



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE GRADO

TÍTULO:

ANÁLISIS DE CONTROL Y APLICACIÓN EN EVS DE SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO BASADO EN LITIO Y SUPERCONDENSADORES

AUTORES:

**CARDONA RUBIO, POL;
GAYÀ JEREZ, MATÍAS;
MARTÍ FLORENCES, MIQUEL;**

FECHA: junio, 2020

APELLIDOS: Cardona Rubio **NOMBRE:** Pol
TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
PLAN: 2009
DIRECTOR: Jaume Miret Tomás, Rafael Ramos Lara
DEPARTAMENTO: Departament d'Enginyeria Electrònica

APELLIDOS: Gayà Jerez **NOMBRE:** Matías
TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
PLAN: 2009
DIRECTOR: Jaume Miret Tomás, Rafael Ramos Lara
DEPARTAMENTO: Departament d'Enginyeria Electrònica

APELLIDOS: Martí Florences **NOMBRE:** Miquel
TITULACIÓN: Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática
PLAN: 2009
DIRECTOR: Jaume Miret Tomás, Rafael Ramos Lara
DEPARTAMENTO: Departament d'Enginyeria Electrònica

QUALIFICACIÓN DEL TFG

TRIBUNAL

PRESIDENTE

SECRETARIO

VOCAL

FECHA DE LECTURA:

Este proyecto tiene en cuenta consideraciones medioambientales: Sí No

RESUMEN

Nuestro proyecto plantea como tema de estudio la viabilidad y el análisis detallado de un sistema de almacenamiento de energía basado en baterías de litio y SC, su implementación en diferentes vehículos eléctricos (coches, motocicletas, autobuses). Se han considerado dos metodologías de dimensionado de HESS: la primera basada en la tesis doctoral de Moreno-Torres (2016), y la segunda, desarrollada por los autores, con respecto a los recursos y reservas mundiales de litio que se espera que sean problemáticos debido a la demanda de EV en los años venideros. Se han probado diferentes casuísticas bajo la misma ley de control, obteniendo resultados prometedores para el dimensionado de Tipo 2.

Palabras clave:

HESS	Supercondensadores	Baterías	Litio
Dimensionado	EV	Vehículo Eléctrico	Sistema híbrido
ESS	Reservas de Litio		

ABSTRACT

Our project raises as subject of study the viability and detailed analysis of an energy storage system based on Lithium batteries and SC, its implementation on different electric vehicles (car, motorcycle, bus). Two dimensioning methodologies of HESS have been considered: the first based on the doctoral thesis of Moreno-Torres (2016), and the second, developed by the authors, regarding global Lithium resources and reserves expected problematic due to EV demand over the following years. Different casuistic have been tested under the same control law, obtaining promising results for Type 2 dimensioning.

Keywords (10 maximum):

HESS	Supercapacitor	Batteries	Lithium
Dimensioning	EV	Electric Vehicle	Hybrid System
ESS	Lithium Resources		

APORTACIÓN INDIVIDUAL AL GRUPO

Durante este estudio hemos seguido una estrategia de trabajo bien definida en la que, una vez claros los objetivos, el peso de la investigación y redacción de las partes teóricas de la memoria se ha repartido entre los tres autores.

Sin embargo, en el momento en que se requieren todos los conocimientos para el diseño y la implementación del sistema, los tres autores hemos trabajado conjunta y equitativamente. Esto incluye la simulación del sistema completo, depuración de errores, análisis de resultados, trabajo futuro y conclusiones.

Pol Cardona Rubio: Estudio de los Supercondensadores, impacto ambiental de las tecnologías, bases del sistema HESS, bases de la cadena de tracción, justificación del dimensionado.

Matías Gayá Jerez: Estudio de las tecnologías de las baterías de Litio, ensayo del bloque Simulink del motor, realización del artículo.

Miquel Martí Florences: Estudio del convertidor buck/boost, modelo dinámico, ciclos de conducción y vehículos de referencia, preparación y puesta a punto del entorno de las simulaciones finales.

SUMARIO

1. INTRODUCCIÓN	2
2. OBJETIVOS	4
3. MOTIVACIÓN	6
4. CARÁCTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA	7
5. BATERÍA DE LITIO	9
5.1. PRINCIPIO QUÍMICO (LI-ION)	10
5.2. TIPOLOGÍAS	11
5.2.1. LiCoO₂ (LCO)	12
5.2.2. LiMn₂O₄ (LMO)	13
5.2.3. LiNiMnCoO₂ (NMC)	14
5.2.4. LiNiCoAlO₂ (NCA)	15
5.2.5. LiFePO₄ (LFP)	16
5.2.6. COMPARATIVA DE LAS DIFERENTES QUÍMICAS	17
5.3. MODELO ELÉCTRICO DE LA CELDA	18
5.4. MODELADO TÉRMICO DE LA CELDA	20
5.4.1. EFEECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA TENSIÓN DE LA CELDA	20
5.4.2. TEMPERATURA INTERNA DE LA CELDA	21
5.5. DEGRADACIÓN DE LAS CELDAS	22
5.6. SIMULACIÓN MODELO AGING	23
5.7. SIMULACIÓN MATLAB DE UN CICLO DE DESCARGA	25
5.8. ESTUDIO DE MERCADO DE BATERÍAS LI-ION	26
5.9. IMPACTO AMBIENTAL	30
6. SUPERCONDENSADORES	33
6.1. TIPOLOGÍAS	39
6.2. DEPENDENCIA Y MODELIZACIÓN TÉRMICA	41
6.3. MODELO SIMULINK	44
6.4. APLICACIONES	50
6.5. ESTUDIO DE MERCADO DE SUPERCONDENSADORES	52
6.6. IMPACTO AMBIENTAL	55
7. CADENA DE TRACCIÓN EN EV Y COMPONENTES AUXILIARES	56
7.1. MOTOR	59
7.1.1. MODELO SIMULINK DEL MOTOR	60
7.2. CONVERTIDOR DE POTENCIA	64
7.3. CONVERTIDOR BUCK/BOOST	65
8. ESTUDIO DE LAS CARGAS Y MODELO DINÁMICO	69
8.1. ECUACIONES DINÁMICAS	69
8.2. CICLOS DE CONDUCCIÓN	71

8.2.1.	CICLO DE CONDUCCIÓN WLTP	71
8.2.2.	CICLO DE CONDUCCIÓN SORT.....	73
8.2.3.	CICLO DE CONDUCCIÓN WMTC	75
9.	VEHÍCULOS DE REFERENCIA.....	77
9.1.	AUTOBÚS.....	77
9.2.	COCHE.....	79
9.3.	MOTO	80
10.	SISTEMAS HÍBRIDOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA	81
10.1.	CRITERIOS DE DISEÑO	81
10.1.1.	COMODIDAD	82
10.1.2.	SEGURIDAD	86
10.1.3.	EFFECTIVIDAD	88
10.1.4.	RESPECTO AL MEDIOAMBIENTE.....	90
10.1.5.	RENTABILIDAD.....	92
10.2.	TECNOLOGÍAS ESCOGIDAS	95
10.3.	MORFOLOGÍA Y TIPOLOGÍA	98
10.4.	CONTROL DEL SISTEMA HESS	104
10.5.	METODOLOGÍAS DE DIMENSIONADO DEL HESS.....	108
10.5.1.	DIMENSIONADO TIPO 1.....	109
10.5.2.	DIMENSIONADO TIPO 2.....	111
11.	IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL SISTEMA HESS	115
11.1.	CONSIDERACIONES Y AJUSTE	116
12.	RESULTADOS.....	120
12.1.	DIMENSIONADO TIPO 1	121
12.1.1.	AUTOBÚS	123
12.1.2.	COCHE.....	128
12.1.3.	MOTO	133
12.2.	DIMENSIONADO TIPO 2	137
12.2.1.	AUTOBÚS	138
12.2.2.	COCHE.....	144
13.	CONCLUSIONES.....	149
14.	TRABAJO FUTURO.....	153
15.	AGRADECIMIENTOS	155
16.	BIBLIOGRAFIA	157

SUMARIO DE FIGURAS

ILUSTRACIÓN 1 - REACCIÓN QUÍMICA DE LA CELDA DE LI	10
ILUSTRACIÓN 2 - GEOMETRÍA CILÍNDRICA VS PRISMÁTICA	10
ILUSTRACIÓN 3 - ESQUEMA CONSTRUCTIVO DE UNA CELDA CILÍNDRICA	11
ILUSTRACIÓN 4 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS CELDA LiCoO ₂ (MIAO ET AL. 2019).....	12
ILUSTRACIÓN 5 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS CELDA LiMn ₂ O ₄ (MIAO ET AL. 2019).....	13
ILUSTRACIÓN 6 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS CELDA LiNiMnCoO ₂ (MIAO ET AL. 2019)	14
ILUSTRACIÓN 7 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS CELDA LiNiCoAlO ₂ (MIAO ET AL. 2019)	15
ILUSTRACIÓN 8 - CARACTERÍSTICAS BÁSICAS CELDA LiFePO ₄ (MIAO ET AL. 2019).....	16
ILUSTRACIÓN 9 - COMPARATIVA CELDAS DE CELDAS BASADAS EN EL PLOMO, NIQUEL Y LITIO («TYPES OF LITHIUM-ION BATTERIES – BATTERY UNIVERSITY») [SIN FECHA]	17
ILUSTRACIÓN 10 - ESQUEMA ELÉCTRICO BÁSICO DE UNA CELDA	18
ILUSTRACIÓN 11 - CURVA DE DESCARGA DE UNA CELDA DE 3,6 V 3 AH	18
ILUSTRACIÓN 12 - IMPACTO DE T ^º EN LA DEGRADACIÓN DE LA CELDA (XU ET AL. 2016)	23
ILUSTRACIÓN 13 - DESCARGA A 2, 4 Y 6C DE UNA CELDA LiCoO ₂ DE 7,2 V 5,4 AH.....	25
ILUSTRACIÓN 14 - EVOLUCIÓN REGIONAL DEL MARECADO DEL LI-ION EN USD («LITHIUM ION BATTERY MARKET BY SOURCE, TYPE, APPLICATION & GEOGRAPHY COVID-19 IMPACT ANALYSIS MARKETSANDMARKETS™») [SIN FECHA]	26
ILUSTRACIÓN 15 - CONCENTRACIÓN DE LITIO EN SUDAMÉRICA.....	27
ILUSTRACIÓN 16 - CONCENTRACIÓN DE LITIO EN AUSTRÁLIA.....	27
ILUSTRACIÓN 17 - RESERVAS Y RECURSOS DE LI MUNDIAL (RESERVAS SON CANTIDADES CONOCIDAS Y DE FÁCIL EXTRACCIÓN, RECURSOS SON VALORES POTENCIALES ESTIMADOS EXISTENTES EN LA ZONA) (OLIVEIRA ET AL. 2015)	28
ILUSTRACIÓN 18 - MASSA (G) DE LI UTILIZADO POR KWH EN CADA TIPOLOGÍA DE BATERÍA, CONTRASTE ENTRE EL VALOR REAL ACTUAL Y EL TEÓRICO (KUSHNIR Y SANDÉN 2012)	28
ILUSTRACIÓN 19 - MODELO DE DEMANDA ACUMULADA DE LI SEGÚN CAPACIDAD MEDIA DE BATERÍA EN LA TIPOLOGÍA DE VEHÍCULO Y SU ESCENARIO DE ADOPCION A LO LARGO DEL SIGLO, SEGÚN LA CAPACIDAD DE RECICLAJE. UNIDADES EN MT (MILLONES DE TONELADAS) DE LI VIRGEN ACUMULADO EN AMBOS EJES VERTICALES (KUSHNIR Y SANDÉN 2012).....	29
ILUSTRACIÓN 20 - DEMANDA ANUAL ANTE EL POTENCIAL DE EXTRACCIÓN DE LI PARA UNA FLOTA DE VEHÍCULOS PHEV O BEV ANTE LOS ESCENARIOS ESTABLECIDOS POR TILTON (KUSHNIR Y SANDÉN 2012).....	30
ILUSTRACIÓN 21 - CRADLE-TO-GATE ANÁLISIS ("DE LA EXTRACCIÓN A LA PUERTA DEL FABRICANTE") DE UNA BATERÍA DE 1 KWH TIPO NMC, DONDE SE HACE UN PORCENTAGE DEL IMPACTO DE CADA PROCESO/COMPONENTE PARA CADA CATEGORÍA DE IMPACTO AMBIENTAL REFERENTE AL TOTAL DE LA CATEGORIA MOSTRADO EN LA PARTE SUPERIOR, GHG SE REFIERE A LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO, PM10 SE REFIERE A LA EMISIÓN DE PARTÍCULAS INALABLES CON UN RADIO DE 10 µM (DAI ET AL. 2019).....	30
ILUSTRACIÓN 22 - DETALLE DE TODOS LO PROCESOS IMPLICADOS PARA 1 KM DE RECORRIDO EN UN EV (COMPARABLE A UN VW GOLF CON 200 KM DE AUTONOMÍA) CON UNA BATERÍA LMO DE APROXIMADAMENTE 34 kWh (CUSENZA ET AL. 2019)	31
ILUSTRACIÓN 23 - COMPARACIÓN DE TODOS LOS ELEMENTOS CON IMPACTO AMBIENTAL ENTRE UN EV (BEV) Y UN VEHÍCULO DE COMBUSTIÓN INTERNA (ICEV) PONDERANDO DIFERENTES MÉTODOS/PARÁMETROS INDICATIVOS TOMANDO EL 100% EL VALOR DEL EV (CUSENZA ET AL. 2019)	31
ILUSTRACIÓN 24 - GWP A LO LARGO DEL CICLO DE VIDA DE DIFERENTES TIPOLOGÍAS DE BATERÍAS BASADAS EN LITIO (PETERS ET AL. 2017).....	32
ILUSTRACIÓN 25 - ESQUEMA CONSTRUCTIVO DE UN CONDENSADOR («WHAT IS SUPERCAPACITOR (ULTRACAPACITOR) - CHARACTERISTICS, WORKING & TYPES») [SIN FECHA].....	34
ILUSTRACIÓN 26 - ESQUEMA DE DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN UN SC («SUPERCAPACITOR - WIKIPEDIA») [SIN FECHA].....	35
ILUSTRACIÓN 27 - DETALLE DE DISTRIBUCIÓN DE CARGAS EN UN SC CARGADO («SUPERCAPACITOR - WIKIPEDIA») [SIN FECHA]	35
ILUSTRACIÓN 28 - DETALLES DE LA POROSIDAD DEL ELECTRODO DE UN SC	36
ILUSTRACIÓN 29 - AUTODESCARGA DE SC EN FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA (VARIACIÓN DE LA TENSIÓN EN REPOSO) Y SU VALOR DE RESISTENCIA ATRIBUIDO (KOWAL ET AL. 2011)	37
ILUSTRACIÓN 30 - REDISTRIBUCIÓN EN EL PORO DEL ELECTRODO DE UN SC DE LOS PORTADORES DE CARGA EN 2 GRUPOS DE CASUÍSTICAS (KOWAL ET AL. 2011).....	37
ILUSTRACIÓN 31 - ESQUEMA ELÉCTRICO DE UN SC (ESBER Y MOUBAYED 2013).	41
ILUSTRACIÓN 32 - DEPENDENCIA TÉRMICA EN TIEMPOS DE CARGA Y DESCARGA DE UN SC (ESBER Y MOUBAYED 2013)	42
ILUSTRACIÓN 33 - ESQUEMA TÉRMICO DE UN SC (KREZANIK ET AL. 2014).....	42
ILUSTRACIÓN 34 - ESQUEMA TÉRMICO 2 DE UN SC (PEDRAYES ET AL. 2019)	43
ILUSTRACIÓN 35 - RESPUESTA TÉRMICA DE UN SC (KREZANIK ET AL. 2014)	43

ILUSTRACIÓN 36 - ANÁLISIS DE PÉRDIDAS EN UN SC (PEDRAYES ET AL. 2019).....	44
ILUSTRACIÓN 37 - MODELO SIMULINK DEL SC Y DETALLE DE SUS OUTPUTS.....	44
ILUSTRACIÓN 38 - VENTANA DE PARÁMETROS DEL BLOQUE DE SC DEL MODELO SIMULINK	45
ILUSTRACIÓN 39 - EXPRESIÓN MATEMÁTICA DEL CÁLCULO DEL SOC (%) DEL SC	46
ILUSTRACIÓN 40 - ENSAYO DE DESCARGA DE SC	47
ILUSTRACIÓN 41 - RESULTADOS DE ENSAYO DE DESCARGA A 25°C DEL MODELO SIMULINK DE SC	47
ILUSTRACIÓN 42 - RESULTADOS DE ENSAYO DE DESCARGA A 0 K DEL MODELO SIMULINK DE SC.....	48
ILUSTRACIÓN 43 - DETALLE DE LA CAÍDA DE TENSIÓN DEL SC PROVOCADA POR LA ESR AL INICIO DEL ENSAYO DE DESCARGA A 0 K.....	49
ILUSTRACIÓN 44 - RESULTADO DE ENSAYO DE DESCARGA A 0 K DEL MODELO SIMULINK DE SC CON ESR RELATIVA A 0 MΩ .49	49
ILUSTRACIÓN 45 - ENSAYO DE CARGA DE SC.....	49
ILUSTRACIÓN 46 - RESULTADOS DE ENSAYO DE CARGA DE SC A 0 K, PARÁMETROS IGUALES A LOS ENSAYOS DE DESCARGA ...	50
ILUSTRACIÓN 47 - MERCADO DEL SC (TASA DE CRECIMIENTO POR REGIÓN EN EL PERIODO 2014-2019) («SUPERCAPACITORS MARKET GROWTH, TRENDS, AND FORECAST (2020-2025)» [SIN FECHA])	52
ILUSTRACIÓN 48 - CAGR DEL 21,8% ESPERADO EN EL MERCADO DE SC (2,66 BILLONES DE USD PARA 2025) («SUPERCAPACITORS MARKET GROWTH, TRENDS, AND FORECAST (2020-2025)» [SIN FECHA]).....	54
ILUSTRACIÓN 49 - EVOLUCIÓN Y PERSPECTIVA DEL MERCADO DE SC («SUPERCAPACITORS MARKET GROWTH, TRENDS, AND FORECAST (2020-2025)» [SIN FECHA])	54
ILUSTRACIÓN 50 - CONJUNTO DE FACTORES DE IMPACTO AMBIENTAL PONDERADOS, SE MUESTRAN SC BASADOS EN CARBÓN ACTIVO Y EN GRAFENO (COSSUTTA ET AL. 2020)	55
ILUSTRACIÓN 51 - GWP DE DOS CONJUNTOS DE 5 SC DE 5F CADA UNO, BASADOS EN CARBÓN ACTIVO(AC) Y GRAFENO (RGO), SEMUESTRA TAMBIÉN CUÁL SERIA LA EVOLUCIÓN DEL PARÁMETRO ANTE UNA EVOLUCIÓN DE LA TECNOLOGÍA (COSSUTTA ET AL. 2020)	55
ILUSTRACIÓN 52 - ESQUEMA ELEMENTAL DE CONVERSIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA A MECÁNICA	56
ILUSTRACIÓN 53 - ESQUEMA MODELO	56
ILUSTRACIÓN 54 - ESQUEMA FUNCIONAL DE UN EV EN MODO MOTOR.....	57
ILUSTRACIÓN 55 - ESQUEMA FUNCIONAL DE UN EV EN MODO GENERADOR.....	58
ILUSTRACIÓN 56 - MOTOR SÍNCRONO CON DOS POLOS.....	59
ILUSTRACIÓN 57 - ENTRADAS Y SALIDAS MODELO MATLAB MOTOR	60
ILUSTRACIÓN 58 - SUBSISTEMA MODELO MATLAB MOTOR.....	61
ILUSTRACIÓN 59 - CURVA CARACTERÍSTICA MOTOR 50 kW	62
ILUSTRACIÓN 60 - GRÁFICA DEL PAR (IZQUIERDA) Y DE VELOCIDAD (DERECHA) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	63
ILUSTRACIÓN 61 - GRÁFICA DE POTENCIA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	63
ILUSTRACIÓN 62 - ESQUEMA DE INVERSOR TRIFÁSICO USANDO INTERRUPTORES IDEALES(MOHAN, UNDERLAND Y ROBBINS 2003)	64
ILUSTRACIÓN 63 - CONTROL DEL CONVERTIDOR Y SUS EFECTOS EN UNA FASE	64
ILUSTRACIÓN 64 - CONTROLADOR BUCK/BOOST CONTROLADO POR CORRIENTE	66
ILUSTRACIÓN 65 - CONTROLADOR DEL CONVERTIDOR BUCK/BOOST	66
ILUSTRACIÓN 67 - ENSAYO DEL CONVERTIDOR BUCK/BOOST. SALIDA DURANTE EL ENSAYO.	68
ILUSTRACIÓN 68 - DETALLE DEL RÉGIMEN ESTACIONARIO DEL CONVERTIDOR BUCK/BOOST.....	68
ILUSTRACIÓN 69 - EL CICLO DE CONDUCCIÓN COMO COMBINACIÓN DE PERFILES EN FUNCIÓN DEL RATIO POTENCIA-MAZA Y LA VELOCIDAD MÁXIMA (TUTUIANU ET AL. 2014).....	72
ILUSTRACIÓN 70 - CICLO WLTC CLASE 3	73
ILUSTRACIÓN 71 - PERFIL DEL CICLO SORT Y TABLA CON LOS PARAMETEROS DE CADA TIPO (MISANOVIC Y SPASOJEVIC 2015)	74
ILUSTRACIÓN 72 - CICLO WMTC CLASE 3	75
ILUSTRACIÓN 73 - ESQUEMA FUNCIONAL DE UN HESS PASIVO.....	99
ILUSTRACIÓN 74 - ESQUEMA ELÉCTRICO DE UN HESS PASIVO	99
ILUSTRACIÓN 75 - ESQUEMA FUNCIONAL DE UN HESS ACTIVO.....	100
ILUSTRACIÓN 76 - ESQUEMA FUNCIONAL DEL ELEMENTO DISTRIBUIDOR	100
ILUSTRACIÓN 77 - ESQUEMA FUNCIONAL DE UN HESS ACTIVO AISLADO	101
ILUSTRACIÓN 78 - ESQUEMA FUNCIONAL DE UN HESS ACTIVO DISTRIBUIDO.....	101
ILUSTRACIÓN 79 - DETALLA DEL BLOQUE DISTRIBUCIÓN DE UN HESS ACTIVO DISTRIBUIDO.....	102
ILUSTRACIÓN 80 - SISTEMA HESS ACTIVO-PARALELO (MORENO-TORRES 2016)	103
ILUSTRACIÓN 81 - SISTEMA HESS TWO STAGE BATTERY / SC (MORENO-TORRES 2016)	104
ILUSTRACIÓN 82 - ALGORITMO DE CONTROL DEL SITEMA HESS.....	106
ILUSTRACIÓN 83 - EFICIENCIA Y DEGRADACIÓN DEL SISTEMA HESS SEGÚN EL HybPER PARA 3 CICLOS ARTEMIS URBAN	

CONSECUTIVOS (1000 SECUENCIAS PARA LA DEGRADACIÓN). LEY DE CONTROL OPTIMIZADA PARA LA MAYOR EFICIENCIA O LA MENOR DEGRADACIÓN EN CADA ANÁLISIS (MORENO-TORRES 2016).....	110
ILUSTRACIÓN 84 - MODIFICACIÓN DE LA ILUSTRACIÓN 20 PARA ESCALAR LA BARRERA DE 30 MT A LA MITAD DEL ESCENARIO DE DEMANDA ACUMULADA DE LI CON UN 80% DE RECICLAJE, RESULTANDO EN QUE LA BATERÍA DE ADOPCIÓN DEBERÍA SER DE 21,6 kWh MEDIOS, RESULTADO DEBIDO A LA LINEALIDAD OBSERVADA EN LA ILUSTRACIÓN ORIGINAL (KUSHNIR Y SANDÉN 2012) ENTRE LOS 9 kWh Y 36 kWh DE AMBOS EJES	112
ILUSTRACIÓN 85 - ESQUEMA SIMULINK IMPLEMENTACIÓN HESS	115
ILUSTRACIÓN 86 - PESTAÑA STERN DEL BLOQUE DE SIMULINK DE SC CON VALORES PREDETERMINADOS	116
ILUSTRACIÓN 87 - PARÁMETROS TÉRMICOS PREDETERMINADOS POR EL PRESET LFP DEL BLOQUE SIMULINK DE BATERÍA ...	118
ILUSTRACIÓN 88 - SoC DE LA BATERÍA DEL AUTOBÚS DURANTE DOS CICLOS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	123
ILUSTRACIÓN 89 - CORRIENTE DE LA BATERÍA DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS.....	124
ILUSTRACIÓN 90 - SoC DEL BLOQUE DE SC DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. SOLO HESS.....	125
ILUSTRACIÓN 91 - BALANCE DE POTENCIAS DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	126
ILUSTRACIÓN 92 - TEMPERATURA DE LA CELDA DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	126
ILUSTRACIÓN 93 - TASAS DE DESCARGA DE LA BATERÍA DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS.....	127
ILUSTRACIÓN 94 - CORRIENTE DE LA BATERÍA DEL COCHE PARA DEL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	128
ILUSTRACIÓN 95 - RATIO DE DESCARGA DE LA BATERÍA DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	129
ILUSTRACIÓN 96 - SoC DE LA BATERÍA DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS.....	129
ILUSTRACIÓN 97 - TEMPERATURA DE LA CELDA DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	130
ILUSTRACIÓN 98 - CORRIENTE DEL SC DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. SOLO HESS.....	131
ILUSTRACIÓN 99 - SoC DEL SC DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. SOLO HESS.....	132
ILUSTRACIÓN 100 - BALANCE DE POTENCIAS DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS.	132
ILUSTRACIÓN 101 - CORRIENTE DE LA BATERÍA DE LA MOTO PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	133
ILUSTRACIÓN 102 - SoC DE LA BATERÍA DE LA MOTO PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	134
ILUSTRACIÓN 103 - CORRIENTE DE LOS SC DE LA MOTO PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. SOLO HESS	134
ILUSTRACIÓN 104 - SoC DE LOS SC DE LA MOTO PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. SOLO HESS.....	135
ILUSTRACIÓN 105 - BALANCE DE PONTENCIAS DE LA MOTO PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	136
ILUSTRACIÓN 106 - TEMPERATURA DE LA CELDA DE LA MOTO PARA EL DIMENSIONADO TIPO 1. ESS Y HESS	136
ILUSTRACIÓN 107 - CORRIENTE DE LA BATERÍA DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2 A 0.5. HESS Y ESS.....	139
ILUSTRACIÓN 108 - SoC DE LA BATERÍA DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS	140
ILUSTRACIÓN 109 - BALANCE DE PONTENCIAS DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS.....	141
ILUSTRACIÓN 110 - TEMPERATURA DE LA CELDA DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS.....	142
ILUSTRACIÓN 111 - RATIO DE DESCARGAS DE LA CELDA DEL AUTOBÚS PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS	142
ILUSTRACIÓN 112 - CORRIENTE DE LA BATERÍA DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS	146
ILUSTRACIÓN 113 - SoC DE LA BATERÍA DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS	146
ILUSTRACIÓN 114 - SoC DE LOS SC DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS	147
ILUSTRACIÓN 115 - TEMPERATURA DE LA CELDA DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS	148
ILUSTRACIÓN 116 - DETALLE DEL BALANCE DE POTENCIAS DEL COCHE PARA EL DIMENSIONADO TIPO 2. ESS Y HESS	148

SUMARIO DE TABLAS

TABLA 1 - PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS CELDA LCO	12
TABLA 2 - PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS CELDA LMO	13
TABLA 3 - PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS CELDA NMC.....	14
TABLA 4 - PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS CELDA NCA	15
TABLA 5 - PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS CELDA LFP	16
TABLA 6 - VARIABLES DE LA ECUACIÓN DE LA FUERZA RESISTIVA	70
TABLA 7 - RESUMEN DE LAS CLASES DEL CICLO WMTC (UNECE 2004).....	75
TABLA 8 - ESPECIFICACIONES DINÁMICAS DEL IRIZAR IE BUS 12	78
TABLA 9 - ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS DEL IRIZAR IE BUS 12.....	78
TABLA 10 - ESPECIFICACIONES DINÁMICAS DEL TESLA MODEL 3	79
TABLA 11 - ESPECIFICACIONES DE LOS PARÁMETROS ELÉCTRICOS DEL TESLA MODEL ESTÁNDAR PLUS.....	80
TABLA 12 - ESPECIFICACIONES DINÁMICAS DE LA ZERO SR/F	80
TABLA 13 - ESPECIFICACIONES ELÉCTRICAS DE LA ZERO SR/F	80
TABLA 14 - CONSIGNAS DEL BLOQUE DE SC SEGÚN LOS ESTADOS DEL CONTROL	108
TABLA 15 - CARACTERÍSTICAS DEL SC BCAP310 DE MAXWELL UTILIZADO EN SIMULINK	116
TABLA 16 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HESS PARA EL AUTOBÚS BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 1.....	121
TABLA 17 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HESS PARA EL COCHE BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 1	122
TABLA 18 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HESS PARA LA MOTO BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 1.....	122
TABLA 19 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ESS PARA EL AUTOBÚS BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 2	137
TABLA 20 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ESS PARA EL COCHE BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 2.....	137
TABLA 21 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HESS PARA EL AUTOBÚS BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 2 CON UN 50% DE MASA DE SC AÑADIDA	138
TABLA 22 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HESS PARA EL AUTOBÚS BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 2 CON UN 75% DE MASA DE SC AÑADIDA	138
TABLA 23 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HESS PARA EL COCHE BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 2 CON UN 25% DE MASA DE SC AÑADIDA	144
TABLA 24 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HESS PARA EL COCHE BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 2 CON UN 50% DE MASA DE SC AÑADIDA	144
TABLA 25 - CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA HESS PARA EL COCHE BAJO LA METODOLOGÍA DIMENSIONADO TIPO 2 CON UN 100% DE MASA DE SC AÑADIDA	145

1. INTRODUCCIÓN

El ser humano, desde el momento en que encontró necesaria la movilidad para la obtención de alimento, protección, mejores condiciones ambientales... ha visto la necesidad e importancia del transporte del individuo, del desplazamiento del mismo.

La primera fuente de energía para nuestro transporte fue nuestra fuerza física, la de nuestro cuerpo, la de nuestras piernas; este factor se ha visto evolucionado y reinventado hasta el estado actual donde nos encontramos diversidad de tipologías de transporte y de fuentes de energía disponibles para los mismos.

Hoy en día los medios de transporte se venden al cliente, al individuo, basándose en la eficiencia temporal y económica como también, reciente y forzosamente, la ambiental.

El papel de esta "eficiencia ambiental" viene dada por la presión que ha realizado la responsabilidad humanitaria gracias a la concienciación e información; como también ha tenido un papel importantísimo las medidas disruptivas recientemente aprobadas por los organismos legislativos, de alto y bajo nivel. En la actualidad nos encontramos en una situación donde la explotación de los combustibles fósiles como principal fuente de energía en el transporte, entre otros usos, nos ha dejado en 2018 con una concentración de CO₂ en el aire de 408,52 ppm, niveles inalcanzados en 800.000 años en nuestro planeta (Hannah Ritchie y Max Roser 2020). La UE ha establecido un plan de acción y estrategia que tiene como objetivo final una Europa climáticamente neutral, con emisión neta nula de gases de efecto invernadero, para 2050 con hitos intermedios como la reducción mínima en el sector transporte del 40%, respecto a 1990, de la generación de tales gases para 2030, donde entrarían acciones tales como el incremento de 975.000 vehículos de bajas emisiones y 140.000 puntos de recarga actuales a 13 millones y 1 millón, respectivamente, para 2025 (Comisión Europea 2019). En ámbitos locales nacionales tenemos como ejemplo la ZBE (zona de bajas emisiones) que restringe desde el 1 de enero de 2020 el paso, durante el día, de turismos, motocicletas y ciclomotores sin etiqueta ambiental (otra medida ejemplar) en 95 km² de la ciudad de Barcelona.

Toda esta responsabilidad ambiental y medidas legislativas han incentivado exponencialmente el I+D del sector automovilístico como también la creación de nuevas áreas de mercado y tipología de proveedores para el mismo; todo con un objetivo claro y evidente, la reducción en la dependencia actual del sector del transporte con los

combustibles fósiles, dicho de otra forma, la búsqueda de tecnologías y fuentes de energía alternativas.

La sustitución abrupta de una tecnología esencial, como es el combustible y sistema de tracción, para un tejido empresarial y comercial tan grande como el sector del transporte, conlleva que la nueva apuesta aporte el máximo de beneficios y, principalmente, el mínimo de inconvenientes evidentes posibles a corto plazo ante el sistema ya establecido. Es por esto que hemos visto una apuesta táctica rápida y generalizada en el sector por la adopción del motor eléctrico en combinación con baterías como la cadena de tracción sustituta. El motor eléctrico ha vivido ya una enorme evolución y estudio a lo largo del siglo, debido a su papel industrial y ahora ferroviario, por el contrario, los sistemas de almacenaje de energía eléctrica, las baterías, se hallan en un estado muy prematuro en comparación; nunca habían sido foco de tanta atención por un sector tan imponente.

La tecnología del sistema de almacenaje de energía eléctrica, tópico entorno al que este estudio se desarrolla, que se ha consolidado en estos primeros pasos de la movilidad eléctrica ha sido las baterías basadas en litio. Esta tecnología de baterías proporciona, actualmente, el mínimo de inconvenientes económicos, de rendimiento y complejidad ante los combustibles fósiles. Viendo la evidencia, como en cualquier tecnología, que la misma va a evolucionar, cambiar y mejorar, este estudio plantea la viabilidad de un sistema híbrido de baterías de litio y supercondensadores en diversas tipologías de vehículos.

