctricos.

Tanto para vehículos híbridos enchufables como para vehículos eléctricos a batería, la cantidad de energía expendida a la red y los servicios auxiliares han sido identificados como factores que conducen a un aumento significativo en la degradación de las baterías, llegando a ser requeridos frecuentes reemplazos del banco de baterías a lo largo de la vida útil del vehículo [20].

La figura 7.9 presenta un resultado de la influencia de la profundidad de la descarga en la degradación relativa de la capacidad (RCD por sus siglas en inglés) el cual es un vector promediado de valores de capacidad para cada condición de ensayo, normalizado con respecto al valor de capacidad original al comienzo de la vida útil de las celdas (en inglés, BOL o beginning of life).

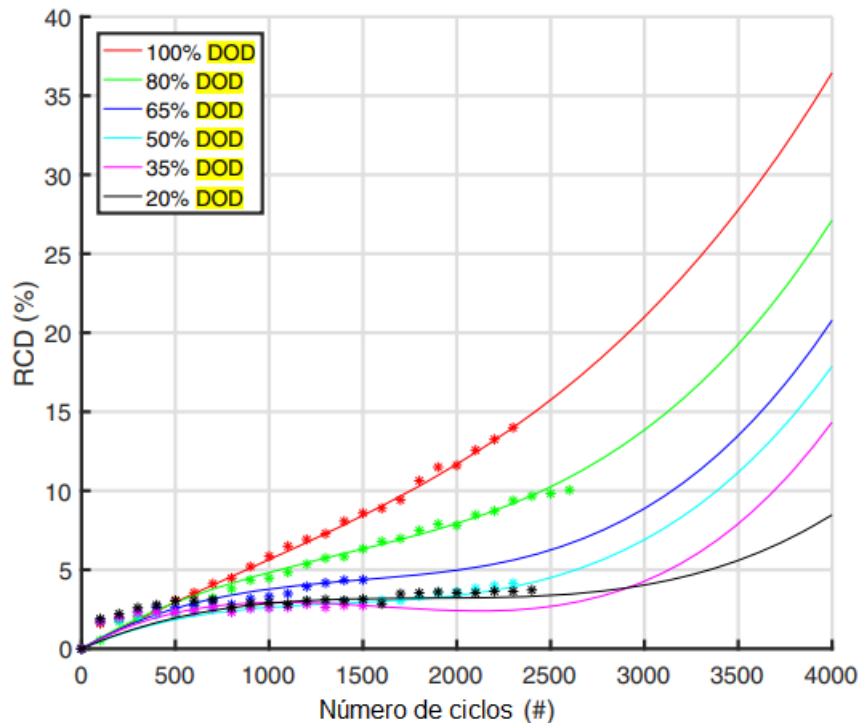


Figura 7.9: Influencia de la profundidad de la descarga en la degradación relativa de la capacidad de la celda NMC. Fuente: [20].

Los resultados presentados muestran la degradación de la capacidad de la celda NMC, entre el 0 % (celda nueva) y el 20 % (celda que ha alcanzado el final de su vida útil para automóviles eléctricos). Un valor positivo del RCD indica una pérdida de capacidad, mientras que un valor negativo indica un incremento en la capacidad. El resultado presentado en este trabajo [21] muestra una incidencia importante del DOD en la degradación, siendo menor al 5 % cuando el DOD es menor o igual a 35 % al cabo de 2500 ciclos, mientras que para profundidades de descarga mayores al 80 % la degradación excede el 10 % al cabo de la misma cantidad de ciclos.

El resultado presentado anteriormente para celdas NMC, actualmente extendidas en las baterías de los vehículos eléctricos, coincide con el presentado anteriormente en la sección 3.5.1.3 tanto para celdas LFP como para celdas NMC estudiadas bajo diferentes regímenes de descarga. El resultado presentado entonces, exhibido nuevamente en la presente sección, establece una dependencia sensible de la degradación de las celdas de iones de litio con los niveles de profundidad de la descarga.

Por su parte, la entrega a la red de cantidades significativas de energía de las baterías, se asocian biunívocamente con el DOD, por lo que el expendio de importantes cantidades de energía eléctrica en modo V2G impactan de forma nociva en las baterías, provocando un

marcado aumento en la degradación.

7.4.2.4. Efecto adverso de la operación a elevados estados de carga.

Dentro de los hallazgos observados en relación a la incidencia del rango de operación, algunos de ellos presentados en la subsección 3.5.1.2, para las celdas de iones de litio ha sido observado un efecto adverso cuando el rango de operación se encuentra en el entorno de valores elevados del SOC. En la sección correspondiente, fue mostrado como, al cabo de 40 semanas de operación de una batería LFP, la caída de la capacidad para operaciones con un SOC mayor al 85 %, se sitúa en valores mayores al 10 %.

Del mismo modo, otros estudios han establecido que el envejecimiento de las baterías de iones de litio en aplicaciones movilidad eléctrica se produce durante la conducción, la recarga de las baterías, y durante los períodos de reposo (sin cargas ni descargas). Durante los períodos de reposo, el envejecimiento se acelera con altas temperaturas y alto SOC. Durante la conducción (cuando la batería se va descargando y recargando con el freno regenerativo), el SOC tiene una influencia similar [22]. Este comportamiento es presentado en el gráfico 7.10.

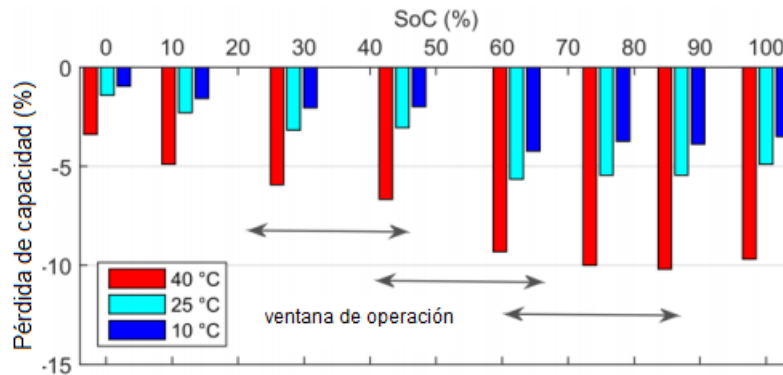


Figura 7.10: Pérdida de capacidad en función del SOC después de 18 meses de almacenamiento para la celda NCA. Fuente: [22].

La figura 7.10 presenta el efecto del almacenamiento durante períodos de reposo a diferentes temperaturas (10°C, 25°C y 40°C) para la celda NCA, encontrándose que el reposo a elevados niveles de SOC (60-90 %) afectan de forma significativa las baterías, causando una degradación mayor al 5 % al cabo de 18 meses de almacenamiento a una temperatura de 25°C. De forma análoga la figura 7.11 presenta los resultados para los mismos rangos de SOC y temperatura, durante ciclos de conducción acordes al ciclo estandarizado US06.

7.4. Impactos del V2G sobre la batería del vehículo eléctrico.

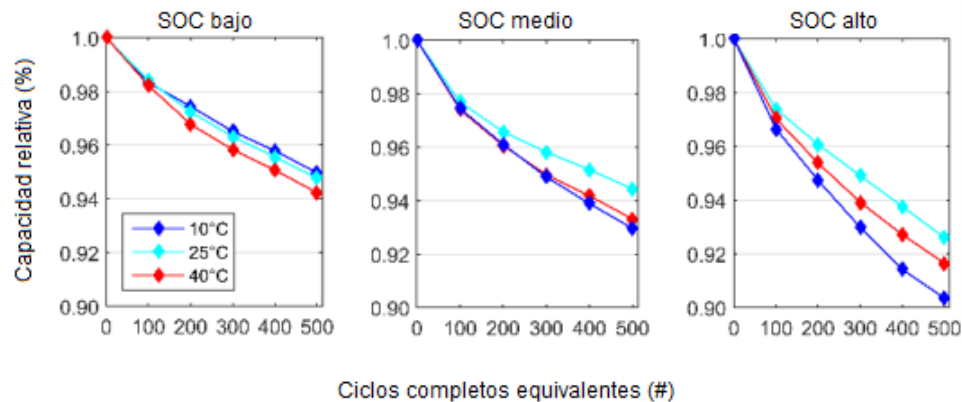


Figura 7.11: Pérdida de capacidad en función del SOC para la celda NCA. Se presentan los tres rangos de operación para SoC bajo, medio y alto. Adaptado de [22].

Los resultados presentados en la figura 7.11, adaptado de [22], muestra un incremento en la degradación de las celdas NCA cuando el rango de operación del SOC oscila entre 60 % y 90 %, acentuándose este fenómeno aún más cuando las temperaturas se ubican en los extremos. La degradación alcanzada puede situarse próxima al 10 % al cabo de los 500 ciclos completos equivalentes, siendo en el entorno de 5 % mayor para un rango de SOC elevado (60 %-90 %) que para un bajo rango de SOC (20 %-40 %).

Este resultado sugiere que, al menos para la celda NCA, rangos de operación para menores valores de SOC pueden ser menos perjudiciales, así como además, el almacenamiento de energía en situación de reposo también debería ubicarse en bajos niveles de SOC para evitar elevada degradación de esta celda. Resultados similares fueron también hallados para celdas con un cátodo compuesto por óxidos de Níquel, Manganeso y Cobalto [70].

En caso de establecer regímenes de funcionamiento de baterías de vehículos eléctricos en modo V2G, el aumento de la degradación debido a rangos de operación del SOC inapropiados, debe ser tenido en cuenta. Rangos de operación del SOC elevado tienden a ser desfavorables, al tiempo que se presentan como inevitables si se quiere tener energía remanente en la batería del vehículo para ser entregada a la red. En consecuencia, para el funcionamiento no optimizado del modo V2G, parece inevitable que el vehículo realice ciclos de conducción a elevados valores de SOC, entregando el remanente energético a la red alcanzando descargas profundas.

No obstante lo anterior, otros regímenes de funcionamiento en modo V2G pueden resultar beneficiosos. A modo de ejemplo, si un vehículo eléctrico en un momento dado es cargado hasta el 100 % del SOC y usa en dicha instancia el vehículo en modo conducción hasta un SOC igual a 80 %, podría ser beneficioso bajar el SOC de la batería hasta, por ejemplo, un 25 %, si luego el vehículo va a permanecer en reposo por un lapso de tiempo dado, y beneficiar entonces la batería. En resumen, en relación al rango del funcionamiento del SOC, el V2G podría ser perjudicial para la batería si se cumplen ciertas condiciones de operación que lleven al SOC a rangos elevados.

7.5. Posibles consecuencias negativas en el desempeño del vehículo, como consecuencia de la degradación de sus baterías.

Otra de las referencias relevantes, utilizadas más adelante para la simulación de la evolución del SOH de las baterías de vehículos eléctricos es la desarrollada en [54]. En el trabajo, se presenta un modelo que utiliza como variables de entrada el SOC inicial, el SOC final, el DOD (partiendo de diferentes SOC), los C-rates de carga y descarga y la temperatura de operación de la batería. Adicionalmente, el modelo emplea el ciclo completo equivalente (FCE) tal cual fue presentado en la subsección 3.8.5 del capítulo 3 donde el modelo se presenta de forma completa.

7.5. Posibles consecuencias negativas en el desempeño del vehículo, como consecuencia de la degradación de sus baterías.

Sin perjuicio de posibles fallas que puedan ser ocasionadas en el sistema bidireccional de carga y descarga de las baterías, tales como daños en celdas, daños en el sistema de enfriamiento del banco de baterías o del cargador, o bien en los elementos eléctricos o electrónicos del vehículo o del sistema de recarga del vehículo, se presentan en esta sección las consecuencias negativas que la degradación de las baterías acarrea consigo. Estas consecuencias se vinculan con disminución en las características de desempeño del vehículo, propias de la degradación del banco de baterías. Dada la característica de desempeño de las celdas de litio-ion, con una curva de descarga a tensión casi constante, es posible que algunas de las consecuencias enumeradas en la presente sección, no sean percibidas por los usuarios de los vehículos. Además de lo anterior, si bien la bibliografía establece, en general, un límite de SOH igual a 80 % como límite de la primera vida de las baterías para vehículos eléctricos, algunos fabricantes establecen un 60 % como límite admisible.

Es factible asumir que un sistema V2G que se encuentre adecuadamente construido e implementado, no presente mayores fallas o defectos que cualquier otro sistema de tales características, aunque cabe señalar que, al existir un sistema de intercambio bidireccional de energía, aumenta la cantidad de elementos y complejidad, en comparación con un sistema unidireccional. Por tal motivo, puede ser esperable que al aumentar los puntos de falla aumente la probabilidad de ocurrencia de un evento, con lo cual ha de tomarse los recaudos correspondientes, así como además establecer un plan de mantenimiento adecuado, basado en una metodología adecuada, como puede ser el Análisis de los Modos de Falla y sus Efectos, o cualquiera otra.

La presente sección se enfoca en el vehículo eléctrico en sí mismo, y cuales son las características específicas que pueden verse afectadas cuando se aumenta la degradación de las baterías. Dado que los fabricantes han de tomar las provisiones necesarias y suficientes para que la afectación del desempeño sea imperceptible, es posible que tales efectos no afecten la seguridad en la conducción. No obstante lo anterior, tiene sentido mencionar en la presente sección, cuáles podrían ser tales efectos.

Autonomía

La autonomía de un vehículo eléctrico es la distancia máxima recorrida con una carga completa, se mide en kilómetros (km) y depende, entre otros factores, de las características de la batería, de las características del vehículo y del ciclo de conducción aplicado.

Un ciclo de conducción, tal cual se presenta en el capítulo 4, se puede definir como parte de un

7.5. Posibles consecuencias negativas en el desempeño del vehículo, como consecuencia de la degradación de sus baterías.

procedimiento estandarizado que apunta a evaluar y comparar el desempeño de un vehículo en circunstancias reproducibles y condiciones controladas. Un ciclo de conducción tiene en cuenta las condiciones del entorno como las pendientes o la velocidad del viento, las condiciones del vehículo (presión de los neumáticos, carga transportada), la velocidad, la aceleración y cualquier otro parámetro que influya en los resultados de un ensayo estandarizado. Los procedimientos normalizados internacionales se utilizan para evaluar las prestaciones de los vehículos, como por ejemplo el consumo de energía [71].

Para un estilo de conducción fijo, los factores de diseño que determinan la autonomía son la capacidad de almacenamiento de energía en el banco de baterías, el peso propio del vehículo, el coeficiente aerodinámico y la eficiencia global del sistema (eficiencia de descarga de la batería y eficiencia del sistema electromecánico de tracción). La energía específica para baterías de iones de Litio alcanza hasta 150 Wh/kg (dependiendo del tipo de celda que se utilice), viéndose este valor disminuido en tanto aumenta la degradación, ocasionando en consecuencia una pérdida en la autonomía del vehículo eléctrico.

Velocidad máxima

La velocidad máxima (km/h) depende de varios factores: el peso del vehículo, el coeficiente de fricción aerodinámico, la potencia del motor y la potencia del banco de baterías. En los vehículos eléctricos, la velocidad máxima suele ser limitada electrónicamente a los efectos de limitar la corriente eléctrica consumida y evitar así el estrés del sistema en su conjunto, particularmente el estrés del sistema eléctrico y sus componentes.

Las baterías de ion-Litio acumulan más energía por unidad de masa (es decir, poseen mayor energía específica), lo cual permite disponer de más energía acumulada en el vehículo y en consecuencia consumir más potencia, que es un requisito para desarrollar mayores velocidades. A mayor velocidad, la fuerza realizada por el vehículo debe ser mayor, mientras que la potencia es el producto de la fuerza por la velocidad; al aumentar ambas la potencia aumenta.