El planteamiento de la hibridación entre estas dos tecnologías parte de la premisa, corroborada por otros estudios, de que son tecnologías que unidas pueden solventar los inconvenientes actuales de la movilidad eléctrica, así como atender a mejorar otros puntos aún en la sombra, debido a ser un sector nuevo, como puede ser la durabilidad del sistema. Este estudio, a diferencia de otros, plantea la aplicación directa del sistema híbrido en vehículos como el autobús, coche y moto para extraer las conclusiones de cada una de esas aplicaciones. Este estudio se basará en la modelización de los sistemas y componentes necesarios utilizando el aplicativo Matlab.

2. OBJETIVOS

Para el presente estudio, los autores nos planteamos objetivos que engloban las áreas de búsqueda de información y la validación de la misma como también el aprendizaje en modelización de sistemas en Simulink (Matlab) con su cálculo pertinente y la verificación de resultados; todas estas áreas siempre estarán supervisadas por los tutores de este trabajo de final de grado. El objetivo final del estudio es el siguiente:

- Validación de la viabilidad y balance de beneficios e inconvenientes de la implementación, en 3 modelos de vehículo eléctrico diferentes, de diversas metodologías de dimensionado de sistemas de almacenaje de energía eléctrica basados en la hibridación de baterías de litio y supercondensadores. Los resultados y su valoración se conseguirán mediante el contraste con el sistema de referencia, basado únicamente en baterías de litio, y la simulación de todos los sistemas implicados para ello.

Para cumplir tal objetivo se nos plantean los siguientes intermedios:

- Búsqueda y contraste de información sobre los siguientes tópicos:
 - Baterías de litio y, por separado, supercondensadores como también sistemas híbridos (HESS) basados en la unión de ambas tecnologías:
 - Tipologías y sus características.
 - Impacto ambiental.
 - Estudio de mercado.
 - Sistemas de almacenaje de energía eléctrica, cadenas de tracción, características y ciclos de trabajo para las tipologías de vehículo eléctrico:
 - Autobús.
 - Coche.
 - Moto.
- Formulación de los perfiles de carga y ciclos de trabajo para las tres tipologías de vehículo eléctrico mencionados anteriormente.
- Modelización de la cadena de tracción eléctrica completa, sin sistema de almacenaje eléctrico, para cada vehículo con el dimensionado pertinente en cada caso.
- Modelización del sistema de baterías de litio de referencia con la tipología y dimensionado pertinente a cada aplicación.
- Estudio de lógicas de control, tipologías, de los sistemas híbridos (HESS)

basados en baterías de litio y supercondensadores a implementar en los 3 vehículos.

- Modelización de los sistemas complementarios necesarios para implementación de los sistemas HESS formulados.
- Modelización y dimensionado de los sistemas HESS formulados.
- Unión de las tres cadenas de tracción modelizadas con sus pertinentes modelos del sistema de referencia y, por separado, los distintos sistemas HESS formulados a su vez también por separado.

3. MOTIVACIÓN

El esfuerzo para realizar este estudio ha estado siempre impulsado por el interés ingenieril ante el sector del transporte en el cuál vemos la evidencia de que vamos a vivir su mayor cambio en la historia. Concretamente somos tres estudiantes del grado de Ingeniería Electrónica y Automática con especial curiosidad por el vehículo eléctrico y sus baterías, temática en la que deseamos tener nuestras futuras carreras laborales relacionadas. Para conseguir tal futuro los 3 autores ya hemos estado implicados en el proyecto voluntario UPC Vilanova E3-Team, el único equipo de competición de vehículo eléctrico de nuestra universidad, concretamente hablamos de una moto eléctrica tipo moto-3, que compite en la reconocida competición internacional MotoStudent Electric desde sus inicios. Este proyecto de 2 años ya ha puesto a prueba y ha reforzado nuestra motivación e implicación por conseguir tal futuro laboral.

La idea detrás de este trabajo se formuló hace 2 años a partir de una simple broma en la que ante falta de potencia en vehículos eléctricos surgió la pregunta de por qué no hay un turbo eléctrico. A lo cual, en broma, se respondió que se podría poner un condensador muy grande en paralelo a las baterías y así ya no tener tal problema. Esa respuesta primeramente pareció graciosa pero conforme los 3 autores le íbamos dando vueltas en nuestra cabeza iban saliendo más y más razones teóricas por las que tal solución podría ser beneficiosa. El siguiente paso que consolidó nuestras ganas para tomar este estudio fue cuando fuimos a comentar la idea a diversos doctores de nuestro campus y estaban de acuerdo con las hipótesis, muy teóricas, que traíamos y no las encontraban disparatadas para nada, que era lo que nos esperábamos. El último paso para decidirnos a tomar este trabajo conjunto fue al encontrar que había diversos, no muchos, estudios muy recientes por universidades de otros países tratando el tópico el cual tenía incluso un nombre (HESS), pero no encontramos estudios aplicados a vehículos de la forma que deseábamos, de la forma que vamos a realizar en este estudio.

Es así como 3 estudiantes se encuentran ante un tema del que no han recibido formación alguna en sus clases como trabajo de final de grado pero, aun así, creen firmemente en que sus capacidades analíticas, ganas y trabajo conjunto, a la vez que la supervisión por dos doctores reconocidos que han visto potencial en la idea y se han involucrado desde el minuto 0, es así como no vemos inconveniente para poder aportar, con nuestro estudio, una solución a la pregunta que nos formulamos en 2º de grado, pregunta que muchos más jóvenes ingenieros, en un futuro, se van a preguntar también.

4. CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA ELÉCTRICA

Ésta es la mayor barrera que tienen los vehículos eléctricos en la actualidad que impiden su producción a gran escala y que pondría fin a su rivalidad con los vehículos de combustión interna. Actualmente el precio de la batería de un vehículo eléctrico (VE) supone de un 40 a un 50% del coste total del vehículo y a pesar de su elevado coste, siguen sin satisfacer las necesidades de autonomía entre los clientes más exigentes.

Existen varios tipos de sistemas de almacenaje de energía, pero sin ninguna duda, el claro dominante a día de hoy y cuya investigación y desarrollo fue merecedor del premio Nobel de Química (2019) otorgado a los científicos John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham y Akira Yoshino, por su estudio en el desarrollo de baterías de iones de litio. Antes de entrar al detalle en explicar de qué manera ha conseguido esta química superar a sus competidores y analizar una fuente de energía que podría revolucionar el mercado de los VE, debemos explicar los parámetros eléctricos que se utilizan para describir las características de las baterías:

- **Energía específica (Wh/kg):** corresponde a la cantidad de energía que puede almacenar la batería por unidad de masa.
- **Densidad de energía (Wh/L):** corresponde a la cantidad de energía que puede almacenar la batería por unidad de volumen.
- **Densidad de potencia (W/L):** potencia que puede entregar una batería por unidad de volumen.
- **Tensión nominal (V):** diferencia de electro-potencial que el fabricante o tecnología específica para cumplir el resto de características nominales, normalmente especificadas para este nivel de tensión. Suele ser el valor de trabajo recomendado.
- **Capacidad (Ah):** es la cantidad de electricidad que puede obtenerse mediante la descarga total de una batería inicialmente cargada al máximo. Por ejemplo, una batería de 70 Ah podrá entregar 70 A durante 1h o de la misma manera, 7 A durante 10 h.
- **C de carga y descarga:** se aplica tanto a la carga como para la descarga y nos muestra la intensidad a la que podemos cargar y descargar las celdas en función de la intensidad nominal, es decir, la que se produce en la carga/descarga a 1C.
- **Ciclos de carga y descarga:** este parámetro se utiliza para medir la vida útil de la batería. Un ciclo de descarga corresponde a la descarga completa de la

energía de la celda. Cabe destacar que la vida útil de la batería depende en gran parte de la forma en que se cargue/descargue y de la temperatura de las celdas

- **SoC (State of Charge):** corresponde a la cantidad de energía almacenada en la celda en función de la total, se expresa en tanto por ciento.
- **SOH (State of Health):** corresponde al estado en el que se encuentra la batería, con el tiempo, las baterías se degradan y su *State of Health* disminuye, este valor se da en tanto por ciento.
- **V_{nom}** : diferencia de electro-potencial que el fabricante o tecnología específica para cumplir el resto de características nominales, normalmente especificadas para este nivel de tensión. Suele ser la tensión de trabajo recomendada.
- **V_{max}** : tensión máxima de la celda, varía en función de la química y no se recomienda continuar la recarga cuando se alcanza este valor, de lo contrario aumentaría la posibilidad de degradación.
- **V_{min}** : tensión mínima de la celda, varía en función de la química y no se recomienda bajar de este valor durante la descarga, la celda podría no volver a recuperar sus características nominales.
- **Celda:** unidad mínima con las características nominales propias de la batería. Esta nomenclatura permite diferenciar cada unidad energética dentro de una configuración en serie o paralelo propia a baterías complejas.

A continuación, presentaremos la batería por excelencia en la actualidad, analizaremos las diferentes químicas derivadas y sus características específicas. Finalmente introduciremos un sistema de almacenamiento de energía que, implementado en armonía con la tecnología mencionada en un vehículo eléctrico, presentaría potencialmente un gran avance en cuanto a prestaciones del vehículo además de alargar notablemente su vida útil.

5. BATERÍA DE LITIO

Las baterías Li-Ion son las más utilizadas a día de hoy para la movilidad eléctrica ya que posee unas características que la hacen destacar frente a las demás baterías disponibles en el mercado. En primer lugar, el Litio tiene más potencial de reducción que cualquier otro elemento (-3,05 V), esto le permite a la celda tener el mayor potencial energético posible. Además, el Litio es el tercer elemento más ligero de la tabla periódica y tiene uno de los menores radios atómicos entre los demás iones; de esta manera se aumenta la velocidad de transmisión de iones por el electrolito de la celda.

Las baterías basadas en Litio requieren un mantenimiento muy reducido, cosa que no pueden garantizar otros tipos de baterías. Las celdas no poseen efecto memoria en el uso y no requieren una descarga controlada para no perjudicar su capacidad de almacenamiento. Una desventaja de estas baterías es la necesidad de un circuito de protección para evitar el desbalanceo de las celdas del módulo en la carga y en la descarga de la batería. Otro factor que ralentiza su utilización a gran escala como fuente de almacenamiento de energía, es su elevado precio en comparación con las demás químicas del mercado. Al precio de la explotación y reproceso de este material, se le tiene que sumar el coste de otro de los materiales necesarios para la creación de estas baterías, el cobalto (Co). Por esto se están llevando a cabo cada vez más investigaciones para encontrar nuevas arquitecturas con diferentes químicas y poder resolver la problemática de la movilidad eléctrica.

5.1. PRINCIPIO QUÍMICO (LI-ION)

La celda de Litio consta de un cátodo (electrodo positivo), un ánodo (electrodo negativo) y un "medio" (electrolito) como conductor. Generalmente, el cátodo consiste en un óxido de metal ($LiFePO_4$, $LiFePO_4$, $LiMn_2O_4$, $LiNi_{0,33}Mn_{0,33}Co_{0,33}$) y el ánodo en un material con base de carbono. Durante la descarga los iones se desplazan desde el ánodo al cátodo a través del electrolito y en la carga, se revierte la dirección del flujo.

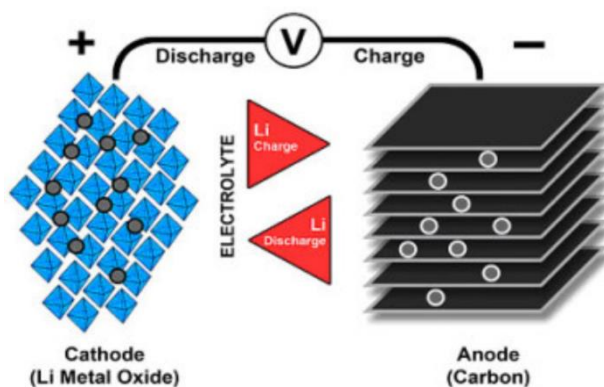
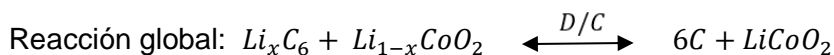
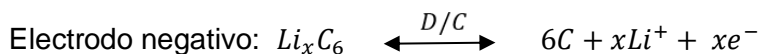
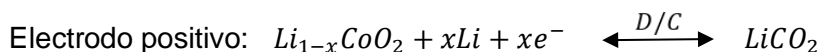


Ilustración 1 - Reacción química de la celda de Li

La reacción química producida en la celda es la siguiente:



Las celdas usadas pueden ser cilíndricas o prismáticas. En ambos casos se trata de unas capas enrolladas de ánodo, el cátodo y el separador, a los que después se les añade el electrolito.

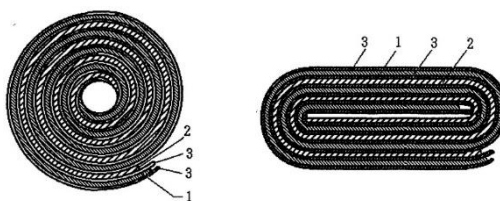


Ilustración 2 - Geometría cilíndrica vs prismática

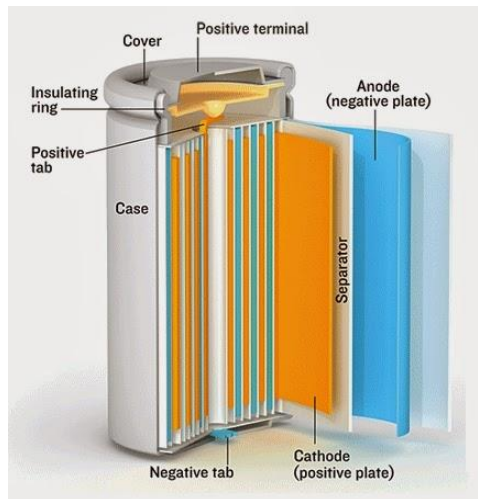


Ilustración 3 - Esquema constructivo de una celda cilíndrica

La posibilidad de disponer las celdas de forma cilíndrica o prismática permite la utilización de las celdas Li-Ion en un gran abanico de dispositivos. Por ejemplo, las baterías de Litio Polímero (LiPo) son las más utilizadas en el campo de la telefonía móvil. También están teniendo una gran aceptación en el mercado de los drones de radiocontrol, donde el espacio de la batería juega un papel muy importante.

Con gran diferencia las celdas más utilizadas en vehículos eléctricos e híbridos son las cilíndricas, organizadas en módulos de s series para llegar a la tensión deseada y p paralelos para conseguir la capacidad deseada.

5.2. TIPOLOGÍAS

Las diferentes configuraciones de batería de Litio se obtienen cambiando el compuesto utilizado como cátodo por sus variantes : $(Li_{1-x}CoO_2)$, $LiFePO_4$, $LiMn_2O_4$, $LiNi_{0,33}Mn_{0,33}Co_{0,33}$, etc.

La búsqueda de nuevas químicas responde a los objetivos planteados de reducir la dimensión del compuesto, formación de nuevas estructuras químicas para aumentar la velocidad de los iones y electrones en la reacción, formación de capsulas alrededor de los reactivos para mejorar el aislamiento y la seguridad de la reacción...

Cada tipología tiene sus ventajas a nivel de potencial eléctrico, capacidad, tensión de la celda, seguridad, coste, etc. Pero cada una acarrea unos inconvenientes que se deberán tener en cuenta a la hora de seleccionar una química para nuestra batería.

5.2.1.LiCoO₂ (LCO)

Su alta densidad de energía hace que la celda de Litio/Cobalto sea una elección recurrente para su uso en teléfonos móviles, portátiles y cámaras digitales. Los principales inconvenientes de esta tipología son: su relativamente corta vida útil, baja estabilidad térmica y densidad de potencia limitada.

No se recomienda la carga y descarga de estas celdas a más de 1C, por ejemplo, una celda de formato 18650 (que establece una estandarización en las medidas del encapsulado cilíndrico, siendo 18 mm de diámetro y 650 mm de alto) de 2400 mAh se deberá cargar y descargar a máximo 2400 mA. Para una recarga óptima, el fabricante incluso recomienda la carga a 0,8C, de esta manera se evita el sobrecalentamiento de la celda.

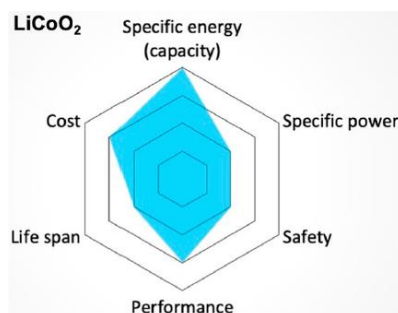


Ilustración 4 - Características básicas celda LiCoO₂ (Miao et al. 2019)

El gráfico de la ilustración 4 resume las especificaciones de la celda de *LiCoO₂* en términos de: densidad de energía, la cantidad de energía que puede almacenar la celda; densidad de potencia, la capacidad de otorgar una corriente elevada; seguridad en la temperatura, rendimiento a alta y baja temperatura; vida útil y finalmente, coste.

(LiCoO₂) LCO	
Tensión	3,6 V nominal; rango de operación 3-4,2 V
Energía específica	170-180 Wh/kg
Carga	0,7-1C
Descarga	1C
Ciclo de vida	500-1000 ciclos

Tabla 1 - Parámetros característicos celda LCO

5.2.2. LiMn_2O_4 (LMO)

La baja resistencia interna de la celda le permite la carga rápida y la descarga a elevada corriente. La descarga se puede realizar a 20-30 A sin experimentar una elevación abrupta de la temperatura. También se permite la descarga por pulsos de hasta 50 A, pero la descarga de forma prolongada a estas corrientes produciría que la temperatura suba por encima del límite de la celda (80°C).

Esta tipología tiene una capacidad inferior a la de su homóloga de Litio-Cobalto, pero su flexibilidad en el diseño permite crear celdas que permiten alargar la longevidad de la batería o, por el contrario, otras más potentes y que sean capaces de entregar corrientes más elevadas. Por ejemplo, una versión de celda 18650 más conservadora, tiene una capacidad de 1100 mAh mientras que una de mayores prestaciones, llega a 1500 mAh.

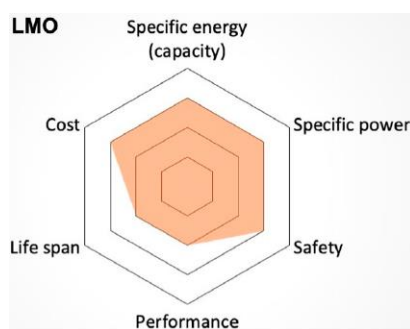


Ilustración 5 - Características básicas celda LiMn_2O_4 (Miao et al. 2019)

La mayoría de las baterías de Litio-Manganeso cuentan con un 30% de LiNiMnCo para aumentar su densidad de energía y alargar su vida útil. Se utiliza en vehículos eléctricos como el Nissan Leaf, Chevy Volt y el BMW i3. En algunas arquitecturas se añade al ánodo una pequeña proporción de Silicio, esto provoca un aumento del 25% en la potencia, pero se disminuye la vida útil debido a la tracción mecánica interna que sufre el Silicio a medida que se produce la carga y descarga de la celda.

$(\text{LiMn}_2\text{O}_4)$ LMO	
Tensión	3,8 V nominal; rango de operación 3-4,2 V
Energía específica	90-120 Wh/kg
Carga	0,7-1C; 3C max.
Descarga	1C, algunas arquitecturas 10C, 30C pulsos de 5 s
Ciclo de vida	300-700 ciclos

Tabla 2 - Parámetros característicos celda LMO

5.2.3. LiNiMnCoO_2 (NMC)

Esta es sin duda una de las químicas más utilizadas y con mayores prestaciones dentro de las celdas de Litio, pueden servir tanto como celdas para almacenar grandes cantidades de energía o, celdas capaces de entregar grandes potencias a pesar de su tamaño. Por ejemplo, una celda de LiNiMnCoO_2 en formato 18650, puede diseñarse para tener una capacidad de 2800 mAh y entregar una corriente de 4 hasta 5 A (casi 2C); en cambio, la misma celda en el mismo formato, pero optimizada para conseguir una mayor potencia, posee una capacidad de 2000 mAh y entrega una corriente constante de 20 A (10C).

Una de las configuraciones más utilizadas para el cátodo es la de 1/3 de Ni, 1/3 de Mn y 1/3 de Co ($\text{LiNi}_{0,33}\text{Mn}_{0,33}\text{Co}_{0,33}$). De esta manera se consigue aumentar la prestación de la celda, además de reducir el precio de fabricación al reducir la cantidad de Co en el compuesto.

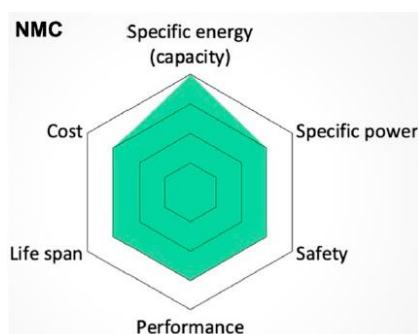


Ilustración 6 - Características básicas celda LiNiMnCoO_2 (Miao et al. 2019)

(LiNiMnCoO_4) NMC	
Tensión	3,7 V nominal; rango de operación 3-4,2 V
Energía específica	155-185 Wh/kg
Carga	0,7-1C
Descarga	1C, algunas arquitecturas 2C
Ciclo de vida	1000-2000 ciclos

Tabla 3 - Parámetros característicos celda NMC

5.2.4. LiNiCoAlO_2 (NCA)

Esta celda fue desarrollada en el año 1999 y es una de las químicas más prometedoras para el mercado de los vehículos eléctricos a corto plazo. Comparte características con las celdas NMC, ofreciendo una gran densidad de energía y una considerablemente alta densidad de potencia. Las desventajas de esta química son su elevado coste y su seguridad, al tener una menor tolerancia a las altas temperaturas que las celdas NMC. El principal productor mundial de estas celdas es Panasonic y gracias a su acuerdo con Tesla, las celdas NCA se utilizan en la producción de la batería del **Tesla Model X** y **Model S**.

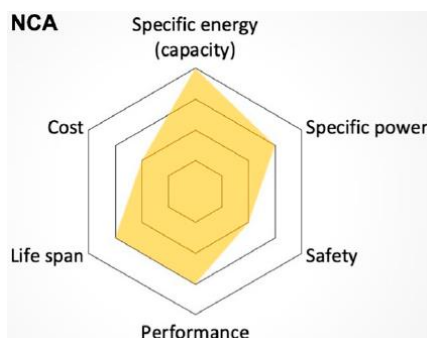


Ilustración 7 - Características básicas celda LiNiCoAlO_2 (Miao et al. 2019)

(LiNiCoAlO_2) NCA	
Tensión	3,6 V nominal; rango de operación 3-4,2 V
Energía específica	145-165 Wh/kg
Carga	0,7
Descarga	1C
Ciclo de vida	1000 ciclos

Tabla 4 - Parámetros característicos celda NCA

5.2.5. LiFePO_4 (LFP)

La celda de Litio-Fosfato de hierro tiene una baja resistencia interna y un gran rendimiento. Sus puntos fuertes son la elevada corriente de descarga (alta densidad de potencia) y un ciclo de vida útil largo, además de su estabilidad térmica y seguridad.

Al eliminar el Óxido de Cobalto de la química, además de suprimirse el riesgo de combustión de la celda, se deja de fomentar la extracción de este mineral en minas donde los trabajadores operan en condiciones muy precarias.

Su tensión nominal es ligeramente inferior a la de las demás químicas de Litio (3,3 V) y esto se refleja en su principal desventaja, que las hace verse opacadas ante la celda de Óxido de Cobalto. Este factor impide la utilización de baterías de LiFePO_4 como fuente principal de almacenamiento de energía para vehículos eléctricos. Las bajas temperaturas reducen su rendimiento y acortan su ciclo de vida. Al contrario que otras tipologías de Li-Ion, las celdas de Litio-Fosfato tienen mayor índice de descarga en reposo, lo que se puede solucionar añadiendo una electrónica para evitar el desbalanceo entre las celdas del módulo.

Actualmente las baterías de Litio-Fosfato están siendo utilizadas como baterías auxiliares, por ejemplo, para sustituir la batería convencional de Plomo-Ácido presente en la mayoría de vehículos de combustión.

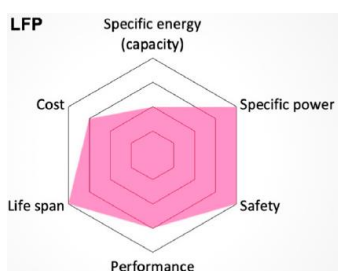


Ilustración 8 - Características básicas celda LiFePO_4 (Miao et al. 2019)

(LiFePO_4) LFP	
Tensión	3,3 V nominal; rango de operación 2.5-3,65 V
Energía específica	100-120 Wh/kg
Carga	1C
Descarga	1C, algunas arquitecturas 25C, 40 A en pulsos de 2 s
Ciclo de vida	+2000 ciclos

Tabla 5 - Parámetros característicos celda LFP

5.2.6.COMPARATIVA DE LAS DIFERENTES QUÍMICAS

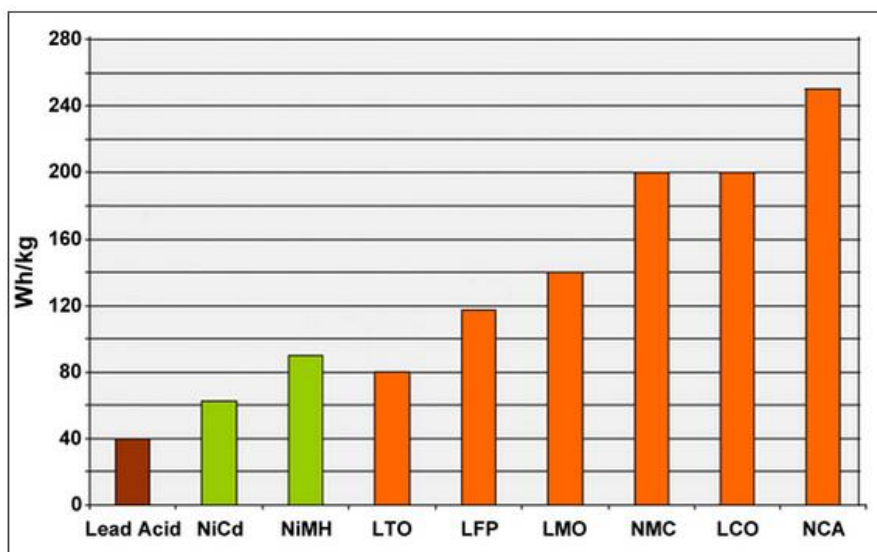


Ilustración 9 - Comparativa Celdas de celdas basadas en el Plomo, Níquel y Litio («Types of Lithium-ion Batteries – Battery University» [sin fecha])

La ilustración 9 nos muestra una comparativa de la energía específica de los diferentes tipos de celdas utilizadas para la fabricación de baterías. Como podemos observar, claramente la celda NCA es la que puede almacenar mayor energía por celda y éste es el motivo por el que Tesla y Volkswagen la utilizan en sus modelos de coches eléctricos.

Cabe destacar que se está valorando el utilizar las celdas LTO y LFP porque éstas, a pesar de tener una menor energía específica, no utilizan el Cobalto como reactivo. Desde la expansión de los teléfonos móviles y otros equipos electrónicos portátiles, el Cobalto ha tenido un peso importantísimo en el mercado mundial y su elevado precio anima a los fabricantes de VE a buscar nuevas tecnologías para el almacenaje de energía.

5.3. MODELO ELÉCTRICO DE LA CELDA

En el modelo MATLAB utilizado para la batería, que pertenece a la librería Simscape Electrical, se presenta la posibilidad de escoger entre distintos modelos de baterías, así como de calcular los efectos de la temperatura y el envejecimiento de la celda. En el caso de la batería de Li-Ion, el modelo incorpora las ecuaciones presentadas en el estudio de Saw et al., 2014. Centrándonos en el modelo eléctrico, el modelo usa el siguiente esquema:

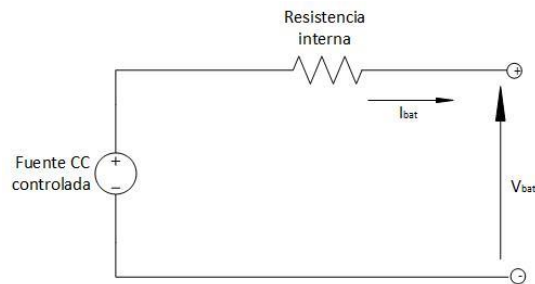


Ilustración 10 - Esquema eléctrico básico de una celda

De tal manera que $V_{bat} = E_{controlada} - I_{bat} \cdot R_{int}$. A continuación, se muestra la curva típica de descarga de una celda de Li-Ion.

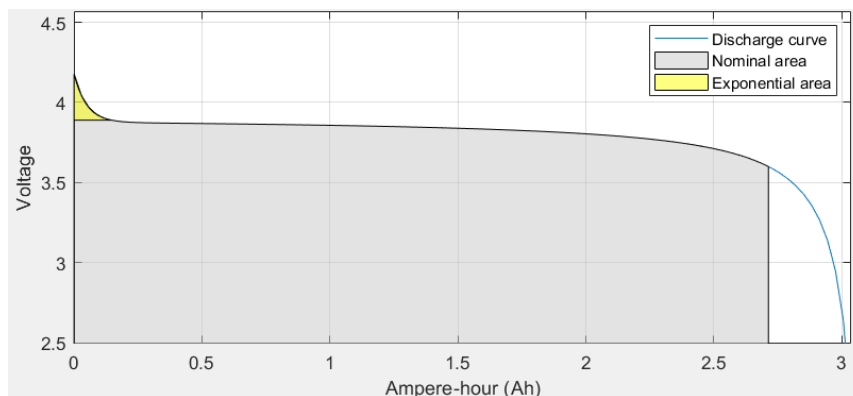


Ilustración 11 - Curva de descarga de una celda de 3,6 V 3 Ah

La ecuación que gobierna la fuente controlada varía para la carga y para la descarga, según establece el modelo, descrito por Tremblay & Dessaint, 2009, que es el estudio de donde Saw obtiene el modelo.

La ecuación, que depende de la capacidad de la batería y la intensidad, es la siguiente para la descarga:

$$E_{con} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q - i \cdot t} \cdot (i \cdot t + i^*) + A \cdot e^{-B \cdot i \cdot t} \quad (1)$$

Y para la carga:

$$E_{con} = E_0 - K \cdot \frac{Q}{i \cdot t - 0,1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - i \cdot t} \cdot i \cdot t + A \cdot e^{-B \cdot i \cdot t} \quad (2)$$

Los parámetros son los siguientes:

- E_0 es la tensión constante, en V
- K es la constante de polarización, en V/Ah
- i es la corriente, en A
- i^* es la corriente a bajas frecuencias, en A
- Q es la capacidad máxima de la batería, en Ah
- A es la tensión exponencial, en V
- B es la capacidad exponencial, en Ah⁻¹

El primer término de la ecuación es el potencial, constante. El segundo corresponde a la caída de tensión por polarización, que también depende del estado de la carga, reflejado en la fracción $\frac{Q}{Q-i \cdot t}$. Analizando dicha fracción, se aprecia que corresponde al inverso de la capacidad restante en la celda. Multiplicando por la constante, se puede considerar el resultado como una resistencia de polarización.

La parte exponencial de la ecuación se usa para describir la parte exponencial de la curva de descarga de la celda, en la que desciende rápidamente el valor de la tensión. Los valores de A y B se obtienen experimentalmente.

Resulta llamativo el elemento i^* , que se define como la intensidad a bajas frecuencias. Se introduce en el estudio de Tremblay para explicar el comportamiento dinámico lento de la tensión como respuesta a un pulso de corriente.

Mencionar que en la ecuación de la carga la resistencia de polarización se describe como $K \cdot \frac{Q}{i \cdot t}$; con la celda cargada debería ser infinita. Sin embargo, la realidad según Tremblay se corresponde con $K \cdot \frac{Q}{i \cdot t - 0,1 \cdot Q}$.

Estas ecuaciones, sin embargo, no tienen en cuenta el efecto de la temperatura, que se detalla en el siguiente apartado.

5.4. MODELADO TÉRMICO DE LA CELDA

En el mismo modelo de batería se incluye un preciso modelo térmico genérico para los acumuladores de Li-Ion. Dicho modelado se basa, entre otros, en el estudio de Saw. El modelado térmico de una batería puede realizarse desde diversas aproximaciones, muchas de las cuales consisten en la medida de diversos parámetros mediante experimentación una vez construida la batería, o permiten realizar estimaciones de la temperatura interna de la batería a partir de lecturas periódicas durante su vida útil.

Sin embargo, el modelo de Simscape, que bebe ampliamente de la influencia de Saw, permite el cálculo a partir de parámetros disponibles en las especificaciones de muchas celdas.

5.4.1. EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LA TENSIÓN DE LA CELDA

En primer lugar, presenta el efecto que realiza sobre la tensión en bornes de la celda el efecto de la temperatura, que se traduce en la dependencia de la temperatura de algunas constantes.

Dependen de la temperatura, la tensión constante (E_0) y la constante de polarización (K) y la resistencia interna (R). La capacidad (Q) depende de la temperatura ambiente. Las ecuaciones que expresan las dependencias son las siguientes:

$$E_0(T) = E_{0|T_{ref}} + \frac{\partial E}{\partial T} (T_{amb} - T_{ref}) \quad (3)$$

$$K(T) = K_{|T_{ref}} \cdot e^{\alpha \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (4)$$

$$Q(T_{amb}) = Q_{|T_{amb}} + \frac{\Delta Q}{\Delta T} (T_{amb} - T_{ref}) \quad (5)$$

$$R_{int}(T) = R_{|T_{ref}} \cdot e^{\beta \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right)} \quad (6)$$

Los parámetros que aparecen en estas ecuaciones se detallan a continuación:

- T_{ref} es la temperatura ambiente de referencia, en K
- T es la temperatura interna de la celda, en K
- T_{amb} es la temperatura ambiente, en K
- E/T es el coeficiente reversible de tensión y temperatura
- α es la ratio de Arrhenius para la resistencia de polarización
- β es la ratio de Arrhenius para la resistencia interna

Como se aprecia, la resistencia interna depende de la temperatura interna de la celda. Encontrar dicha temperatura es otro de los objetivos de la simulación.

5.4.2. TEMPERATURA INTERNA DE LA CELDA

Para encontrar la temperatura interna de una celda, primero entenderemos que es lo que produce calor en la misma. Volviendo al estudio de Saw:

$$Q_{gen} = i \left(E_0 - V_{batt} + T \cdot \frac{\partial E}{\partial T} \right) [W] \quad (7)$$

Explica que el calor generado se debe a tres componentes:

- La variación de la entropía, de carácter reversible, que se simboliza por $iT \frac{\partial E}{\partial T}$ y que puede ser tanto endotérmico como exotérmico.
- La resistencia interna, que en la ecuación se simboliza con la caída de tensión $E_0 - V_{batt}$. Como todas las pérdidas por efecto Joule, siempre será exotérmica.
- Un calor irreversible producido por la transferencia de los electrones a través de los electrodos. No está considerado en la ecuación ya que es despreciable. Esta afirmación se sostiene en el estudio de Thomas & Newman, 2003, de donde Saw obtiene su balance de energías.
- Saw también considera la resistencia en los contactos de la celda. Si bien esto es útil al diseñar una batería concreta, en un modelo Matlab donde no se especifica la construcción de la batería carece de sentido. Por nuestra parte, también podemos no considerarlo ya que este efecto afectará de la misma manera en un sistema híbrido como en uno convencional.

Como afecta este calor a la celda se aprecia en un balance de energías y varía según las consideraciones del investigador. En la literatura se encuentran balances que tienen en cuenta la forma de la celda, el efecto de las celdas vecinas, si existe refrigeración forzada, el efecto de la radiación o de la convección.

En el modelo Matlab del que disponemos, solo considera que el calor generado es igual al almacenado, menos el disipado:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} = Q_{gen} - \frac{T - T_{amb}}{R_{th}} \quad (8)$$

Donde c_p es el poder calorífico y R_{th} la resistencia térmica equivalente.

Resolviendo la ecuación diferencial se puede hallar la temperatura en función del tiempo. En la información del modelo la fórmula de la temperatura está en el dominio de Laplace.

5.5. DEGRADACIÓN DE LAS CELDAS

En el mercado actual de vehículos eléctricos, un tercio del coste del vehículo corresponde al coste de producción y ensamblaje de la batería. La vida útil, junto a la capacidad de la batería, corresponden a la principal problemática actual de la movilidad eléctrica, si bien es cierto, que la degradación de la batería con el tiempo se puede reducir conduciendo de forma eficiente y realizando recargas lentas en lugar de las cargas rápidas o semi-rápidas. La manera más eficiente de cargar y descargar cualquier celda es hacerlo a 1C o lo que es lo mismo, a la corriente nominal de la celda.

La degradación en las celdas Li-Ion se produce por el crecimiento de una capa sólida (SEI) en el electrolito debido a las reacciones entre los electrones y el electrolito, esto impide que los iones de litio reaccionen con los electrodos. El nivel de crecimiento de esta capa depende de la demanda que se le exija a la batería, los principales factores que aceleran su crecimiento son la temperatura y el estado de carga de la celda. Otro fenómeno de degradación, aunque menos nombrado que el SEI, es el revestimiento metálico o “*lithium plating*” que se produce debido a la sobrecarga de la celda. Cuando el electrodo no puede almacenar más iones de litio en la reacción, tiende a acumularlos en la superficie formando litio metálico, que provoca una disminución de los iones de litio libres en la reacción y, por lo tanto, una pérdida de la capacidad. Esta capa de litio metálico puede llegar a formar dendritas en el electrodo que pueden ocasionar cortocircuitos en la celda.

El fenómeno de *cycling aging* se produce por los ciclos de carga y descarga de la celda, supone una disminución progresiva de la capacidad de la celda, que depende exponencialmente de la temperatura y linealmente del estado de carga en la que se encuentra la celda.

La ilustración 12 muestra la relación que tienen la temperatura y el estado de carga con la degradación de la capacidad de la celda. Podemos observar que el impacto que tiene la temperatura interna de la celda crece de manera exponencial y es considerablemente mayor que la dependencia del estado de carga. Cuanto mayor sea la corriente otorgada

por celda para satisfacer la demanda de la batería, mayor será la temperatura debido a la resistencia interna. Evitar los picos de corriente en las baterías de Li-Ion alarga considerablemente la vida útil de la batería al igual que controlar la temperatura del pack de baterías mediante un sistema de refrigeración.

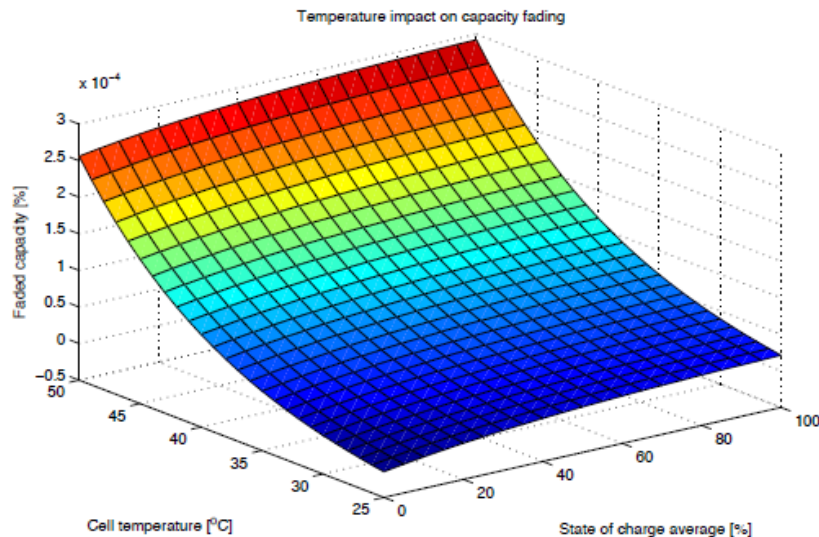


Ilustración 12 - Impacto de T^0 en la degradación de la celda (Xu et al. 2016)

5.6. SIMULACIÓN MODELO AGING

Un factor de peso que ayudará a determinar si finalmente es favorable utilizar un sistema HESS en EV, es la degradación (pérdida de capacidad) que se producirá en la batería a largo plazo.

El modelo que se utiliza en nuestro trabajo, se basa en un estudio de tesis doctoral realizado por el Dr. Pablo Moreno en (Moreno-torres 2016). El modelo utilizado es el siguiente:

$$\nabla Q = B \cdot e^{-\left(\frac{E_a}{R \cdot T}\right)} \cdot Ah^z \quad (9)$$

Donde ∇Q es el porcentaje de pérdida de capacidad, B es un factor pre-exponencial, E_a [J mol⁻¹] es la energía de activación de Arrhenius, $R = 8.314$ [J mol⁻¹ K⁻¹] la constante de los gases, T es la temperatura absoluta, $z \approx 0.55$ es un factor de reajuste, y Ah son los Ah entregados por la batería.

Aunque esta ecuación está pensada para descargas a C-rates constantes, se propone una versión linealizada apta para perfiles de descarga variables. Para realizar la conversión se deberá discretizar los C-rates de descarga de la celda durante el ciclo de conducción y aplicar la ecuación (10) para obtener la degradación producida por cada C-rate discretizado. La ecuación linealizada es la siguiente:

$$\ln(\nabla Q(k)) = \ln(B(k)) - \left(\frac{E_a}{R \cdot T(k)}\right) + z \cdot \ln(Ah(k)) \quad (10)$$

Donde $\ln(\nabla Q(k))$ es el porcentaje de pérdida de capacidad. La degradación total será:

$$\nabla Q(k) = \sum_k \nabla Q(k) \quad (11)$$

Para obtener el valor de Ah producido por cada C-rate, se calcula:

$$Ah(k) = n \cdot DoD(k) \cdot Q_{max} \quad (12)$$

Siendo n el número de ciclos, $DoD(k)$ la descarga (Deep of Discharge) producida por cada C-rate y Q_{max} la capacidad total de la batería.

El autor del estudio (Moreno-torres 2016) plantea una expresión para obtener la E_a en función de los C-rates de descarga, basada en resultados experimentales obtenidos para una celda de $LiFePO_4$:

$$E_a(k) = 31500 - 370.3 \cdot C_{rate}(k) \quad (13)$$

Para calcular el factor pre-exponencial se utiliza:

$$\ln(B(k)) = 1.226 \cdot e^{-0.2797 \cdot C_{rate}(k)} + 9.263 \quad (14)$$

Viendo estas ecuaciones, se puede apreciar que los parámetros que más significativamente afectan a la pérdida de capacidad son la corriente y la temperatura. El efecto de bajar un grado de temperatura es mucho menor que el de bajar 1C, si se atiende al exponente de la ecuación 9. Aun así, si la reducción es simultánea en ambos parámetros es indiscutible que la degradación será menor.

5.7. SIMULACIÓN MATLAB DE UN CICLO DE DESCARGA

Para simular el bloque de baterías con MATLAB usamos el bloque Battery nativo de la librería Simscape, cuyo modelo se ha explicado en los apartados anteriores. Dicho bloque, aparte de permitir simular la degradación y el efecto de la temperatura como ya se ha explicado, permite introducir una gran variedad de parámetros como la tensión, la capacidad nominal y ciertos puntos de la curva nominal de descarga. También permite la posibilidad de simular algunas celdas de diferentes químicas que ya tiene en su librería, como hemos escogido nosotros.

Se ha simulado un ciclo de descarga a diferentes ratios de una celda de LiCoO_2 de 7,2 V y 5,4 Ah. Aunque en el apartado 5.2.1 se especifica que la tensión nominal típica de las celdas con esta química es 3,6 V, nótese que 7,2 V corresponde exactamente al doble de 3,6 V, ya que es resultado de una configuración de las dos celdas en serie. Así pues, se ha simulado la descarga a 2, 4 y 6C, siendo en este caso 1C 5,4 A. En la ilustración 13 se muestran la tensión y la temperatura contra el tiempo.

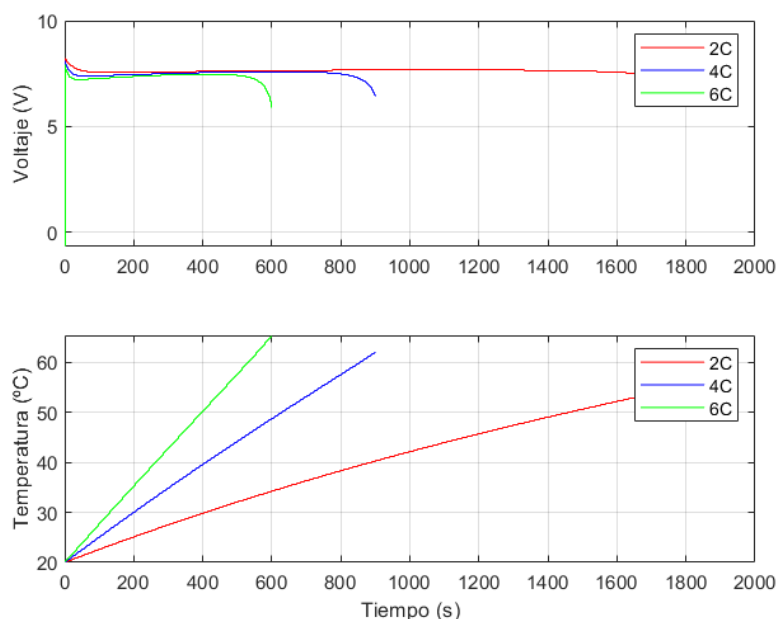


Ilustración 13 - Descarga a 2, 4 y 6C de una celda LiCoO_2 de 7,2 V 5,4 Ah

Evidentemente, el resultado del bloque de simulación es coherente: el tiempo de descarga coincide a la perfección y se aprecia perfectamente el efecto de incrementar el ratio de descarga en el tiempo de autonomía y la temperatura sobre la celda.

5.8. ESTUDIO DE MERCADO DE BATERÍAS LI-ION

La nueva normativa de emisiones que ha fijado la Unión Europea, que ha entrado en vigor el pasado 1 de enero, incrementará las ventas de coches eléctricos en un 14,2%. Esta nueva normativa establece que la media de emisiones de todos los vehículos que vendan las marcas durante 2020 no puede superar los 95 g/km de CO₂. Es bastante posible que, a partir del segundo semestre de 2020 se produzca una fuerte concentración de modelos eléctricos matriculados, lo que aumentaría el stock de este tipo de vehículos de kilómetro cero en los concesionarios y, al mismo tiempo, un descenso en sus precios, convirtiéndose así en una alternativa de compra más asequible para los particulares

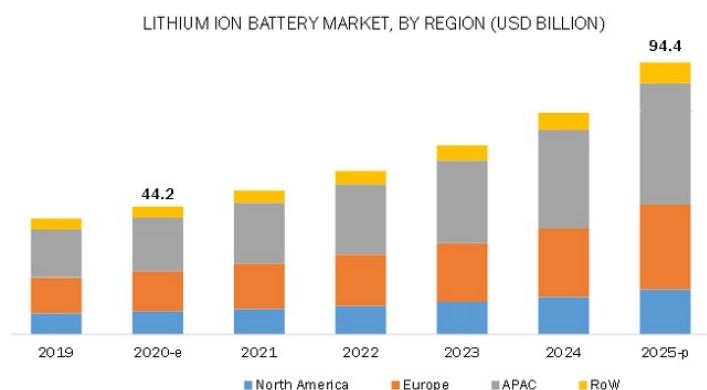


Ilustración 14 - Evolución regional del mercado del Li-Ion en USD («Lithium Ion Battery Market by Source, Type, Application & Geography| COVID-19 Impact Analysis|MarketsandMarkets™» [sin fecha])

El crecimiento de la demanda de vehículos eléctricos viene necesariamente ligado con un incremento en las producciones de baterías de Litio, ya que éstas, y en concreto las NMC, son las más utilizadas como sistemas de almacenamiento de energía para vehículos eléctricos e híbridos.

El mercado del Litio crece de manera exponencial año tras año y alcanzó un valor de 44,2 Billones de USD en el año 2020, se espera que esta cifra aumente hasta llegar a los 94,4 Billones en 2025.

Este imparable crecimiento de la demanda de Li nos hace formularnos la siguiente pregunta: ¿Hay reservas suficientes de este preciado mineral para satisfacer las necesidades de movilidad eléctrica en el planeta?

El metal se obtiene principalmente de dos fuentes: La espodumena y los desiertos de sal. El primero se encuentra concentrado en su mayor parte en Australia y los mayores

desiertos de sal están en Sudamérica, principalmente en Argentina, Chile y Bolivia. Según los datos obtenidos en el año 2019, se estima que la mayor reserva mundial de Li se encuentra en Chile con aproximadamente 8.600.000 millones de toneladas de este material. Cabe destacar que a pesar de la publicidad que se les ha dado a los proyectos de extracción de Litio de las salinas de Sudamérica, éstos tardan unos 7 años en empezar a producir el mineral; en cambio, la explotación de la espodumena australiana solo requiere de 3 a 5 años.

Las ilustraciones 15 y 16 muestran la distribución de las reservas y recursos de Li en nuestro planeta:



Ilustración 15 - Concentración de Litio en Sudamérica



Ilustración 16 - Concentración de Litio en Australia

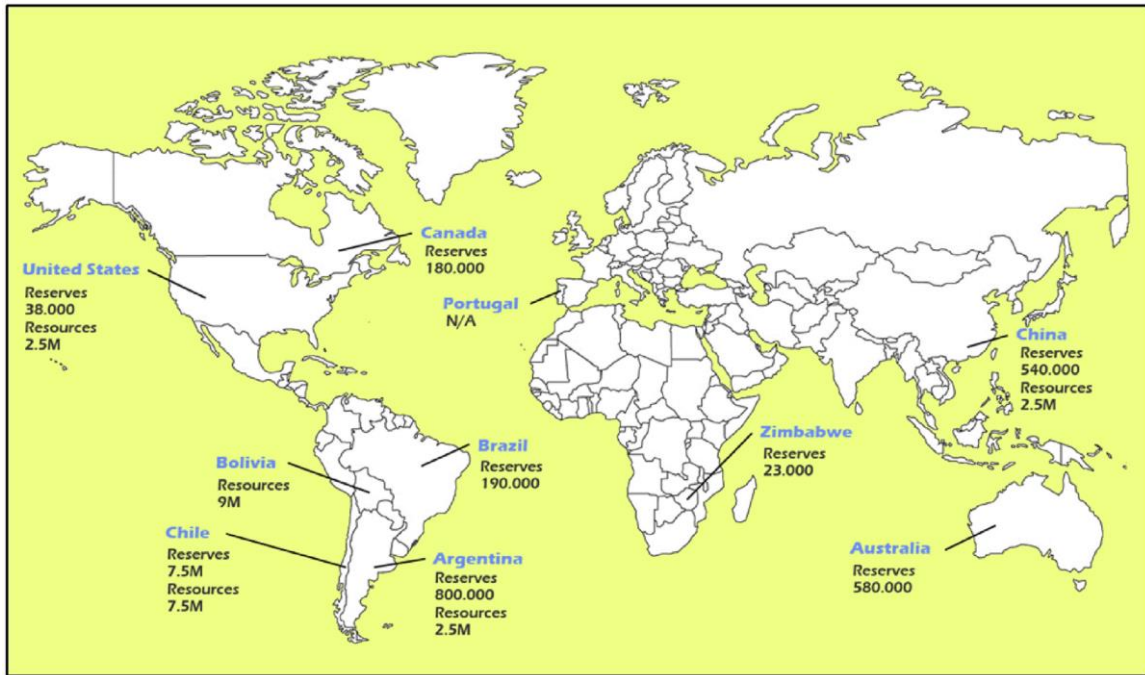


Ilustración 17 - Reservas y recursos de Li mundial (reservas son cantidades conocidas y de fácil extracción, recursos son valores potenciales estimados existentes en la zona) (Oliveira et al. 2015)

Para especificar la cantidad neta del metal en las diversas tipologías tenemos la ilustración 18 donde vemos un contraste entre el valor comercial actual utilizado y el valor teórico posible si la tecnología se ve optimizada:

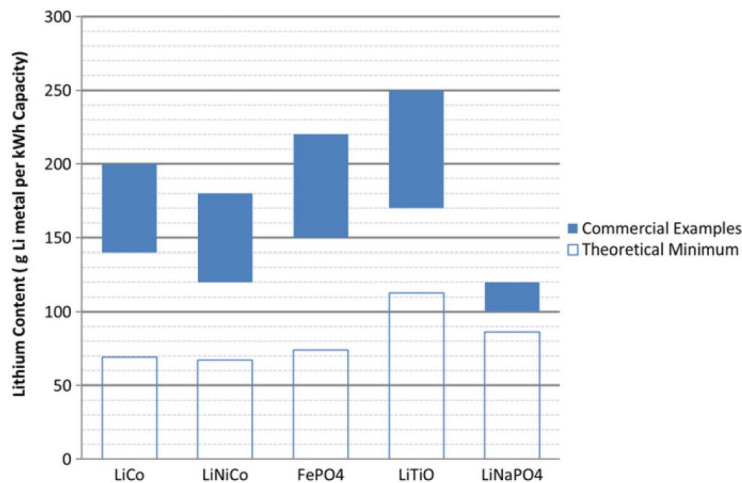


Ilustración 18 - Masa (g) de Li utilizado por kWh en cada tipología de batería, contraste entre el valor real actual y el teórico (Kushnir y Sandén 2012)

La ilustración 19 muestra el futuro de la demanda de Li ante las capacidades medias de 9 kWh para un vehículo híbrido enchufable (con motor de combustión, PHEV) y 36 kWh de un vehículo 100% eléctrico (BEV). Las bandas de demanda se estiman entre 0,2 y 0,5 vehículos por cápita (escenarios justificados en extensión en el estudio) y se categoriza la demanda según la capacidad de reciclaje ante un ciclo de vida de 10 años. También se establece la referencia de 30 Mt de Li como el valor límite económicamente rentable sin contar los recursos potenciales del metal en océanos.

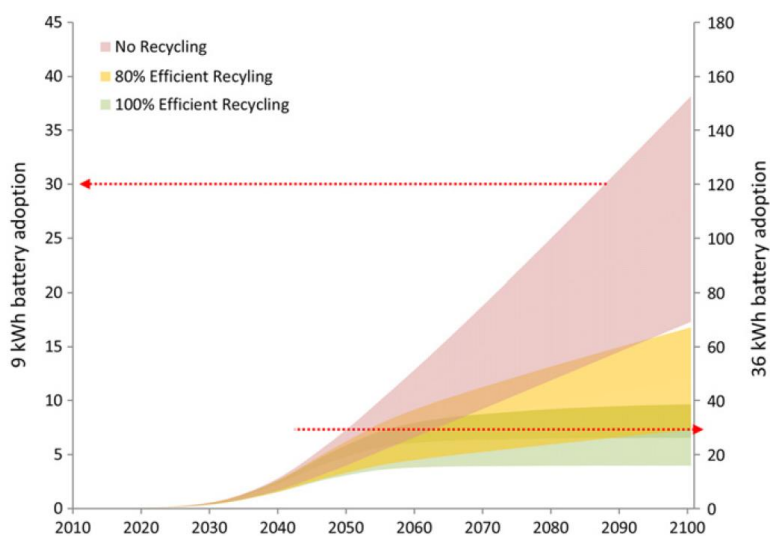


Ilustración 19 - Modelo de demanda acumulada de Li según capacidad media de batería en la tipología de vehículo y su escenario de adopción a lo largo del siglo, según la capacidad de reciclaje. Unidades en Mt (millones de toneladas) de Li virgen acumulada en ambos ejes verticales (Kushnir y Sandén 2012)

Podemos ver que el reciclaje deberá ser total para la absorción de una flota de vehículos 100% eléctricos. El estudio declara que el reciclaje de Li será la principal fuente del metal a lo largo de la segunda mitad del siglo.

Estos últimos años, el mercado ha estado desbalanceado al haber mayor oferta que demanda de Litio y este factor ha hecho que varios inversores se replanteen formar parte de este sector, pero se espera que durante estos años se estabilice al aumentar la demanda debido al incremento de vehículos eléctricos. En el año 2019 aproximadamente un 50% de las baterías fueron recicladas o reprocesadas y convertidas en *Power Banks* en el mercado chino, que sin ninguna duda son los líderes del reciclaje de Litio.

Finalmente, considerando el potencial máximo de extracción estimado de Li y la demanda de entre 0,2-0,5 vehículos por cápita (los límites inferior y superior de las bandas, respectivamente) de tipología híbrido enchufables (PHEV) o 100% eléctricos con batería (BEV), vemos en la ilustración 20 como a mitad de siglo, la extracción posible estimada de Li estará claramente por debajo de la demanda anual. Se toman los valores de demanda ante un 80% de reciclaje.

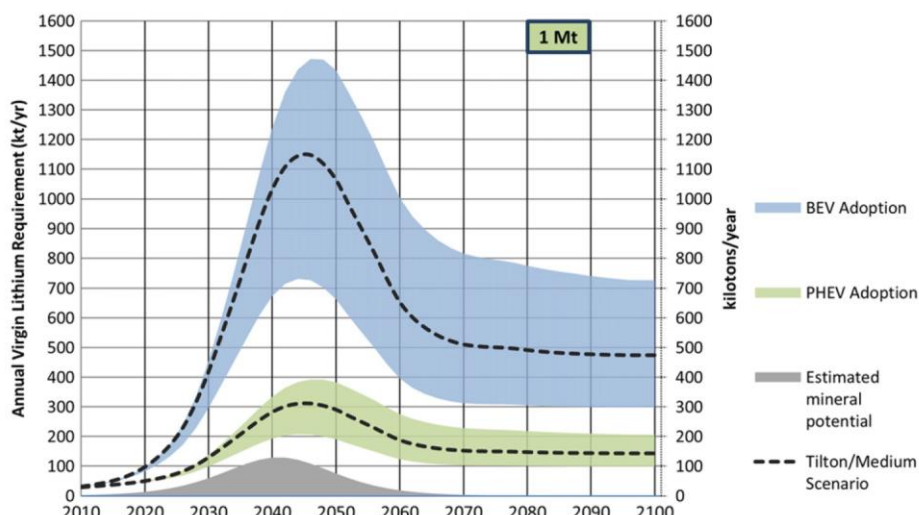


Ilustración 20 - Demanda anual ante el potencial de extracción de Li para una flota de vehículos PHEV o BEV ante los escenarios establecidos por Tilton (Kushnir y Sandén 2012)

Se concluye que las reservas de Li se muestran potencialmente insuficientes ante la demanda prevista y, por lo tanto, nuevas tecnologías independientes a este metal serán necesarias.

5.9. IMPACTO AMBIENTAL

Entre la información aportada por distintos estudios podemos ver en la ilustración 21 el detalle del proceso de fabricación de 1 kWh de una batería NMC:

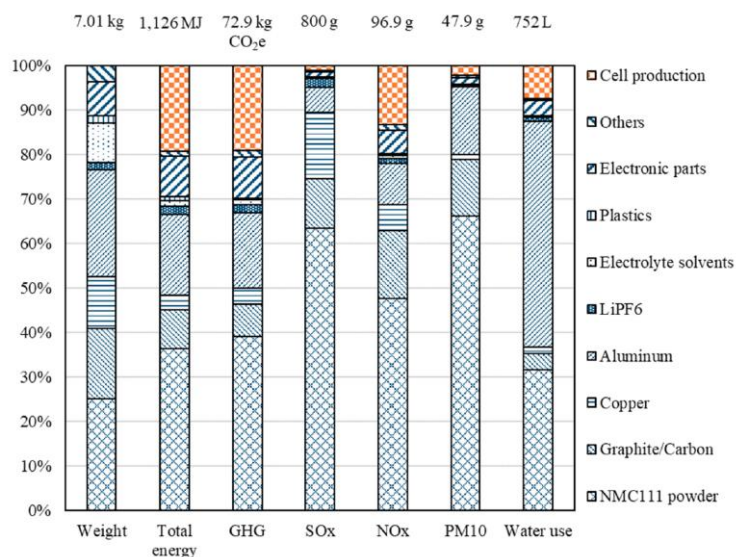


Ilustración 21 - Cradle-to-gate análisis ("de la extracción a la puerta del fabricante") de una batería de 1 kWh tipo NMC, donde se hace un porcentaje del impacto de cada proceso/componente para cada categoría de impacto ambiental referente al total de la categoría mostrado en la parte superior, GHG se refiere a los gases de efecto invernadero, PM10 se refiere a la emisión de partículas inalables con un radio de 10 μ m (Dai et al. 2019)

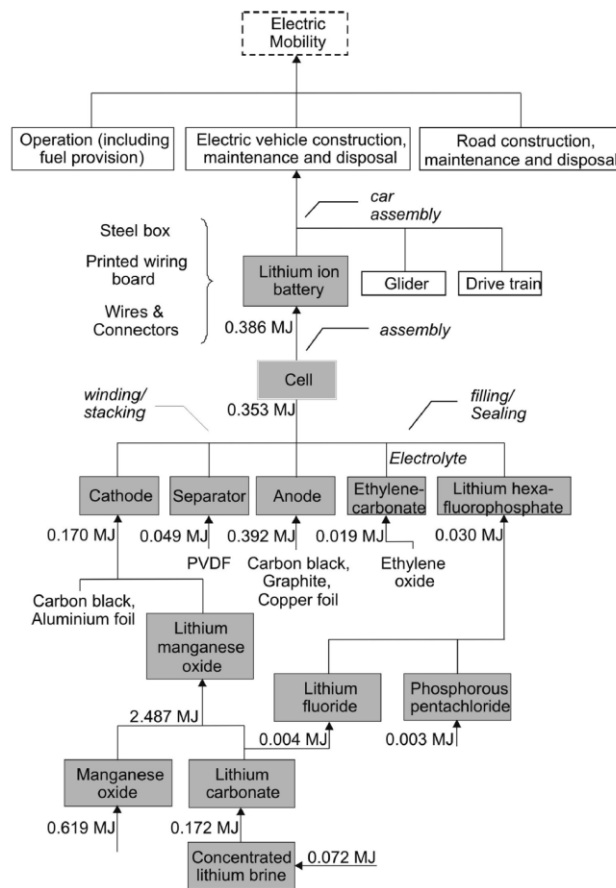


Ilustración 22 - Detalle de todos los procesos implicados para 1 km de recorrido en un EV (comparable a un VW Golf con 200 km de autonomía) con una batería LMO de aproximadamente 34 kWh (Cusenza et al. 2019)

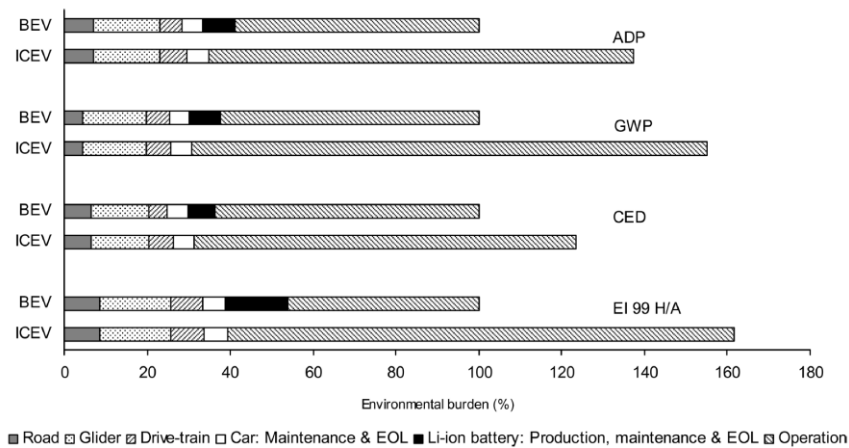


Ilustración 23 - Comparación de todos los elementos con impacto ambiental entre un EV (BEV) y un vehículo de combustión interna (ICEV) ponderando diferentes métodos/parámetros indicativos tomando el 100% el valor del EV (Cusenza et al. 2019)

Los siguientes factores tienen el siguiente significado:

- **Road:** construcción y mantenimiento de la carretera donde el vehículo será utilizado.
- **Glider:** el resto de componentes que no sean la propios a la cadena de tracción

o la batería, como podrían ser el chasis, interior, sistemas de climatización y complementos.

- **ADP:** potencial de agotamiento abiótico, factor que indica la disminución en la disponibilidad de recursos naturales no-vivos. Factor en que su cálculo aún está discutido.
- **EOL:** “end of life treatment” procesos aplicados en el final del ciclo de vida del componente, ya sea reciclaje, incineración, destrucción, reutilización, etc.
- **GWP:** “global warming potential” factor expresado como masa de CO₂ que indica la potencial emisión de gases de efecto invernadero.
- **CED:** “cumulated energy demand” cálculo de la energía total acumulada para la producción y/o uso.
- **EI 99 H/A:** metodología de análisis del impacto ambiental que tiene como resultado la creación y contraste de “eco-indicadores”.

Comentar que el estudio detrás de la Ilustración 22 y 23 data de 2010, pero aún consideramos sus resultados debido a la forma en que han sido expresados, como referencia. Finalmente presentamos la ilustración 24:

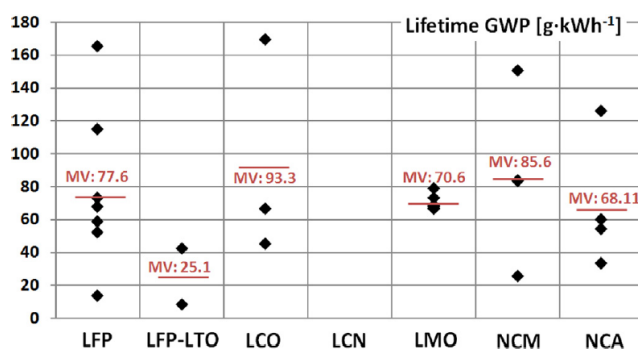


Ilustración 24 - GWP a lo largo del ciclo de vida de diferentes tipologías de baterías basadas en Litio (Peters et al. 2017)

Viendo que se demuestra que el EV en su totalidad, principalmente por el uso de la batería como fuente de energía, es un vehículo con menor impacto ambiental que el vehículo de combustión interna, por tanto, es el escogido ante la tendencia normativa mundial.

6. SUPERCONDENSADORES

Se le llama supercondensador, ultracondensador o condensador electroquímico a aquel elemento pasivo capaz de almacenar energía eléctrica de forma electroquímica, elemento que gracias a su estructura única consigue una alta capacitancia que lo diferencia del condensador común. Nos referiremos a ellos a lo largo del trabajo como “SC”.

Tanto el SC como el condensador se basan en la correlación de las siguientes leyes físicas:

$$C = \epsilon \frac{S}{D} \text{ (F)} \quad E = \frac{1}{2} CV^2 \text{ (J)} \quad (15)$$

La primera ley especifica la capacidad [F] entre dos placas eléctricamente conductoras con una superficie S [m²] separadas mecánicamente a una distancia lineal D [m], en la dirección del vector \vec{S} , que pertenece al grosor de una lámina de un material de carácter dieléctrico con una específica permeabilidad eléctrica ϵ [F/m]. Al aplicársele una diferencia de potencial [V], a esta capacidad eléctrica, vemos en la segunda ley la proporción en que se almacena energía [J].

La diferencia constructiva que altera los valores de la primera ley son la razón por la que diferenciamos entre SC y condensadores, valores que dejan al SC con una energía específica de entre 10 y 20 veces mayor al condensador.