El peso de un vehículo con baterías de Litio-ion es menor que el peso de un vehículo con baterías de menor densidad energética y en consecuencia la fuerza requerida es menor, permitiendo desarrollar más velocidad. Como contrapartida, las baterías de ion-Litio soportan menores descargas profundas (DoD) que otras tecnologías (por ejemplo, basadas en Hierro o en Plomo), lo que constituye uno de los mayores inconvenientes de las baterías de ion-Litio. Al producirse descargas profundas en baterías de ion-Litio, su vida útil se ve afectada en mayor medida que en baterías de Plomo-ácido [72]. Mayores velocidades demandan al banco de baterías mayor consumo de corriente eléctrica y las descargas resultan más profundas. Por lo tanto, la velocidad final debe ser controlada en un vehículo eléctrico con cualquier tipo de baterías.

Torque máximo

La máxima pendiente que un vehículo puede afrontar desde el reposo, depende del torque máximo desarrollado, medido en Newton por metro (N.m). El torque máximo depende de la motorización del vehículo y es una característica que queda definida por el fabricante del motor o del vehículo. Del mismo modo que para la velocidad, el torque máximo puede ser limitado electrónicamente para evitar que la corriente eléctrica del sistema sea también elevada y condicione la vida de algunos de sus componentes.

Aceleración

7.6. Optimización del funcionamiento en modo V2G.

La aceleración y la recuperación de un vehículo eléctrico dependen del peso del vehículo, del coeficiente aerodinámico y de la potencia del motor. Mayores aceleraciones son demandantes de mayor potencia y en consecuencia de mayor corriente eléctrica, que exige al sistema eléctrico del automóvil. Por tal motivo, si los niveles de degradación de la batería son elevados, es esperable que la misma no pueda responder adecuadamente ante demandas elevadas de potencia, o bien puede ocurrir que la aceleración del vehículo sea limitada electrónicamente limitando la corriente eléctrica.

Tiempo de carga de la batería y consumo energético.

El tiempo de carga de la batería de un vehículo eléctrico depende del cargador de baterías on-board que el vehículo tenga instalado, además del tamaño de la batería. Algunos modelos de vehículos tienen cargador con opción de carga rápida, el cual podrá ser usado si se cuenta con una instalación eléctrica adecuada en el punto de carga. El fabricante del vehículo usualmente informa el tiempo que tarda un vehículo en ser cargado completamente en modo de carga lenta, partiendo de baterías completamente descargadas (0% SoC) hasta la batería completamente cargada (100% SoC) .

Para uso particular, tiempos prolongados de carga son aceptables para un usuario que dispone de entre 8 y 10 horas del vehículo en su casa. Además, el tiempo máximo de una carga completa considera que el estado de la batería al iniciar la carga es 0%SoC, lo cual ocurre excepcionalmente en ciudades de Uruguay donde los recorridos promedio son en promedio 35 km por día [73]. Como fue presentado en 3.5.1.2, el aumento de degradación de la batería es asociado al aumento de la resistencia interna, haciendo los procesos de carga y descarga más lentos, dificultando en consecuencia tanto la recarga del vehículo eléctrico en cualquier condición, como también ante la eventual necesidad de entregar energía a la red eléctrica [42]. Del mismo modo, aunque despreciable en la mayoría de los casos, el consumo energético tiende a aumentar en los proceso de ciclado en tanto disminuye la eficiencia de la batería del vehículo eléctrico.

7.6. Optimización del funcionamiento en modo V2G.

Como ha sido señalado en secciones previas, la optimización de los procesos de carga y descarga de la batería, aún en modo V2G, es un requisito al cual se debe tender si se busca hacer factible el V2G mediante el menor daño posible a las baterías de los vehículos, y extendiendo todo lo posible su vida útil. Diversos trabajos han sido realizados con el foco puesto en la optimización del intercambio de energía, y en particular en la etapa en la cual el vehículo entrega energía a la red eléctrica.

El vínculo bidireccional entre la red eléctrica y los vehículos eléctricos permite un uso flexible, económico y de respuesta rápida de las baterías de los vehículos en la red. Sin embargo, los efectos del envejecimiento de la batería debido a los ciclos de operación adicionales debidos al V2G y la consecuente degradación de la batería son la principal barrera a este modelo. Por lo tanto, se vuelve imprescindible un enfoque de programación del V2G con el foco puesto en la minimización del envejecimiento de la batería.

Para evaluar el envejecimiento de la batería en modo V2G, el fenómeno de degradación de la

7.6. Optimización del funcionamiento en modo V2G.

batería debe ser cuantificado mediante un algoritmo de conteo de carga (Ah) o conteo de energía (Wh), además de la evaluación permanente de temperatura de operación, C-rate y profundidad de la descarga. Asimismo, la programación de las descargas V2G deben ser modelados como un problema de optimización de objetivos múltiples, en el que la degradación de la batería y las condiciones que impone la red se diseñan como objetivos de optimización. Las metodologías de programación V2G diseñadas deben entonces minimizar los ciclos completos equivalentes de carga/descarga de la batería y optimizar el tiempo de residencia y la intensidad de cada vehículo conectado en modo V2G, al tiempo que se considere, asimismo, brindar a la red eléctrica los servicios que se esperan del modo V2G.

A modo de ejemplo, el trabajo presentado en [23], señaló una serie de posibles impactos favorables sobre las baterías si se alcanza un funcionamiento óptimo del modo V2G. La propuesta de algoritmo que se plantea se muestra en la figura 7.12 en la cual se indican los pasos lógicos que se siguen para lograr el propósito.

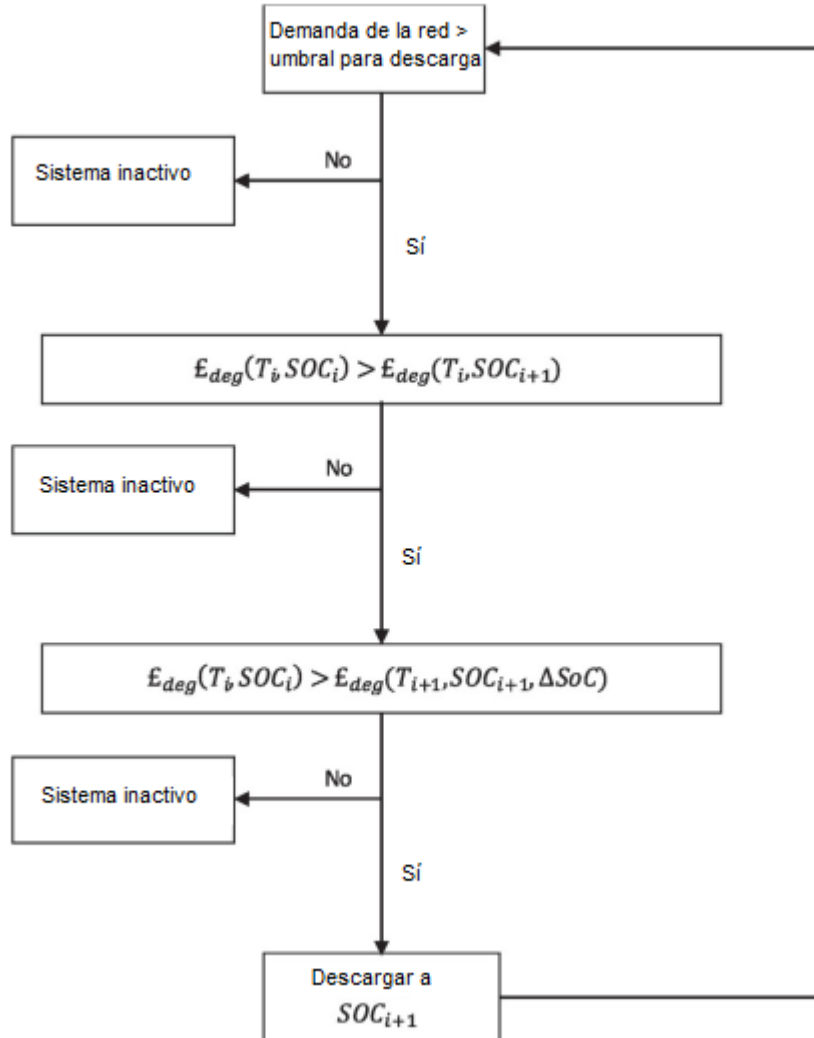


Figura 7.12: Representación esquemática del algoritmo empleado en [23] para evaluar la descarga en modo V2G.

El algoritmo presentado implica el equilibrio entre moverse hacia un valor óptimo en términos de la degradación de la batería, vs. los ingresos por venta de EE debido a tal movimiento. La red eléctrica realiza una solicitud de energía al BMS del vehículo, que el BMS traduce a un ΔSoC_{V2G} .

Los resultados presentados en la presente sección son el resultado de un proceso de optimización que ha conducido a un impacto no desfavorable. Esos resultados han motivado más investigaciones sobre la posibilidad de maximizar el SoH de la batería mediante el uso de una red inteligente integrada para manipular las condiciones operativas de los vehículos eléctricos funcionando en modo V2G. Según queda de manifiesto en [23], es posible aprovechar el rango óptimo de ΔSoC_{Drive} y ΔSoC_{V2G} para extender la vida útil de la batería del VE. Una parte

7.6. Optimización del funcionamiento en modo V2G.

integral de este tipo de sistemas es la capacidad de predecir y cuantificar la degradación de la batería. Para tales casos, debe ocurrir que la red inteligente interactúa con el BMS de la batería del vehículo o bien con la VCU del vehículo para calcular la energía y la potencia disponible y la condición operativa de la batería que minimiza la degradación.

En relación a la posibilidad de encontrar impactos favorables del V2G sobre la batería del vehículo eléctrico, trabajos como el presentado en [23], sostienen que un vehículo eléctrico conectado a una red inteligente puede extender la vida útil de la batería del vehículo eléctrico en comparación con el caso en que no se ha aplicado el modo V2G. Tal resultado no puede ser consecuencia más que de un proceso de optimización de la descarga/recarga. A modo de ejemplo, de los trabajos de simulación presentados en [23], se deriva que si un ciclo de conducción diario consume entre el 21 % y el 38 % de la energía almacenada en la batería, la descarga de un 40 % del estado de carga de las baterías a la red puede reducir la pérdida de capacidad en un 6 % y puede reducir la pérdida de potencia en un 3 % en un período de tres meses. En algunos casos particulares los resultados presentados sugieren que un vehículo eléctrico que entrega energía a una red inteligente es capaz de reducir la pérdida de capacidad de la batería hasta en un 9,1 % y la pérdida de la potencia hasta en un 12,1 % si la formulación es adecuada y se usan algoritmos que minimicen la degradación.

Para lograr los beneficios presentados en [23], se asume que la red inteligente interactúa con el sistema de gestión de la batería del vehículo para calcular la energía y la potencia disponible del automóvil y las condiciones de operación de la batería, lo que minimiza la degradación. Se asume también que el BMS puede informar al operador de la red sobre la energía requerida para el viaje de regreso de los conductores a casa o a su destino próximo previo a la recarga, dejando una reserva de energía para tal fin y estableciendo de esa manera una restricción fuerte para el SOC de la batería. Para estos fines, se desarrolla un modelo integral de degradación de la batería basado en datos de envejecimiento a largo plazo para una batería comercial cuyos electrodos están compuestos por $C_6/LiNiCoAlO_2$. En el marco de dicho trabajo se acuña el término "*degradation reversing*", el cual representa el abatimiento de los fenómenos de degradación debido al uso de los vehículos eléctricos en modo V2G.

El modelo de circuito equivalente utilizado en [23] se presenta en la figura 7.13, el cual es utilizado para evaluar la incidencia de los factores de estrés en la degradación de las baterías. El modelado a partir de este circuito equivalente, se presta para la parametrización a partir de la realización de pruebas de envejecimiento estandarizadas establecidas en el campo del modelado de baterías.

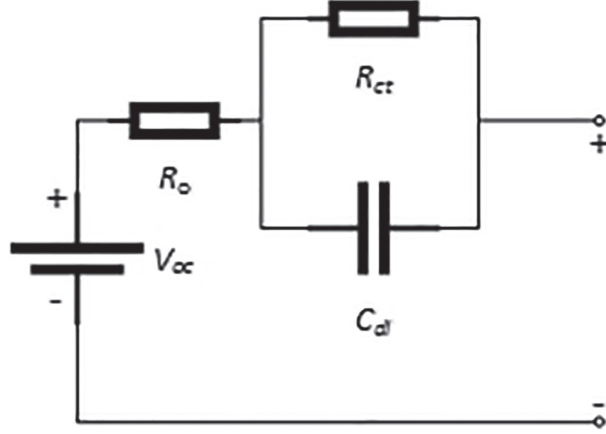


Figura 7.13: Circuito equivalente empleado para el modelado del comportamiento de la batería de un VE empleado para el estudio de los impactos debido al V2G. Fuente: [23].

La estructura del circuito equivalente contiene una fuente de tensión ideal que representa el potencial de circuito abierto (OCV) del sistema de electrodos usados en este caso C6 / LiNiCoAlO₂. Esta fuente está conectada a una resistencia variable en serie R_0 , que representa la resistencia óhmica interna. En serie con la resistencia R_0 se conecta el par paralelo resistor-capacitor que representa la resistencia de transferencia de carga (R_{ct}) junto con las capacitancias de doble capa superficial (C_{dl}). Todos los elementos del circuito varían con la temperatura (T), con el estado de carga (SoC) y con la velocidad de descarga (C_{rate}), además de depender también del tiempo t y de la profundidad de la descarga. Por lo tanto, después de cada paso de tiempo, se evalúa la degradación de la batería y se actualiza los parámetros del circuito. La pérdida de capacidad (CF) y la pérdida de potencia (PF) se definen en las ecuaciones 7.1 y 7.2 como:

$$CF = 1 - \frac{Q - \mu_{CF}Q_{rated}}{Q_{rated} - \mu_{CF}Q_{rated}} \quad (7.1)$$

$$PF = \frac{1}{\mu_{PF} - 1} \left(\frac{R_0 + R_{CT}}{R_0(0) + R_{CT}(0)} - 1 \right) \quad (7.2)$$

donde μ_{CF} es el factor que afecta la capacidad nominal Q_{rated} y μ_{PF} es el factor que afecta la resistencia interna.

El vehículo eléctrico de referencia modelado en [23], solamente se recarga cuando el SoC se agota a un nivel en el que no se puede realizar el siguiente trayecto. Cada ciclo se define a lo largo de una semana y representa una variedad de comportamientos y entornos de conducción realistas construidos a partir de ciclos como FTP y NEDC. Entretanto, el algoritmo implementado funciona en dos partes, primero comparando la degradación esperada entre mantener la batería en SoC_i y mantenerla en SoC_{i+1} (siendo la variación del SoC igual a 1%) y luego comparando la degradación esperada por mantener la batería en SoC_{i+1} con la degradación debida al pasaje de SoC_i a SoC_{i+1} . Asimismo, calcula el costo esperado de degradación de la batería cuando el vehículo eléctrico está conectado a la red inteligente (T_i, SoC_i) y lo compara con el caso en que

7.6. Optimización del funcionamiento en modo V2G.

cierta cantidad de carga ΔSoC es entregada a la red. Si el algoritmo encuentra que la entrega de esa cantidad de carga ΔSoC entregada a la red causa un cambio en el costo de la degradación tal que (T_i, SoC_i) es mayor a (T_{i+1}, SoC_{i+1}) , entonces se realiza la entrega de energía a la red; de lo contrario se mantiene sin realizar tal entrega. El modelo de envejecimiento implementado se utilizó para estudiar varios escenarios con diversas variaciones en el SoC (ΔSoC_{Drive}), así como además la aplicación de descargas a la red con ciertas variaciones en el SoC (ΔSoC_{V2G}). Uno de los principales resultados obtenidos en este trabajo se presentan en la figura 7.14, donde se establece una comparación de la pérdida de capacidad (CF) y la pérdida de potencia (PF) entre el ciclo optimizado V2G y un caso de referencia en el que el vehículo eléctrico se utiliza solamente en modo conducción, es decir, sin la entrega de energía a la red eléctrica.