El condensador es un elemento sin polaridad, a excepción de los electrolíticos, en la que las dos placas conductoras se encuentran separadas por un material dieléctrico, aislante. El condensador electrolítico es una tipología constructivamente especial ya que se asemeja al SC debido a la sustitución del dieléctrico por un electrolito (sustancia compuesta de iones libres solvatados). En la ilustración 25 queda plasmado el esquema constructivo de un condensador común que nos servirá para entender y diferenciarlo con el propio del SC, foco de estudio en este apartado:

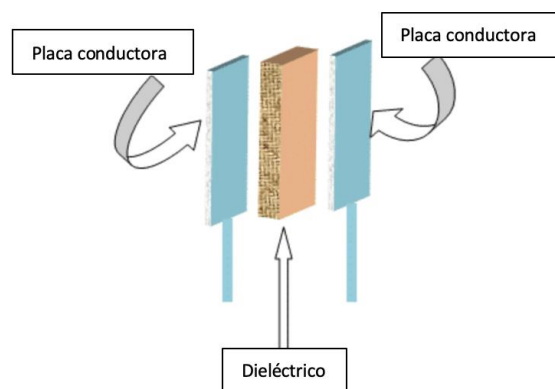


Ilustración 25 - Esquema constructivo de un condensador («What is Supercapacitor (Ultracapacitor) - Characteristics, Working & Types» [sin fecha])

El SC presenta como principales diferencias eléctricas ante el condensador su elevada capacidad de hasta cientos de faradios (en el condensador hablamos como máximo de milifaradios, habitualmente de micro/pico faradios) y de una tensión posible mucho más baja entorno a los 2,5-2,7 V, recomendada por fabricantes. También tenemos, debido a la alta capacitancia, la posibilidad de almacenar de 10 a 100 veces más energía que el condensador común que sumado a su alta densidad de potencia hacen que SC esté en el foco de comparación con las tecnologías de baterías comunes, entre ellas las de Litio.

La forma constructiva del SC se puede explicar de forma simple como la duplicación del efecto producido en un condensador común, es decir, nos encontramos con dos “condensadores” en cada electrodo (material conductor en estado sólido que está en contacto con el electrolito y el colector de corriente) que se interconectan en serie entre ellos, aislados uno del otro con un separador dieléctrico iónico-permeable que, como indica su característica, deja el paso a través de sus poros a los iones del electrolito en el que los electrodos, los dos “condensadores”, se encuentran inmersos, pero no permite el paso de la corriente eléctrica que produciría corto circuito. La estructura de estos dos “condensadores” se genera, en la tipología puramente capacitiva, gracias al efecto llamado doble capa eléctrica ante la polarización de ambos electrodos en la aplicación de una diferencia de potencial entre ellos.

El efecto de doble capa eléctrica se crea de forma eléctricamente opuesta en cada electrodo debido a la contraria polarización de ambos en la aplicación de tensión eléctrica entre ellos, por ello, la explicación del fenómeno en uno de los electrodos es fácilmente extrapolable. El descubrimiento de este efecto se le atribuye al médico y físico alemán Helmholtz en 1879 y consiste en la generación de dos capas, interna y externa, cuando un electrodo, en contacto con un electrolito, se ve polarizado.

La capa interna, llamada PIH (*Plano interno de Helmholtz*), es una capa molecular de disolvente físicamente absorbida al electrodo polarizado, que separa eléctricamente el mismo de los iones del electrolito que se han visto eléctricamente atraídos para la compensación de cargas con el electrodo polarizado. Esta capa se presenta, por lo tanto, como un pseudodieléctrico que debido a su carácter molecular presenta un espesor de entre 0,1 nm y 10 nm, lo cual es drásticamente inferior al material dieléctrico puro posible aplicado en los condensadores comunes a día de hoy; también al ser una capa físicamente absorbida al electrodo, lo que significa que la estructura atómica de los elementos unidos no ha sido modificada, permite tener una estabilidad mucho mayor a un dieléctrico puro expuesto a tal campo eléctrico, el cuál entraría en rotura.

La capa externa, llamada PEH (*Plano externo de Helmholtz*), es en la que se encuentran atraídos los iones del electrolito de carga opuesta a la del electrodo.

En la ilustración 26 y 27 puede verse la estructura del SC y referenciado el PIH y PEH con el SC descargado y cargado, así como un detalle del segundo caso:

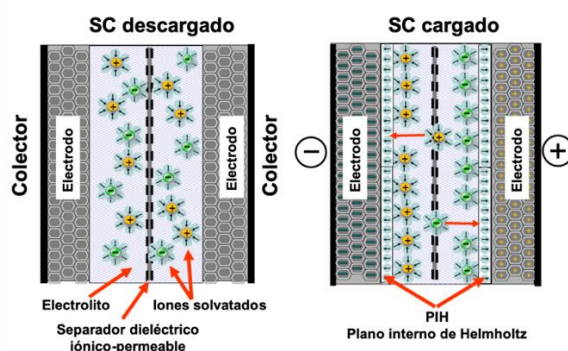


Ilustración 26 - Esquema de distribución de cargas en un SC («Supercapacitor - Wikipedia» [sin fecha])

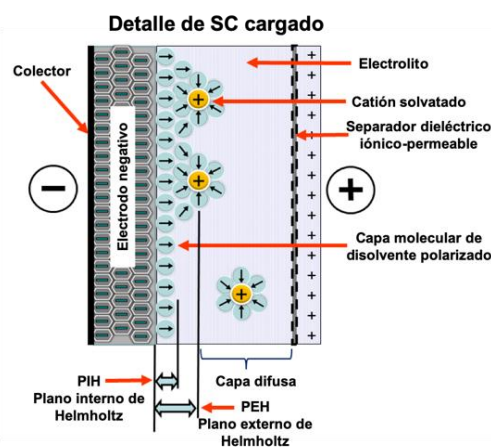


Ilustración 27 - Detalle de distribución de cargas en un SC cargado («Supercapacitor - Wikipedia» [sin fecha])

Recalcar como vemos que el fenómeno de doble capa eléctrica con su PIH y PEH solo aparece cuando el SC se encuentra cargado con los electrodos polarizados.

Al conectar el SC a una carga tendremos la corriente circulando a través de los colectores, no del electrodo.

Es gracias al fenómeno de doble capa eléctrica, concretamente al PIH, que tenemos el divisor de la fórmula de la capacitancia eléctrica, la distancia lineal, drásticamente reducido ante el posible en un condensador común, por lo tanto, se justifica la alta capacitancia de los SC. Otra forma en la que la capacidad pueda ser incrementada es aumentando la superficie de las placas conductoras distanciadas, en caso del SC, se trata de la superficie de los electrodos en contacto con el electrolito y se consigue mediante la porosidad del mismo, como se puede observar en la ilustración 28:

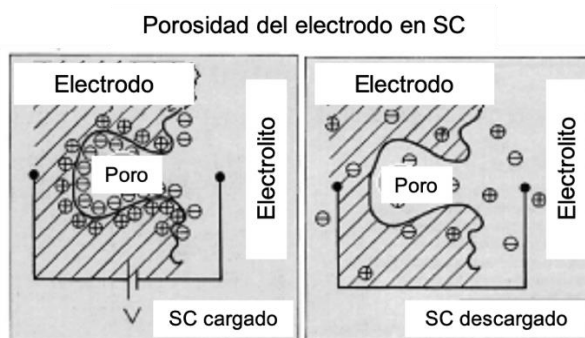


Ilustración 28 - Detalles de la porosidad del electrodo de un SC

La auto-descarga de supercondensadores es distinta a la propia en baterías. El estudio de la ilustración 29 (Kowal et al. 2011), detalla que la tensión puede decaer entre un 5-60% al cabo de 2 semanas de reposo, aun así, indica que en contraste con las baterías donde se usa el mismo término, la carga eléctrica perdida es mínima ya que la pérdida de tensión se debe a una relajación de una sobretensión inicial debida a la concentración de portadores de carga, que en reposo se ven redistribuidos entre los poros. Tal estudio indica que con tasas de descarga bajas esa carga eléctrica, aparentemente perdida, puede ser extraída, es decir, “recuperada”, cosa que en las baterías es imposible.

Este fenómeno se le llama self-discharge current leakage o DCL, traducido a corriente de fuga de auto-descarga, por ello, se le atribuye a este fenómeno un valor del orden del micro-amperio promedio medidos en un periodo de tiempo específico que se asemejarían a qué tasa de descarga la tensión se ve afectada durante ese tiempo de forma pasiva en reposo, este es el valor ofrecido en la ficha de características del SC común. Para justificar este término de corriente el estudio plantea la creación de una R_{SD} como la resistencia variable determinante del fenómeno. La Ilustración 30 indica la

variación temporal de la tensión y R_{SD} en función de la temperatura para un SC cargado durante 24 h a 2,7 V.

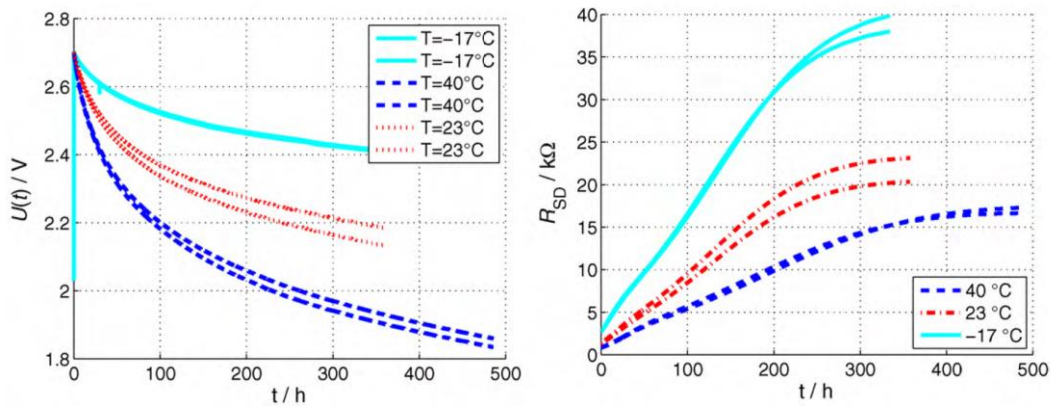


Ilustración 29 - Autodescarga de SC en función de la temperatura (variación de la tensión en reposo) y su valor de resistencia atribuido (Kowal et al. 2011)

Es interesante observar la redistribución de los portadores de carga, causante principal de este fenómeno:

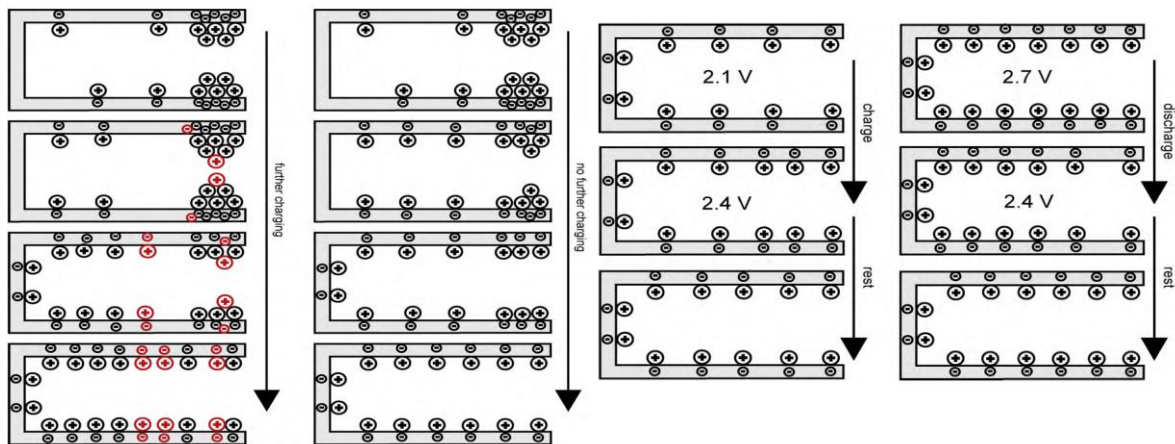


Ilustración 30 - Redistribución en el poro del electrodo de un SC de los portadores de carga en 2 grupos de casuísticas (Kowal et al. 2011)

En el grupo de la izquierda de la ilustración 30 vemos el efecto de la duración del proceso de carga a tensión constante. Vemos a la izquierda que la redistribución de los portadores de carga es simultánea a la incorporación de nuevos portadores en el poro mientras se extiende la carga del SC. En la izquierda vemos la redistribución una vez la carga se ha terminado.

En el grupo de la derecha de la ilustración 30 vemos como los portadores se redistribuyen durante el reposo posterior a cortos periodos de carga y descarga. Esta redistribución es planteada como la principal causante de la disminución de la tensión del SC (Kowal et al. 2011).

Una vez clara la diferencia constructiva del SC que le permite su elevada capacitancia

en contraste con el condensador común y el fenómeno de auto-descarga característico, pasamos a comentar las cualidades que lo hacen foco de interés para el sector de la electromovilidad:

- **Elevada densidad de potencia:** es capaz de entregar por encima de 10 veces la potencia posible en una celda de litio por la misma masa o volumen. Tal factor se encuentra por encima de 1 kW/kg y hasta 10 kW/kg, más que suficiente para nuestra aplicación. Se puede decir que el SC, debido a la inexistencia de reacciones químicas que llevan su tiempo, es capaz de absorber y entregar la corriente que el sistema pueda soportar, por lo tanto, son idóneos para aplicaciones de carga rápida y entrega de picos de descarga.
- **Amplio rango de temperaturas de trabajo:** debido otra vez a su base no-química, la mayoría trabajan de forma óptima hasta los 65°C (a una tensión menor de la nominal hasta 85°C) y según el electrolito podemos tener temperaturas negativas de hasta -40°C. El comportamiento térmico y dependencia será comentada a posteriori, pero es claramente menor a las celdas de litio.
- **Alta eficiencia:** la ausencia de reacciones químicas aporta eficiencias muy altas (cerca del 100%) debido a una resistencia interna muy baja, también llamada ESR (*Equivalent Series Resistance*), que por lo tanto perderá muy poca energía por efecto Joule a corrientes elevadas.
- **Profundidad de descarga:** al contrario que muchas de las tecnologías de baterías, entre ellas las de litio, el SC puede descargarse por completo sin recibir impacto en su funcionamiento.
- **Mantenimiento:** debido a la baja ESR y la ausencia de reacciones químicas en las que el deterioro de los reactivos ante ciclos de carga y descarga es un factor limitante, con el SC nos encontramos con una capacidad de recibir ciclos de carga y descarga prácticamente infinitos, fácilmente se le atribuyen un ciclo de vida por encima de 1.000.000 de ciclos a partir de los que la capacidad pasa a ser un 80% de la nominal y el valor de ESR se ha visto duplicado.
- **Escalabilidad:** como las baterías, al tratarse de celdas en formatos

convencionales es muy sencillo el conexionado en serie (con o sin balanceado) o en paralelo para aumentar la tensión o corriente, según convenga.

Por otro lado, pasamos a comentar los factores que aún están limitando su incorporación al sector:

- **Elevado coste:** podemos encontrar el factor de €/kWh en torno a 10 veces el propio de las baterías de litio hoy en día. Esto se atribuye a la falta de I&D para la búsqueda de materiales sustitutos y procesos de fabricación más económicos. Aun así, su coste se ha visto reducido a lo largo de los años y las perspectivas son buenas.
- **Tensión máxima baja:** los fabricantes de SC establecen que deben estar sometidos a valores máximos de diferencia de potencial entre sus bornes de 2,5-2,7 V lo cual es bajo comparado a la mayoría de baterías y obliga al conexionado en serie o incorporación de elevadores de tensión, con el coste que eso comporta.
- **Energía específica baja:** tal factor no es comparable al de las baterías de litio y es por ello que los SC no se ven como candidatos, a día de hoy, como única fuente de energía para aplicaciones de electro-movilidad con requisitos de autonomía.

6.1. TIPOLOGÍAS

Como cualquier componente electrónico existen tipologías de SC. Estas se diferencian principalmente por dos factores, la composición de los electrodos y la simetría entre ellos en esa característica.

Según el primer factor tenemos que diferenciar entre condensadores de doble capa eléctrica, llamados EDLC (Electric Double-Layer Capacitor), y los pseudo-condensadores. Como hemos dicho, se diferencian en el material escogido para los electrodos, lo que implica un comportamiento y detalles cualitativos distintos. Por separado:

- **EDLC:** son aquellos con los electrodos basados en derivados del carbón, ya sea

carbones activos o nanotubos de carbono, como también en el prometedor grafeno. Es la tipología con mayor densidad de potencia debido a que el almacenamiento de energía es totalmente electroestático, principio de funcionamiento explicado anteriormente en comparación al condensador. Se escogen derivados del carbón debido a su asequible precio y su característica porosa. Los electrolitos escogidos son acuosos o de base orgánica como el acetonitrilo.

Existe una variante llamada AEDLC donde la "A" indica la asimetría en la capacitancia de los electrodos debido a la mayor cantidad de carbón en uno de ellos. Esta variante puede ofrecer un rango de estabilidad electroquímico mayor, llamado ESW (*Electrochemical Stability Window*).

- **Pseudo-condensadores:** como indica el prefijo "pseudo" se nos presenta una tipología fruto de la aproximación de su característica a la propia de un elemento puramente capacitivo, por ello se basa en la pseudo-capacitancia. Tal fenómeno es el que a partir de reacciones de redox totalmente reversibles (a diferencia de las baterías) entre electrolito y electrodo se almacena energía de forma faradaica que permite densidades energéticas más altas que los EDLC de hasta 50 Wh/kg teóricos pero se ve limitado en comparación a los mismos con un ciclo de vida de entorno a 100.000 ciclos y densidades de potencia menores, aun así, ambos valores están muy por encima, 100 veces los ciclo de vida, a los posibles en baterías, de ahí que se le aproxime la nomenclatura a un elemento capacitivo.

Los electrodos serán generalmente óxidos metálicos o polímeros conductores como la polianilina u otros resultantes del proceso llamado "dopaje electroquímico de polímeros". El electrolito será acuoso para electrodos de óxidos metálicos.

No tendremos el efecto de doble capa eléctrico de Helmholtz pero la construcción es la misma y solo se diferencia que en la posición de los planos interno y externo es donde ocurre la reacción redox reversible entre electrolito y electrodo.

Como en muchos otros casos de la tecnología, foco de este trabajo, nos encontramos con una tipología resultado de la unión de otras para intentar sumar ventajas, tomando el mínimo de compromisos posibles. Así tenemos la siguiente:

- **Condensadores híbridos:** presentan el electrodo negativo basado en carbón activo, propio de los EDLC, y el positivo en polímero conductor, propio de los pseudo-condensadores. Esta conjunción permite llegar hasta los 20Wh/kg sin compromiso aparente en densidad de potencia ante un EDLC aun limitando el ciclo de vida a los 100.000 ciclos propios de los pseudo-condensadores.

6.2. DEPENDENCIA Y MODELIZACIÓN TÉRMICA

El SC presenta, como cualquier componente electrónico, una dependencia en su comportamiento y rendimiento con la temperatura, así como una respuesta térmica fruto del efecto Joule ante su uso. En este apartado de forma escueta trataremos las conclusiones de otros estudios sobre ambos temas.

Primero destacar la dependencia ínfima a la temperatura de los SC en contraste a las baterías, debido a su baja ESR y, por lo tanto, alta eficiencia. Primero tratar el modelo dinámico generalizado del SC:

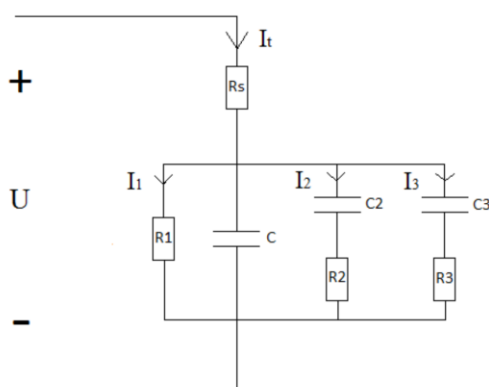


Ilustración 31 - Esquema eléctrico de un SC (Esber y Moubayed 2013).

Se presenta C como el elemento de almacenaje de energía capacitivo principal (la capacidad nominal) siendo entonces C2 y C3, con sus respectivas impedancias, las componentes propias del carácter dinámico del sistema ante una aplicación real (no son valores presentes en la ficha de características común). En cuanto a los elementos resistivos restantes tenemos a Rs tomando el papel de la ESR (Equivalent Series Resistance) del orden del mili-ohmio, y a R1 (anteriormente referenciada como RSD) siendo la resistencia de auto-descarga.

La modelización en espacio de estados del sistema caracterizando según el fabricante Nipponchemicon para una celda de 2,3 V da como resultado las siguientes gráficas, donde podemos ver las diferencias en tiempo de carga y descarga según la temperatura.

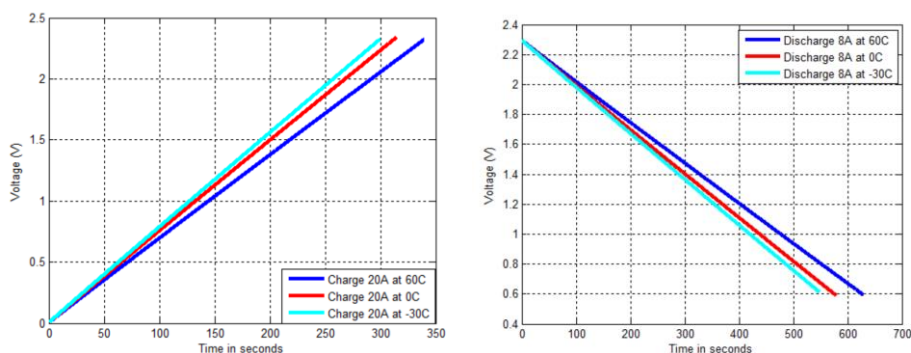


Ilustración 32 - Dependencia térmica en tiempos de carga y descarga de un SC (Esber y Moubayed 2013)

Estos resultados de una universidad del Líbano han sido confirmados por otro estudio proveniente de India y por lo tanto podemos extraer la simple conclusión de que es beneficioso cargar los SC a la mínima temperatura posible y descargarla a la máxima por debajo de 65°C, para así obtener el mínimo tiempo de carga y el máximo de descarga.

En cuanto al modelo térmico que según la corriente de carga/descarga nos proporcionará la temperatura esperada del SC se nos presenta el siguiente esquema:

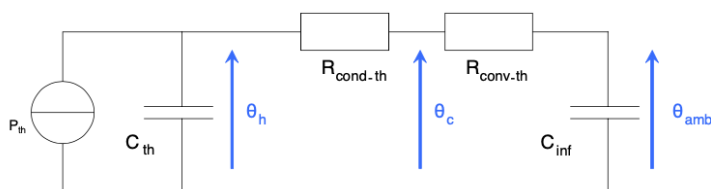


Ilustración 33 - Esquema térmico de un SC (Kreczanik et al. 2014)

Aquí tenemos a C_{th} como la capacidad térmica del SC y a C_{inf} como la capacidad térmica de la temperatura ambiente, infinita en caso de temperatura estable; ambos parámetros se expresan en J/K. Por otro lado, tenemos a θ_h y θ_{amb} como las diferencias de potencial para las capacidades térmicas anteriores y a θ_c como la propia debido a convección térmica en la carcasa, siendo todas ellas el símil eléctrico a la temperatura del núcleo del SC, a la temperatura ambiente y a la temperatura de la carcasa respectivamente. Los elementos resistivos representan los fenómenos de convección térmica entre la temperatura ambiente y la carcasa del SC ($R_{conv-th}$) así como la conducción térmica de la misma al núcleo del SC ($R_{cond-th}$), ambos parámetros expresados en KW.

Se nos presenta entonces el modelo térmico simplificado de la forma siguiente:

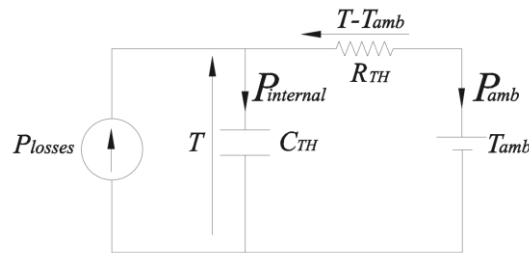


Ilustración 34 - Esquema térmico 2 de un SC (Pedrayes et al. 2019)

Aquí vemos sustituida la C_{inf} como una fuente de tensión continua con el valor de T_{amb} que representa la consideración de una temperatura ambiente estable. También vemos R_{th} como la suma de $R_{cond-th} + R_{cond-th}$ siendo un valor habitualmente proporcionado por el fabricante. Observamos en los dos esquemas que se hará referencia a las pérdidas térmicas en carga/descarga llamadas P_{th} o P_{losses} .

Una vez claro el modelo térmico de los SC pasamos a la observación de su comportamiento, primero veremos la respuesta térmica ante 150 ciclos de carga y descarga del modelo expuesto parametrizado para una celda de 2,7 V i 3000 F en contraste con la medición real para T_{amb} estable a 24 °C. Como podemos ver el modelo es muy preciso:

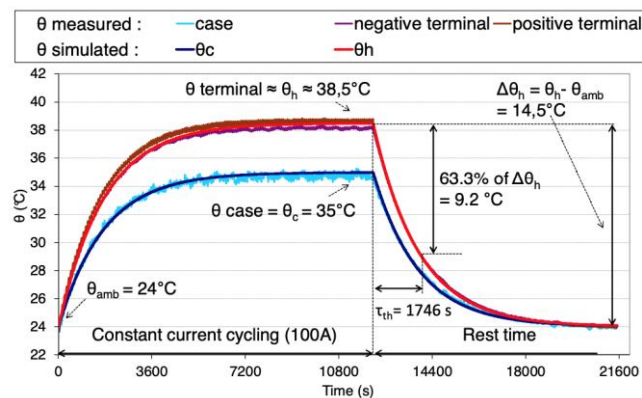


Ilustración 35 - Respuesta térmica de un SC (Kreczanik et al. 2014)

Comentar como se puede aproximar la temperatura del núcleo, θ_h o T , como la propia de los terminales de conexión. Sabiendo que se ha sometido a 150 ciclos continuos de aproximadamente unos 40 s simétricos de carga y descarga se puede afirmar que el SC se estabiliza, respondiendo como un sistema de primer orden, en una temperatura lejos de ser peligrosa y la inercia térmica es destacablemente baja con la τ_{th} de 30' (la constante de tiempo térmica).

Procedemos a tratar las pérdidas por calor, la P_{th} , gracias a los resultados extraídos de un test a un banco de SC de 135 V sometidos a 100 s simétricos de carga y descarga a aproximadamente 2 kW de potencia constante durante 600 s, es decir, 3 ciclos completos seguidos. Se nos presenta la siguiente respuesta:

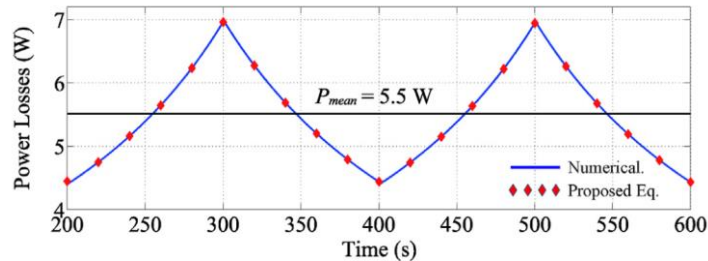


Ilustración 36 - Análisis de pérdidas en un SC (Pedrayes et al. 2019)

Comentar que los puntos rojos en la gráfica son una comparación de las ecuaciones propuestas en el estudio en contraste con las exactas extraídas por métodos numéricos. Esta gráfica permite confirmar la alta eficiencia de los SC teniendo los 5,5 W de disipación media representando un 0,3% de pérdidas en el ensayo, lo que dejaría al SC con un rendimiento del 99,7%.

6.3. MODELO SIMULINK

En este estudio se utiliza el modelo de SC tipo EDLC presente en el directorio *Simscape / Electrical / Specialized Power Systems / Electric Drives / Extra Sources* de Simulink. Este modelo nos permite una parametrización sencilla y nos permite utilizarlo como sistema de almacenamiento eléctrico bidireccional, ofreciendo tensión y corriente en descarga a la vez que puede ser cargado al aplicarle tensión superior a la propia.

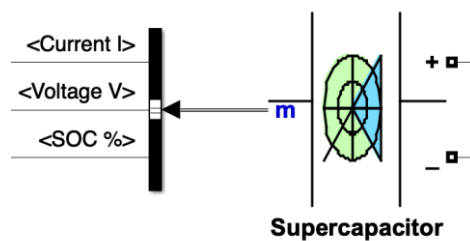


Ilustración 37 - Modelo Simulink del SC y detalle de sus outputs

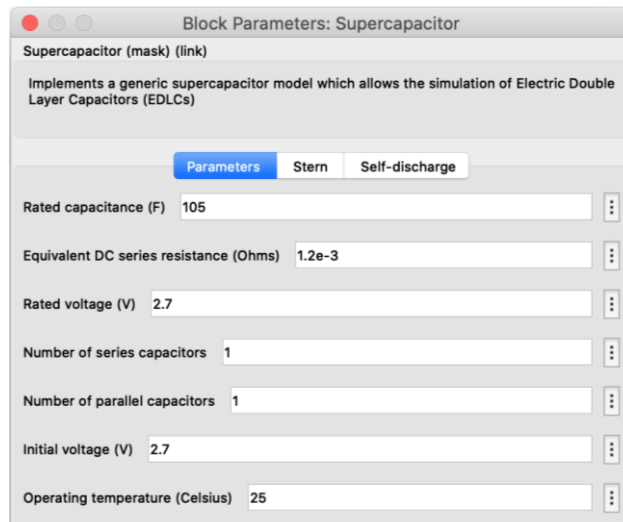


Ilustración 38 - Ventana de parámetros del bloque de SC del modelo Simulink

Donde los parámetros que se trataran en este estudio son los siguientes:

- **Rated capacitance $C(F)$** : capacidad nominal del SC o la resultante de la configuración de ellos.
- **Equivalent DC series resistance $R(\Omega)$** : Resistencia interna ensayada en corriente continua del SC o la resultante de la configuración de ellos.
- **Rated voltage $V(V)$** : tensión nominal del SC o la resultante de la configuración de ellos.
- **Number of series capacitors**: valor entero de SC eléctricamente conectados en serie en caso de que los valores anteriores hagan referencia a una configuración de ellos. Se recomienda que este valor sea divisor de la tensión nominal del bloque entre la tensión nominal de un SC (en torno a 2,5-2,7 V), en caso de no serlo se debe ser consciente de que será la tensión de trabajo aplicada a cada SC del bloque, pudiendo ser perjudicial para la vida útil del componente en aplicaciones prácticas.
- **Number of parallel capacitors**: valor entero de SC eléctricamente conectados en paralelo en caso de que los valores anteriores hagan referencia a una configuración de ellos. Valor determinado principalmente, entre otros factores, como divisor de la corriente máxima, continua o de pico (menos de 1 s), aplicada al bloque entre el mismo valor especificado por el fabricante para cada SC. Este valor máximo de corriente viene dado por implicaciones térmicas.

- **Initial voltage $I(V)$** : tensión inicial del SC o la resultante de la configuración de ellos.
- **Operating temperature $I(^{\circ}C)$** : temperatura de trabajo, que será considerada constante.

En la pestaña “Stern” permite configurar parámetros más detallados sobre los materiales del SC, valores que el fabricante no especifica en datasheets, por lo tanto, estos valores no se modificarán y se admitirá el 2% de error máximo que los autores detallan. La última pestaña permite simular la auto-descarga y graficar curvas de carga a corrientes específicas; ninguna de estas funciones nos es de utilidad.

Se puede observar que por el bus de salida “m” el bloque nos ofrece el valor de tensión (V), corriente (A) y state of charge en % (SoC) en función del tiempo. Su conexión al resto de sistemas será mediante su borne positivo (+) y negativo (-).

Comentar que el SoC(%) se calcula según la carga eléctrica inicial menos la carga eléctrica consumida (integral del perfil exponencial de corriente de un condensador común, con exponente $-t/(RC)$) respecto a la carga eléctrica total teórica. Esto se resume en la fórmula:

$$SOC = \frac{Q_{init} - \int_0^t i(\tau) d\tau}{Q_T} \times 100$$

Ilustración 39 - Expresión matemática del cálculo del SoC (%) del SC

Importante detallar que el modelo no simula el ciclo de vida ni tiene en consideración la reacción térmica del SC, esto justifica que las corrientes resultantes del SC no estén limitadas, se pueden extraer miles de amperios del modelo ya que no se considera la pérdida en calor o degradación.

Los datos introducidos en la ilustración 40 son los propios al modelo SCCY1KB707S3PBLE del fabricante AVX. Se han simulado con una carga constante de 5 mΩ conectada a partir de 1 s de simulación. La carga ha estado determinada para comprobar que el modelo respeta la constante de tiempo teórica $\tau=RC$ y que en 3τ se consigue el 95% de estabilización del sistema, asociado al valor de tensión.

La constante de tiempo considerando la ESR en serie a la carga ($R_t=6,2 \text{ m}\Omega$) sería de $0,651 \text{ s}$, en nuestro ensayo tendríamos el 95% de estabilización en el instante $2,95 \text{ s}$. Considerando únicamente la carga ($R_t=5 \text{ m}\Omega$) τ sería de $0,525 \text{ s}$, teniendo el 95% de estabilización en el instante $2,575 \text{ s}$.