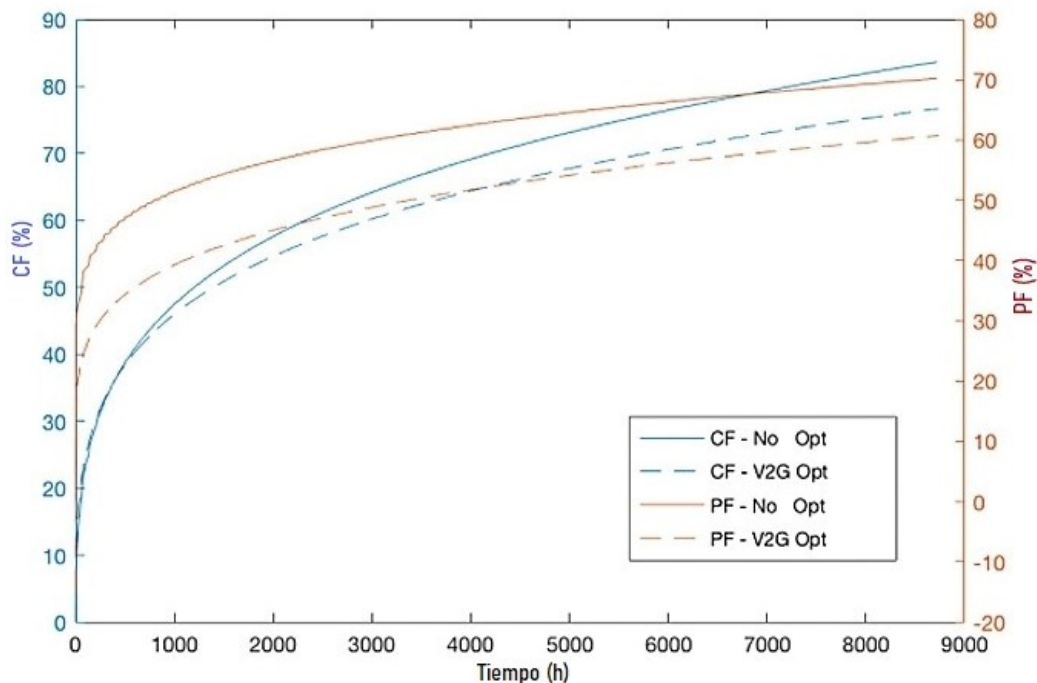


Figura 7.14: Comparación de la pérdida de capacidad (CF, en azul) y la pérdida de potencia (PF, en rojo) entre el ciclo optimizado V2G (línea punteada) y el caso de referencia no optimizado (línea llena). El gráfico corresponde al caso $\Delta SoC_{Drive} = 15\%$. Fuente: [23].

Para ΔSoC_{Drive} de 15%, que corresponde al consumo diario promedio del ciclo de conducción estudiado, la CF es 7% y la PF es 9.5% y se observa un cruzamiento en entre las curvas de ciclado optimizado y no optimizado, devolviendo un resultado favorable a la optimización. La simulación se realizó sobre una flota de 120 vehículos que se someten a variadas condiciones de funcionamiento. Se asume que los vehículos se cargan cuando la batería está cerca de agotarse ($SoC < \Delta SoC_{Drive}$).

7.7. Simulaciones de la degradación en Matlab-Simulink.

De acuerdo a lo presentado en el capítulo 3, las baterías padecen cierto grado de degradación como resultado de su uso en los vehículos eléctricos. Tal degradación puede ser cuantificado para cada vehículo si se lo somete a alguno de los ciclos de conducción estandarizados, o bien si la degradación es medida en pruebas reales de conducción. Por otra parte, el capítulo 4 presentó los ciclos de conducción más conocidos en distintos países y regiones. Muchos de los ciclos presentados se ajustan de buena manera a una conducción realista, mientras que algunos otros han sido criticados por ser poco representativos de la realidad.

De lo anterior se desprende que el número de las posibles combinaciones tanto de ciclos de conducción (estandarizados o hechos a medida de un circuito real), así como el tipo de vehículo seleccionado para el análisis y sus características técnicas específicas, así como el tipo de baterías con las que el vehículo sea equipado (LFP, NMC, etc.), se vuelve de tal envergadura que exceden las posibilidades del presente trabajo. A lo anterior debe ser agregada la gran cantidad de modelos que buscan modelar el comportamiento de vehículos eléctricos y sus baterías (modelado termodinámico, modelado del SOH, etc.), lo cual ensancha aún más las posibilidades de realizar estudios de los costos asociados a la degradación de las baterías durante la conducción de los vehículos.

Por tal motivo, se opta por seleccionar vehículos existentes en el mercado local (Uruguay), estudiados en el marco del proyecto de fin de carrera de ingeniería eléctrica "*Baterías en Vehículos Eléctricos Conectados a la Red, BeV2G*" del Instituto de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería de la UDELAR [66], y publicados en [24]. Las condiciones de borde quedan establecidas para un ciclo de conducción estandarizado WLTP así como además para un ciclo de conducción realista relevado para la ciudad de Montevideo, para tres vehículos comercializados en la plaza local, estudiados mediante un modelo de degradación [54]. Para alcanzar los resultados necesarios para la comparación económica se realizó un desarrollo de software en Matlab-Simulink, el cual es capaz de modelar y simular el comportamiento de diferentes vehículos eléctricos bajo diferentes condiciones de uso. En dicho programa, se colocó especial atención al comportamiento de las baterías y en particular a la gestión de la descarga y su impacto en el SOH de las mismas luego de su utilización en diferentes modos [66].

7.7.1. Simulaciones de la degradación de la batería del vehículo en modo conducción.

Los vehículos eléctricos implementados en el software, los cuales pueden ser encontrados en el mercado uruguayo, fueron los siguientes:

- Renault Kangoo ZE Maxi (de 22 kWh y de 33 kWh)
- Renault Zoe R110
- BYD E5

7.7. Simulaciones de la degradación en Matlab-Simulink.

En la tabla 7.1 se muestran las principales características eléctricas y mecánicas de los vehículos que fueron simulados, tales como torque máximo, potencia y tensión de la batería, entre otras características fundamentales a los efectos de la simulación.

Vehículo	Renault Kangoo 22 kWh	Renault Kangoo 33 kWh	Renault Zoe R110	BYD E5
Potencia (kW)	44	44	80	160
Torque (Nm)	226	225	225	310
Voltaje batería (V)	360	345.6	345.6	604.8
Energía batería(kWh)	22	33	41	60.5
Química batería	LMO	NMC	NMC	NMC
Peso en vacío (kg)	1553	1553	1575	1900

Cuadro 7.1: Principales características de los vehículos eléctricos utilizados en las simulaciones. Fuente: [24].

El ciclo de conducción estandarizado tomado como referencia en el estudio fue el WLTP [17], el cual fue diseñado por la UNECE (United Nations Economic Commission for Europe) y fue oportunamente presentado en la sección 4.2.3 del capítulo 4. Adicionalmente, para el presente estudio se utilizó el *Ciclo Montevideo*, el cual fue creado a partir de un relevamiento real en un VE en la ciudad de Montevideo, con el objetivo de abarcar varios sectores de la ciudad, incluyendo muy diversas topologías y muy diversos tipos de vías. El *Ciclo Montevideo* tiene una duración de más de 5500 segundos y recorre una distancia total de 42.3 km. En la figura 7.15 puede observarse su representación gráfica (velocidad en función del tiempo). Este ciclo se utilizó en las simulaciones descritas para evaluar y comparar diversos desempeños de los diferentes vehículos implementados, así como además validar el modelo implementado en Matlab-Simulink.

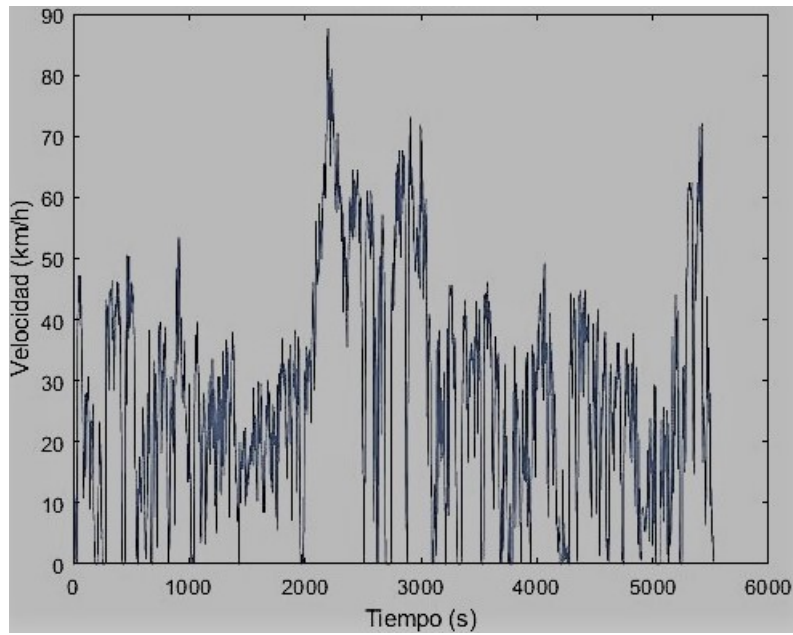


Figura 7.15: Ciclo de conducción real relevado en la ciudad de Montevideo. Elaboración propia.

En relación a las implementaciones de software, utilizando las herramientas disponibles en Matlab-Simulink se realizó un modelo de vehículo eléctrico organizado en siete bloques que interactúan entre sí, los cuales son presentados en la figura 7.16.

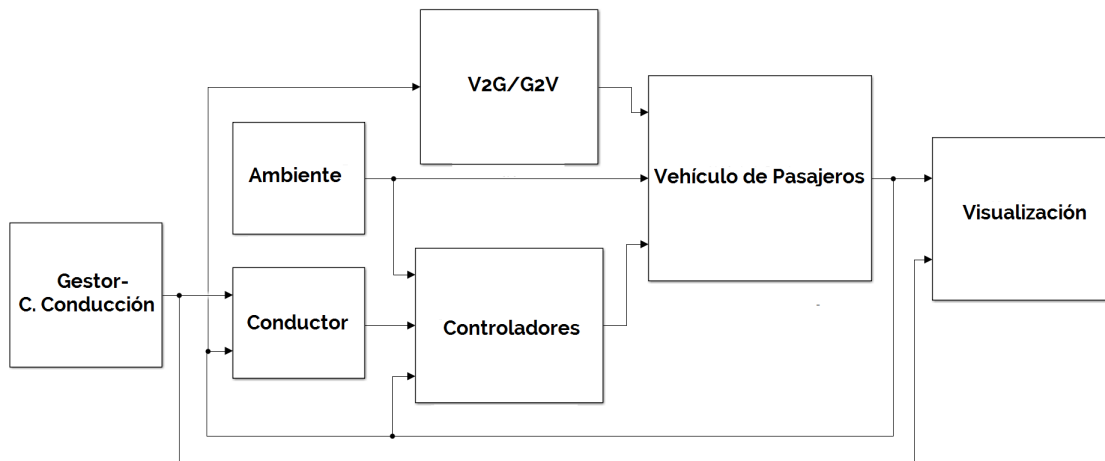


Figura 7.16: Esquema general del modelo implementado en Matlab-Simulink. Adaptado de [24].

Entre los aspectos más relevantes, se destaca la implementación del modelado de las ecuaciones que describen el movimiento del vehículo, así como también su interacción con los requerimientos exigidos al motor y a las baterías, lo cual fue presentado en 5. El desarrollo determina el par que debe ser entregado por el motor para impulsar el vehículo ante las diversas exigencias del terreno y del conductor, como por ejemplo aceleraciones o desaceleraciones en función del ciclo de conducción utilizado. Otro de los bloques importantes es el que modela la interacción de V2G/G2V (vehicle-to-grid / grid-to-vehicle), en el que se realiza el cálculo de la corriente que se intercambia entre el vehículo eléctrico y la red eléctrica, la cual puede ser tanto de carga como de descarga.

En relación a la *Capacidad utilizable* de los vehículos eléctricos que fueron simulados, se tuvo en cuenta que generalmente los VEs no utilizan el 100% de la energía en sus baterías (capacidad máxima real), sino que por motivos relacionados con la degradación de las baterías y también por razones de seguridad y funcionalidad, suelen utilizar una cantidad de energía menor a la máxima disponible en el pack, que es la *capacidad utilizable* por el vehículo. Dado que el algoritmo utilizado trabaja con datos de energía real y que los datos de energía en VE dados por fabricantes corresponden a la energía utilizable, se corrigieron estos valores para una correcta implementación del algoritmo. Tal modificación se realiza a través de la siguiente ecuación:

$$Capacidad_max_real = \frac{Capacidad_max_utilizable}{0,9} \quad (7.3)$$

En relación al SOC utilizable y al SOC real, se debe considerar que el algoritmo del SOH utiliza los datos de capacidad real y de energía real de la batería, por lo tanto utiliza un porcentaje determinado del SOC del vehículo real. Los datos de SOC que se obtienen del VE durante los recorridos, corresponden al SOC utilizable, por lo tanto se hace necesario escalarlo para poder trabajar correctamente con el algoritmo.

En relación a los diferentes C_{rate} , debe ser tenido en cuenta que al simular el comportamiento de un VE, se obtienen tramos de corrientes muy diversos debido a las muy variadas exigencias del recorrido, por lo que debió ser tomado el promedio de la corriente entregada por la batería para cada intervalo de 10% del SOC, dividido entre la capacidad nominal de la batería. Otra consideración relevante es que en [54] se utilizó una batería NMC con una capacidad nominal de 26 Ah. Para utilizar el modelo con otras baterías NMC de diferente capacidad, se debe normalizar el ritmo de descarga dividiendo la corriente que efectivamente entrega la batería por la capacidad nominal de la misma, para trabajar con el C_{rate} correspondiente.

La interfaz generada en Matlab-Simulink permite simular el comportamiento de distintos VEs a lo largo de diferentes ciclos de conducción [66]. Tanto los vehículos como los ciclos de conducción a simular son seleccionables desde una lista desplegable. Además, el programa permite interactuar con la red tanto para cargar el vehículo como para descargar el vehículo hacia la red, funcionando en modo V2G. Luego de simulados los ciclos que se evaluados sobre un determinado VE, la interfaz devuelve el SOH de su batería conforme a lo presentado en la sección 3.8.5 del capítulo 3. También, la interfaz permite hallar cuantos ciclos (n) es posible realizar con características predefinidas hasta que el SOH de las baterías llegue a un 80%, alcanzando, en consecuencia, el EOL. El programa permite la modificación de varios parámetros con el fin

7.7. Simulaciones de la degradación en Matlab-Simulink.

de generar versatilidad en las simulaciones. Se permite modificar características eléctricas y mecánicas del VE, características del entorno (por ejemplo, temperatura) y características de la carga/descarga a la red, como la potencia de descarga.