Hacemos la distinción anterior ya que el modelo toma en consideración parámetros fuera de la teoría simple e ideal y así, de esta forma, poder tener dos perspectivas de cómo estos parámetros varían de la teoría original. Los datos de corriente son a título informativo ya que nos queremos centrar en los valores de tensión y SoC; la corriente ya hemos detallado que no está limitada, serán los autores que deberán tener en consideración los límites establecidos por fabricante. El ensayo tiene la siguiente estructura:

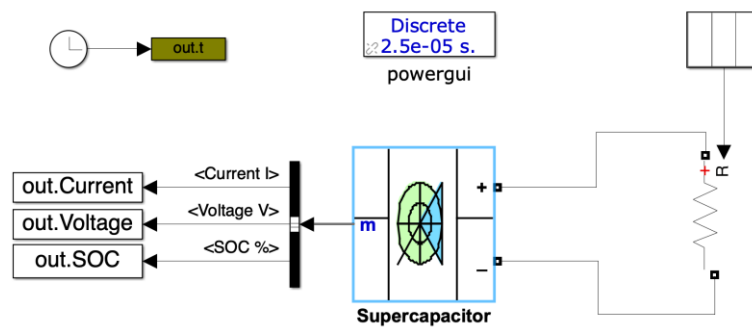


Ilustración 40 - Ensayo de descarga de SC

A 25°C y con etiquetas en los instantes comentados tenemos:

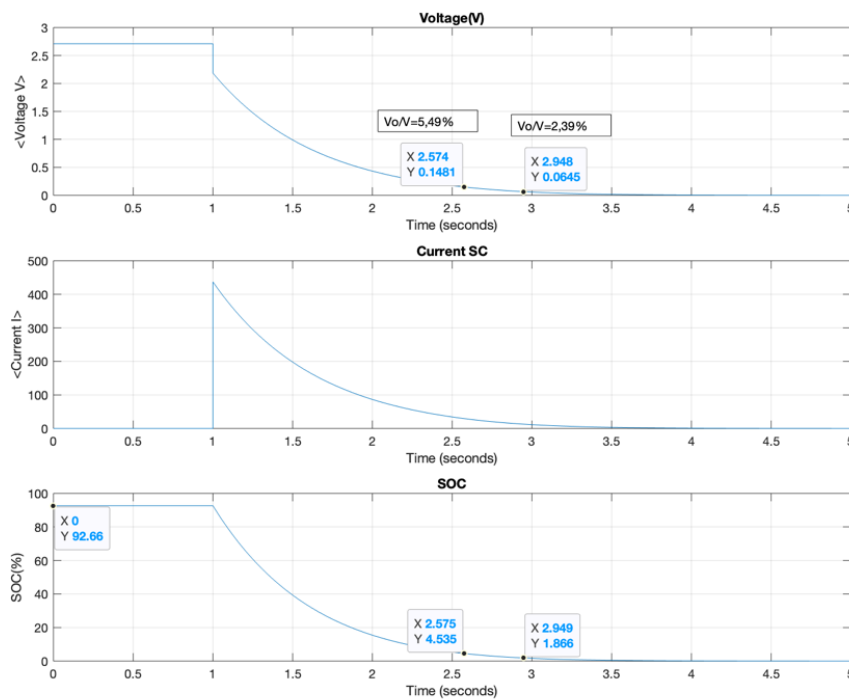


Ilustración 41 - Resultados de ensayo de descarga a 25°C del modelo Simulink de SC

Podemos observar en la ilustración 41 que el 5% de tensión relativa esperado solo se aproxima al instante 2,575 s considerando únicamente la carga de 5 mΩ. También se observa inicialmente que, aún teniendo la tensión inicial en su valor nominal, el SoC es de un 92,66%; para conseguir el 100% se debería cargar inicialmente el SC a 2,865 V. Tras determinados ensayos se ha concluido la clara dependencia del estado de carga inicial según T (°C), por ello se ha realizado en mismo ensayo a 0 K, pudiéndose ver que solo a esta temperatura se alcanza el 100% de SoC.

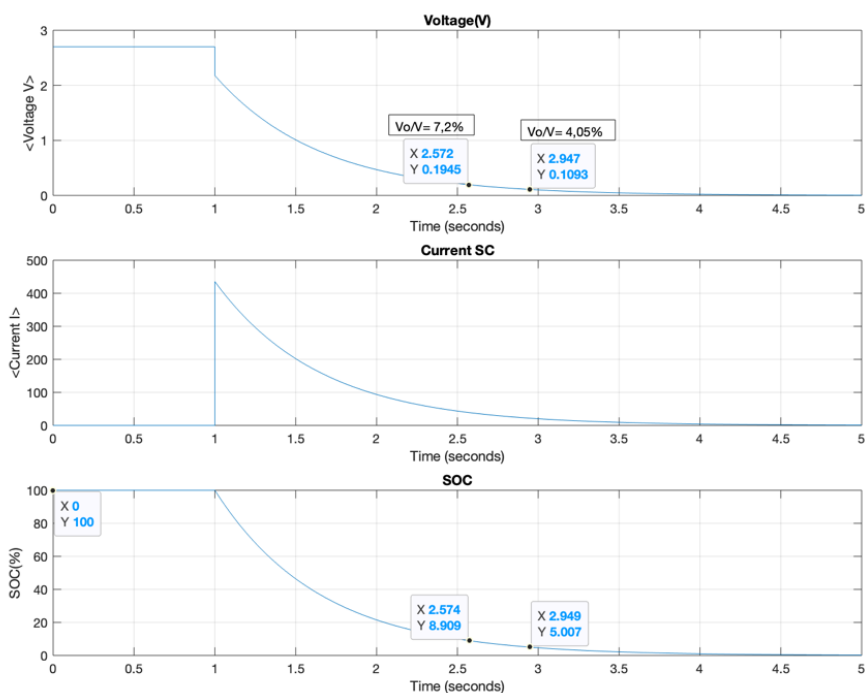


Ilustración 42 - Resultados de ensayo de descarga a 0 K del modelo Simulink de SC

Se observa en la ilustración 42, correctamente el 100% de SoC inicial a la tensión nominal a la vez que un 5% exacto de SoC en el instante 3τ considerando ESR como una carga en serie a la carga de 5 mΩ ($R_t=6,2$ mΩ). También vemos que el 5% en tensión relativa no se consigue en el instante teórico esperado.

También se ha observado el efecto directo del valor de ESR en el gradiente de tensión para $t = 1$ s, cuando se aplica la carga. Podemos ver en la ilustración 43 que para el mismo ensayo en 0 K la caída vertical de la tensión es de 0,522 V que para una corriente de salida de 435,5 A en ese instante, da un valor resistivo de 1,2 mΩ como causante, exactamente el valor de ESR.

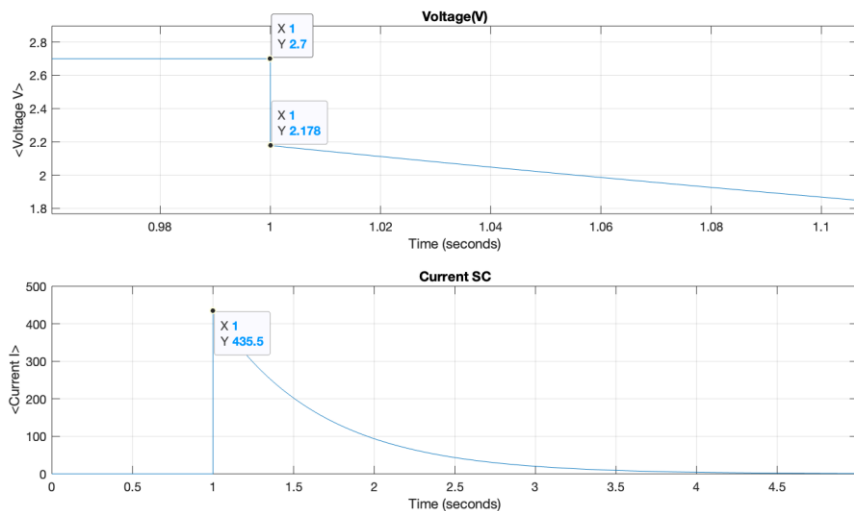


Ilustración 43 - Detalle de la caída de tensión del SC provocada por la ESR al inicio del ensayo de descarga a 0 K

Podemos observar en la ilustración 44, con una ESR prácticamente inexistente a una temperatura de 0 K, como tal caída desaparece y la descarga es prácticamente la exponencial ideal propia de un condensador común:

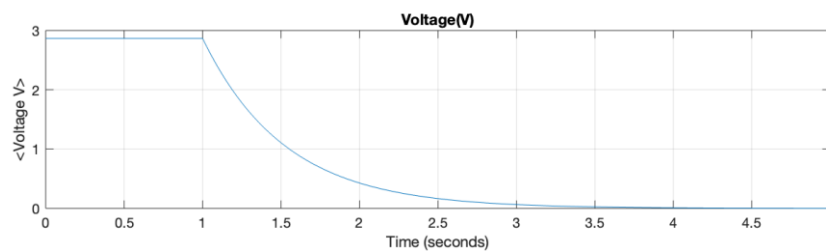


Ilustración 44 - Resultado de ensayo de descarga a 0 K del modelo Simulink de SC con ESR relativa a 0 mΩ

En la carga del SC se obtiene el mismo comportamiento que en descarga pero a la inversa. En la ilustración 45 se muestra la estructura del ensayo de carga del SC:

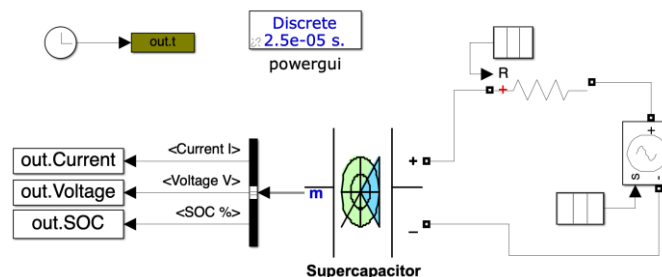


Ilustración 45 - Ensayo de carga de SC

Se ha realizado el ensayo con la misma resistencia de 5 mΩ en serie conectada en el instante 1 s (para obtener los mismos valores de corriente), instante donde la fuente de corriente continua ideal controlada pasa a generar 2,7 V en el circuito, evidentemente la tensión del SC debe ser 0 V. Se ha considerado la misma ESR de 1,2 mΩ y se ha ensayado a 0 K. La ilustración 46 muestra los resultados con datos concretos que

justifican el carácter inverso con respecto a los a ensayos en descarga.

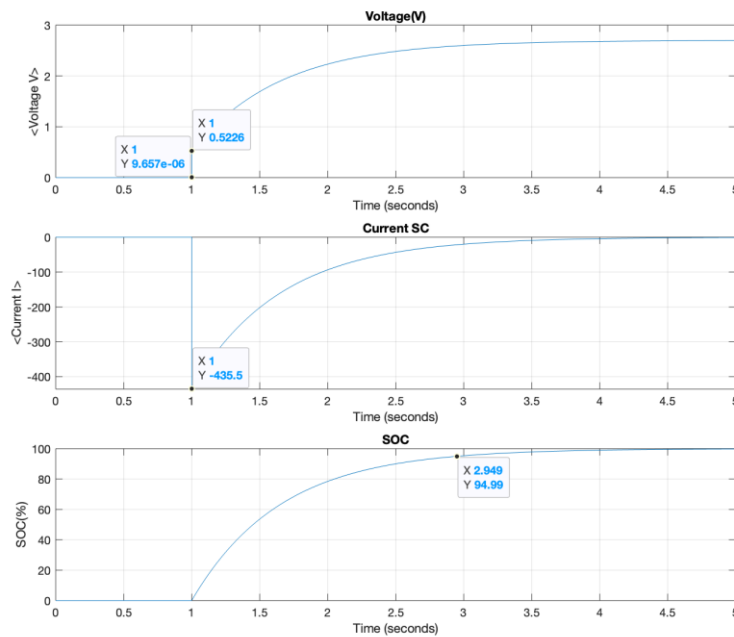


Ilustración 46 - Resultados de ensayo de carga de SC a 0 K, parámetros iguales a los ensayos de descarga

6.4. APLICACIONES

Creemos que es mejor entender la razón de aplicación de un SC que ejemplificarla en extensión, por ende, recogemos aquí qué características son las principales para encontrarnos este componente aplicado en gran diversidad de sistemas, con algún que otro ejemplo:

- Suministro de energía eléctrica: el supercondensador puede tomar el carácter de fuente de alimentación total o parcial del sistema. Detallamos a continuación las características del sistema:
 - La descarga a soportar es elevada y corta en el tiempo, estamos hablando de consignas tipo escalón con una duración menor a 1 minuto y medio, normalmente entorno a segundos. Es primordial la densidad de potencia y no la densidad energética. Tenemos como ejemplo el flash de una cámara o un desfibrilador.
 - El perfil de funcionamiento del sistema es fluctuante, teniendo la presencia de picos de exigencia parecidos al punto anterior. El SC es un buen candidato para suplir tales picos. La alimentación de un CPU en un ordenador convencional o los sistemas fotovoltaicos serian un claro ejemplo.

- Sistema que, ante el corte momentáneo e inesperado, ante fallo de la fuente principal de energía se deba garantizar el suministro instantáneo desde una fuente secundaria para el correcto apagado del sistema si es necesario. Tenemos como ejemplo la alimentación de la memoria volátil de ordenadores que se puede ver corrompida ante cortes energéticos.
- El mantenimiento es imposible o debe ser mínimo a la vez que la obsolescencia programada no es un factor de diseño, al menos no al nivel de la electrónica de consumo, y por lo tanto se espera la máxima vida útil del sistema, así como la garantía de su funcionamiento debe ser total. Aplicaciones militares y aeroespaciales, como también sistemas de emergencia con actuadores eléctricos o alimentación de tranvías y buses eléctricos.
- Sistemas donde la temperatura debe afectar de forma mínima a la garantía de tener el sistema alimentado en condiciones óptimas. También tenemos como claro ejemplo aplicaciones militares y aeroespaciales. Es fácil entender que, por ejemplo, el sistema de comunicaciones de un submarino o un satélite soportarán temperaturas fuera de lo habitual, pero aun así se debe garantizar su operatividad.
- Sistemas en que se exige un tiempo de recarga mínimo a la vez que la posibilidad de recibir altas corrientes durante ese periodo, por ende, se busca una resistencia interna mínima, una capacitancia alta y el mínimo de reacciones químicas en el sistema de almacenamiento eléctrico. Aquí tenemos sistemas como el KERS (Kinetic Recovery Energy System) utilizado en Formula 1 para la regeneración eficiente en frenada del vehículo gracias a la transformación de su energía cinética. También existe el curioso caso de las góndolas que cruzan el río Támesis. Considerando también los puntos anteriores, se tiene como ejemplo el prototipo, tipo LMP1, de Toyota que competió en 2014-2015 en las 24h de Le Mans; el modelo TS040 utilizó un sistema híbrido basado en SC y un motor de combustión interna.

La exigencia total de estas características en un sistema deriva a tener un almacenamiento eléctrico basado totalmente en SC. A medida que estas características se ven restringidas por presupuesto o nivel adquisitivo del cliente/usuario, como también puede ser que la densidad energética tenga un papel destacable, independientemente

del factor económico, será el punto en que se deberán tomar compromisos en el cumplimiento de las características detalladas, hibridando el sistema de SC con otras alternativas que ataquen estos dos puntos.

- Equilibrado de tensión, suplemento ante micro-cortes y compensación de armónicos en redes y micro-redes eléctricas. No entraremos en profundidad debido a que no son aplicaciones de peso para nuestro estudio.

6.5. ESTUDIO DE MERCADO DE SUPERCONDENSADORES

Las diferentes fuentes e informes indican que el mercado de SC en 2018 estaba valorado entre 0,8 y 1,5 billones de dólares teniendo una tasa de crecimiento anual compuesto (CAGR) de un 30% desde 2014 («Global Supercapacitors Industry» [sin fecha]; «What is Supercapacitor (Ultracapacitor) - Characteristics, Working & Types» [sin fecha]). En la ilustración 47 se puede observar cuál ha sido su evolución distribuida a lo largo del planeta.



Ilustración 47 - Mercado del SC (tasa de crecimiento por región en el periodo 2014-2019)
(«Supercapacitors Market | Growth, Trends, and Forecast (2020-2025)» [sin fecha])

Vemos la clara potencia asiática y oceánica. China tiene el sector transporte como uno de sus pilares económicos siendo un “early adopter” de nuevas tecnologías en el sector, entre ellas, el estudio y desarrollo de SC. En Japón tenemos a 5 fabricantes de SC y un gran interés en los sistemas smart grid y mejora del control de sus redes eléctricas, entendemos por ello que posiblemente el SC entra en este propósito para el equilibrado y compensación de armónicos en redes. Concretamente en Australia también tenemos uno de los principales fabricantes mundiales de SC.

Debido a que hemos comentado la procedencia de fabricantes de la tecnología vemos necesario detallar las principales empresas detrás de este mercado, con un orden simbólico de su influencia y indicando su procedencia:

- AVX Corp. (USA)
- CAP-XX Limited (Australia)
- Eaton Corporation plc (Irlanda)
- Maxwell Technologies Inc. (USA)
- Panasonic Corporation (Japón)
- ELNA CO., LTD. (Japón)
- Loxus Inc. (USA)
- KORCHIP Corporation (Corea)
- Nippon Chemi-Con Corporation (Japón)
- Seiko Instruments Inc. (Japón)
- Shanghai Aowei Technology Development Co. Ltd. (China)
- SHENZHEN TOPMAY ELECTRONIC CO., LTD. (China)
- TOKIN Corporation (Japón)

En 2017-2018, periodo en el que los autores planteaban los principios elementales de este estudio ya eran conocedores de Maxwell Technologies Inc. y su extenso catálogo debido a ser el resultado más generalizado en la búsqueda por internet de esta tecnología. Pero hasta el momento en que se ha realizado este apartado, resulta curioso indicar que no eran conocedores de que el fabricante americano Tesla adquirió tal empresa el 16 de mayo de 2019 por una suma aproximada de 218 millones de dólares, siendo la quinta adquisición del fabricante («Tesla Completes Acquisition of Maxwell Technologies | Tesla, Inc.» [sin fecha]; «Why Did Elon Musk Spend \$218 Million on an Ultracapacitor Company? | Greentech Media» [sin fecha]) .

Fuentes indican que el 47,7% del mercado es debido a aplicaciones en el sector transporte. Todas las perspectivas indican un crecimiento constante del sector con un CAGR de aproximadamente un 20% para 2025 o 2027. Se barajan cifras optimistas de más de 7 billones de dólares en el mercado para 2027 pero aún las más pesimistas indican 2,6 billones para 2025. Podemos ver las ilustraciones 48 y 49 de contraste en las previsiones:



Ilustración 48 - CAGR del 21,8% esperado en el mercado de SC (2,66 billones de USD para 2025) («Supercapacitors Market | Growth, Trends, and Forecast (2020-2025)» [sin fecha])

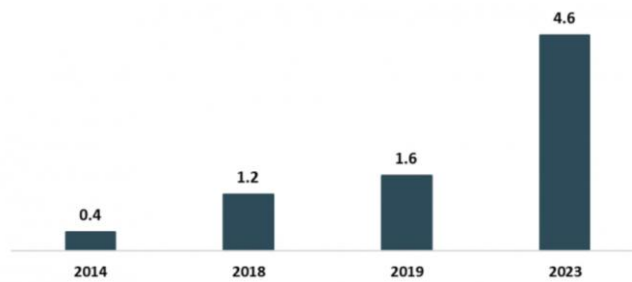


Ilustración 49 - Evolución y perspectiva del mercado de SC («Supercapacitors Market | Growth, Trends, and Forecast (2020-2025)» [sin fecha])

6.6. IMPACTO AMBIENTAL

Las siguientes dos ilustraciones, provenientes del mismo estudio, pretenden resumir lo máximo posible este apartado, ya que tampoco se ha encontrado más información contrastable gratuita.

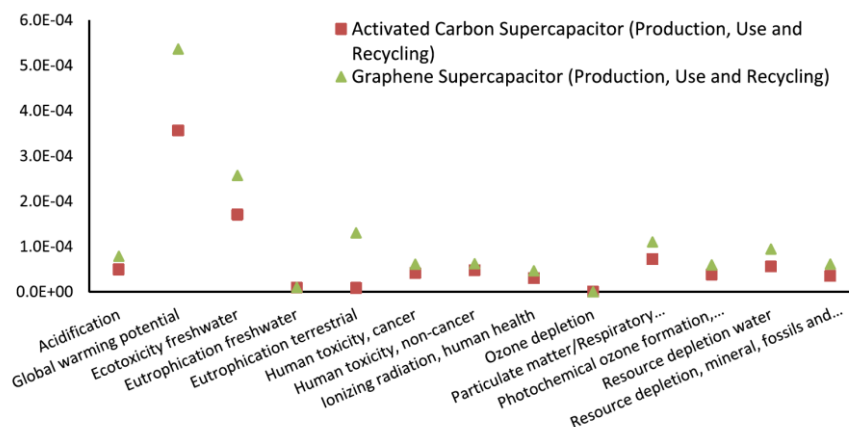


Ilustración 50 - Conjunto de factores de impacto ambiental ponderados, se muestran SC basados en carbón activo y en grafeno (Cossutta et al. 2020)

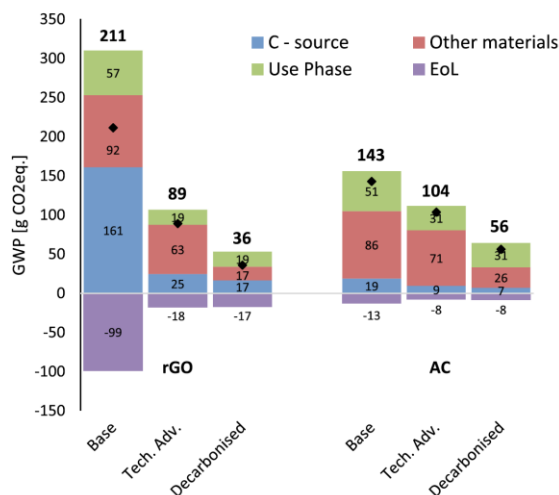


Ilustración 51 - GWP de dos conjuntos de 5 SC de 5F cada uno, basados en carbón activo(AC) y grafeno (rGO), semuestra también cuál sería la evolución del parámetro ante una evolución de la tecnología (Cossutta et al. 2020)

No podemos expresar una conclusión clara ante los datos de la ilustración 50 y 51 debido a que no se correlaciona a valores energéticos o de potencia ni se han encontrado más fuentes para el contraste de resultados. El estudio especifica que para reducir los efectos del grafeno el reciclaje es determinante y posible.

7. CADENA DE TRACCIÓN EN EV Y COMPONENTES AUXILIARES

Partiremos explicando la cadena de forma genérica para en un final introducir características de los elementos principales y auxiliares como el convertidor de corriente continua.

La intención más elemental de la cadena de tracción es la transmisión de energía eléctrica almacenada a un motor eléctrico que la transformará en energía mecánica, gracias al par de torsión desarrollado en su rotor. Esta función se describe bajo el siguiente esquema:



Ilustración 52 - Esquema elemental de conversión de energía eléctrica a mecánica

Vemos aquí la necesidad de que el motor sea de corriente continua (DC) ya que no existe la tecnología que nos permita almacenar corriente alterna (AC). Añadiendo más funciones a este esquema elemental tenemos la faceta del control, ya que el esquema anterior no existe forma de controlar el par desarrollado. Más aún en EV los motores de DC no se han visto utilizados por su rendimiento y posibilidades de control. El motor utilizado en el sector son tipologías de motores alimentados por corriente alterna o asimilable como tal.

Antes que presentar esquemas más complejos, hacemos un inciso para explicar el esquema de colores y formas, a modo leyenda, utilizado a lo largo de todo el apartado “Morfología y tipología”. Tomando el siguiente esquema modelo:

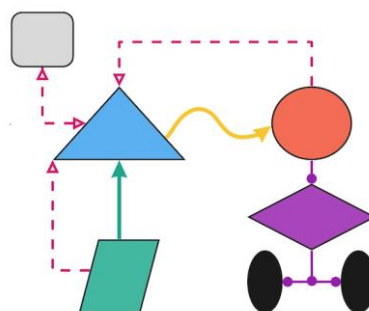


Ilustración 53 - Esquema modelo

- El sentido de los conectores intencionalmente indica los flujos de energía o información posibles entre los elementos conectados.
- Los conectores continuos tipo flecha indican el conexionado eléctrico de potencia, alta tensión:

- Verde: corriente continua (DC).
- Amarillo: corriente alterna (AC).
- Los conectores continuos con cabeza redondeada y color violeta indican el conexionado mecánico de elementos.
- Los conectores discontinuos presentan el conexionado de señal, baja tensión, que se basa en el flujo digital o analógico de información necesaria para el control o monitorización de elementos. Pueden tener etiquetas explicativas de la característica de la información más común o importante del canal, pero evidentemente, puede haber mucha más información en tránsito.
- Los elementos triangulares o rombos indican control o conversión energética.
- Los elementos circulares indican generación de par de torsión (motor o ruedas).

Pasamos a detallar el esquema general de un EV en sus dos modos de funcionamiento por separado, ya que el comportamiento del sistema puede verse claramente diferenciado entre ambos.

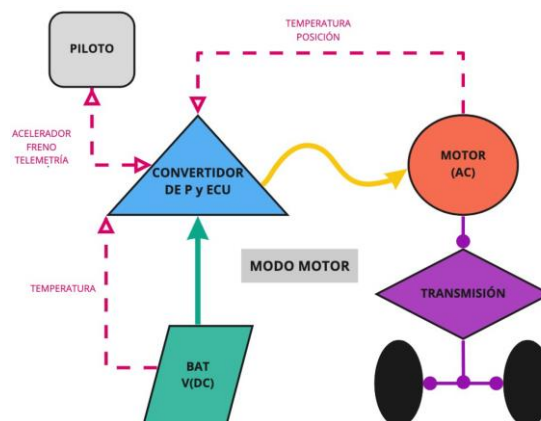


Ilustración 54 - Esquema funcional de un EV en modo motor

La ilustración 54 representa la funcionalidad principal del EV en el que se convierte energía eléctrica en par de torsión en las ruedas. Para ello vemos la incorporación de determinados elementos que pueden necesitar explicación:

- **Batería de corriente continua, bajo el acrónimo “BAT V(DC)”**: aquí tenemos el sistema de almacenaje de energía eléctrica. El bloque engloba cualquier sistema capaz de proporcionar corriente continua ante la demanda del resto de elementos para conseguir el par/velocidad deseada.
- **Convertidor de potencia y central electrónica de control (ECU)**: se han englobado estos dos elementos bajo un mismo bloque para simplificar. Este

bloque es el encargado, principalmente, de gestionar los inputs del piloto, sistemas de emergencia, la temperatura de batería como también la del motor y la posición de su rotor (datos indispensables para el control de ambos sistemas). Este bloque también desarrolla el control de potencia y la conversión de la corriente continua procedente de la batería a corriente alterna o asimilable entregada al motor. Como ya hemos explicado el motor DC no se utiliza en el sector.

- **Motor (AC):** máquina eléctrica síncrona o asíncrona alimentada por corriente alterna o asimilable encargada de la generación del par de torsión para la impulsión del vehículo.
- **Transmisión:** en caso de existir una caja de cambios en EVs (2 o 3 marchas como máximo) son muy simples, compactas y automáticas; normalmente acopladas directamente al motor. En caso de no existir caja de cambios tendremos una relación de transmisión única a lo largo de todo el rango de RPM del motor. Esta diferencia con la transmisión propia a un vehículo con motor de combustión interna es debido a la curva par/velocidad característica del motor eléctrica, donde se presenta un alto par instantáneo a baja velocidades. En este bloque también se encuentra el diferencial, encargado de la distribución del par a las ruedas, y los sistemas de control de tracción.

En EVs ya se ha comentado la posibilidad de regeneración y cuando se da el caso (Par en ruedas > Par resistivo del motor). El esquema queda de la siguiente forma:

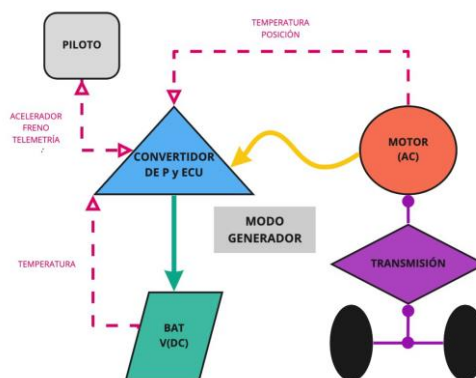


Ilustración 55 - Esquema funcional de un EV en modo generador

El único cambio se ve en el sentido del flujo de la energía “de potencia”, ya sea mecánica o eléctrica. Esto afecta principalmente al convertidor de potencia y ECU ya que el control puede ser totalmente diferente para la regeneración como también debido a que la

conversión de potencia pasa a ser de AC a DC y el bloque BAT V(DC) mostrará un carácter distinto en esta casuística.

Proseguiremos a detallar superficialmente la característica del motor y convertidor de potencia utilizados en nuestro estudio.

7.1. MOTOR

Para las tres aplicaciones que se estudian en este proyecto se ha escogido el motor síncrono de imanes permanentes (PMSM, por sus siglas en inglés). El motivo de tal elección reside en que este tipo de motores es uno de los más utilizados en todo tipo de EV (vehículos eléctricos) (Adamas_Intelligence 2018), y existen modelos actuales de autobús, coche y motocicleta que usan este tipo de motor.

El principio de funcionamiento del PMSM es el que corresponde a cualquier máquina síncrona, pero con la particularidad que el campo magnético del rotor es producido por imanes, generalmente de neodimio (Gieras y Wing 2002, p. 53), en lugar de un rotor bobinado alimentado en corriente continua. Esto proporciona la ventaja de un mayor rendimiento al no usar escobillas para el cambio de polaridad del rotor, pero también supone un incremento de precio debido a factores como la escasez de tierras raras. Centrándonos en aspectos puramente tecnológicos, observamos la siguiente figura, extraída del libro de Chapman (Stephen J. Chapman 2012, p. 205):

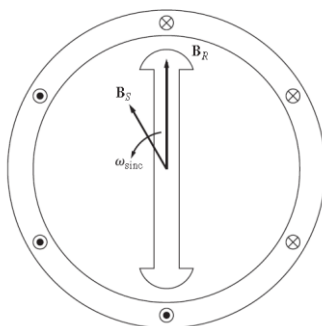


Ilustración 56 - Motor síncrono con dos polos

Si se aplica una tensión trifásica al estator, se produce en el mismo un campo magnético giratorio B_s en el estator. Debido a la presencia de los imanes, ya existe un campo magnético en el rotor, que tenderá a alinearse con el del estator. Citando a Chapman:

“El principio básico de la operación de los motores síncronos es que el rotor “persigue” al campo magnético giratorio del estator alrededor de un círculo y nunca lo alcanza.”

7.1.1.MODELO SIMULINK DEL MOTOR

A continuación, presentaremos el modelo de Simulink que utilizaremos para la simulación del motor de los diferentes vehículos eléctricos en los que se basa nuestro estudio. Pertenece a la librería HEV.lib de MATLAB y es un subsistema que representa un motor PMSM de 50 kW.

Como podemos observar en la ilustración 57 aparecen como entradas: la consigna de par (Nm) y de velocidad angular (rpm) y la alimentación del motor en CC. La salida del sistema es un bus de datos que contiene los parámetros eléctricos del funcionamiento como resultado de haber introducido las entradas deseadas. Para nuestra aplicación nos centraremos en obtener la corriente del estator, la velocidad del rotor y el torque del motor.

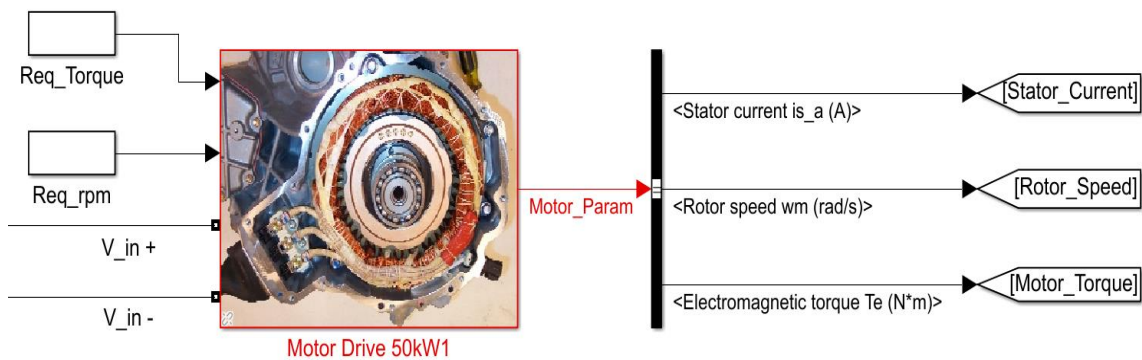


Ilustración 57 - Entradas y salidas modelo Matlab motor

Analizando más al detalle el interior del subsistema (ilustración 58), podemos ver que realmente consta de tres bloques importantes, el primero es el motor eléctrico en sí, que se alimenta en corriente alterna trifásica y requiere una consigna de velocidad angular. El segundo bloque (inversor trifásico) se utiliza para convertir la corriente continua de entrada al subsistema a la corriente trifásica de alimentación del motor. El tercer bloque (VECT controller) envía la señal de control al inversor para gestionar la corriente necesaria en cada momento y que se cumpla la demanda de par y velocidad, para ello, necesita inputs de velocidad y el ángulo giro del rotor en cada momento, la corriente trifásica de alimentación y la consigna de par para cada instante de tiempo.