Para validar el modelo, se realizó una prueba en un VE real, aprovechándose la instancia para relevar un nuevo ciclo de conducción real (Ciclo Montevideo), obteniéndose también las pendientes del recorrido. El vehículo utilizado fue un Renault Kangoo ZE Maxi de 22 kWh de batería. Para las pruebas, se realizaron 5 recorridos que cubren diversos caminos habituales en la ciudad de Montevideo. Los recorridos incluyen pendientes pronunciadas, recorridos urbanos y recorridos de carretera o rambla, en donde se alcanzan las mayores velocidades. Con estos recorridos se generó el ciclo de conducción llamado Ciclo Montevideo.

Durante los recorridos con el VE real se registraron las exigencias máximas del motor y baterías, y luego de finalizados los recorridos se utilizaron los datos de energía consumida y estado de carga final para ajustar el modelo realizado en Matlab-Simulink.

7.7.2. Evaluación del SOH en función de la distancia recorrida.

Para estimar la evolución del SOH en función del uso del vehículo se simulan recorridos diarios acordes a los ciclos WLTP [17] y se estima el SOH de las baterías en función de la distancia para este ciclo. En la tabla 7.2 se despliegan los datos simulados para los vehículos de Renault, Kangoo de 33 kWh y Zoe R110, y para el modelo E5 de BYD. Se simulan 2, 4 y 6 ciclos WLTP diarios, que equivalen a 46.5 km, 93.0 km y 139.6 km respectivamente. Con estos recorridos diarios se estima el SOH a los 5, 7 y 9 años, respectivamente.

Vehículo	N° de WLTP diarios	Distancia recorrida (km)	SOC final (%)	SOH 5° año (%)	SOH 7° año (%)	SOH 9° año (%)
Kangoo 33kWh	2	46.5	81.8	97.4	96.4	95.4
	4	93.0	63.5	91.9	88.8	85.8
	6	139.6	44.2	85.9	80.6	75.5
Zoe R110	2	46.5	85.1	97.9	97.0	96.2
	4	93.0	70.2	94.5	92.4	90.0
	6	139.6	55.3	89.2	85.1	81.1
BYD E5	2	46.5	84.6	97.9	97.0	96.1
	4	93.0	69.0	94.3	92.1	90.0
	6	139.6	53.4	88.8	84.6	80.5

Cuadro 7.2: SOH de las baterías luego de recorrer 2, 4 y 6 ciclos WLTP diarios durante 5, 7 y 9 años. Fuente: [24].

En la tabla 7.2 se observa que el deterioro de la baterías varía entre los diferentes vehículos, obteniendo para las mismas distancias un deterioro más profundo cuando el DOD es mayor. El valor del DOD para cada simulación queda determinado por el SOC final, ya que el SOC inicial para todas las simulaciones fue 100 %. Puede observarse que a DOD poco profundos se infiere

7.7. Simulaciones de la degradación en Matlab-Simulink.

una vida útil elevada y a DOD más profundos se observa una disminución del SOH. Acorde a lo presentado en la sección 7.4.2.3 del capítulo 7, es clara la evidencia que muestra que a DOD menores al 30% el deterioro estimado parece ser reducido.

7.7.3. Simulaciones de la degradación de la batería debido al uso en modo V2G.

Dependiendo de la distancia recorrida cada día por el vehículo eléctrico, es posible disponer de mayor o menor cantidad de energía remanente en la batería del vehículo eléctrico, la cual puede eventualmente ser entregada a la red eléctrica. Una gestión inteligente de la energía remanente en las baterías del vehículo eléctrico, destinada o bien al uso doméstico o bien a la red eléctrica, podría plantear una ventaja económica para el usuario si las condiciones fuesen favorables.

Las empresas suministradoras de energía disponen, por lo común, de tarifas en las que difiere el costo según el horario de consumo. Dado esto, una gestión inteligente implicaría cargar el vehículo en el período de menor costo, realizar los recorridos necesarios para el uso diario, y al estacionar el vehículo en algún punto, entregar a la red eléctrica ciertas cantidades de energía remanente. Tal entrega de energía a la red debería ser realizada en períodos en los cuales exista una retribución económica que implique una ganancia neta, la cual supere incluso las pérdidas ocasionadas por la degradación marginal de las baterías.

Justamente, a los efectos de determinar las pérdidas ocasionadas por una degradación adicional de las baterías, se realizaron las simulaciones en Matlab-Simulink presentadas anteriormente. La tabla 7.3 presenta los resultados de la simulación de dos y cuatro ciclos de conducción WLTP al día, seguidos de una descarga hacia la red (V2G) hasta alcanzar un 10% del estado de carga de las baterías. La consigna de potencia de descarga en este escenario fue de 3,7 kW.

Vehículo	N° de WLTP diarios	Distancia recorrida (km)	SOC final recorrido (%)	Energía V2G (kWh)	SOH 5° año (%)	SOH 7° año (%)	SOH 9° año (%)
Kangoo 33kWh	2	46.5	81.8	23.7	76.5	68.0	59.8
	4	93.0	63.5	17.7	76.6	68.2	60.2
Zoe R110	2	46.5	85.1	30.8	76.3	67.8	59.7
	4	93.0	70.2	24.7	76.5	68.0	60.0
BYD E5	2	46.5	84.6	45.1	76.3	67.7	59.5
	4	93.0	69.0	35.7	76.5	68.0	60.0

Cuadro 7.3: SOH de las baterías al realizar un recorrido diario y V2G. Fuente: [24].

Una de las primeras observaciones es que en tal régimen de cargas y descargas las baterías alcanzan el fin de su uso apto para el vehículo eléctrico al cabo del quinto año. Se observa, además, que para los tres vehículos evaluados se tiene un deterioro muy similar para el mismo tiempo transcurrido, con diferencias menores al 1% del SOH para las simulaciones realizadas. Se entiende que la paridad de los resultados puede deberse a: 1) que el algoritmo considera que

7.7. Simulaciones de la degradación en Matlab-Simulink.

las baterías son todas de la misma química (NMC), 2) que la profundidad de descarga es la misma en todos los casos (DOD=90%) y 3) que los ritmos de descarga (*C-rate*) son similares para todos los vehículos simulados. Este es el parámetro que influye más en el deterioro según el algoritmo. Nótese que a pesar de tener el mismo DOD, la cantidad de energía que entrega cada vehículo es diferente ya que los tamaños de batería no son iguales. También cabe señalar que los 46.5 km diarios recorridos se ajustan a un promedio urbano e interurbano establecidos en [24], correspondientes a distancias experimentales realizadas en Montevideo [66].

Comparando los porcentajes del SOH a los 5, 7 y 9 años reflejados en los cuadros 7.2 (sin aplicar V2G) y 7.3 (aplicando V2G), se puede observar cómo, según lo establecido por el modelo que fue implementado, el impacto de la entrega de energía a la red resulta muy relevante sobre la salud de las baterías. Se hace claro que el deterioro provocado por el V2G es considerable según este modelo y según el régimen implementado (que no incluye ninguna optimización sino que es conservador y muy adverso), y acortaría la vida útil de las baterías de forma significativa. La diferencia en el deterioro de las baterías será distinto si se modifican parámetros fundamentales como por ejemplo la profundidad de la descarga, la cantidad de energía entregada a la red, o incluso también los C-rates. En la tabla 7.4 se presenta el deterioro incremental que padecen las baterías debido a la entrega de energía a la red (V2G), al recorrer las distancias diarias y realizar descargas a la red hasta un 10% del SOC.

Vehículo	Distancia recorrida (km)	SOC final recorrido (%)	Energía V2G (kWh)	$\Delta(SOH)$ 5 años (%)	$\Delta(SOH)$ 7 años (%)	$\Delta(SOH)$ 9 años (%)
Kangoo 33kWh	46.5	81.8	23.7	-21.5	-29.5	-34.9
	93.0	63.5	17.7	-16.6	-23.2	-29.8
Zoe R110	46.5	85.1	30.8	-22.1	-30.1	-37.9
	93.0	70.2	24.7	-19.0	-26.1	-33.3
BYD E5	46.5	84.6	45.1	-22.1	-30.2	-33.9
	93.0	69.0	35.7	-18.9	-26.2	-33.3

Cuadro 7.4: Presentación de los resultados de deterioro incremental en el SOH de las baterías debido exclusivamente al impacto del V2G (tres últimas columnas), según las simulaciones realizadas acordes al modelo utilizado. Fuente: [24].

Los resultados presentados en la tabla 7.4 indican el deterioro en el estado de salud de la batería (ΔSOH) debido al funcionamiento en modo V2G. Se observa que para un mismo vehículo, al aumentar la distancia del recorrido diario la diferencia disminuye, ya que disminuye la energía que se tiene disponible para entregar a la red (a mayor cantidad de ciclos de conducción, menor es la energía remanente para volcar a la red). Finalmente, en la columna "Energía V2G (kWh)" de la tabla 7.4 se puede observar que la cantidad de energía disponible para entregar a la red es una porción elevada del total de la capacidad del banco de baterías. En consecuencia, es esperable que en implementaciones con cargadores bidireccionales se establezcan algoritmos de optimización que determinen la cantidad de energía óptima a entregar a la red, que compense la pérdida de capacidad en la batería con el beneficio económico que pueda llegar a obtenerse

7.7. Simulaciones de la degradación en Matlab-Simulink.

de la entrega de energía a la red. Tal optimización deberá considerar todas las variables críticas que inciden negativamente en la degradación de las baterías, las cuales fueron presentadas en los capítulos 3 y 7, así como además todas las variables económicas que entran en juego en el momento, parametrizadas acorde a las preferencias del propietario del vehículo eléctrico.

Capítulo 8

Análisis Económico de los Impactos del V2G.

8.1. Introducción.

En el presente capítulo se analizan las consecuencias económicas y financieras que implica el uso de un vehículo eléctrico en modo V2G, en particular desde el punto de vista del comprador del vehículo eléctrico. El esquema comercial asumido en el presente capítulo, es aquel en el que el vehículo es enajenado por el importador y vendido al comprador con sus baterías (tal cual ocurre hoy en día en Uruguay), debiendo asumir este último los costos de reposición del banco al fin de su vida útil (EOL por sus siglas en inglés), o bien realizar la venta del vehículo usado con un SOH menor al esperado. El modelo de negocio implementado en la presente evaluación económica consta de una empresa rentadora de automóviles que decide comprar uno o más vehículos eléctricos en el marco de un proyecto de inversión que se acoge a la Ley de Promoción y Protección de Inversiones (Ley 16.906), para ponerlos en alquiler y obtener una renta. En el modelo de negocio implementado, la rentadora de vehículos decide comprar un vehículo eléctrico de gama media o media-alta, con autonomía igual o mayor a 400 km, y características de habitabilidad y confort acorde a lo descrito en la sección 8.2.2. La evaluación del proyecto se basa en decidir si se implementa, o no, el uso del vehículo de alquiler en modo V2G, asumiendo el impacto de la degradación de la batería y sus consecuencias económicas.

Como ha sido presentado en el capítulo 7, la evidencia indica que existen perjuicios cuantificables debido a la degradación temprana de las baterías de los vehículos eléctricos por el uso en modo V2G, lo cual puede ser minimizado de diferentes maneras (mediante una adecuada optimización), pero en cualquier caso debe ser monetizado y compensado por la empresa que comercializa la energía eléctrica. En algún caso, las empresas que comercializan EE, o las regulaciones locales, pueden establecer incentivos adicionales para los propietarios, los cuales podrían tener algunas características particulares, como por ejemplo beneficios comerciales especiales, servicios exclusivos o incluso beneficios subjetivos de distinta naturaleza. El enfoque que aquí se realiza solamente contabiliza y evalúa los beneficios económicos resultantes de la venta de energía eléctrica a la empresa comercializadora. Dado que en Uruguay no está ni permitida ni

regulada la inyección de energía eléctrica almacenada en vehículos eléctricos hacia la red de UTE, el caso que se plantea es un caso hipotético en el cual se habilita el funcionamiento en modo V2G con inyección a la red del distribuidor.

Para llevar adelante la evaluación económica del modelo de negocio planteado, se realizaron entrevistas a actores relevantes del mercado local, tales como rentadoras de automóviles con experiencia en alquiler de vehículos eléctricos [74], técnicos de la división movilidad eléctrica de la empresa estatal de energía eléctrica (UTE) [75], expertos en movilidad eléctrica que trabajan con proyectos de inversión en movilidad eléctrica [76], así como además importadores de vehículos eléctricos, representantes de distintas marcas del mercado local [77] [78].

8.2. Modelo de negocio.

El modelo de negocio planteado en el presente capítulo consta de una empresa que se dedica al alquiler de vehículos automóviles, la cual decide incorporar vehículos eléctricos en su gama de productos ofrecidos. Dentro de las opciones que el caso de estudio analiza y compara, están las opciones con V2G y sin V2G. En la primera de las alternativas, la empresa debe considerar las inversiones necesarias para operar en modo V2G, dentro de lo cual debe estar incluidas las instalaciones eléctricas que permitan la inyección de energía a la red eléctrica, y además la inversión inicial debe contemplar la adquisición de vehículos que tengan la opción V2G. En tal sentido, la opción V2G ve aumentada la inversión inicial debido a ambas contribuciones, mientras que ve asimismo un ingreso adicional en su flujo de caja debido a la venta de energía eléctrica. Se menciona nuevamente que se trata de un caso hipotético que en Uruguay requeriría adecuaciones regulatorias que lo habiliten.

Por otra parte, la opción que no incorpora el V2G en su plan de negocios tiene una inversión inicial menor debido a que no es requerido un cargador bidireccional ni las instalaciones y gestiones correspondientes. Como contrapartida, no encuentra un ingreso adicional en su flujo de caja ya que no realiza ventas de EE a la empresa comercializadora de energía. En este caso, la degradación de sus baterías será menor que en el primer caso. En ambos casos el vehículo seleccionado es el mismo, ya que se lo selecciona por sus atributos de capacidad, desempeño y potencia, tratándose en este caso de un vehículo de gama media-alta.

Según lo establecido en el modelo de negocio, y acorde a lo señalado por actores locales [74] [76], el proyecto de inversión es evaluado a 5 años ya que es el tiempo que las rentadoras locales conservan sus vehículos, buscando beneficios en relación a los seguros que contratan y a las garantías de los fabricantes de vehículos. La diferencia entre ambas opciones queda establecida por el valor residual del proyecto, dada la degradación adicional de las baterías de los vehículos. Asimismo, como se mencionó, habrá diferencias en las inversiones y en los ingresos. Respecto al valor de depreciación del vehículo, estudios señalan que al cabo del quinto año el valor residual es igual al 45 % del valor original [25] bajo condiciones normales de uso, llegando al 15 % al cabo de 10 años.

8.2.1. Supuestos asumidos y presentación del modelo de negocio.

Asimiento como hipótesis que se habilita la inyección a la red en modo V2G, y a los efectos de monetizar las compras y ventas de energía eléctrica, en la presente sección se consideran los precios de energía eléctrica del pliego tarifario vigente de UTE (febrero 2022), asumiendo la tarifa para medianos consumidores, suministro en baja tensión (400 V, categoría MC1). Para esta tarifa, los servicios presentan en el tramo horario Punta-Llano una potencia contratada mayor o igual que 10 kW, de acuerdo al siguiente detalle:

- opcional para los servicios con potencia contratada máxima menor o igual que 40 kW,
- reglamentario para los servicios con potencia contratada máxima entre 40 kW y 200 kW,
- opcional para servicios con potencia contratada máxima igual o mayor que 200 kW.