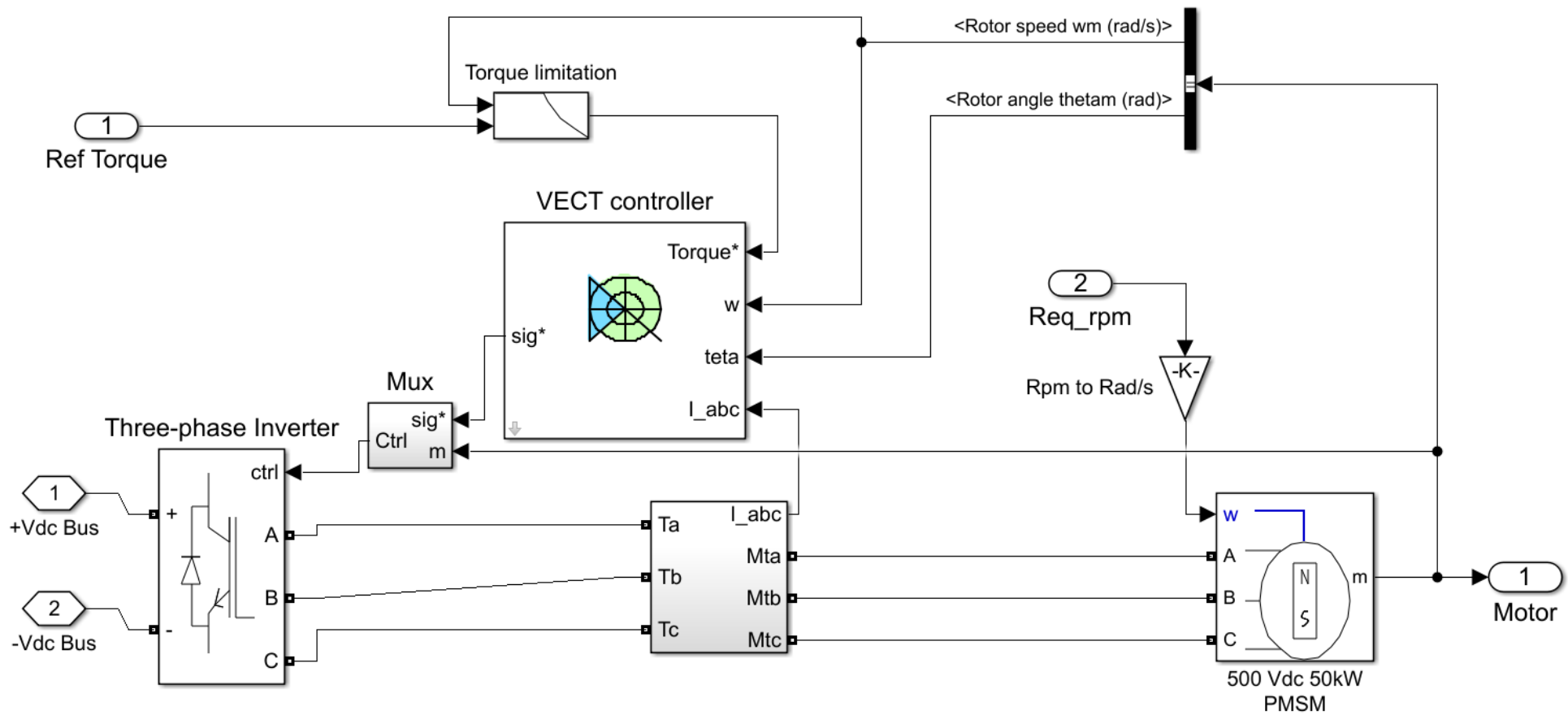


Ilustración 58 - Subsistema modelo Matlab motor

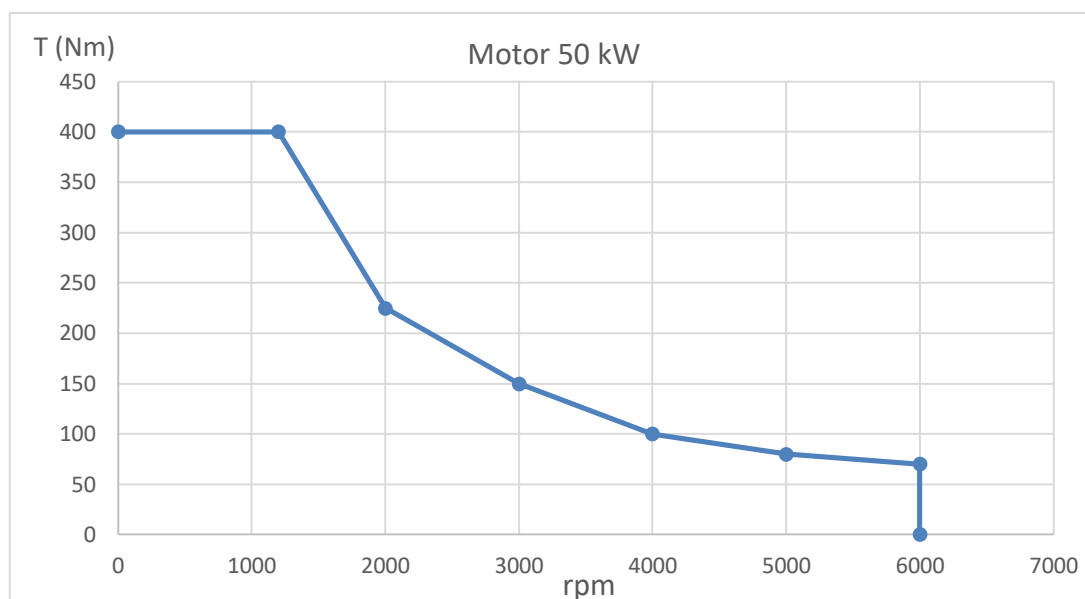


Ilustración 59 - Curva característica motor 50 kW

La curva característica del motor viene representada en la ilustración 59. En nuestro caso, el Par máximo del motor es de 400 Nm y puede mantener este par constante hasta la velocidad de 1200 rpm. Luego el motor describe una curva a potencia constante (50 kW) a medida que aumenta la velocidad y disminuye el par. La mayor velocidad que puede alcanzar nuestro motor es de 6000 rpm a 70 Nm.

Para comprobar el funcionamiento del motor, simularemos un segmento del ciclo WLTP de conducción utilizando los parámetros dinámicos del automóvil eléctrico más vendido de la historia, el Tesla Model 3. El objetivo de este estudio es comprobar que, si le aplicamos al sistema una consigna de par y velocidad, el motor además de seguir la consigna, consumirá la intensidad necesaria en función de la demanda manteniendo en todo momento la tensión de entrada constante.

Como podemos observar en la ilustración 60, el motor sigue a la perfección la consigna de par y velocidad hasta tal punto que las dos curvas se solapan creando una sola. En la ilustración 61 se muestra la curva de potencia requerida al motor y la respuesta de éste. Un aspecto a destacar en la ilustración 61 es que, en los instantes de desaceleración del vehículo, el motor trabaja como generador y entrega energía que podrá ser almacenada en el sistema HESS, hay casos de picos de potencia negativa de 10 kW. Con este ensayo hemos demostrado que nuestro motor es capaz de seguir con exactitud la demanda de un vehículo eléctrico y en consecuencia consume una intensidad, que en nuestro caso provendrá del sistema HESS de almacenamiento de energía.

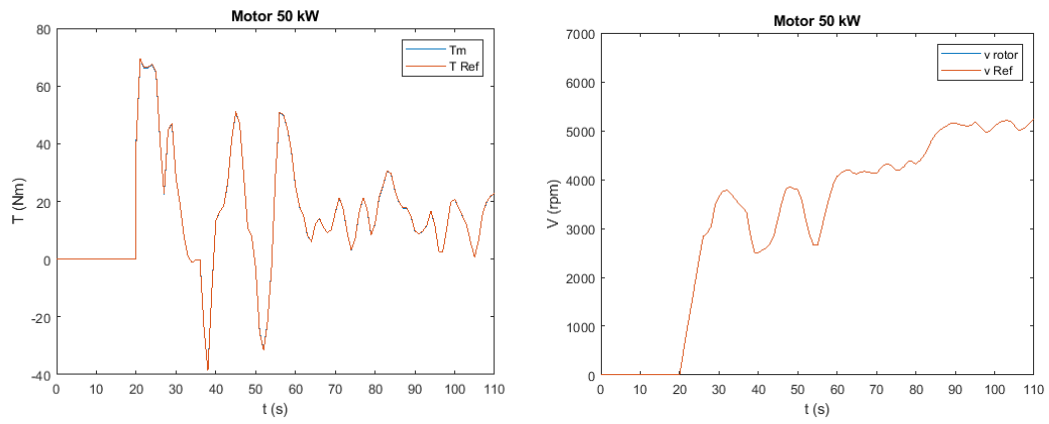


Ilustración 60 - Gráfica del par (izquierda) y de velocidad (derecha) en función del tiempo

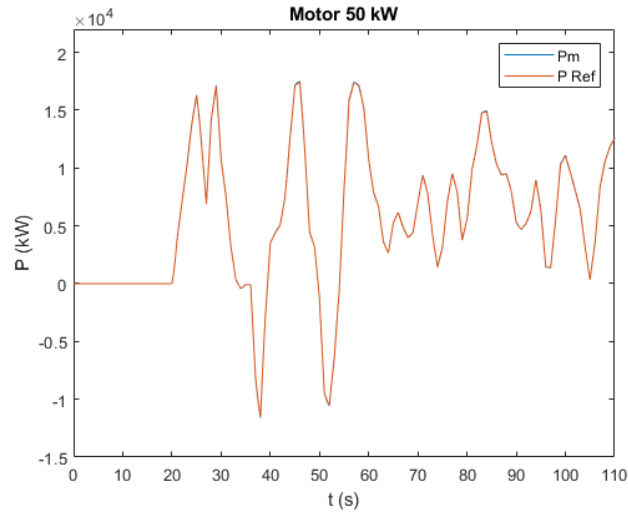


Ilustración 61 - Gráfica de Potencia en función del tiempo

7.2. CONVERTIDOR DE POTENCIA

Como se ve en el apartado anterior, al estator se le aplica una tensión trifásica. Ello hace necesario el uso de un inversor trifásico, que transforme la corriente continua proporcionada por el sistema de almacenamiento de energía eléctrica a corriente trifásica. Típicamente, un inversor trifásico se implementa con seis interruptores controlados (normalmente y dependiendo de la tensión de trabajo y frecuencia de conmutación, transistores de tecnología MOSFET o IGBT (Erickson y Maksimovic 2004, p. 81)), que conmutan para conseguir una señal sinusoidal de la frecuencia deseada. El esquema, extraído del libro de (Mohan, Underland y Robbins 2003), es el siguiente:

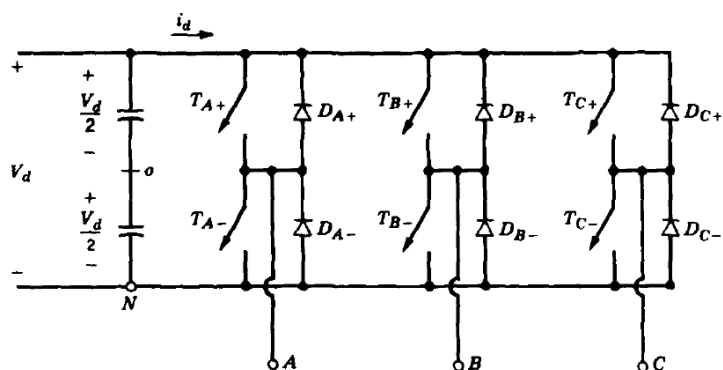


Ilustración 62 - Esquema de inversor trifásico usando interruptores ideales (Mohan, Underland y Robbins 2003)

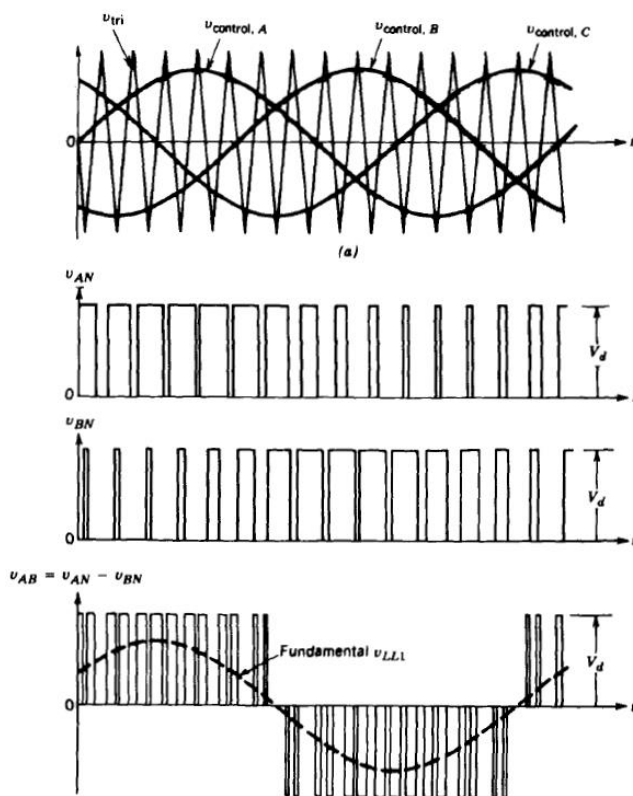


Ilustración 63 - Control del convertidor y sus efectos en una fase

Observemos la ilustración 63. Si controlamos los interruptores siguiendo la ley de control de la primera gráfica (activándolos por comparación entre una onda de diente de sierra y una referencia sinusoidal), la tensión de, por ejemplo, las fases A y B respecto al neutro siguen la forma de las dos gráficas del medio. La resta de ambas señales nos deja con una tensión de fase V_{AB} cuyo valor medio se aproxima de manera notable a una senoide. La misma lógica se aplica a las otras dos fases, obteniendo una tensión trifásica. Aumentando la frecuencia de las señales sinusoidales de control se puede actuar sobre la frecuencia de la tensión de salida.

7.3. CONVERTIDOR BUCK/BOOST

La explicación de la presencia de un convertidor buck/boost en nuestro sistema se encuentra en el apartado 10.3, en el que se habla de las particularidades del sistema híbrido. Sin embargo, como parte de la cadena de tracción y como componente auxiliar se trata en este apartado, ya que en el mencionado 10.3 no se entra en sus particularidades.

Por otra parte, sí que se debe explicar su función para entender por qué se escoge un convertidor buck/boost controlado por corriente: es el encargado de descargar los SC a la potencia deseada y verter dicha potencia en el bus de continua. Igualmente, deberá ser bidireccional para permitir el flujo en ambas direcciones.

La opción más sencilla que cumple dichos requisitos es un buck/boost bidireccional. Como no es objetivo de este trabajo analizar pormenorizadamente este componente, se ha preferido esta opción frente a topologías más complejas.

El modelo utilizado, disponible en Matlab (Saleh 2020), se resumen en la ilustración 64, en la que también se aprecian los elementos utilizados para el ensayo del dispositivo.

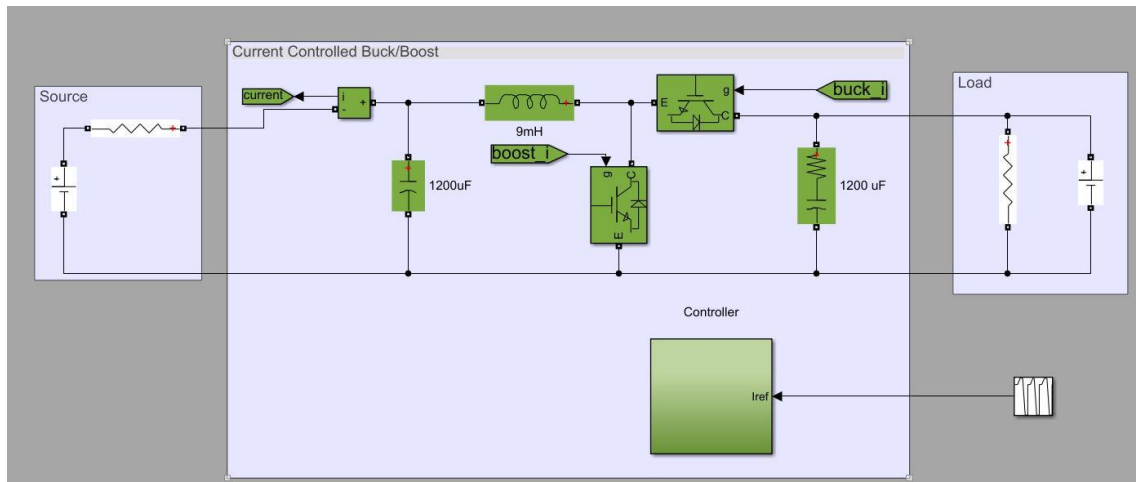


Ilustración 64 - Controlador Buck/Boost controlado por corriente

El ensayo se realiza controlando la corriente a la que se carga y se descarga una fuente. La carga se compone de una resistencia y de una fuente de tensión, ya que en la aplicación del sistema híbrido la tensión del bus de continua quedará fijada por la batería.

En cuanto al control, proporcionado en la misma fuente, es similar para la puerta de buck como para la puerta de boost. En ambos casos se resta a la corriente de referencia la corriente de la etiqueta “current” de la ilustración 64. Ese error de corriente se pasa por un controlador PI, para luego la señal resultante compararla con una señal de diente de sierra. El resultado de la comparación activará o desactivará el correspondiente transistor (ver ilustración 65).

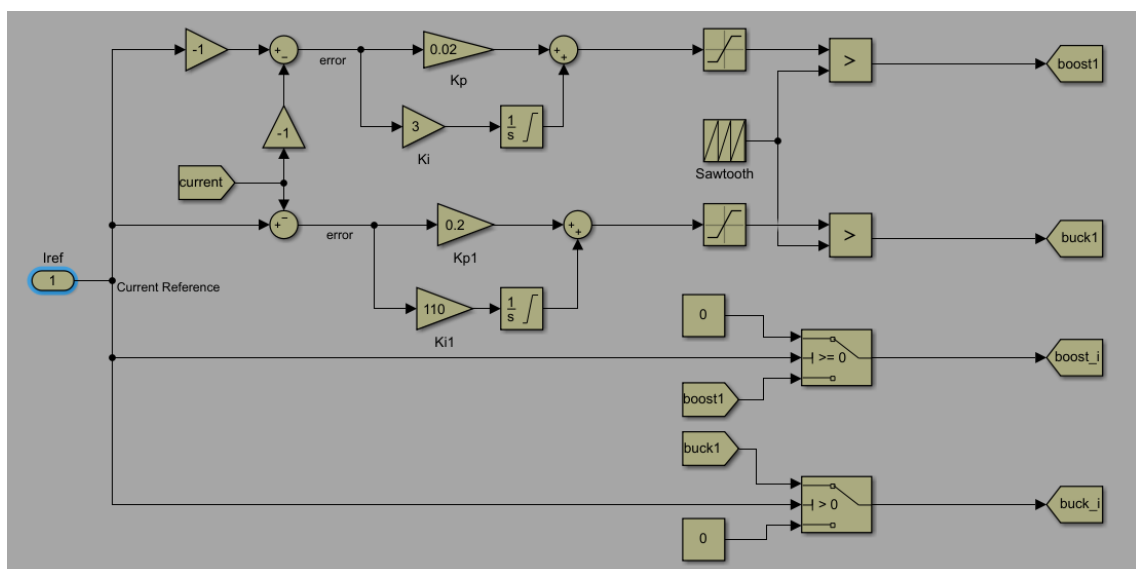


Ilustración 65 - Controlador del convertidor buck/boost

Para decidir cuál de los transistores actuará, y por tanto cuál será la función del convertidor, se compara otra vez la corriente de referencia. En caso de ser menor que 0 se trabajará en modo boost y la corriente se deriva hacia la carga y en caso de ser mayor o igual en modo buck, derivándose la corriente hacia la fuente en este caso.

Sobre el dimensionado de los componentes pasivos, las ecuaciones del apartado 3 del artículo de (Viswanatha y Venkata Siva Reddy 2018), permiten calcular tanto la bobina como el condensador. El valor de la bobina estará comprendido entre L_{min} y L_{max} .

$$L_{min} = V_{bus} \cdot \frac{D_{buck}(1-D_{buck})}{f_s \cdot \Delta I} \quad (17)$$

$$L_{max} = V_{source} \cdot \frac{D_{boost}}{f_s \cdot \Delta I} \quad (18)$$

Donde f_s es el valor de la frecuencia de conmutación, ΔI es la variación de corriente y las D son los duty cycles de las puertas de los transistores.

Para el valor de los condensadores, se calculan a partir del rizado de tensión deseado.

$$C = I \cdot \frac{\Delta t}{\Delta V} \quad (19)$$

El valor máximo de rizado corresponde a ΔV . Δt se calcula como la multiplicación del duty cycle y el periodo correspondiente a la frecuencia de conmutación. Se calculará para los valores máximos y mínimos de cada variable.

Sin embargo, tanto en el dimensionado de los componentes como en la sintonización de los controles PI, nos encontramos con que los presentes en el modelo original de (Saleh 2020) funcionaban perfectamente para todas nuestras aplicaciones, con un resultados como los mostrados a continuación. Es por ello que no se modifican.

En la ilustración 66 se aprecia un ensayo en el que la consigna pasa por 100A, 150A y -150A, pudiéndose comprobar que el convertidor es capaz de entregar y recibir la corriente deseada. Tanto la consigna como la señal medida se muestran en la misma gráfica, pero no se aprecia debido a que son exactamente coincidentes.

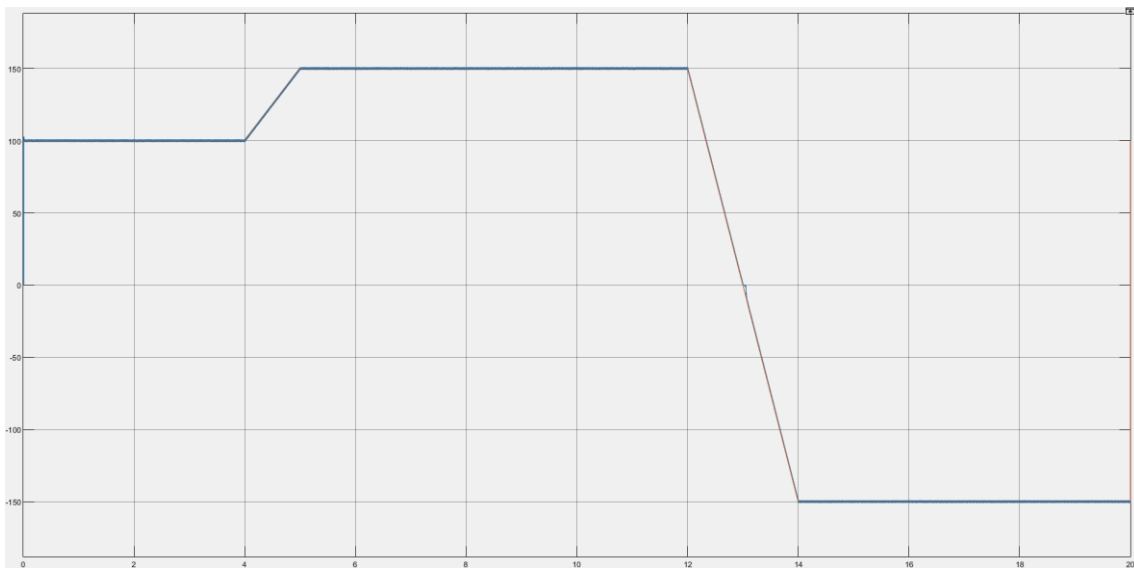


Ilustración 66 - Ensayo del convertidor buck/boost. Salida durante el ensayo.

También se ha comprobado el rizado de corriente: en la ilustración 67 se observa el detalle de un tramo estacionario, en el que se aprecia un rizado de hasta 0.777A respecto a la referencia, lo que supone un rizado del 0.52%.

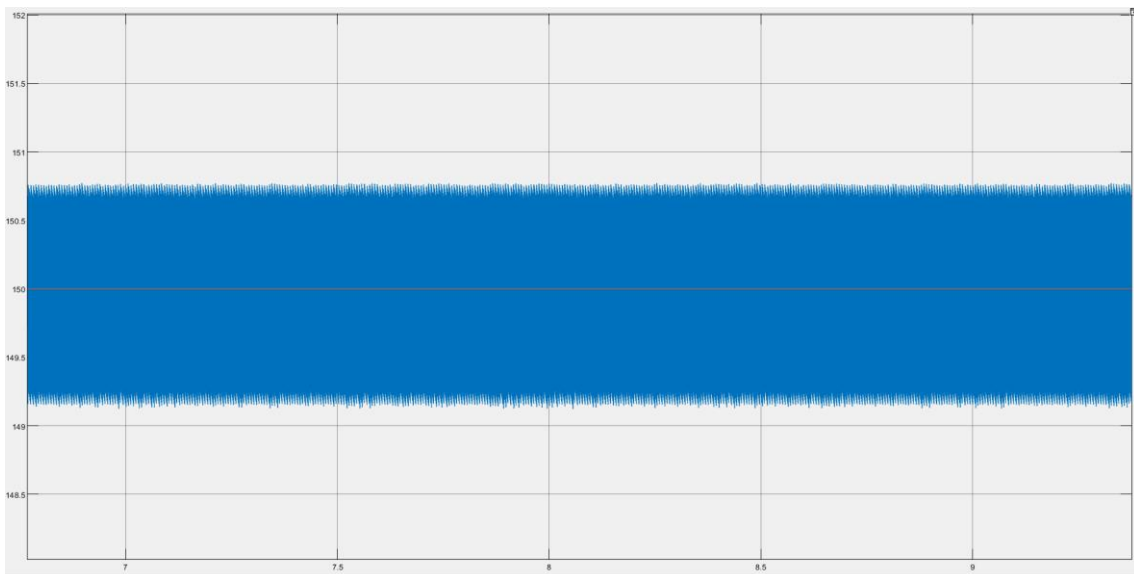


Ilustración 67 - Detalle del régimen estacionario del convertidor buck/boost

8. ESTUDIO DE LAS CARGAS Y MODELO DINÁMICO

El estudio de la carga se ha realizado aplicando la dinámica básica de un vehículo sobre los distintos ciclos normalizados que afectan a cada vehículo.

Un ciclo de conducción es un perfil de velocidades y aceleraciones que representa cómo se comporta un vehículo desde el punto de vista cinemático. Existen modelos normalizados que obligan a los fabricantes a contrastar sus diseños frente a un estándar. De estas pruebas, se obtiene, por ejemplo, el consumo de combustible o las emisiones de CO₂ en vehículos de combustión, o la autonomía de un vehículo eléctrico.

Los ciclos de conducción utilizados son el WLTP (World Harmonized Light-duty Vehicle Test Procedure) para el coche, el E-SORT (Standardised On-Road Test) para el autobús y el WMTC (World Motorcycle Test Cycle) para la moto.

Se procede a explicar primeramente las ecuaciones dinámicas utilizadas para obtener la potencia que se le exige al vehículo dependiendo de la pendiente, la velocidad y la aceleración, entre otros parámetros propios del vehículo. Luego se proporciona información sobre el ciclo WLTP, que reconocimiento recibe y porque se ha escogido.

8.1. ECUACIONES DINÁMICAS

Realizando un análisis dinámico sobre un vehículo (Larminie y Lowry 2003, p. 7) se aprecian cuatro fuerzas que actúan sobre él. Veamos la ecuación que las engloba:

$$F = m \cdot g \cdot (\cos(\alpha) + \mu \cdot \sin(\alpha)) + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot S \cdot (v \pm v_{viento})^2 + m \cdot \frac{dv}{dt} + J * \frac{1}{\eta_i \cdot i^2 \cdot r^2} \cdot \frac{dv}{dt} \quad (20)$$

El primer sumando corresponde a la fuerza de rodadura. La ecuación se obtiene del análisis de un móvil sobre un plano inclinado, y depende por tanto de la pendiente. Cuando el tramo de circulación es plano, la fuerza de rodadura depende únicamente del rozamiento con la pista, a parte del peso del propio vehículo.

El segundo término se identifica a la fuerza producida por el choque con el aire. Aquí la variable es la velocidad del vehículo, que provoca que la fuerza aumente de manera cuadrática al aumentar la velocidad. Para entender esta ecuación es fundamental el concepto de penetración aerodinámica, que corresponde al paso del aire por la

superficie del móvil. Dependiendo de la forma de esta superficie, interactuará de manera distinta provocando más o menos fricción. En la ecuación el término C_D (coeficiente de penetración aerodinámica o coeficiente de drag) nos indica como es esa fricción.

La tercera suma viene obligada por la Segunda Ley de Newton.

El último sumando responde a la fuerza inercial producida durante aceleraciones y deceleraciones. La Segunda Ley de Newton aplicada a un movimiento rotativo nos dice que el producto de un momento de inercia J por la aceleración angular de un móvil rotando equivale al par. En nuestro caso, la aceleración angular se relaciona con la lineal mediante el radio de las ruedas motrices. Pasando ese par al eje del rotor mediante la relación de transmisión se obtiene la fórmula deseada.

En ocasiones los dos últimos términos se juntan al considerar que la fuerza debida a la aceleración inercial es aproximadamente entre un 5% y un 10% que la fuerza debida a la aceleración lineal.

En la tabla 6 se explican todas las variables de la ecuación.

Magnitud	Símbolo	Unidades
Masa del vehículo	m	kg
Gravedad	g	m/s^2
Pendiente del tramo	α	$^\circ$
Coeff. Rozamiento	μ	-
Densidad del aire	ρ	kg/m^3
Coeff. Drag	C_D	-
Área frontal del vehículo	A	m^2
Velocidad del vehículo	v	m/s
Velocidad frontal del viento	v_{viento}	m/s
Momento de inercia	J	$kg \cdot m^2$
Relación de transmisión	i	-
Rendimiento de la transmisión	η_i	-
Radio de la rueda	r	m

Tabla 6 - Variables de la ecuación de la fuerza resisiva

Para obtener la potencia, simplemente nos basta con multiplicar la fuerza tractora otra vez por la velocidad. En el modelo, este cálculo se realiza una vez por cada paso de simulación.

8.2. CICLOS DE CONDUCCIÓN

Se denomina ciclo de conducción al perfil de velocidades establecido por un procedimiento de test de homologación de vehículos, en los que se evalúa la autonomía, el consumo y, en vehículos de combustión, las emisiones.

Tradicionalmente, cada país o conjunto de países con un marco regulatorio común, tenía su propio ciclo de conducción acorde a su norma. Actualmente, sin embargo, esta tendencia parece revertirse en pos de una internacionalización de los procedimientos de test, aunque todavía existen multitud de ciclos distintos. En este trabajo se estudian solamente los ciclos de conducción en vigencia en la Unión Europea para cada tipo de vehículo, que se traduce en el ciclo WLTP para el coche, el SORT para el autobús y el WMTC para la moto.

8.2.1. CICLO DE CONDUCCIÓN WLTP

El ciclo de conducción WLTP (Worldwide harmonised Light Vehicle Test Procedure), que para nuestra aplicación se usará para ensayar el coche y la moto, al ser estos considerados como vehículos ligeros, surge como respuesta a la necesidad de reemplazar a su predecesor NEDC (New European Drive Cycle), que se había quedado obsoleto al estar basado en estudios teóricos desarrollados durante los años 80.

Durante la década de 2010 se empezó a criticar las discrepancias entre el ciclo NEDC y la realidad. Por este motivo se desarrollaron modelos estadísticos que reflejan el comportamiento de los conductores al volante siendo el resultado es el ciclo WLTP que se comienza a aplicar en 2017 para estar totalmente operativo en septiembre de 2019. Presenta diferencias respecto al NEDC en una mayor velocidad media, aceleraciones y frenadas más bruscas, menor tiempo de parada y más tipos de vía distintos, lo que hace que aumente también la velocidad máxima. La diferencia más importante es que, aparte de tener vigencia en la Unión Europea, países como Japón, India o China también lo han aceptado.

En el momento de desarrollar el ciclo WLTP se ha tenido en cuenta que el perfil medio de conducción varía bastante dependiendo de por dónde se conduzca, pudiéndose establecer tres zonas principales: urbana, rural (equivalente a carreteras secundarias) y autovía.

Sin embargo, en los países anteriormente mencionados los límites de velocidad para los mismos tipos de vía no son iguales, por lo que las velocidades medias y aceleraciones difieren bastante. Para armonizar los resultados de distintos países, los desarrolladores del ciclo escogieron dividir el ciclo en sectores de velocidad en lugar de por categorías viales.

Así pues, el ciclo WLTP es la combinación de cuatro perfiles de velocidad: baja (L), media (M), alta (H) y extra-alta (ex-H), siendo la última necesaria para describir el comportamiento en autovía en países europeos. Sin embargo, no hay un único ciclo WLTP, como tampoco todos los vehículos son iguales. Existen tres “clases”, que se basan en la velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo y el *Power-to-mass ratio*, la relación entre la potencia del vehículo y su masa bruta, es decir, la masa necesaria para que el vehículo funcione con todos los complementos para que ha estado diseñado e incluyendo los pasajeros. Cada una de estas tres clases se compone de distintas combinaciones de perfiles.

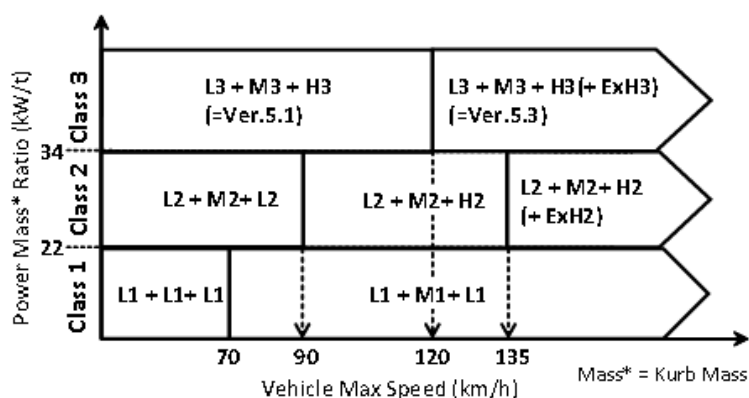


Ilustración 68 - El ciclo de conducción como combinación de perfiles en función del ratio potencia-masa y la velocidad máxima (Tutuianu et al. 2014)

Como se aprecia en la ilustración 68, dependiendo de la ratio de potencia-masa y de la velocidad máxima del vehículo, el ciclo de test será distinto, siendo siempre una combinación de los distintos perfiles de velocidad. Los números al lado de cada letra corresponden a versiones del ciclo, como se explica en el documento donde se desarrolla la creación del ciclo WLTP (Tutuianu et al. 2014).

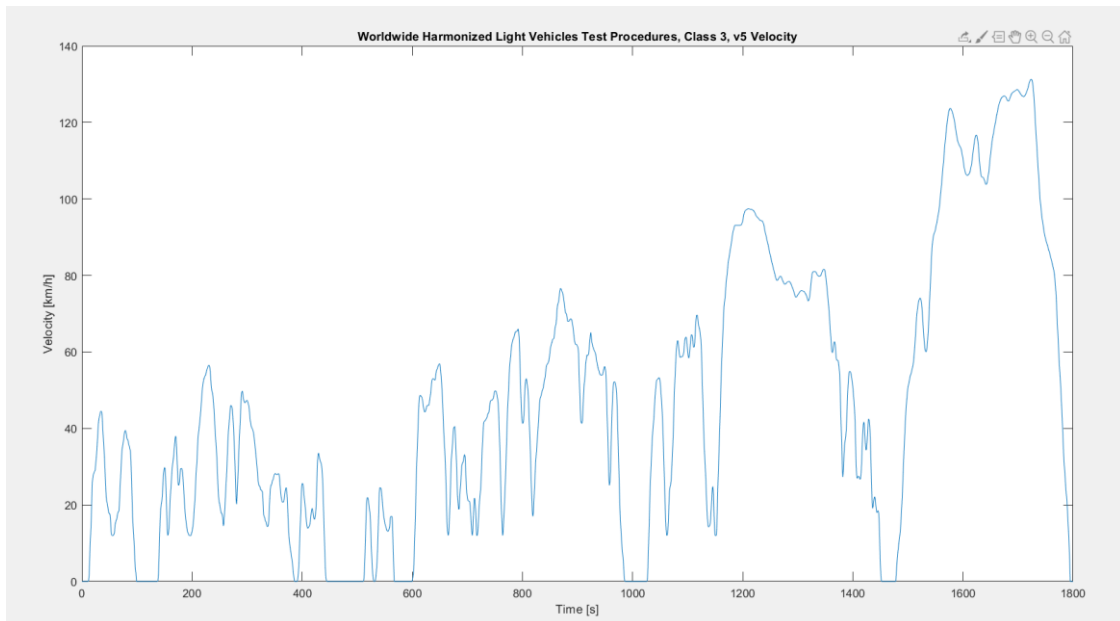


Ilustración 69 - Ciclo WLTC clase 3

En la ilustración 69 vemos el perfil de velocidades de la clase 3 del ciclo. En nuestro modelo Simulink hemos utilizado el bloque de MATLAB *Drive Cycle Source* que incluye todas las clases del ciclo y que pertenece a la librería *Vehicle Dynamics Blockset*. Como se aprecia, es en la última parte de la clase 3 del ciclo en la que las velocidades son más elevadas.

La información se ha obtenido de (Tutuianu et al. 2014; «WLTPfacts.eu - Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure» [sin fecha]).

8.2.2.CICLO DE CONDUCCIÓN SORT

El ciclo de conducción SORT (Standardised On-Road Test Cycles) tiene una historia similar al WLTP. Buscando crear un estándar sobre el que referenciar los autobuses urbanos del mundo, la UITP (Unión Internacional del Transporte Público, por sus siglas en francés) desarrolla este ciclo que viene a llenar un vacío donde no existían protocolos más allá de los comunes a todos los vehículos pesados y el consumo y autonomía se calculaban en base a los ciclos particulares de cada ciudad, siendo relevante el ciclo desarrollado en Braunschweig («EU: Heavy-duty: Braunschweig | Transport Policy» [sin fecha]), Alemania, que consiguió cierto reconocimiento.

Sin embargo, SORT no es una norma homologable (Clean Fleets 2014), simplemente es una herramienta para que clientes y fabricantes tengan una base común aproximadamente real de cómo se comporta un autobús. Para la homologación de los

mismos, un autobús está obligado a pasar las mismas pruebas que camiones y otros vehículos pesados, pero son test al motor, no al conjunto del vehículo. Dichos test son el World harmonized transient cycle (WHTC), que simula diferentes condiciones de conducción y el World Harmonized Stationary Cycle (WHSC), que simula algunas situaciones estacionarias durante un periodo de tiempo. Como se ha dicho, solo ponen a prueba el motor, mientras que SORT prueba el vehículo completo de igual manera que en el ciclo WLTP, y es por tanto que se constituye de manera “oficiosa” como el estándar sobre el que referenciar un autobús.

Al igual que el ciclo WLTP, el SORT también engloba 3 ciclos diferentes, donde la velocidad también es un factor importante pero la principal diferencia es el tiempo de parada entre uno y otro. En la ilustración 70 se puede ver como en base a los parámetros mencionados se construyen los diferentes ciclos de SORT:

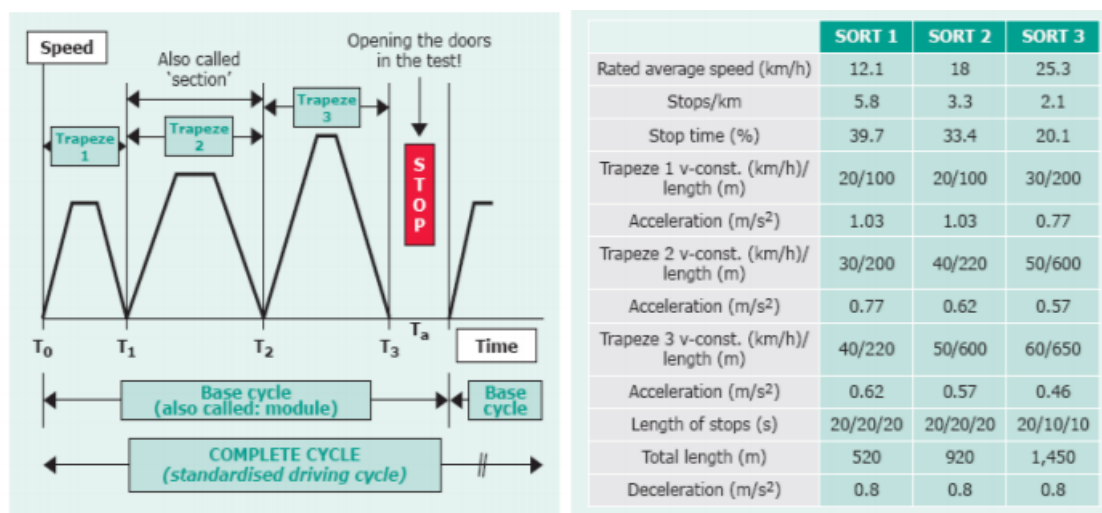


Ilustración 70 - Perfil del ciclo SORT y tabla con los parámetros de cada tipo (Misanovic y Spasojevic 2015)

Como se aprecia en la ilustración 70, los perfiles de cada uno de los tipos son iguales, con forma trapezoidal, pero variando las aceleraciones, los tramos de velocidad constante y los tiempos de parada, para adecuarse a la realidad de cada ciudad. Según (GIS, W., KRUCZYŃSKI, S., TAUBERT, S., WIERZEJSKI 2017) cada tipo de SORT se adecua de forma bastante precisa a diversas ciudades, poniendo París o Londres como ejemplo de SORT 1 (también llamado *Heavy Urban Cycle*), Madrid o Múnich como representantes del SORT 2 (*Easy Urban*) y las áreas suburbanas de París como ejemplo del SORT 3 (*Easy Suburban*).

8.2.3.CICLO DE CONDUCCIÓN WMTC

El ciclo de conducción WMTC (World Motorcycle Test Cycle) es el último de los ciclos que trataremos y afecta a las motos. Basado en el ciclo NEDC pero adaptado a las realidades de los países que lo aceptan como la Unión Europea, Brasil, Japón, Estados Unidos, la India o Chile, en la Unión Europea pasó a ser obligatorio a partir de 2017.

Al igual que los anteriores ciclos, presenta también 3 clases, dependiendo de la cilindrada y de la velocidad máxima. Evidentemente, el único criterio que nos afecta es el de la velocidad máxima. Cada una de las clases es una combinación de las partes en que se divide el ciclo, que corresponden a la circulación por entorno urbano, carreteras secundarias y autovías, con la particularidad que la parte correspondiente al entorno urbano se repite dos veces al suponer el vehículo frío la primera vez en la primera clase. Aunque en un vehículo eléctrico no aporta mucho, en un test diseñado para medir la cantidad de partículas contaminantes emitidas por un motor de combustión, es necesario.

La construcción del ciclo de cada clase se construye según la siguiente tabla:

Clase	Parte	Velocidad máxima /(km/h)
Clase 1	Parte 1	100
	Parte 1	100
Clase 2	Parte 1	100
	Parte 2	130
Clase 3	Parte 1	100
	Parte 2	130
	Parte 3	>130

Tabla 7 - Resumen de las clases del ciclo WMTC (UNECE 2004)

A continuación, se muestra la clase 3 del ciclo, ya que como se ve en la tabla anterior, nos permite visualizar las tres partes del ciclo.

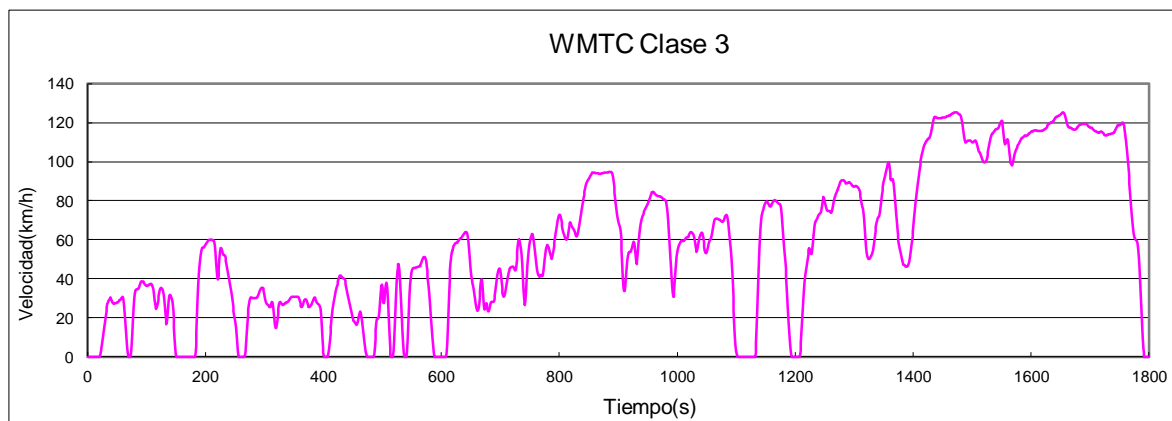


Ilustración 71 - Ciclo WMTC Clase 3

Nuestro vehículo de referencia, al ser un vehículo de altas prestaciones, será testado en la Clase 3.

La información de este ciclo de conducción se ha obtenido de (UNECE 2004), donde se explican los pasos seguidos durante el desarrollo del ciclo, con todas las versiones y enmiendas de los distintos países que colaboraron en su redacción.

9. VEHÍCULOS DE REFERENCIA

Se ha escogido un vehículo comercial de referencia de cada tipo para comparar los resultados de las simulaciones llevadas a cabo con los datos de autonomía de los vehículos de referencia. Avanzando brevemente el contenido del apartado 10, el objetivo del primer dimensionado es implementar el sistema híbrido sin afectar de manera notable la autonomía del vehículo de referencia.

También nos es muy útil para los parámetros dinámicos de los vehículos: al tener datos reales de masa, coeficiente de drag y el resto de parámetros mencionados en el punto 8.1 no nos obliga a suponer unos datos realmente difíciles de dimensionar sin un vehículo real.

9.1. AUTOBÚS

Para la aplicación al autobús se comparan los resultados de nuestras simulaciones sobre un ciclo SORT con los resultados de un autobús Irizar ie bus 12. El motivo por el cual se escoge este modelo es que la propia empresa nos ha confirmado que miden la autonomía mediante el ciclo SORT, que como se ha dicho en el apartado correspondiente, al ser un estándar y no una norma cuando un fabricante de autobuses da el dato de autonomía no es seguro que esté referenciado al protocolo del UITP.

El Irizar ie bus 12 es uno de los modelos eléctricos de la empresa guipuzcoana, que tiene plantas de producción en España, Marruecos, Brasil México y Sudáfrica. Se trata de un autobús urbano con capacidad para unos 80 pasajeros y entre 25 y 30 butacas. En cuanto a la autonomía, una consulta en su web («Por delante en autonomía - Irizar e-mobility» [sin fecha]), nos indica una autonomía entre 200 km y 220 km a una velocidad de media de 15-17 km/h, por lo que sabiendo que la autonomía se mide contra un ciclo SORT, es fácil inferir que el ciclo medido es el SORT 2, que tiene una velocidad media de 18 km/h.

Los datos dinámicos del vehículo se resumen en la tabla 8:

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidades
Masa del vehículo	m	21200	kg
Coeff. Drag	CD	0,55	-
Área frontal del vehículo	A	8,415	m ²
Momento de inercia	J	-	kg·m ²
Relación de transmisión	i	1/4	-
Rendimiento de la transmisión	η_i	1	-
Radio de la rueda	r	0,5	m

Tabla 8 - Especificaciones dinámicas del Irizar ie bus 12

No hemos sido capaces de encontrar datos fiables sobre el momento de inercia ni la relación de transmisión, pero a partir de la potencia del motor y del par nominal es fácil encontrar una velocidad nominal entorno a las 1200 min⁻¹, que a través del radio de la rueda se convierten en unos 220 km/h, por lo que suponiendo una relación de transmisión de 1/4 se convierten en 54 km/h, que es una velocidad aceptable para el vehículo.

También hemos supuesto el coeficiente de Drag como 0,55 por ser el del autobús Irizar PB.

Los parámetros del *powertrain* se especifican en la tabla 9:

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidades
Potencia de motor	P	180	kW
Tipo de motor	-	PMSM	-
Par nominal	T	1500	Nm
Capacidad batería	E	350	kWh
Capacidad batería	Q	500	Ah
Tensión nominal batería	Vnom	700	V

Tabla 9 - Especificaciones eléctricas del Irizar ie bus 12

Mientras que los datos relativos a potencia y par del motor y la capacidad de la batería se obtienen de las especificaciones del vehículo en la web de su fabricante, la tensión de la batería se obtiene del proyecto final de carrera de (Vallejo 2019).

9.2. COCHE

El modelo usado como referencia es el Tesla Model 3 por ser el vehículo eléctrico (con baterías, excluyendo híbridos) más vendido en todo el mundo en 2019 (Worldwide electric vehicle sales by model 2019 | Statista» [sin fecha]).

Por tanto, para la simulación, las variables que influyen en el modelo dinámico del vehículo serán las del modelo de referencia, así como las dimensiones de los componentes del powertrain, excluyendo la batería al sustituirse por el equivalente híbrido.

El Model 3 es el vehículo que presenta Tesla para conquistar la gama media-alta del mercado de vehículos eléctricos, por debajo de sus anteriores y más lujosos modelos Y y S. Con aproximadamente 300000 unidades vendidas en 2019 (casi 200000 de diferencia con el segundo en la lista), presenta varias versiones, que dependen de los accesorios de software y sobre todo la autonomía, directamente relacionada con el tamaño y capacidad de la batería.

Las tres versiones existentes llamadas *Performance*, *Gran Autonomía* y *Estándar Plus* se diferencian en peso (1847 kg para las dos primeras versiones y 1612 kg para la *Estándar*) y autonomía (530 km en las dos primeras versiones y 409 en la última), y ligeramente en aceleración. Los tipos *Performance* y *Gran Autonomía* también se diferencian de la versión estándar por incorporar dos motores (uno en cada eje) contra la tracción secundaria del modelo *Estándar*. Se escoge simular la versión estándar por tener una autonomía menor que se traduce en menor tiempo de simulación y por incorporar un solo motor que simplifica el modelo y economiza el tiempo y capacidad de simulación.

En la tabla 10 se resumen las especificaciones dinámicas del modelo.

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidades
Masa del vehículo	m	1612	kg
Coeff. Drag	CD	0,24	-
Área frontal del vehículo	A	2,34	m ²
Momento de inercia	J	0,54	kg·m ²
Relación de transmisión	i	1/9	-
Rendimiento de la transmisión	η_i	1	-
Radio de la rueda	r	0,3344	m

Tabla 10 - Especificaciones dinámicas del Tesla Model 3

Los parámetros eléctricos se muestran en la tabla 11.

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidades
Potencia de motor	P	188	kW
Tipo de motor	-	PMSM	-
Capacidad batería	E	54	kWh
Capacidad batería	Q	154	Ah
Tensión nominal batería	Vnom	350	V

Tabla 11 - Especificaciones de los parámetros eléctricos del Tesla Model Estándar Plus

9.3. MOTO

Este estudio toma la motocicleta Zero SR/F sobre un ciclo WMTC como referencia.

Este modelo llega al mercado a principios de 2019 y sorprende por el par que es capaz de entregar (190Nm) así como velocidad punta y aceleración. Existen dos versiones (Estándar y Premium), entre las que la única diferencia destacable es el cargador integrado, que en la versión Premium pasa de ser de 3 kW a 6 kW, por lo que el tiempo de carga se reduce a la mitad. A nivel dinámico o eléctrico no existe ninguna diferencia.

En la tabla 12 podemos ver las especificaciones dinámicas:

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidades
Masa del vehículo	m	220	kg
Coeff. Drag	CD	0,7	-
Área frontal del vehículo	A	0,5	m ²
Momento de inercia	J	-	kg· m ²
Relación de transmisión	i	2/7	-
Rendimiento de la transmisión	η_i	0,95	-
Radio de la rueda	r	0,315	m

Tabla 12 - Especificaciones dinámicas de la Zero SR/F

En la tabla 13 se aprecian las especificaciones eléctricas del vehículo:

Magnitud	Símbolo	Valor	Unidades
Potencia de motor	P	40	kW
Tipo de motor	-	PMSM	-
Capacidad batería	E	12,6	kWh
Capacidad batería	Q	124	Ah
Tensión nominal batería	Vnom	102	V

Tabla 13 - Especificaciones eléctricas de la Zero SR/F

10. SISTEMAS HÍBRIDOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA

Los sistemas híbridos de almacenaje de energía, reconocidos por las siglas HESS (*Hybrid energy storage systems*), existen bajo el simple principio de “la unión hace la fuerza”, que en ingeniería se traduce a que la unión de diversas, pero concretas, tecnologías con una precisa lógica de funcionamiento, que justifica la aportación deseada de cada tecnología al resultado final, nos puede permitir combatir inconvenientes y sumar ventajas en comparación a un sistema no-híbrido.

La elección de las tecnologías implicadas en el sistema híbrido viene claramente influenciada por la aplicación final del sistema, en este estudio ya se ha comentado que ésta será en concretos medios de transporte, que son el coche, autobús y moto. Esta aplicación nos permite generalizar los beneficios buscados e inconvenientes a paliar ante un sistema no-híbrido, bajo unos criterios de diseño, a la vez que el esquema del sistema.

10.1. CRITERIOS DE DISEÑO

En este apartado se pondrá en situación al lector ante los requisitos de nuestras aplicaciones para así entender la lógica detrás del planteamiento de la propia aplicación de un HESS y las tecnologías escogidas para ello.

Para comprimir y facilitar la explicación entenderemos en muchos casos a los 3 vehículos como si fueran uno único, una sola aplicación en que generalizaremos sus características para permitirnos tal unificación, pero a la vez daremos una ejemplificación específica cuando sea necesario.

Al tratarse de un medio de transporte el diseño del mismo debe cumplir con necesidades muy evidentes para el usuario como son las siguientes:

- Comodidad.
- Seguridad.
- Efectividad.
- Respeto al medioambiente.
- Rentabilidad.

Bajo esta primera incisión en nuestra aplicación expandiremos cada punto hasta necesidades que pueden ser no tan evidentes para el usuario final, pero si para el fabricante u organismos legislativos. Consideramos también estos últimos debido a su clara influencia en el sector de transporte.

10.1.1. COMODIDAD

Por un lado, la comodidad que busca el usuario se puede entender bajo el principio de la ergonomía en la posición que se le dará uso. Esto nos lleva al primer factor limitante de la ergonomía: el espacio útil. Tal factor no sólo afecta a la ergonomía, ya que el usuario común también busca la existencia de espacio de carga, como puede ser el maletero en un coche, siendo esta otra apreciación distinta a la utilidad del espacio en el vehículo.

En el coche eléctrico actual (no-híbrido) se ha visto una clara ventaja ante coche con motor de combustión interna, y es que la mayoría de estos, ya sean sedanes, coupés, SUVs, deportivos... se presentan con dos maleteros, delantero y trasero, que suman un espacio de carga mucho mayor a su símil en combustión, esto se debe a que el volumen de la cadena de potencia eléctrica es diferencialmente menor, ya sea por el motor, la inexistencia de una transmisión en la mayoría de casos o la presencia de una muy simple y compacta, como a la vez es debido a la gran optimización en el diseño del contenedor de baterías como elemento estructural a lo largo de la base del vehículo, diseño que se le llama "*tipo skate*"; tal diseño puede aplicarse también a los buses eléctricos.

En el autobús común, como puede ser el interurbano, se puede entender también que se busca el máximo de usuarios posibles en su interior, para la rentabilización del servicio, sin sacrificar la comodidad del mismo, ya sea de pie o sentado. Por poner un simple ejemplo, puede ser crítico en el diseño tener las áreas destinadas a la gente de pie de forma que, para una estatura media, se tenga que tener el cuello doblado, debido a que el suelo del vehículo es muy alto debido al contenedor de baterías y el techo tampoco se puede elevar infinitamente, por la compatibilidad con infraestructuras viales tales como puentes, túneles, etc.

En el caso de la moto el espacio es mucho más reducido y el diseño "*tipo skate*" no es

aplicable, lo cual deja al fabricante con una batalla más difícil ante la gestión del espacio, principalmente para las baterías, no dejando de lado la ergonomía, pero sí el espacio de carga ya que en una moto no es un factor diferencial ni principalmente buscado por el usuario. El espacio de carga normalmente, en ser deseado, se consigue mediante complementos similares a maletas que se añaden a partes específicas de la moto según su tipología.

Aquí podemos entender que el sistema HESS no debería comprometer el espacio útil, garantizando la ergonomía e incluyendo el espacio de carga máximo posible, propio al formato del vehículo, en comparación al vehículo eléctrico actual y en caso de verse reducido ante el mismo, en ningún caso se debería ofrecer prestaciones menores, en espacio, al propio de un vehículo de combustión del mismo formato.

Por otro lado, y específicamente en el coche y moto para uso personal fuera de un servicio de alquiler, entenderemos que el tiempo de repostaje del vehículo es determinante de la comodidad que ofrece el vehículo en su uso. El tiempo de repostaje solo se puede ver reducido, pero no eliminado debido a que la regeneración total de energía no existe debido a las fuerzas no-conservativas aplicadas al vehículo (rozamiento y carga aerodinámica) que, bajo el principio de la conservación energética, nos dejan con un sistema que, en un momento u otro, será forzado a ser estacionado, obviamente de forma estática, para la recarga de su sistema de almacenamiento de energía. Durante el tiempo de repostaje el vehículo se encuentra en un estado no-operativo lo cual se traduce a una incomodidad para el usuario propio del vehículo detallado al principio de este párrafo. Quede claro que no se consideran sistemas hipotéticos tipo catenaria para la conexión continua del vehículo a la red eléctrica ni sistemas de repostaje en movimiento como puede haber en aviones.

Independientemente de la autonomía, traducible al intervalo de tiempo entre repostajes, el usuario busca que su vehículo este de vuelta al estado operativo en el mínimo tiempo posible.

Es clara la discusión que ha habido ante la variabilidad de los tiempos de repostaje en vehículos eléctricos según la situación bajo la que se realice el mismo. En el vehículo eléctrico llamamos al tiempo de repostaje como “tiempo de carga o recarga”.

Los tiempos de carga en un coche eléctrico varían de alrededor a 40-60 min, en el caso único de ser cliente de Tesla y utilizar sus supercargadores, hasta las 6-8h o incluso el

día de carga lenta utilizando un punto de conexión común en casa.

En el caso de las motos no existe a día de hoy un fabricante que ofrezca una estructura de supercargadores, ni comparable, a los de Tesla... pero debido a que hablamos de baterías de menor capacidad los tiempos de carga varían entre las 2-4 h.

En el caso del autobús no hay mucha información disponible ante las potencias de carga en las que se mueve el mercado ya que es un mercado muy inmaduro, pero se habla de métodos que ofrecen de 200 a 350 kW implementados en sistemas de inducción, pantógrafo o conexión por el suelo. Estas potencias en según qué baterías de mayor capacidad esperaríamos, como mínimo, los mismos tiempos de un coche eléctrico convencional.

Vemos una tendencia en los coches, que progresivamente pasará a las motos, en la que en según qué localizaciones exactas se esté realizando la recarga, el usuario puede ver reducido el tiempo de tal proceso. Esto implica que el usuario, en necesidad de un tiempo reducido, deba desplazarse a tal localización, lo cual no es sinónimo de comodidad a la vez que el usuario debe encontrar una utilidad a ese tiempo, en el que el vehículo no está operativo, en esa localización exacta. Esto es debido a que estos puntos de recarga rápida no están diseñados para tener el vehículo aparcado toda la noche y así poder "olvidarte" y marchar a casa; estos puntos de recarga, tipo estación de servicio, llevan el usuario normalmente a estar relativamente cerca del vehículo durante el tiempo de carga, por lo tanto, restringe su movimiento durante el proceso.

Aún es más discutible la futura disponibilidad/existencia de un servicio semejante al de Tesla para cualquier usuario/vehículo, con la extensión del mismo y a un precio que salga rentable. Debido a la rentabilidad esperada para paliar el coste elevado propio de la instalación de líneas de tan alta potencia y sus sistemas de seguridad, nos permite afirmar que un usuario que se encuentre fuera de un núcleo urbano tiene y tendrá, en futuro próximo, muchas menos posibilidades de recibir tal servicio en su cercanía y, por lo tanto, si se debe desplazar significativamente fuera de sus rutina de movimiento habitual para recibir tal servicio... la rentabilidad para tal usuario de tal servicio empieza a ser muy cuestionable. Esto se ha visto de forma evidente en países como Estados Unidos, donde se encuentra el grosor de la clientela de Tesla y su estructura de supercargadores, ya que gran mayoría de sus usuarios confiesan que utilizan el servicio de carga rápida de forma esporádica, cuando están de paso, siendo preferente recargar el vehículo en casa con la contraprestación temporal consecuente.

Ya sea con recargas rápidas o lentas, la rutina de un usuario de vehículo eléctrico, se ha visto modificada por el tiempo del proceso. Esto y la discusión consecuente es debido a la comparación con el vehículo con motor de combustión interna al que ya se le ofrece una red de gasolineras muy extensa y los tiempos para llenar un depósito de 60 L no suelen superar los 3 minutos.

Una ventaja que debe ser aprovechada en el vehículo eléctrico es la posibilidad de regeneración de energía debido a que el motor eléctrico puede funcionar tanto como motor como generador, con rendimientos similares si no exactamente iguales. Entendemos la regeneración como un método pasivo de recarga que mejora, por tanto, los tiempos de carga y la comodidad del usuario.

La regeneración de energía se debe a la transformación de la energía cinética del vehículo en energía eléctrica, debido a que en caso de frenada se aprovecha el par existente en la cadena de tracción que supera el par resistivo del motor, lo cuál nos deja con un generador de energía eléctrica que se verá “devuelta” al sistema de almacenamiento de energía. El problema actual viene debido a que, en las tecnologías de litio utilizadas en el mercado, ya explicadas, ofrecen capacidades de recarga limitadas, lo cual limitan las corrientes de recarga a la vez que al tratarse de “micro-recargas” intermitentes no periódicas, picos de recarga, pueden afectar a la salud de una batería basada en litio. La regeneración “perfecta” sería aquella en la que el sistema de almacenaje de energía eléctrica pueda “aceptar” toda la energía entregada por el generador sin repercusiones en su salud ni limitaciones químicas.

Por ende, el sistema HESS debería proponerse bajo la intención de reducir los tiempos de recarga y mejorar la eficiencia del proceso de regeneración.

10.1.2. SEGURIDAD

El usuario debe tener la certeza de que en la utilización del vehículo² su seguridad física no puede verse comprometida más allá de casos consecuentes al uso inapropiado fuera de recomendaciones del fabricante, conducción incorrecta del usuario o la casualidad de ser víctima de estas dos primeras acciones realizadas por otros usuarios desencadenando un accidente. En el último caso, tanto el usuario como el fabricante y los organismos legislativos buscan que el daño sea mínimo para todos los pasajeros. Todo esto se consigue con sistemas de seguridad/emergencia al encontrarse en un vehículo accidentado, principios de diseño específicos y concienciación del usuario.

Progresaremos tomando el coche como ejemplo, ya que es el formato de vehículo personal más popular. El coche ha sufrido una evolución exponencial en sus criterios de diseño y sistemas de seguridad en los últimos 30 años. Se ha pasado de materiales rígidos a aleaciones metálicas y un diseño estudiado bajo el criterio de la absorción del impacto en caso de accidente, provocando la deformación máxima controlada (sin poner en peligro a los usuarios) para así reducir la reacción del impacto en los pasajeros. Se ha pasado de tener depósitos de combustible potencialmente inflamables y de no ser obligatorios los cinturones ni airbags a estar regulados por organismos gubernamentales; teniendo a día de hoy vehículos con hasta 9 airbags o incluso perspectivas de 11, destinando alguno de ellos a la protección de peatones. También se ha visto una irrupción generalizada de sistemas electrónicos de conducción asistida, total o parcial, y de alarma para mejorar, aún más, el factor tratado en este apartado, la seguridad.

El nacimiento de la oferta de vehículos eléctricos ha creado cierta preocupación general ante la seguridad de sus sistemas. Por el general, la cultura e historia, se ha llevado al usuario común a estar familiarizado con los sistemas mecánicos propios a un vehículo con motor de combustión interna, ya que integra componentes que no se han visto drásticamente modificados, a ojos del usuario, a lo largo de 50 años y son componentes motrices que el usuario puede “ver y tocar”. Los sistemas eléctricos, sobretodo de potencia, son generalmente foco de desconocimiento para el usuario común y, en algún caso, incluso de miedo. Esto es debido, básicamente, a que el usuario entiende que la electricidad es peligrosa, estando en lo cierto, y más aún en la cercanía de agua o metales, que son casuísticas existentes en el vehículo eléctrico.

Por el momento, bajo principalmente el paraguas de las tecnologías y diseño implementado por el fabricante Tesla, se ha visto que el vehículo totalmente eléctrico puede ser igual si no más seguro que el vehículo de combustión interna. Es así ejemplo su modelo Model 3, en su configuración básica, que obtuvo la puntuación más alta de la historia en las pruebas EURO NCAP. Esto se puede justificar por la inexistencia de un bloque motor muy pesado y rígido en la parte delantera en una posición elevada que suele ser lo primero en afectar al usuario en caso choque en un vehículo de combustión interna. A la vez el bloque de baterías con el diseño “tipo skate” aporta un centro de gravedad muy bajo y gran rigidez en esa zona, factores que benefician la estabilidad del vehículo. También, el mismo fabricante, ha demostrado que con el correcto aislamiento del contenedor de baterías y sistemas de potencia a la vez que la correcta parametrización térmica y sistemas de refrigeración de los mismos, se consigue que el usuario no deba tener ninguna preocupación por su seguridad añadida a la que tendría en un vehículo de combustión interna.

En el formato del autobús o moto, debido a su diseño, no se ha conseguido aún garantizar los niveles de seguridad del coche. Aún así son formatos donde las tecnologías de aislamiento y control aplicadas en el coche eléctrico son totalmente integrables, por lo tanto, y de igual forma que en el coche, el usuario de un autobús o moto de propulsión eléctrica no debería tener ninguna preocupación por su seguridad añadida a la que tendría en un símil de combustión interna.

Comentar que debido a que el mercado del vehículo eléctrico es drásticamente aún menor al de combustión, se pueden considerar las afirmaciones anteriores como anticipadas, por ello, en este estudio se considera y se espera que los nuevos fabricantes de vehículo eléctrico tomen los mismos estándares y medidas de seguridad comparables a Tesla y que los organismos legislativos actualicen y detallen en extensión lo antes posible, si no se ha realizado ya, tales estándares para regularizar su cumplimiento.

Por ende, el sistema HESS debe estar estrictamente diseñado bajo los mismos estándares de seguridad que un vehículo eléctrico (debido a la semejanza en su cadena de tracción) garantizando así los mismos niveles de seguridad para el usuario. También cabe decir que el sistema HESS debe permitir al fabricante producirlo o implementarlo sin compromisos de seguridad para sus operarios o sus instalaciones, sin cambios drásticos en su cadena de producción que serían contraprestaciones directas en la rentabilidad del sistema.

10.1.3. EFECTIVIDAD

El usuario de cualquier útil, ya sea tan simple como un destornillador o complejo como una estación espacial, busca siempre que la utilidad que se le ha prometido durante el proceso de adquisición o diseño sea a efectos prácticos, bajo experiencia propia, cumplidos.