Los cargos por consumo de energía, por potencia y cargo fijo, son presentados en la figura 8.1, mientras que los cargos por energía se distribuyen en tres períodos horarios, durante todos los días que integran la factura mensual, de acuerdo al siguiente detalle:

- horas Punta: de 18:00 a 22:00 hrs.
- horas Llano: de 07:00 a 18:00 y de 22:00 a 24:00 hrs.
- horas Valle: de 00:00 a 07:00 hrs.

Tarifa	Nivel de tensión kV	Precio de energía \$/kWh			Potencia máxima medida \$/kW	Cargo Fijo mensual \$
		Valle	Llano	Punta	Punta-Llano	
MC1	0,230 - 0,400	2,150	4,732	10,765	367,2	682,1

Figura 8.1: Extracto del pliego tarifario de UTE correspondiente a la tarifa Medianos Consumidores, subcategoría MC1.

Si bien la reglamentación vigente en Uruguay no admite la entrega de energía a la red, si se permite el arbitraje tarifario sin inyección, en el cual, mediante almacenadores (baterías) instalados en la industria o comercio, es posible realizar la recarga en el valle o en el llano y autoconsumir la energía almacenada en el llano o en el pico. Esto es, conceptualmente, recargar baterías en un horario a precios bajos y realizar autoconsumo cuando los precios son mayores, estando impedida la inyección de energía eléctrica a la red [79].

Sin perjuicio de haber sido comentados anteriormente o de hacer agregados o complementos posteriores en el texto, la siguiente enumeración resume los supuestos asumidos para establecer los márgenes y las condiciones del caso de estudio que se presenta en esta sección. Como fue mencionado, los supuestos asumidos tienen sustento en hipótesis razonadas en función de la información obtenida en la bibliografía de referencia y en las entrevistas realizadas, lo cual queda debidamente citado en cada caso.

8.2. Modelo de negocio.

- El ejercicio asume que se vuelca energía eléctrica desde el vehículo a la red eléctrica (V2G), lo cual no está actualmente permitido por la reglamentación.
- Se asume que la empresa comercializadora de EE vende y compra todas las cantidades de energía establecidas en el presente capítulo.
- Para una misma franja horaria, se asume que el precio de compra de EE es igual al precio de venta de EE. Dichos precios corresponden al pliego tarifario de UTE, tarifa MC1.
- Se asume tarifa medianos consumidores, subcategoría MC1.
- La recarga y la entrega de energía a la red se realiza a una potencia de 7.4 kW, AC, según indicación del representante.
- A una potencia de 7.4 kW y un período de 7 horas diarias, el total de energía de recarga igual a 51,8 kWh lo cual, en el vehículo seleccionado en 8.2.2, equivale a un DOD=78.8 %.
- Se asume una tasa de ocupación de los vehículos igual a 71 %, equivalente a unos 22 días de uso al mes o 260 al año. Se asume además, 113 km diarios recorridos [74], lo cual devuelve 30.000 km recorridos al año y 150.000 al cabo del período de evaluación de 5 años. Estos valores hacen que el vehículo se encuentre dentro del período de garantía del fabricante [77].
- Se asume que el vehículo eléctrico opera en modo V2G todos los días del año, incluso si no es utilizado en modo conducción. Cuando no es usado en modo conducción, recarga baterías en el valle e inyecta en el pico y en el llano.
- Se asume que se obtiene una exoneración del 42.44 % en la Comisión de Aplicación de la Ley de Promoción y Protección de Inversiones [76].
- Del mismo modo que ocurre con los vehículos convencionales con motor a combustión, se asume que el precio de la energía eléctrica lo reintegra el usuario del vehículo al finalizar el período de alquiler.
- El modelo asume que el vehículo siempre vuelve a la base, con el fin de implementar la descarga a la red. Esto podría ser de difícil implementación pero podría llevarse a cabo arreglos específicos que lo habiliten (por ejemplo, ubicando cargadores bidireccionales en puntos estratégicos como aeropuertos, hoteles, etc.)
- El vehículo eléctrico en modo V2G se asume operativo los 365 días del año. Del total de los días del año, 260 días (71 %) se considera en alquiler, lo cual es una tasa de ocupación conservadora, en tanto es bastante menor 87 % esperado [74], pero cobra sentido si se piensa en regímenes especiales de alquileres para vehículos eléctricos que operen en modo V2G.
- Cuando el vehículo no es usado en modo conducción (no es alquilado), el mismo es usado en modo V2G y los ingresos se calculan como la diferencia entre las ventas y las compras en los horarios correspondientes $((P * Q)_{punta} + (P * Q)_{llano} - (P * Q)_{valle})$.

8.2. Modelo de negocio.

- Se asume que el impacto en la degradación de las baterías se sitúan dentro de los casos más extremos y que no se ejecuta ninguna optimización de los procesos involucrados de carga/descarga, llevando la vida útil de la batería a un mínimo de 5 años.

El esquema implementado se muestra en la figura 8.2 donde son presentados los rangos horarios en los que el vehículo es utilizado. En la figura se indican los diferentes usos y sus correspondientes modos. Se observa que de 00:00 hs. a 07:00 hs. el vehículo es recargado en el período tarifario correspondiente al valle, alcanzando a cargar 51,8 kWh a una potencia de 7,4 kW. Luego, entre las 07:00 hs y las 18:00 hs. el vehículo es utilizado en modo conducción, consumiendo 15 kWh de energía en dicho régimen. Finalmente, el modo V2G es implementado entre las 18:00 hs. y las 24:00 hs., atravesando el período punta (18:00 a 22:00 hs) y parte del período llano (22:00 a 24:00 hs.), entregando a la red un total de 36,8 kWh por día.



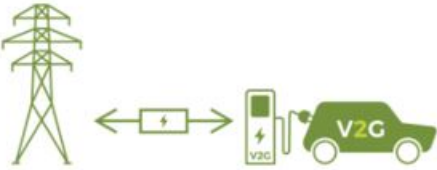
			
Horario 0 a 7 hs. Tarifa período valle Vehículo en recarga 51,8 kWh	Horario 7 a 18 hs. Tarifa período llano Vehículo en conducción 15 kWh	Horario 18 a 22 hs. Tarifa período punta Vehículo en modo V2G 29,6 kWh	Horario 22 a 24 hs. Tarifa período llano Vehículo en modo V2G 7,2 kWh

Figura 8.2: Esquema de uso del vehículo eléctrico según los diferentes rangos horarios.
Elaboración propia.

8.2.2. Vehículo seleccionado para el modelo de negocio.

Dentro de las opciones disponibles en el mercado, se seleccionó un vehículo eléctrico de gama media o media-alta, de origen chino, marca Hozon, modelo Nezha U 500. En la ficha técnica se indica una autonomía mayor a 500 km NEDC, lo cual fue rectificado por el representante, alcanzando un total de 400 km en un entorno urbano. Un extracto de la ficha técnica del vehículo es presentada en la figura 8.3 mientras que las características de habitabilidad y terminaciones se muestran en la figura 8.4.

8.2. Modelo de negocio.

	NEZHA 520 U Comfort	NEZHA 520 U Luxury
Parámetros técnicos		
Largo*Ancho*Altura (mm)	4530*1860*1628	
Wheel base (mm)	2770	
Tipo de batería	Ternary lithium battery	
Tipo de motor	Permanent magnet synchronous motor	
Autonomía NEDC (km)	≥ 500	
Potencia máxima (kW)	150	150
Torque máximo (N·m)	310	310
Velocidad máxima (km/h)	≥155	≥ 155
Aceleración (0-100km/h) (s)	<7	<7
Cargador on-board (kW)	6.6	
Enchufe de carga estándar europeo Tipo 2	●	●
Tiempo de carga lenta (h)	≤ 10 h	
Tiempo de carga rápida (h) (30%-80%)	30min	
Llantas y neumáticos		
Neumáticos	225/60 R18	225/55 R19
Llantas	Llantas de aleación 18"	Llantas de aleación 19"

Figura 8.3: Extracto de la ficha técnica del vehículo seleccionado para el estudio. Fuente: información del representante.

Se señala que el consumo de este vehículo es equivalente a unos 165 Wh por km recorrido, alcanzando una autonomía real de unos 400 km, con un banco de baterías de 66 kWh. Una de las características más relevantes de este vehículo es la posibilidad de entregar energía de la batería a la red eléctrica (V2G) a una potencia de carga/descarga de 7.4 kW AC, según indicación del representante..



Figura 8.4: Imágenes proporcionadas por el representante de los exteriores e interiores del vehículo seleccionado.

Como puede verse en las imágenes presentadas en 8.4, se trata de una SUV con tracción integral (4x4) con amplia capacidad en el habitáculo de hasta 5 pasajeros.

8.2.3. Inversiones requeridas.

Por otra parte, la evaluación de las inversiones requeridas para el modo V2G son presentadas en el cuadro 8.2.3 donde son presentados los valores de las inversiones en infraestructura eléctrica [76], lo cual incluye un cargador bidireccional de 7,4 kW de potencia, más el aumento de potencia requerido ante UTE, así como las instalaciones eléctricas que contienen los trámites correspondientes. Del mismo modo, se incluye el monto de la inversión CIF en el automóvil eléctrico, acorde a la información proporcionada por el representante de la marca [77].

VE + V2G	USD
Cargador bidireccional 7,4 kW	2400
Instalaciones eléctricas	2000
Aumento Potencia Contratada UTE	173
Vehículo eléctrico Hozon U 500	38500
Total inversión	43073

Cuadro 8.1: Inversiones estimadas para el modelo de negocio que incluye un sistema V2G.

Análogamente, la evaluación de las inversiones requeridas para el modo VE (el cual no incluye la operación V2G) son presentadas en el cuadro 8.2.3 donde son presentados los valores de las inversiones en infraestructura eléctrica [76], lo cual incluye un cargador unidireccional de 7,4 kW de potencia, más el aumento de potencia requerido ante UTE (lo cual también es requerido), así como las instalaciones eléctricas que contienen los trámites correspondientes. Del mismo modo, se incluye el monto de la inversión CIF en el automóvil eléctrico, acorde a la información proporcionada por el representante de la marca [77]. Cabe señalar que en el modelo de negocio que se plantea en el presente ejercicio, la empresa rentadora de vehículos busca un vehículo eléctrico con las prestaciones del modelo presentado (Hozon U 500), lo cual debe incluir todas las características técnicas y de confort que este vehículo presenta, sin importar si cuenta o no con la opción de entregar energía a la red [74]. Tal decisión responde a la demanda del mercado, razón por la cual el vehículo utilizado en ambos casos es el mismo, diferenciándose únicamente si se aplica o no la opción de entregar energía a la red eléctrica.

VE (sólo ciclos de conducción)	USD
Cargador unidireccional 7,4 kW	800
Instalaciones eléctricas	1000
Aumento Potencia Contratada UTE	173
Vehículo eléctrico Hozon U 500	38500
Total inversión	40473

Cuadro 8.2: Inversiones estimadas para el modelo de negocio que incluye un sistema VE, donde el vehículo es sometido únicamente a ciclos de conducción.

8.2.4. Valor residual del proyecto.

El valor residual del proyecto debe considerar la depreciación de los activos involucrados en el proyecto, tanto los incorporados en la inversión inicial como en el caso de aquellos que se incorporen en instancias intermedias, si los hubiera. En el presente caso de estudio, dado que la evaluación se realiza a 60 meses, no se alcanza a la incorporación de nuevos activos, como por ejemplo la reposición de un nuevo banco de baterías.

En relación a los activos involucrados en el proyecto, se considera, por una parte, que el valor residual de las instalaciones eléctricas realizadas para la recarga de los vehículos eléctricos es igual a cero al cabo del período. Esto se considera así dado que son activos de escaso valor inicial, y están sujetos además a una muy rápida depreciación dados los avances tecnológicos que se están dando en la materia.

En relación a la depreciación del vehículo eléctrico, la bibliografía consultada [25] establece una serie de criterios para la determinación de los valores de depreciación, llegando a una curva logarítmica de depreciación en función del tiempo. El estudio se basa en nuevos datos sobre las tasas de depreciación de los vehículos eléctricos y los costos de mantenimiento y reparación, junto con los precios promedio de los vehículos en el mercado, para estimar cuánto pueden ahorrar a los consumidores los EV más populares de la actualidad en comparación con vehículos ICE

similares.

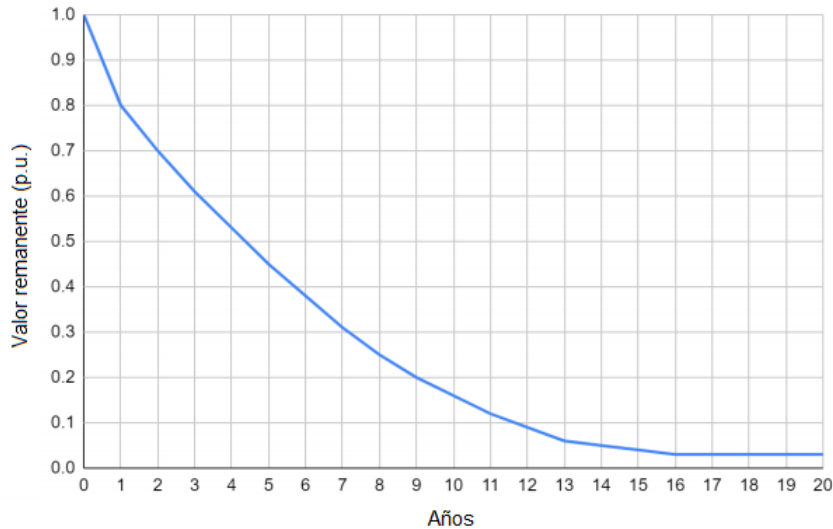


Figura 8.5: Curva de depreciación de vehículos eléctricos utilizada para la evaluación. Fuente: [25].

De acuerdo a los resultados presentados en el capítulo 7 así como además a lo expuesto en la sección 3.5 del capítulo 3, el resultado de operar un vehículo eléctrico en modo V2G sin realizar una optimización de los procesos de descarga y a DOD de entre el 80 % y el 90 %, puede llevar a una degradación adicional de la batería de un 5 % anual, por sobre la degradación esperada en modos de conducción sin V2G. Tales resultados llevarían a adelantar aproximadamente en 5 años el reemplazo del banco de baterías, debiendo ser aproximadamente en el año 5 en lugar del año 10, dependiendo del vehículo, de la batería, de las condiciones de la carga y descarga, y de los demás parámetros mencionados anteriormente.

Dado lo anterior, el resultado del esquema planteado en el modelo de negocio lleva a que, al cabo del 5° año, el vehículo no solamente ha llegado al final de la garantía y también a un punto de quiebre en el valor de los seguros y mantenimientos, sino que además ha llevado la batería a un envejecimiento tal que se hace necesario el recambio. Otro punto de vista podría ser que la degradación de la batería al cabo del 5° año es tal que el envejecimiento se corresponde con un vehículo de 10 años.

En tal sentido, a los efectos de comparar el uso del vehículo en modo V2G contra el uso del vehículo sin V2G, se considera que el valor residual del vehículo con V2G, al cabo del 5° año, se corresponde con el valor de un vehículo de 10 años. Esto lleva a que el valor residual para el modo V2G sea igual al 15 % de su valor inicial, mientras que es igual al 45 % de su valor inicial para el modo V2G. Esta diferencia (45 %-15 % del precio del vehículo) es igual a USD 11.550, lo cual, acorde al cálculo realizado en 8.2.5 es algo menor al precio de reemplazo de un pack de baterías nuevo para este vehículo, establecido en USD 13.200 dólares CIF.

Cabe mencionar en este punto que, si bien la literatura refiere al 80 % del SOH como el punto de corte en el cual la batería deja de ser apta para el uso en el vehículo eléctrico, las baterías de BYD en Uruguay (LFP BYD Blade Battery) tienen una garantía en sus vehículos de 500.000 km u 8 años con un SOH del 60 %, habilitando de este modo el uso del vehículo más allá de un SOH igual a 80 % [78]. En tal sentido, asumiendo que a lo largo del quinto año de uso en modo V2G el vehículo eléctrico alcanza un valor de SOH en el entorno del 80 %, el presente ejercicio asume que el vehículo puede responder adecuadamente a los requerimientos del mercado (incluso considerando lo presentado en 7.5), pero se reconoce que en términos de disponibilidad de energía se llegaría al límite de lo establecido en el modelo.

8.2.5. Costo de reemplazo de un banco de baterías de Litio-ion.

Si bien no se recurrió al reemplazo del banco de baterías en el ejercicio del presente capítulo, en la presente sección se analiza el costo por kWh que puede tener un banco de baterías de iones de Litio. Este ejercicio tiene sentido para validar el modelo de degradación de vehículos eléctricos presentado en 8.2.4.

Además del precio internacional obtenido en la literatura de referencia [80], se presenta una apertura de los costos e impuestos que deben ser agregados a un banco de baterías de iones de Litio para ser nacionalizado y comercializado en el mercado local. El tipo de baterías considerada en la presente subsección corresponde a la batería de Litio-ion NMC, cuyo uso se encuentra ampliamente extendido en el mercado de los vehículos eléctricos.

Como puede verse a continuación, el costo de las baterías recargables de iones de Litio que se utilizan en los teléfonos, computadoras portátiles y vehículos eléctricos se ha reducido sensiblemente en los últimos años y ha sido uno de los principales motores del rápido crecimiento, en particular de los vehículos eléctricos. Sin embargo los intentos de cuantificar ese descenso de costos han producido resultados ambiguos y contradictorios que han dificultado las proyecciones a futuro de esta tecnología, o han incluso dificultado las posibilidades de diseñar políticas públicas y/o la asignación de recursos para investigación. No obstante lo anterior, investigadores del MIT han realizado un análisis exhaustivo [81] de los estudios que han analizado el descenso de los precios de estas baterías, el cual se remonta a más de tres décadas, incluyendo el análisis de los conjuntos de datos y documentos originales para llegar a una imagen clara de la trayectoria de precios de esta tecnología. Los investigadores descubrieron que el costo de estas baterías se ha reducido en un 97 % desde su introducción comercial en 1991. Este ritmo de caída es mucho más rápido de lo que muchos analistas habían afirmado y es comparable al de los paneles solares fotovoltaicos, que algunos habían considerado un caso excepcional [82].

Aunque está claro que se han producido descensos en los costos de algunas tecnologías de energía limpia como la solar y la eólica, al estudiar el descenso de los precios de las baterías de iones de Litio se observa que existe desacuerdo en cuanto a la rapidez del descenso de los precios. Desacuerdos similares aparecieron al rastrear otros aspectos importantes del desarrollo de las baterías, como la densidad energética y la energía específica, los cuales son cada vez mejores pero están sometidos a informaciones comerciales que introducen muchas veces importantes interferencias. Si bien el descenso de costos de las baterías ha propiciado el reciente crecimiento de las ventas de vehículos eléctricos, no está claro hasta qué punto ha incidido este descenso

de precios en los movimientos del mercado. Gracias al análisis realizado en [82], se ha podido confirmar que las tecnologías de baterías de iones de Litio han bajado sus costos y precios a un ritmo comparable al de los módulos fotovoltaicos.

En una primer aproximación, puede resultar llamativo cierto nivel de incertidumbre y desacuerdo sobre los costos de las baterías de iones de Litio y a qué factores se debe el abaratamiento, pero gran parte de la información se encuentra en forma de datos corporativos reservados a los que es difícil acceder para los analistas e investigadores, y la mayoría de las baterías de iones de Litio para vehículos eléctricos no se venden directamente a los consumidores. En cambio, los fabricantes compran las baterías de iones de Litio y las incorporan a los vehículos eléctricos o bien las empresas fabricantes de vehículos (OEM) compran baterías hechas bajo pedido a gran escala o tienen fábricas propias, por lo que los precios que se negocian o se contabilizan internamente no se hacen públicos. No obstante lo anterior, los costos de las baterías determinan en gran medida la disparidad de precios de los vehículos eléctricos respecto a los vehículos convencionales, lo que determina la importancia de la determinación justa de sus precios.

La investigación y desarrollo en materia de baterías intenta avanzar en la tecnología de baterías para ayudar a mejorar la penetración en el mercado de los vehículos híbridos y eléctricos, superando las barreras actuales. Para lograr esto, el foco está puesto en un costo de batería reducido, mayor rendimiento de la batería, admisibilidad de carga extremadamente rápida (en inglés, XFC extreme fast charging) a diferentes temperaturas, celdas de química avanzada para una mayor duración y vida útil, mayor tolerancia a condiciones de uso extremo como sobrecarga o sobredescarga, así como también un esquema de reciclaje y sostenibilidad más rentables.

El Reporte del progreso anual 2019 de la Oficina de Tecnología de Vehículos del Departamento de Energía de los Estados Unidos [83] señala que el precio actual de adquisición de un pack de baterías para vehículo eléctrico en ese país en 2019 era de USD 235 por kWh, para un pack típico de entre 3000 y 5000 ciclos de uso y entre 10 y 15 años de duración, lo cual se condice con precios actuales (2022) que pueden ser encontrados entre varios proveedores internacionales. Por otra parte, para el traslado de dicho precio al mercado local, los impuestos correspondientes deben ser aplicados, lo cual depende del régimen de importación en el cual se introduce el artículo en el mercado local.

Respecto a la importación de vehículos eléctricos con sus respectivas baterías incorporadas, debe ser tenida en cuenta la siguiente estructura de gastos y costos:

- Precio en origen.
- Precio CIF de la unidad (precio en origen, más seguro y flete a puerto Montevideo), entre 3 y 4 % más que precio en origen.
- Arancel de importación (23 % sobre el valor CIF). Este arancel aplica siempre que los vehículos no provengan de México o Mercosur.
- Tasa consular, entre 2 y 5 %
- Gastos y honorarios para el despacho de aduanas, movimientos portuarios, agencia marítima y fletes en el entorno del 3 % valor CIF

8.3. Resultados de la evaluación económica.

- Impuesto IVA, 22 %
- Impuesto IMESI, depende de la categoría del vehículo. Para vehículos eléctricos es 5.75 %
- Ganancia del importador y concesionario entre 4 y 12 %

Realizando la adición de los impuestos enumerados, el costo de una batería nueva dentro de un vehículo eléctrico colocada en el mercado local, puede estimarse un 75 % más que el precio en origen, aproximadamente, lo que ubicaría el precio por kWh en unos 410 dólares. Este cálculo corresponde a la importación de vehículos y el incremento es para el caso de las baterías de vehículos eléctricos en Uruguay, y no tiene en cuenta posibles regímenes especiales de importación que puedan ser introducidos mediante regulaciones particulares.

Lo anterior debe ser reconsiderado si se busca calcular el precio de baterías en regímenes especiales de importación, o bien si se importan baterías no dentro de vehículos sino de forma separada. En tal caso, corresponde considerar al menos los siguientes costos para la reposición de un banco de baterías:

- Precio en origen.
- Precio CIF de la unidad (precio en origen, más seguro y flete a puerto Montevideo), entre 3 y 4 % más que precio en origen.
- Tasa consular, entre 2 y 5 %
- Gastos y honorarios para el despacho de aduanas, movimientos portuarios, agencia marítima y fletes en el entorno del 3 % valor CIF

Considerando lo anterior, el precio CIF más los costos y tasas correspondientes, se sitúan (dependiendo del proveedor, la calidad del producto y sujeto a variaciones de mercado), en no más de USD 200 para la batería LFP y no más de USD 260 para la batería NMC [78]. Para el caso del vehículo Hozon U 500, el costo de reemplazo de un banco de baterías se situaría en unos 13.200 dólares CIF, con lo cual se considera que el modelo de degradación de los vehículos eléctricos presentado en 8.2.4 es razonable y se ajusta a los precios del mercado.

8.3. Resultados de la evaluación económica.

Los resultados de la evaluación económica son presentados en la presente sección, donde se exponen las hipótesis y supuestos, las fuentes de la información utilizada y los valores de los datos utilizados los cálculos realizados. La tabla 8.3 expone los valores de las principales variables de entrada, las cuales son presentadas en el presente capítulo, junto con las correspondientes fuentes de información.

8.3. Resultados de la evaluación económica.

Vehículo seleccionado	Hozon NEZHA U500	
Autonomía declarada por el fabricante (NEDC)	km	400
Consumo especificado	kWh/km	0,165
Consumo por día en conducción	kWh/día	18,6
Energía diaria inyectada (V2G)	kWh/día	33,2
Energía diaria recargada en Valle (diario disponible)	kWh/día	51,8
Porcentaje de ocupación del vehículo	71 %	
Días operativos / año (rent a car)	260	
recorrido diario (rent a car)	km/día	113
Potencia de carga/descarga	kW	7,4
Días operativos / año (EE)	365	
Capacidad almacenamiento del pack	kWh	66
Precio de baterías	USD/kWh	201
Energía específica LFP CATL	Wh/kg	140
Densidad de energía LFP CATL	Wh/L	214
Peso del pack	kg	471
Precio diario alquiler VE	USD/día	42
Precio de compra de EE cuando no se alquila	USD/kWh	0,049
Costo de la EE para recarga de batt	USD/kWh	0,049
Precio de venta de la EE punta	USD/kWh	0,250
Precio de venta de la EE llano	USD/kWh	0,110
Tasa de descuento	10 %	
Tipo de cambio	43	

Cuadro 8.3: Datos de entrada para los cálculos económicos y financieros del caso.

Dado que el modelo planteado es tal que la recarga de energía solamente se realiza en el valle, el total de energía que se recarga en la batería es 51.8 kWh. A la inversa, se observa que el total de energía diaria inyectada a la red es 33.2 kWh, que se desprenden de los 29.6 kWh entregados en punta, más 3.6 kWh entregados en llano. Se desprende asimismo de lo anterior que del total de los 36.8 kWh disponibles entre punta y llano, solamente se aprovecha el 90.2 % (33.2 kWh), dada la limitación de cantidad de energía recargada. Las pérdidas no fueron consideradas en el presente capítulo.

Por su parte, la tabla 8.4 presenta los resultados de la evaluación para el caso V2G. En la misma queda presentado el resultado para el valor actual neto (VPN), igual a USD 16.757, así como también el valor de la tasa interna de retorno, igual al 24 %.

8.3. Resultados de la evaluación económica.

Año	0	1	2	3	4	5
Inversiones iniciales	-43073					
Ingresos por alquiler del VE		10920	10920	10920	10920	10920
Ingresos por ventas EE		2847	2847	2847	2847	2847
Costo de recarga (sólo V2G)		-272	-272	-272	-272	-272
costo mensual de mantenimiento		-512	-512	-512	-512	-512
Costos de seguros		-663	-663	-663	-663	-663
Costos por patente		-1149	-1149	-1149	-1149	-1149
Valor residual vehículos						5775
Exoneraciones COMAP (42,44 %)		3656	3656	3656	3656	3656
TOTALES (USD)	-43073	14827	14827	14827	14827	20602
VPN (USD)	16757					
TIR	24 %					

Cuadro 8.4: Valores resultantes de la evaluación económica para el proyecto con operación en modo V2G.

Los valores presentados con signo negativo representan egresos, mientras que los ingresos son los valores positivos. La tabla recoge el valor de la inversión inicial presentada en la sección 8.2.3, siguiendo por el listado tanto de ingresos como de egresos. Los ingresos corresponden tanto al concepto de alquiler del vehículo como también los ingresos por venta de energía eléctrica acorde al esquema presentado en la sección 8.2. Los egresos, por su parte, corresponden al valor de los seguros, mantenimiento, patente anual, y el costo por la recarga de energía eléctrica los días en los cuales el vehículo no es alquilado ("Costo de recarga - sólo V2G"). Finalmente, el valor residual al cabo del quinto año es presentado, seguido de las exoneraciones correspondientes a la Ley de Promoción y Protección de Inversiones.

Finalmente, la tabla 8.5 presenta los resultados de la evaluación para el caso de adquisición y puesta en alquiler del vehículo eléctrico propuesto, sin operar en modo V2G. En la misma queda presentado el resultado para el valor actual neto (VPN), igual a USD 14.138, así como también el valor de la tasa interna de retorno, igual al 20 %.

8.4. Análisis de sensibilidad.

Año	0	1	2	3	4	5
Inversiones iniciales	-40473					
Ingresos por alquiler del VE		10920	10920	10920	10920	10920
costo mensual de mantenimiento		-512	-512	-512	-512	-512
Costos de seguros		-663	-663	-663	-663	-663
Costos por patente		-1149	-1149	-1149	-1149	-1149
Valor residual vehículos						17325
Exoneraciones COMAP (42,44 %)		3435	3435	3435	3435	3435
TOTALES (USD)	-40473	12034	12034	12034	12034	29359
VPN (USD)	15.902					
TIR	22 %					

Cuadro 8.5: Valores resultantes de la evaluación económica para el proyecto con operación en modo alquiler sin V2G.

Los valores presentados con signo negativo representan egresos, mientras que los ingresos son los valores positivos. La tabla recoge el valor de la inversión inicial presentada en la sección 8.2.3, seguido luego por el listado de ingresos y egresos. Los ingresos corresponden en este caso solamente al concepto de alquiler del vehículo, no habiendo ingresos por venta de energía eléctrica. Los egresos, por su parte, corresponden al valor de los seguros, mantenimiento y patente anual. Finalmente, el valor residual al cabo del quinto año es presentado (en este caso mayor que el caso anterior), seguido de las exoneraciones correspondientes a la Ley de Promoción y Protección de Inversiones. Para este caso, sin V2G, el porcentaje de ocupación podría ser mejor que el caso anterior en tanto no se presenta la dificultad de volver a la base, lo cual podría ser igualmente discutible en la actualidad, ya que no es evidente que los vehículos eléctricos de alquiler no tengan, de cualquier manera, que volver a la base para realizar la recarga, aunque no opere en modo V2G.

El resultado tal cual ha sido presentado y acorde a los supuestos establecidos, muestra un mejor desempeño de modo V2G que el modo alquiler sin V2G. Estudios de sensibilidad pueden ser conducidos para evaluar la sensibilidad precio, o sensibilidad porcentaje de ocupación, entre otras variables, arrojando resultados que pueden modificar en cierto grado los valores aquí presentados. Sin embargo, el ejercicio pone de manifiesto de forma fehaciente lo favorable que resulta la inversión, con supuestos y condiciones de borde muy conservadores que vuelven robusto el resultado del ejercicio presentado.

8.4. Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad que se plantea, pone el foco en los incentivos que pueden ser aplicados para favorecer la inversión en un sistema V2G, en contraposición con la misma inversión sin V2G. Dentro de los factores identificados, plausibles de ser aplicados, se encontraron en primer instancia los beneficios que otorga la COMAP así como también posibles incentivos tarifarios a la hora de comprar energía eléctrica por parte de la empresa comercializadora de

8.4. Análisis de sensibilidad.

energía.

La tabla de la figura 8.6 presenta el resultado numérico del análisis de sensibilidad al variar los dos factores antedichos. En relación a la variación de los beneficios que otorga la COMAP, fue tomado un máximo de 60 %, lo cual suele ocurrir en algunos períodos cuando se busca realizar la promoción de ciertas actividades. Por otra parte, en relación a un posible aumento tarifario, se tomó un máximo posible de 50 %, en base a que el precio por kWh en horario punta en la tarifa Movilidad Eléctrica es actualmente 47 % mayor al precio, en el mismo tramo, que el establecido en la tarifa MC1.

Valor actual neto		Sensibilidad precio (incremento porcentual y USD/kWh)					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
16.757		0,250	0,275	0,300	0,325	0,350	0,376
Beneficio COMAP	42%	16.757	17.783	18.808	19.833	20.859	21.884
	45%	17.593	18.619	19.644	20.669	21.695	22.720
	50%	19.226	20.252	21.277	22.302	23.328	24.353
	55%	20.859	21.884	22.910	23.935	24.960	25.986
	60%	22.492	23.517	24.543	25.568	26.593	27.619

Figura 8.6: Valores del VAN, resultantes del análisis de sensibilidad al aumentar los precios de venta de EE (hora punta) y los beneficios de la Ley 16.906.

La tabla presenta, sobre la izquierda, los valores de posibles beneficios otorgados por la COMAP en forma de reintegros impositivos, partiendo del valor actual (42,44 %) hasta un máximo hipotético de 60 %. Por otra parte, hacia la derecha de la tabla se presentan los resultados del análisis de sensibilidad al aumentar los precios de venta de energía eléctrica por parte de la rentadora de automóviles. Se observa cómo el valor actual neto evoluciona de forma muy favorable si se manejan ambos mecanismos en simultáneo, o bien incluso si se aplica solamente uno de los posibles incentivos. El valor de referencia de precio en el horario punta (precio actual para la tarifa MC1) es de USD 250 por cada kWh. Por otra parte, el valor actual neto de referencia para el proyecto sin V2G, contra el cual se realiza la comparación, es USD 14.129, de lo que se deduce que los posibles mecanismos de incentivos pueden volver muy atractiva la inversión en V2G.

Por su parte, la tabla de la figura 8.7 presenta el resultado numérico del análisis de sensibilidad al variar los dos mismos factores. En relación a la variación de los beneficios que otorga la COMAP, fue tomado el mismo máximo de 60 %, replicando los argumentos anteriores, y lo mismo aplica para el posible aumento tarifario (máximo aumento en horario punta igual al 50 %).

8.4. Análisis de sensibilidad.

Tasa interna de retorno		Sensibilidad precio (incremento porcentual y USD/kWh)					
		0%	10%	20%	30%	40%	50%
24%		0,250	0,275	0,300	0,325	0,350	0,376
Beneficio COMAP	42%	24%	24%	25%	26%	27%	28%
	45%	24%	25%	26%	27%	27%	28%
	50%	26%	26%	27%	28%	29%	29%
	55%	27%	28%	28%	29%	30%	31%
	60%	28%	29%	30%	30%	31%	32%

Figura 8.7: Valores de la TIR resultantes del análisis de sensibilidad al aumentar los precios de venta de EE (hora punta) y los beneficios de la Ley 16.906.

La tabla presenta los valores de posibles beneficios otorgados por la COMAP en forma de reintegros impositivos, partiendo del valor actual (42,44 %) hasta un máximo hipotético de 60 %. Del mismo modo, hacia la derecha de la tabla se presentan los resultados del análisis de sensibilidad al aumentar los precios de venta de energía eléctrica. Se observa cómo la tasa interna de retorno evoluciona de forma muy favorable si se manejan ambos mecanismos en simultáneo, o bien incluso si se aplica solamente uno de los posibles incentivos. La tasa interna de retorno de referencia para el proyecto sin V2G, contra la cual se realiza la comparación, es 20 %, de lo que se deduce que los posibles mecanismos de incentivos pueden volver muy atractiva la inversión en V2G, alcanzando valores que fácilmente pueden alcanzar el 28 % hasta una tasa interna de retorno máxima igual a 32 %.

Finalmente, dada la mejora potencial que puede llegar a tener la degradación de la batería bajo un proceso de optimización, tal cual fue presentado en la sección 7.12, se presenta en la figura 8.8 la variación del VAN y de la TIR para los casos en que el valor residual del vehículo eléctrico se ve mejorado frente al caso menos favorable.

		Valor residual del vehículo					
		15%	20%	25%	30%	35%	40%
VAN	USD 16.757	16.757	17.953	19.148	20.343	21.539	22.734
TIR	24%	24%	24%	25%	26%	26%	27%

Figura 8.8: Valores del VAN y de la TIR resultantes del análisis de sensibilidad al mejorar el valor residual del vehículo.

De lo anterior se deduce que los potenciales beneficios obtenidos del plan de inversión en modo V2G, pueden ser aun mejorados si se considera la introducción de adecuados algoritmos de optimización que reduzcan el impacto del V2G en la degradación de las baterías. El algoritmo de optimización podría llegar a afectar el porcentaje de ocupación del vehículo, ya sea en modo conducción como en modo V2G, por lo que los valores de la tabla 8.8 sólo corresponden al caso hipotético en el cual solamente mediante ajustes menores se reduce la degradación de las baterías y en consecuencia el valor residual del vehículo aumenta. Señalado lo anterior, se

introduce en consecuencia la pregunta acerca de la determinación del SOH de las baterías en vehículos eléctricos usados. Tal asunto presenta una serie de desafíos, los cuales habrían de ser abordados si se pretende una determinación precisa y fehaciente del SOH, lo cual se entiende tendría repercusión en una correcta valorización de la depreciación de un vehículo eléctrico con cierto tiempo de uso.

8.5. Incentivos y herramientas de promoción del V2G.

En relación a las posibles herramientas de promoción del funcionamiento de los vehículos eléctricos entregando energía eléctrica a la red y brindando servicios auxiliares asociados, se señala que uno de los primeros pasos habría de ser la habilitación regulatoria de tal esquema. Para tal fin, el marco regulatorio podría tomar elementos provenientes de los esquemas planteados para la inyección a la red a partir de la generación solar o también eólica en baja tensión (prohibido cuando se implementan sistemas de almacenamiento), y se entiende que no existen impedimentos técnicos para su implementación.

En segundo lugar, como queda de manifiesto en la sección anterior, otra de las posibles herramientas para la promoción del V2G serían los mecanismos de promoción de las inversiones en instalaciones eléctricas que permitan el intercambio bidireccional. Tales soluciones tecnológicas se encuentran ya disponibles en el mercado, por lo que no se observa una barrera tecnológica al respecto. Al igual que lo anterior, y como ha quedado de manifiesto también en la sección anterior, una de las posibles herramientas de promoción del V2G puede también ser encontrada en los incentivos desde el punto de vista de las tarifas, las cuales se entiende pueden propiciar de muy buena manera la adopción de este tipo de tecnología a pesar de los impactos en las baterías que los usuarios puedan percibir.

Capítulo 9

Conclusiones

La presente documentación corresponde a la tesis presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la República (UdelaR), en cumplimiento parcial de los requisitos de la Maestría en Ingeniería de la Energía y se titula *Impactos en la batería de un vehículo eléctrico debido a la entrega de energía remanente a una red eléctrica inteligente (V2G)*. Como el título lo señala, el trabajo buscó centrarse en el estudio de los impactos que puede tener sobre la batería de un vehículo eléctrico el uso más allá de la conducción, cuando es conectado a la red eléctrica de distribución para entregar energía a la red buscando diversos propósitos. Dentro de los propósitos buscados, puede entenderse que se busca, por un lado, el aprovechamiento de un activo con capacidad de almacenamiento que se encuentra ocioso gran parte del tiempo, sin ser aprovechado. Por otra parte, desde el punto de vista del propietario del vehículo eléctrico, puede existir un beneficio económico interesante si se compensa adecuadamente la degradación de la batería de su vehículo cuando es usado en modo V2G, o incluso puede verse favorecido por beneficios múltiples como descuentos, premios, canjes, etc., si diversas herramientas comerciales son desplegadas por actores del mercado.

Desde el punto de vista de la red, diversos beneficios pueden ser obtenidos si se realiza una implementación adecuada, tales como el *Peak Shaving*, el *Valley Filling*, la compensación de reactiva, regulación de tensión, regulación de frecuencia o servicios de respaldo de energía. Esto debe ser adecuadamente implementado si se quiere lograr el propósito buscado. Dentro de lo mencionado, el *Peak Shaving* y el *Valley Filling* parecen ser relevantes en relación a la gestión de la demanda, pudiéndose a mediano plazo ser obtenidos resultados importantes, algunos de los cuales podrían ser tenidos en cuenta desde el punto de vista de la planificación del despacho de carga y desde el punto de vista de la provisiones de inversión en relación a la infraestructura de recarga. En tal sentido, ciertos reparos que pudieran existir en relación a la demanda que generaría la expansión del parque automotor de vehículos eléctricos, podrían verse mitigados si se implementara el V2G.

Señalado lo anterior, que se corresponde en parte con la motivación del trabajo, surge la pregunta acerca de la incidencia que pueda tener sobre la batería del vehículo eléctrico, el uso de éste en modo V2G, inyectando a la red cierta cantidad de energía periódicamente. Para responder tal interrogante y sus preguntas relacionadas, se ha elaborado el presente trabajo con

base en una recopilación bibliográfica, ensayos de campo y simulaciones de software. Al cabo de tal desarrollo ha resultado lo que se recopila en la presente documentación.

El trabajo comienza presentando las principales nociones en relación a los vehículos híbridos y eléctricos, señalando sus principales características, sus elementos y las diferentes configuraciones. Dentro de las diferentes arquitecturas de los vehículos híbridos y eléctricos, aparecen diferentes tipos de baterías que se adecuan a cada caso, siendo actualmente las de iones de Litio las más extendidas dentro de los fabricantes. Es, de hecho, en el tercer capítulo donde algunos de los diferentes tipos de baterías son presentados, luego de exponerse los principales fundamentos de la composición de una celda electroquímica y su funcionamiento. Del mismo modo, las principales variables que son utilizadas para medir el desempeño de celdas y baterías son presentadas, explicando asimismo su utilidad. Dentro del mismo capítulo es que se introducen los principales mecanismos de envejecimiento identificados, procurando explicar su incidencia en celdas y baterías, dada la importancia que el hecho tiene para la determinación del impacto del V2G en la degradación de estos elementos.

El trabajo prosigue con una presentación de los ciclos de conducción de los vehículos, fundamentales también a la hora de determinar las profundidades e intensidades de descargas y recargas regenerativas durante el uso en modo conducción. A los efectos de elaborar un software de simulación y de comprender las fuerzas involucradas en el movimiento de los vehículos, un capítulo destinado a la temática fue escrito, lo cual sirvió como insumo para comprender los desarrollos de software que fueron luego tomados. Finalmente, para dar comprensión holística al problema del V2G, los diferentes tipos de cargadores para vehículos eléctricos fueron presentados para finalmente hacer un análisis técnico del problema en sí mismo del *Vehicle To Grid*, cerrando el trabajo con el análisis económico de un caso de estudio en el mercado local.

De lo mencionado, cabe en este capítulo poner foco en los principales hallazgos en relación a los mecanismos de envejecimiento y degradación de las baterías de iones de Litio. Dentro de estos hallazgos, se señala la incidencia de la temperatura, el rango de funcionamiento del SOC, el efecto de la profundidad de la descarga, el *C-rate*, condiciones de estacionamiento y condiciones de recarga. En relación a las temperaturas extremas, de momento es esperable que no sea una variable problemática para el V2G en tanto las descargas a la red se realizan a baja potencia (mucho más baja que la que toma el motor del vehículo en modo conducción, no generando entonces incrementos relevantes de la temperatura), y existen además mecanismos de control y gestión que eventualmente actuarían en caso de ser excedido cierto umbral. En relación a los ratios de descarga que pueden estar implicados en un proceso V2G, tampoco se encontró que pueda ser problemático en tal modo de funcionamiento, ya que la inyección a red se realiza, otra vez, a baja potencia y de forma controlada. En relación a las consecuencias del DOD y la entrega de porciones importantes de energía, este sí se presenta como el efecto más importante en relación a la degradación vinculada con el V2G. De hecho, como fue presentado, al cabo de 2000 ciclos (en el caso presentado, algo más de cinco años) el impacto en la degradación puede representar una degradación del 10 % si el DOD se sitúa en un 90 %, es decir el doble de la degradación esperada para un DOD menor a 65 %. Este resultado, que se desprende por un lado del análisis bibliográfico, pero se sustenta también en las simulaciones de Matlab-Simulink implementadas, representa una de las bases sobre las que se apoya el análisis del caso

de estudio presentado, en el cual se obtienen beneficios económicos en el caso V2G Vs. el caso sin V2G, a pesar de la severa degradación de la batería. En relación a los resultados del análisis económico, queda claro que la inversión en V2G es favorable si se la compara con el mismo escenario sin V2G, aún en el peor escenario de degradación y sin realizar optimización alguna de la operativa. De ahí en adelante, todas las mejoras operativas y los incentivos de política representan motivaciones adicionales para la toma de decisión favorable al V2G.

En relación al rango de operación del estado de carga, es observado un aumento en la degradación cuando se opera exclusivamente dentro de un rango elevado del SOC. Esto puede ser visto como una oportunidad para el V2G, si mediante un algoritmo adecuado de optimización se lleva el SOC a un rango menos nocivo para las celdas. Justamente, en relación a la optimización, fue encontrado que adecuados algoritmos en circunstancias específicas, pueden resultar en un beneficio para baterías de vehículos eléctricos que son sometidas a ciertos rangos de funcionamiento mediante el modo V2G, que de otra forma no hubieran podido alcanzar dado el perfil de conducción impuesto por sus conductores. En tal sentido, para algunos perfiles de conducción específicos, se encuentra una ventana de oportunidad que podría resultar en un impacto positivo en relación a la degradación de sus baterías. Lo anterior permite concluir que no existe una única respuesta en relación al impacto del V2G en la batería de un vehículo eléctrico, sino que el impacto dependerá de varias variables como el tipo de batería, el tipo de vehículo, el perfil de conducción del vehículo y algoritmo de optimización implementado.

De lo anterior se desprende asimismo que la toma de la decisión acerca de la entrega o no de energía de un vehículo eléctrico a la red, no debería quedar librado al criterio del usuario sino que debería estar controlado por una combinación de instrucciones dada por la VCU del vehículo así como además de las instrucciones e interacción con el sistema de control de la red eléctrica. Desde el punto de vista de la red, la operación del V2G cobra sentido cuando existe una masa crítica de vehículos que permiten abordar los objetivos beneficiosos que han quedado planteados.

Desde el punto de vista de la toma de decisiones, a nivel de propietario ha quedado de manifiesto que aun para el caso más desfavorable en el que se asumen las peores condiciones de operación, sin ninguna optimización, aun así se presentaría una utilidad marginal adicional si se implementa el modo V2G, bajo la hipótesis delimitadas. Este beneficio se presenta poco atractivo si el negocio fuera implementado bajo los supuestos establecidos en el presente documento. Sin embargo, como contrapartida, el modelo de negocio presentado puede volverse de sobremanera atractivo si ciertos incentivos impositivos y/o tarifarios fuesen implementados. Esto último se presenta como una excelente oportunidad para el regulador si llegado el caso quisiera habilitar, regular y favorecer el funcionamiento del parque automotor de los vehículos eléctricos, en modo V2G.

Capítulo 10

Bibliografía

- [1] José María López. *Vehículos Híbridos y Eléctricos. Diseño del Tren Propulsor*. INSIA - Instituto Universitario de Investigación del Automóvil, 2016.
- [2] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi. *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory, and Design, Second Edition*. Power Electronics and Applications Series. CRC Press, 2009.
- [3] D. Linden and T. Reddy. *Handbook of batteries*. McGraw-Hill, 3rd edition, 2002.
- [4] R. Bansal, P. Menon, and R. Sharma. Silicon–air batteries: progress, applications and challenges. *SN Applied Sciences*, 2:1141, 2020.
- [5] Ch. Julien, A. Mauger, A. Vijn, and K. Zaghib. *Lithium Batteries: Science and Technology*. Springer, 2016.
- [6] Naoki N, Feixiang W, Jung Tae L, and Gleb Y. Research: Li-ion battery materials: present and future. *Materials Today*, 18:252 – 264, 2015.
- [7] Meng G, Ilias B, Arda G, Zhiguo W, Dapeng W, Khalil A, Fei G, Guangwen Z, Suntharampillai T, Donald R. B, Ji-Guang Z, Nigel D. B, Jun L, and Chongmin W. Conflicting roles of nickel in controlling cathode performance in lithium ion batteries. *Nano Letters*, 12(10):5186–5191, 2012. PMID: 22985059.
- [8] M.A. Danzer, V. Liebau, and F. Maglia. Aging of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*, pages 359–387, 2015.
- [9] Z. Guo and Z. Chen. Aging property for lifepo4/graphite cell with different temperature and dods. *Russian Journal of Electrochemistry*, 52(6):546–554, 2016.
- [10] J. Wang, J. Purewal, P. Liu, J. Hicks-Garner, S. Soukazian, E. Sherman, A. Sorenson, L. Vu, H. Tataria, and M. Verbrugge. Degradation of lithium ion batteries employing graphite negatives and nickel–cobalt–manganese oxide + spinel manganese oxide positives:

-
- Part 1, aging mechanisms and life estimation. *Journal of Power Sources*, 269:937 – 948, 2014.
- [11] D. Wong, B. Shrestha, D. Wetz, and J. Heinzl. Impact of high rate discharge on the aging of lithium nickel cobalt aluminum oxide batteries. *Journal of Power Sources*, 280:363–372, 2015.
- [12] Y. Xiao-Guang, Z. Guangsheng, G. Shanghai, and W. Chao-Yang. Fast charging of lithium-ion batteries at all temperatures. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(28):7266, 2018.
- [13] Iqbal Husain. *Electric and hybrid vehicles: design fundamentals*. CRC Press, second edition edition, 2011.
- [14] V.H. Johnson. Battery performance models in advisor. *Journal of Power Sources*, 110:321–329, 2002.
- [15] H. Pascal, A. Charlet, and Y. Chamaillard. Thermodynamic simulation of a hybrid pneumatic-combustion engine concept. *International Journal of Thermodynamics*, 5, 03 2002.
- [16] G. Cole. A generic sfuds battery test cycle for electric road vehicle batteries. In *SAE Technical Paper*. SAE International, 08 1989.
- [17] Wltp-dtp (world light duty test procedures development groups). <https://circabc.europa.eu/faces/jsp/extension/wai/navigation/container.jsp>. Acceso: 29.11.2018.
- [18] M. Gutiérrez, F. Halty, and G. Mango. Sistema de alimentación para vehículos eléctricos: Desarrollo del unidireccional y estudio del bidireccional [en línea]. *Tesis de grado. Montevideo: Udelar. FI. IIE.*, 2020.
- [19] <https://www.arrow.com/en/research-and-events/articles/regulations-and-certification-for-electric-vehicles>. Fecha de consulta: 30/01/2021.
- [20] J. Bishop, J. Colin, D. Bonilla, M. Tran, D. Banister, and M. McCulloch. Evaluating the impact of v2g services on the degradation of batteries in phev and ev. *Applied Energy*, 111:206–218, 2013.
- [21] J. de Hoog, J-M. Timmermans, D. Ioan-Stroe, M. Swierczynski, J. Jaguemont, S. Goutam, N. Omar, J. Van Mierlo, and P. Van Den Bossche. Combined cycling and calendar capacity fade modeling of a nickel-manganese-cobalt oxide cell with real-life profile validation. *Applied Energy*, 200:47–61, 2017.
- [22] P. Keil, S. F. Schuster, C. von Lüders, H. Hesse, R. Arunachala, and A. Jossen. Lifetime analyses of lithium-ion ev batteries. *3rd Electromobility Challenging Issues conference (ECI), Singapore*, 1st - 4th December 2015.
-

-
- [23] K. Uddin, T. Jackson, W. Widanage, G. Chouchelamane, P. Jennings, and J. Marco. On the possibility of extending the lifetime of lithium-ion batteries through optimal v2g facilitated by an integrated vehicle and smart-grid system. *Energy*, 133:710–722, 2017.
- [24] F. Arismendi, M. Vignolo, A. Gigena, and J. Carriquiry. Baterías en vehículos eléctricos conectados a la red. *IEEE URUCON 2021 Conference*, 2021.
- [25] Chris Harto. Electric vehicle ownership costs: Today’s electric vehicles offer big savings for consumers. *Consumer Reports*, Oct. 2020.
- [26] Universidad Politécnica de Valencia. https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm12/pfcm12_3_1.html#:~:text=La%20polarizaci%C3%B3n%20por%20activaci%C3%B3n%20se,en%20la%20interfase%20electrolito%20metal. Acceso: 15.06.2022.
- [27] Ralph J. Broad. Recent developments in batteries for portable consumer electronics applications. *Electrochemical Society, Pennington, NJ*, 1999.
- [28] T. Markel and A. Simpson. Plug-in hybrid electric vehicle energy storage system design. *National Renewable Energy Laboratory*, 2006.
- [29] P. Pistoia and B. Liaw. *Behaviour of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Battery: Health, Performance, Safety, and Cost*. Green Energy and Technology. Springer, 2018.
- [30] A. Schebek L. Müller D. Weil M. Ziemann, S. Grunwald. The future of mobility and its critical raw materials. *Revue de Métallurgie*, 110:47–54, 2013.
- [31] The Tesla Team 2017. <https://www.tesla.com/blog/battery-cell-production-begins-gigafactory>, Acceso: 31.10.2018.
- [32] Green Car Congress. <https://www.greencarcongress.com/2011/11/scib-20111117.html>. Acceso: 15.11.2018.
- [33] New scientist. <https://www.newscientist.com/article/dn7081-charge-a-battery-in-just-six-minutes/>. Acceso: 15.11.2018.
- [34] AA Portable Power Corp. <https://www.batteryspace.com/Lithium-Titanate-Battery.aspx>. Acceso: 15.11.2018.
- [35] Green Car Congress. <https://www.greencarcongress.com/2008/05/toshiba-develop.html>. Acceso: 15.11.2018.
- [36] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho, and G. Pasaoglu. The lithium-ion battery: State of the art and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 89:292 – 308, 2018.
- [37] J. Tu, X.B. Zhao, G.S. Cao, D.G. Zhuang, T.J. Zhu, and J.P. Tu. Enhanced cycling stability of LiMn_2O_4 by surface modification with melting impregnation method. *Electrochimica Acta*, 51(28):6456 – 6462, 2006.
-

-
- [38] C.C. Chan and K.T. Chau. Modern electric vehicle technology. *Oxford University Press*, 2001.
- [39] J. Vetter, P. Novák, M.R. Wagner, C. Veit, K.-C. Möller, J.O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, and A. Hammouche. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 147(1-2):269–281, 2005.
- [40] Languang L, Xuebing H, Jianqiu L, Jianfeng H, and Minggao O. Review: A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles. *Journal of Power Sources*, 226:272 – 288, 2013.
- [41] Test manual for plug-in hybrid electric vehicles. *U.S. Department of Energy Vehicle Technologies Program Battery*, (Rev. 2), 2010.
- [42] P. Arora, R. White, and M. Doyle. Capacity fade mechanisms and side reactions in lithium-ion batteries. *J. Electrochem. Soc.*, No. 10, October 1998 *The Electrochemical Society, Inc.*, 145:3647–3667, 1998.
- [43] X. Meng, W. Rui, R. Benjamin, and W. Xia. Modeling the effect of two-stage fast charging protocol on thermal behavior and charging energy efficiency of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 20:298 – 309, 2018.
- [44] Y. Yonghuang, S. Lip Huat, S. Yixiang, S. Karthik, and T. Andrew. Effect of thermal contact resistances on fast charging of large format lithium ion batteries. *Electrochimica Acta*, 134:327 – 337, 2014.
- [45] A. Burke and M. Miller. Life cycle testing of lithium batteries for fast charging and second-use applications. *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27), 2013 World*, page 1, 2013.
- [46] J. Groot, M. Swierczynski, A. Stan, and Søren K. Kær. On the complex ageing characteristics of high-power lifepo4/graphite battery cells cycled with high charge and discharge currents. *Journal of Power Sources*, 286:475 – 487, 2015.
- [47] S. Tippmann, D. Walper, L. Balboa, B. Spier, and W.G. Bessler. Low-temperature charging of lithium-ion cells part i: Electrochemical modeling and experimental investigation of degradation behavior. *Journal of Power Sources*, 252:305–316, 2014.
- [48] United Nations. Addendum 99: Regulation no. 100, revision 2. *Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to specific requirements for the electric power train.*, 2013.
- [49] USABC Electric vehicle Battery Test Procedures Manual. Revision 2. 1, 1996.
- [50] V. Ruiz, A. Pfrang, A. Kriston, N. Omar, P. Van den Bossche, and L. Boon-Brett. A review of international abuse testing standards and regulations for lithium ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81(Part 1):1427 – 1452, 2018.
-

-
- [51] PNGV Battery Test Manual. 7, 1997.
- [52] Valer Pop. *Battery Management Systems : Accurate State-of-Charge Indication for Battery-Powered Applications*. Number v. 9 in Philips Research Book Series. Springer, 2008.
- [53] Battery University. What does elevated self-discharge do? https://batteryuniversity.com/learn/article/elevating_self_discharge.
- [54] E. Wikner and T. Thiringer. Extending battery lifetime by avoiding high soc. *Applied Sciences*, 8(10), 2018.
- [55] A. Zeh, M. Müller, M. Naumann, H. Hesse, A. Jossen, and R. Witzmann. Fundamentals of using battery energy storage systems to provide primary control reserves in germany. *Batteries*, 2:29, 09 2016.
- [56] L. Casals, B. Amante-García, and L. Cremades. Electric vehicle battery reuse: Preparing for a second life. *Journal of Industrial Engineering and Management.*, 10(2):266–285, 2017.
- [57] S. Saxena, C. Le Floch, J. MacDonald, and S. Moura. Quantifying ev battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. *Journal of Power Sources*, 282, 2015.
- [58] D.D. Brandt. Driving cycle testing of electric vehicle batteries and systems. *Journal of Power Sources*, 40:73 – 79, 1992.
- [59] Reglamento de baja tensión de ute - instalaciones para la carga de vehículos eléctricos. Capítulo XXX. Febrero 2022.
- [60] Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos - fichas, tomacorrientes, conectores del vehículo y conexiones de entrada del vehículo - formatos normalizados. Instituto uruguayo de normas técnicas. UNIT 1234:2020.
- [61] SAE INTERNATIONAL. Sae electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive coupler. J1772 OCT. 2017.
- [62] National travel survey. *Department for Transport, London*, 2010.
- [63] De elektrische auto als powerbank voor huis of kantoor. <https://www.hyundai.com/nl/elektrisch/vehicle-to-grid.html>. Acceso: 29.01.2023.
- [64] Md Mojumder, Fahmida Ahmed Antara, Md Hasanuzzaman, Basem Alamri, and Mohammad Alsharif. Electric vehicle to grid (v2g) technologies: Impact on the power grid and battery. *Sustainability*, 14:13856, 10 2022.
- [65] F. Marra, D. Sacchetti, C. Træholt, and E. Larsen. Electric vehicle requirements for operation in smart grids. In *2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies*, pages 1–7, 2011.
-

-
- [66] A. Gigena, A. Mosto, and J. Acosta. Baterías en vehículos eléctricos conectados a la red, bev2g. *Tesis de grado. Montevideo: Udelar. FI. IIE*, 2020.
- [67] S. Han, S. Han, and H. Aki. A practical battery wear model for electric vehicle charging applications. *Appl. Energy*, 113:1100–1108, 2014.
- [68] S. Bashash, S.J. Moura, J.C. Forman, and H.K. Fathy. Plug-in hybrid electric vehicle charge pattern optimization for energy cost and battery longevity. *Journal of Power Sources*, 196:541–549, 2011.
- [69] C. Zhou, K. Qian, M. Allan, and W. Zhou. Modeling of the cost of ev battery wear due to v2g application in power systems. *IEEE Trans. Energy Conv.*, 26(4):1041–1050, Dec. 2011.
- [70] T. Waldmann, M. Wilka, M. Kasper, M. Fleischhammer, and M. Wohlfahrt-Mehrens. Temperature dependent ageing mechanisms in lithium-ion batteries – a post-mortem study. *Journal of Power Sources*, 262:129–135, 2014.
- [71] L. Berzi, M. Delogu, and M. Pierini. Development of driving cycles for electric vehicles in the context of the city of florence. *Transportation Research Part D*, 47:299–322, 2016.
- [72] K. Divya and J. Ostergaard. Battery energy storage technology for power systems—an overview. *Electric Power Systems Research*, 79:511–520, 2009.
- [73] G. Casaravilla, M. Vignolo, D. Oroño, V. Echinope, A. Gonzalez, F. Souza, S. Santana, G. Eirea, F. Chiaramello, P. Toscano, P. Curto, G. Pena, F. Zinola, A. Cardozo, C. Tut-té, R. Chaer, D. Bentancur, G. Hermida, D. Bentancour, M. Faraone, A. Camargo, and G. Hernandez y F. Constanzo. Hacia un transporte automotor racional y eficiente: Autos híbridos y eléctricos. Montevideo, 2012.
- [74] Entrevista realizada a Juan José Benenati. Febrero 2022. Técnico Comercial de la rentadora de automóviles Multicar.
- [75] Entrevista realizada a Pablo Cabalo. Febrero 2022. Ingeniero Electricista de la unidad movilidad eléctrica de UTE.
- [76] Entrevista realizada a Federico Arismendi (Director de Effiza). Febrero 2022. Effiza: ESCO que opera en el mercado local (Uruguay).
- [77] Información proporcionada por Guillermo Novelli (director de MOBILITY). Febrero 2022. MOBILITY, empresa importadora de vehículos eléctricos HOZON.
- [78] Entrevista realizada a Santiago Guelfi (Director de SADAR). Febrero 2022. SADAR: Empresa importadora de vehículos eléctricos BYD.
- [79] Ministerio de Industria Energía y Minería de Uruguay. Decreto 27/020. 27 de enero de 2020.
-

-
- [80] N. Kittner and D. Kammen. A battery of innovative choices—if we commit to investing. *Bulletin of the Atomic Scientists*, 74(1):7 – 10, 2018.
- [81] D. Chandler. Study reveals plunge in lithium-ion battery costs. <https://news.mit.edu/>, March 23, 2021. [Acceso: 25 de mayo de 2021].
- [82] S. Ziegler and E. Trancik. Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline. *Energy Environ. Sci.*, 14:1635–1651, 2021.
- [83] S. Ziegler and E. Trancik. Vehicle technologies office batteries 2019 annual progress report. *DOE 2019 Annual Progress Report*, 2019.