Este estudio se centra 3 medios de transporte, por ello y en su nivel más elemental, deben ser efectivos en el traslado de pasajeros de punto A a punto B. El mercado del sector transporte, como otros muchos, tiene un factor claramente influenciado en la satisfacción final ante la efectividad de dicho vehículo a ojos del usuario, estamos hablando del factor económico. El coste económico del servicio ofrecido por el medio de transporte, ya sea en su adquisición a nivel personal o alquiler, crea en el usuario una correlación llamada calidad-precio. Tal correlación se trata de una ratio general fruto del balance de la efectividad del sistema en desarrollar sus funciones y/o cualidades en contraste con el coste a cubrir para disfrutar de las mismas. Tal ratio siempre se realiza ante la comparación, del vehículo estudiado, con la oferta de otros modelos provenientes de otros fabricantes a un nivel de precio, llamado "gama", que cubren las principales funciones y/o cualidades en un formato semejable. La calidad-precio es normalmente el primer factor bajo el que el usuario común busca justificar su elección final ante el coste del servicio ofrecido, pero cabe decir que es factor muy volátil y subjetivo, ya que depende totalmente de qué cualidades/funciones que son de interés, a nivel personal, para el usuario; así se justifica la razón por la cuál no todo el mundo compra o utiliza el mismo exacto modelo de vehículo.

Conforme el presupuesto, que el usuario dispone para adquirir las funciones y/o cualidades del vehículo, se ve incrementado, el usuario puede dar importancia a la efectividad en la que vehículo resuelve funciones y/o cualidades complementarias a la elemental ya comentada, es decir, no esenciales. Esto explica las gamas de precio en los vehículos donde en la gama alta se ofrece las mejores prestaciones para distintos tipos de usuarios, cuyos intereses que se pueden englobar en:

- **Materiales de mejor calidad y mejores acabados**, principalmente en el interior del vehículo. En la alta gama se podrían categorizar de lujo y no tiene porqué ser sinónimo de que el mantenimiento del vehículo será menor.

- **Tecnologías/sistemas punteros** que debido a su estado prematuro en el mercado y al I+D dedicado a ellas, su coste puede ser elevado. Estas tecnologías pueden estar relacionadas con la seguridad, rendimiento, conectividad, impacto ambiental, mantenimiento, etc.
- **Prestaciones en conducción superiores.** Esto lo englobamos a un carácter más deportivo del vehículo, ya sea con un mejor manejo, potencia superior, eficiencia de la cadena tractora, etc.
- **Confort y/o comodidad durante su utilización.** Este punto se ha desarrollado anteriormente, de forma general, para el vehículo eléctrico. Aquí podríamos añadir que está, a veces, muy relacionado con los dos primeros puntos de esta lista o incluso con el manejo del vehículo.
- **Diseño general del vehículo.** El usuario se interesa por la forma física en la que los elementos están distribuidos bajo su criterio estético y/o práctico. Aquí también entran conceptos explicados en el apartado de comodidad.

Para todos estos puntos el usuario busca poder disfrutarlos pasivamente, es decir, el factor de la simplicidad en la que el vehículo es efectivo en la realización de sus funciones y/o cualidades es también valorable para el usuario. En la tecnología de consumo, nuestro caso, siempre se ha visto una evolución hacia la simplicidad en la ejecución. Remarcable que, incluso ahora, vemos la tendencia hacia la conducción autónoma, dejando claro que hasta la función más elemental del vehículo se está cubriendo de forma automática para un esfuerzo mínimo del usuario ya que, el ser humano por naturaleza, busca la simplificación de sus problemas, entre ellos, el transporte.

Por ende, el sistema HESS debe mitigar al máximo las complicaciones añadidas, en caso de haberlas, ante tecnologías rivales a ojos del usuario final. El sistema HESS, por lo tanto, se desea que sea un sistema automatizado que, aún así, el usuario pueda comprender de forma simple su funcionamiento. Sin tratar el factor económico en profundidad, ya que se realizará así en el siguiente apartado, el sistema estudiado se debería poder justificar de forma evidente, clara y sin tecnicismos al usuario final, detallando qué puntos mejora la efectividad del vehículo, es decir, cuáles de los puntos de interés general, detallados anteriormente, muestra ventajas ante las tecnologías establecidas, en la gama del vehículo, para así mejorar su ratio de calidad-precio, justificando su elección.

La última afirmación, aunque evidente, es importante recalcar su relevancia en la determinación de la viabilidad del sistema HESS, sobretodo desde la perspectiva real del mercado capitalista, en el que, si no hay demanda, no habrá oferta. El usuario común, en todos los ámbitos tecnológicos, tiende a ser reticente y escéptico ante tecnologías novedosas en las que no comprende sus beneficios y, si no se es capaz de transmitir tales ventajas de forma entendedora, tecnologías realmente viables se pueden ver obligadas a desaparecer del mercado, debido a que la demanda de los “early adopters” rara vez resulta ser suficiente para mantener el sistema/tecnología en oferta, y si fuera el caso, el precio no se vería reducido de la forma habitual a lo largo de la vida del sistema/tecnología/producto.

En este estudio se parte de la hipótesis de que el sistema HESS puede beneficiar el futuro vehículo eléctrico, de forma eficaz, en prestaciones de conducción, impacto ambiental, confort/comodidad, reducción de su mantenimiento y aumentar su ciclo de vida, siendo una tecnología puntera en el sector, sin afectar substancialmente al punto restante de interés para el usuario, el diseño.

10.1.4. RESPETO AL MEDIOAMBIENTE

Teniendo en cuenta la explicación de la situación medioambiental actual y algunas de las medidas aprobadas detalladas en la introducción de este estudio es indispensable que el sistema HESS se diseñe bajo la intención de reducir el impacto ambiental propio a los sistemas de almacenaje de energía actualmente utilizados, sería inaceptable empeorar tal aspecto.

Extendiendo el plano normativo citamos fragmentos del reglamento europeo (UE) 2019/631:

- *“objetivo a escala del parque de la Unión, aplicable a partir del 1 de enero de 2020, de 95 g CO₂/km como promedio de emisiones de CO₂ de los turismos nuevos y un objetivo a escala del parque de la Unión de 147 g de CO₂/km como promedio de emisiones de CO₂ de los vehículos comerciales ligeros nuevos matriculados en la Unión”.*
- *“El presente Reglamento se completará, hasta el 31 de diciembre de 2024, con medidas adicionales para la reducción de 10 g de CO₂/km”.*

- *“La prima por exceso de emisiones prevista en el apartado 1 se calculará mediante la siguiente fórmula:*

(Exceso de emisiones x 95 EUR) x número de vehículos matriculados por primera vez.

A efectos del presente artículo, se entenderá por:

- *«exceso de emisiones», el número positivo de gramos por kilómetro en que las emisiones medias específicas de CO2 de un fabricant ...”*
“superan su objetivo de emisiones específicas en el año civil o en la parte del año civil en la que se aplique la obligación prevista ...”
- *«número de vehículos matriculados por primera vez», el número de turismos nuevos o de vehículos comerciales ligeros nuevos contabilizados por separado producidos por el fabricante y que se matricularon en ese período”*

Esta norma afecta de forma diferencial al catálogo de fabricantes de vehículos con carácter deportivo, debido a que tal característica de conducción basándose en un motor de combustión interna exige emisiones superiores a las establecidas. Aún así, como cualquier normativa, existe un vacío legal o oportunidad para los afectados, y es que el valor de emisiones se contabiliza en promedio ante todos los vehículos contabilizados, esto a llevado a la contabilización conjunta entre marcas deportivas y de bajas emisiones, por los grandes grupos automovilísticos, para así compensar tal promedio. Esta estrategia ha delatado la incapacidad tecnológica de grandes conglomerados como FCA (Fiat Chrysler Automobiles), que comprende a las marcas Fiat, Crysler, Ferrari, Lancia, Alfa Romeo, Maserati, Jeep y RAM, debido a su acuerdo con Tesla para contabilizar sus vehículos eléctricos en ámbito europeo bajo su paraguas, beneficiando económicamente al fabricante americano. Como dato tenemos que las emisiones promedio de Alfa Romeo en 2018 eran de 123 g CO2/km con una venta anual de 946.600 unidades aproximadamente; esto bajo una trasportación a 2020, se traduciría a una hipotética prima por encima de 2.000.000.000€.

El futuro y tendencia del plano normativo en este aspecto debe ser claramente considerado, ya que el sistema HESS no se determinará viable si ya durante su diseño se le espera un ciclo de vida muy corto debido a la próxima ilegalidad en su aplicación. El sector del transporte es un sector fuertemente regulado por organismos gubernamentales, debido a su volumen y efecto en la seguridad general del individuo,

ya sea usuario directo o no.

Más allá de estar dentro del plano normativo, el diseño de nuevas tecnologías debe estar estrictamente relacionado a este factor, intentándolo potenciar al máximo, por la responsabilidad ambiental que nos ha sido otorgada como la raza con mayor efecto en el planeta dónde convivimos con incontables organismos.

Un punto cuestionado en la movilidad eléctrica es el reciclaje del sistema de almacenaje energético. El sistema HESS debe intentar mejorar tal apartado teniendo claro su proceso y efecto.

La implementación de un sistema HESS dónde se demuestre sus beneficios ante las tecnologías establecidas en base a este factor, puede ser una clara ventaja comercial como a la vez puede forzar a cambios normativos generalizados en el sector, ya que sí es viable, por ello posible, el respeto al medioambiente en el sector transporte debe ser forzosamente potenciado por los organismos reguladores.

10.1.5. RENTABILIDAD

Introduciremos este apartado recalcando que el área económica en la que nos adentramos al atender la rentabilidad hipotética de una tecnología no ha sido un área de estudio significativa a lo largo de la formación académica de los autores. Por ello, deberán considerarse siempre las afirmaciones que podamos hacer relacionadas a esta temática, a lo largo de este apartado y estudio, como resultado de la observación de casos similares, formulación de hipótesis en base a ella, sentido común y búsqueda de información, por ende, quede claro que los autores de este estudio, aún así, no poseen experiencia laboral real ni se consideran suficientemente formados como para hablar con total seguridad/propiedad de este tema.

Durante la redacción de este estudio la estructura social y económica mundial se encuentra fuertemente afectada por la pandemia declarada ante el virus COVID-19. Esta situación ha provocado una gran recesión en los mercados que afecta a todos sus sectores, evidentemente al sector transporte entre ellos. Este abrupto desencadenamiento de efectos negativos en los mercados afectará destacablemente al presupuesto destinado a I+D en el tejido comercial mundial, bajo el cuál el desarrollo de la tecnología planteada se vería afectado. En este estudio se considera un estado de la

economía semejable al previo a esta recesión, se podría considerar también en un estado futuro donde los mercados se hayan saneado.

Desde la perspectiva del fabricante, el planteamiento de la rentabilidad de una nueva tecnología/sistema en el mercado capitalista, caso de este estudio, se inicia sólo cuando el sistema hipotético haya superado satisfactoriamente a modo test los criterios de diseño anteriormente detallados, propios al sector transporte. Bajo la hipótesis de que el sistema HESS muestra ventajas en la comodidad y/o seguridad de forma efectiva respetando el medioambiente, será cuando el factor de la rentabilidad del sistema entre como determinante final de su aplicación.

Tal factor, en el sector tecnológico, se basa en la proyección del futuro del mercado donde se categorizará el sistema como rentable y, por lo tanto, viable, si el tiempo de recuperación de la inversión inicial destinada desarrollo e implementación, así como el margen de beneficios a partir de ese momento hasta la previsión de discontinuidad del sistema, es a criterio del fabricante asumible o interesante. Muchos son los casos donde el fabricante se ve obligado, fuera de su criterio de rentabilidad, a desarrollar tal sistema debido a la necesidad de mantenerse competitivo manteniendo su cuota en un mercado donde tal sistema ya se ha visto ampliamente implementado por su competencia.

En el sector del vehículo eléctrico tuvimos a Tesla asumiendo todo el riesgo inicial en el desarrollo del coche eléctrico, viéndose desacreditado por los grandes fabricantes del sector. Aun así, el mercado ha llevado a estos fabricantes a chocarse con una realidad donde su apuesta ha sido, en muchos casos, tardía y apresurada dejando a Tesla con parte de su clientela y mejores prestaciones en comparación. También tenemos el ejemplo de Mercedes-Benz que apostó por el fabricante americano y ahora implementa su tecnología en sus nuevos modelos totalmente eléctricos. Fuera del sector de transporte es curioso comentar el caso del fabricante Sony que inició la venta de la PlayStation 3 bajo un precio con el que perdía dinero, es decir, no cubría costes, pero acabó como producto estrella del sector garantizando una clientela para su próxima generación. Con estos casos queremos ejemplificar que la rentabilidad, al basarse en un futuro más o menos hipotético, puede ser muy difícil de acertar, bajo nuestra opinión.

Se prevé que el sector de vehículo eléctrico no va a sufrir cambios extraordinarios como se han visto en el principio de la segunda década del siglo XXI, en sus inicios. En la actualidad ya empiezan a ser evidentes sus beneficios como también sus puntos a mejorar, pero, aun siendo un mercado inmaduro, sigue habiendo interrogantes abiertos,

como pueden ser la durabilidad/degradación de la tecnología de baterías actual aplicada a un volumen de vehículos aproximado al propio del vehículo de combustión o las consecuencias medioambientales de la demanda de Litio o su reciclaje para cubrir tal demanda, por poner ejemplos.

Por ende, debido a que no se esperan cambios abruptos a corto-medio plazo en el sector, el sistema HESS se debería plantear bajo la consideración de que los costes de desarrollo e implementación sean mínimos e introducirlo al mercado de forma paulatina para que la aceptación de su coste añadido inicial sea lo menos determinante posible para el volumen de ventas total, que se traduce, a reducir el riesgo de la inversión. Es decir, debería seguir el claro ejemplo aplicado a nuevas tecnologías en el sector transporte, donde éstas se ven implementadas inicialmente en algunos modelos de la gama alta ofertada por el fabricante. Esta técnica permite que el usuario se familiarice con la novedad, el fabricante reciba feedback y gestione posibles fallos de diseño de forma discreta, como también provoque aspiración a obtener tal tecnología en la clientela propia a la gama media, creando demanda, para que cuando los costes bajen se pueda garantizar un volumen de ventas que justifique la aplicación en mayor variedad de modelos.

Desde la perspectiva del usuario, la rentabilización se basa en el balance entre el coste inicial a superar para la obtención de las funciones y/o cualidades buscadas en el vehículo, sumado a su coste de mantenimiento (por degradación de sus componentes), en contraste con la efectividad entregada por el vehículo en la ejecución de tales funciones y/o cualidades. Por ende, el sistema HESS debe plantearse bajo la intención de ofrecer una reducción del coste de mantenimiento al usuario ante las tecnologías establecidas, no se anticipa la posibilidad de una reducción del coste inicial debido que al ser una tecnología novedosa forzosamente tendrá un coste mayor durante su inicio en el periodo de aplicación.

10.2. TECNOLOGÍAS ESCOGIDAS

En este apartado pasamos a justificar la elección de las baterías de Litio y SC como los sistemas de almacenaje de energía escogidos para el sistema HESS estudiado, siempre bajo los criterios de diseño explicados. En este apartado no se describen las tipologías o lógica de funcionamiento del sistema. Se entiende que los apartados que tratan las características de ambas tecnologías han sido asimilados.

Primeramente, justificar que las baterías basadas en Litio no podrían ser sustituidas bajo el criterio de rentabilidad. Es una tecnología claramente establecida a la que se le ha dedicado una inversión en el sector muy importante, y por ello, permanecerá a corto y largo plazo. Las baterías de Litio pasan a ser el responsable de la autonomía del vehículo. Debido a su alta energía específica y coste es evidente que será la tecnología con mayor energía almacenada en el sistema y, por ello, su aportación ante la demanda energética será la más significativa de las dos tecnologías. El resto de criterios de diseño en comparación a un vehículo eléctrico, con baterías basadas en litio, no se verían modificados debido a esta tecnología, ya que evidentemente son la misma. Como máximo podríamos ver una reducción en el impacto ambiental de la totalidad del contenedor de baterías si la implementación del HESS plantea la sustitución de parte de la energía almacenada en el sistema de referencia (únicamente basado en baterías de Litio) por almacenarla en SC.

Los SC han sido escogidos bajo la premisa de que sus características y perspectiva de evolución mejoran las prestaciones ofrecidas, bajo los criterios de diseño, ante el vehículo eléctrico de referencia de la siguiente forma:

- **Comodidad:** su formato permite su distribución en el vehículo de igual forma que las baterías de litio, por ello, el espacio útil no se vería afectado en términos de ergonomía. El espacio de carga se podría ver reducido parcialmente en caso que la tipología proponga añadir energía por encima de la propia del sistema de referencia, y en caso de no haber espacio en el diseño tipo skate, el espacio de carga sería el destino de los SC.

La incorporación de esta tecnología aporta la mejora substancial en la optimización del proceso de regeneración, e incluso puede permitir reducir el tiempo de recarga de forma directa si el planteamiento de la lógica en el proceso prioriza la recarga de los SC.

También nos permite afirmar que el perfil de recarga de los mismos podría ser considerado constante al máximo ofrecido por el cargador, como no es caso de las baterías de litio según el tipo de cargador o debido al SoC de las mismas. Todo esto es debido la característica capacitiva de esta tecnología.

- **Seguridad:** esta tecnología ofrece mayor rango de temperaturas para su utilización, lo que transmite mayor seguridad para el usuario. Aún más, esta tecnología no presenta riesgo de explosión o fuego en caso de corto-circuito. Además, ofrecen mayor seguridad que las baterías de litio durante el proceso de fabricación, debido a que los SC sí pueden descargarse al máximo (0 V) y así no ofrecer riesgo alguno al operario o instalaciones.
- **Efectividad:** la aportación de esta tecnología al sistema puede estar monitorizada y automatizada mediante los mismos sistemas y componentes utilizados en la tecnología basada en Litio. Su aportación, mediante este control, no aporta complicaciones para el uso del vehículo y además puede ser un sistema fácilmente comprensible para el usuario, desde la base en que consiste en el reparto de energía estratégico entre las dos tecnologías, según en qué casuística es más eficiente el uso de cada de ellas. Cabe decir que las diferencias en la característica del SC son substancialmente diferenciales a las tecnologías basadas en Litio, facilitando así que el usuario comprenda qué le aporta el sistema con puntos claros y evidentes.

Esta tecnología puede mejorar substancialmente las prestaciones del vehículo en términos de potencia, si el motor eléctrico lo permite, y no afecta negativamente a ninguna otra de las apreciaciones detalladas en la explicación del punto de diseño.

- **Respeto al medioambiente:** justificamos la implicación de los SC debido a que las reservas de Li no se presentan viables ante la demanda y, por lo tanto, esta tecnología puede reducir la exigencia de Li en el mercado. Incluso si la mejora de las prestaciones de los SC es propia de la inversión potencial pertinente al sector transporte, podría plantearse como tecnología sustituta. Más aún, ningún organismo o estudio ha categorizado los SC como perjudiciales ante el medio ambiente, ni comparable al efecto de los combustibles fósiles, por lo tanto, se espera que su futuro este dentro de las exigencias legislativas.

- **Rentabilidad:** su aplicación no provocaría cambio substancial alguno en la cadena de tracción propia al vehículo eléctrico, por lo tanto, los costes en desarrollo e implementación serían, a nuestra consideración, muy bajos. Afirmamos esto ya que los procesos, por ejemplo, de soldadura, control o monitorización son similares si no iguales a los propios de la tecnología establecida.

Un punto preocupante a primera vista es el coste superior actual de los SC. Esta diferencia, basándonos en previsiones y estudios, se vería disminuida conforme las tecnologías basadas en Litio lleguen a su precio mínimo estable (siguiendo la misma tendencia exponencial negativa) o incluso se vean incrementados debido a la cantidad limitada del mineral ante una demanda generalizada del sector transporte. También estudios informan que el presupuesto actual en I+D en esta tecnología no es comparable al de las baterías de Litio, debido a ser una tecnología aún “emergente” y se predice que en caso de que el sector transporte la vea incorporada creará un drástico aumento en su demanda, caso que permitiría aumentar exponencialmente tal presupuesto, mejorando sus características en base al estudio de sus materiales, y sobretodo crear mayor competitividad en el sector de los SC. Por ello, los autores de este estudio se muestran optimistas, como muchos otros estudios, en que este punto se verá claramente mejorado, siendo simplemente una cuestión de tiempo.

De cara al usuario, el drástico aumento en los ciclos de vida esperados de un SC así como su menor degradación ante el perfil de conducción y afectación térmica permiten afirmar que los SC no ofrecerían coste alguno de mantenimiento a lo largo de toda la vida útil del vehículo, muy por encima de los 8-10 años máximo esperados en la otra tecnología. Además, como se explicará posteriormente, la aportación de los SC se puede plantear bajo la intención de paliar la degradación de la tecnología principal, lo que se traduce en un decremento del coste de mantenimiento esperado para la tecnología establecida en el mercado. Más aún, debido a que los ciclos de vida del SC son tan drásticamente superiores se espera que aún garanticen características nominales una vez la vida útil del vehículo se vea terminada, esto permite anticipar que los SC podrían ser fácilmente reutilizados, sin afectación substancial en su rendimiento, en el mismo o distinto sector/aplicación.

10.3. MORFOLOGÍA Y TIPOLOGÍA

Este apartado concentra y estudia las diferentes tipologías de sistemas HESS, donde se realizará un estudio funcional de los elementos correspondientes como también las ventajas y desventajas de cada una. A lo largo de este apartado se detallarán esquemas funcionales, a nivel conceptual, y se utilizará una nomenclatura propia ya que los autores no han encontrado tal información estandarizada. La intención es comprender qué nos permite cada tipología y qué elementos son necesarios. Este apartado no pretende centrarse en la tipología/topología simulada en el aplicativo Matlab en apartados siguientes, sino que pretende reunir en un mismo punto las posibilidades que brinda el sistema HESS según su morfología, información que no hemos encontrado concentrada de esta forma en otros estudios.

El HESS pasará a sustituir en bloque de BAT V(DC) de la cadena de tracción descrita en el apartado 7. Primeramente, explicar que en caso de tener una conexión simultánea entre las dos tecnologías (o ver que sus flechas van al mismo punto) siempre será una conexión eléctrica en paralelo debido al siguiente argumento:

- Los SC están destinados a la aportación de corriente al bus de continua, la aportación de tensión al bus es la función atribuida a la batería basada en Litio. En el hipotético caso de estar conectados en serie, la corriente entregada por los SC estaría limitada por esa tecnología y no habría beneficio alguno. Además, el conexionado en serie siempre aumentará la totalidad de la resistencia interna del sistema, por lo tanto, las pérdidas por efecto Joule.

Se hace necesaria la explicación de la existencia de un “bus de continua”, que se trata de la corriente continua de salida del sistema HESS a una tensión marcada por la propia de la batería basada en litio o la generada, en regeneración, por el convertidor de potencia.

Para conseguir tal tensión se asocian celdas de litio y SC en serie y para conseguir mayor corriente o capacidad, a su vez, se asocian en paralelo. Existe la posibilidad de elevar o reducir la tensión del bus mediante convertidores de corriente continua, esta posibilidad se tratará más adelante.

La primera diferenciación en el sistema se basa en la incorporación de control en la respuesta de cada tecnología. Vemos y explicamos primero el esquema sin control alguno más simple posible:

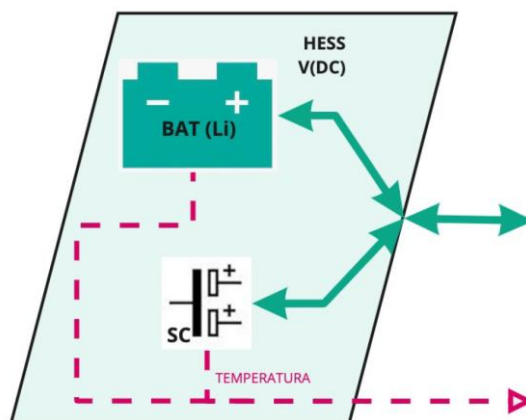


Ilustración 72 - Esquema funcional de un HESS pasivo

El esquema de la ilustración 72 sería el propio a un sistema de equilibrado de tensión, mediante la incorporación de los SC como filtro de perturbaciones. Este esquema presenta el beneficio de la simplicidad y pasividad absoluta en la respuesta del sistema. Asociamos la nomenclatura “HESS pasivo” a este esquema.

El primer inconveniente parte de que la tensión de los SC siempre será la propia del bus de continua y al verse esta disminuida conforme la batería se va descargando nos veríamos incapaces de cargar totalmente los SC por regeneración, siempre estando limitados por la tensión de la batería. A parte la falta de control no permite estrategias de recarga rápida o distinción alguna entre la aportación de cada tecnología. Para ayudar a la comprensión de las implicaciones del conexionado paralelo constante no controlado, presentamos cuál sería el esquema eléctrico conceptual:

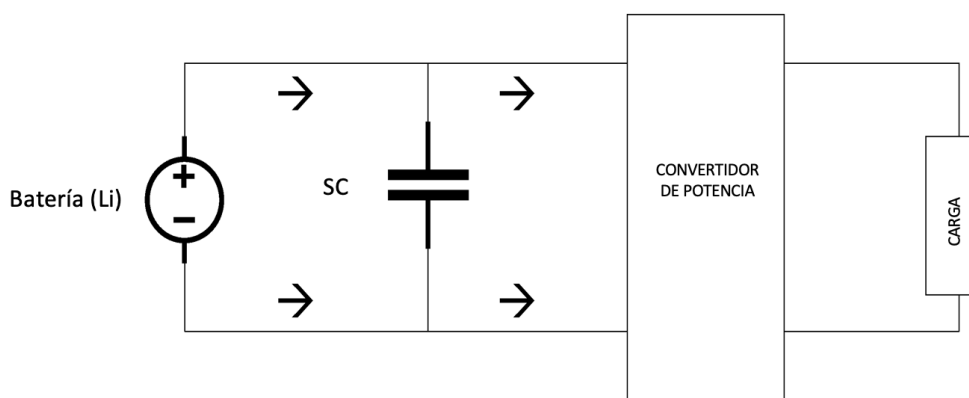


Ilustración 73 - Esquema eléctrico de un HESS pasivo

El esquema en el que la aportación energética sigue una ley de control es el siguiente:

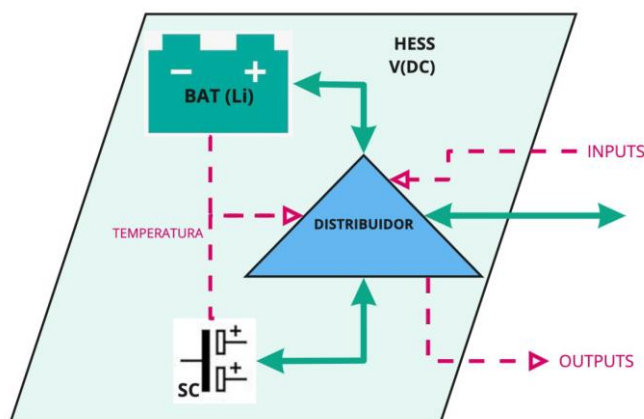


Ilustración 74 - Esquema funcional de un HESS activo

Debido a la incorporación de un control activo referenciamos el esquema de la ilustración 74 como el propio a un “HESS activo”.

El bloque llamado “Distribuidor” será el encargado de gestionar la aportación energética de cada tecnología siguiendo una ley de control basada en análisis de inputs internos, como puede ser la temperatura de cada subsistema, o externos procedentes de la ECU o del piloto incluso. A la vez el bloque debería entregar una serie de datos (outputs) al resto de elementos de control englobados en la ECU para la correcta entrega de los inputs o la monitorización del sistema.

Pasamos a detallar el bloque Distribuidor:

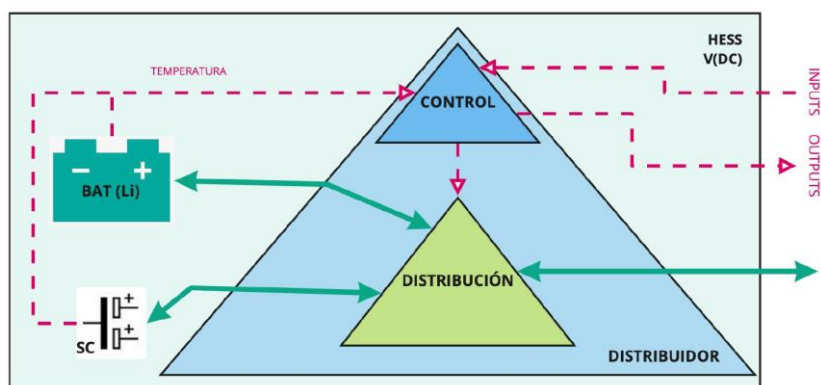


Ilustración 75 - Esquema funcional del elemento Distribuidor

Como vemos (ilustración 75) a este nivel se nos presentan dos bloques internos, una etapa de control y otra de potencia llamada “Distribución” que como indica su nomenclatura, su función se trata en transformar los outputs del bloque de control a una gestión energética distribuida entre ambas tecnologías.

La incorporación del control brinda la posibilidad de una gestión detallada y diferenciada según factores como podrían ser la regeneración, picos de demanda, temperatura del sistema, modo de conducción, modo de recarga, estado de carga de la batería, etc.

Se nos presentan dos métodos de control diferenciados. Por un lado, tenemos el esquema siguiente:

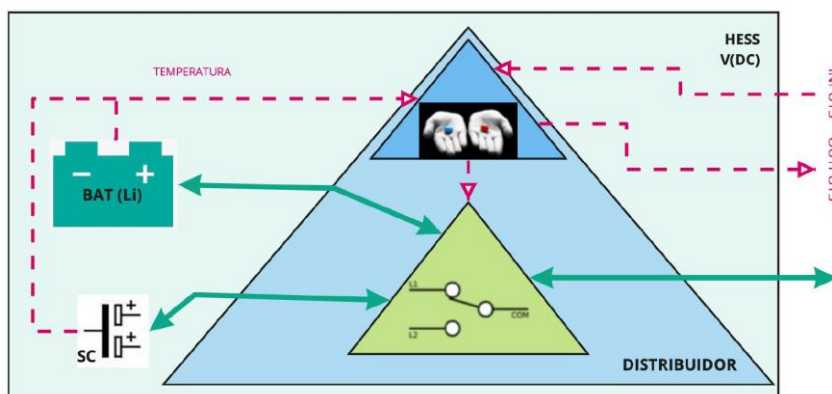


Ilustración 76 - Esquema funcional de un HESS activo aislado

Este esquema (ilustración 76) se basa en la conmutación entre los subsistemas según la opción óptima para cada casuística. Esta lógica binaria de control no permite tener simultaneidad en la aportación energética entre ambas tecnologías, es decir, se basa en aislar las baterías o los SC según convenga, es por ello que surge la nomenclatura utilizada. Este sistema presenta el beneficio de la simplicidad en su control, pero evidentemente, pueden existir casuísticas donde la aportación simultánea sea la más óptima. Debido a que los SC solo podrían gestionar segundos de la demanda total del motor y la conmutación en alta potencia puede presentar problemas en equilibrado de tensión en el bus de continua o retardos, creemos que la simplicidad no justifica su aplicación.

Finalmente, se nos presenta el HESS más complejo:

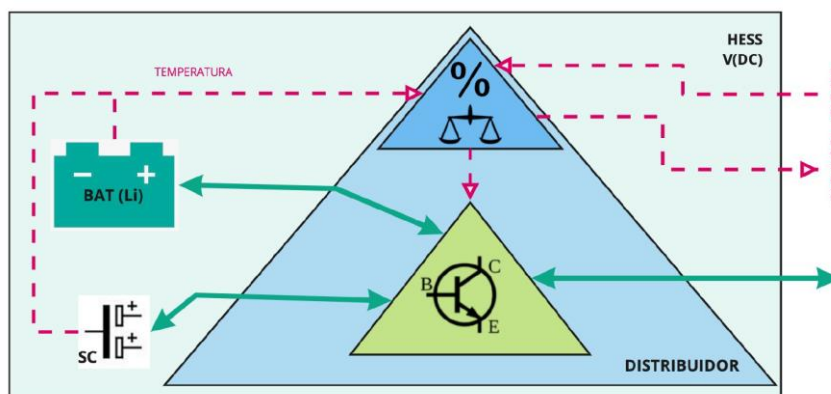


Ilustración 77 - Esquema funcional de un HESS activo distribuido

La distribución energética se verá gestionada bajo unas leyes de control que permitan especificar la aportación óptima de cada subsistema según la casuística. Este sistema puede llegar a asilar alguno de los subsistemas si es conveniente, pero a la vez y en la mayoría de los casos, la corriente del bus de continua se verá aportada o repartida (en regeneración) por un balance entre ambas tecnologías. Este sistema permite la especificación de leyes de control muy detalladas donde se traten amplias casuísticas que dependan, otra vez, de factores como la regeneración, picos de demanda, temperatura del sistema, modo de conducción, modo de recarga, estado de carga de la batería, etc.

Detallando el bloque de la distribución de potencia se nos presenta el siguiente esquema:

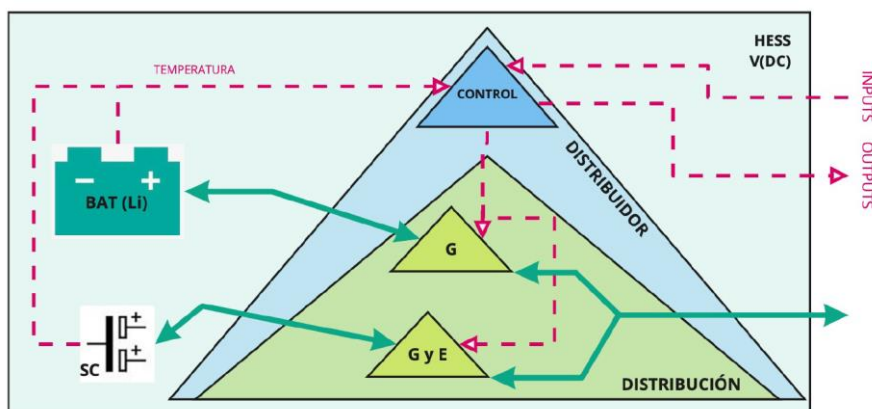


Ilustración 78 - Detalla del bloque Distribución de un HESS activo distribuido

Vemos la incorporación de dos bloques funcionales con las siglas “G” por gestión y “E” por equilibrado de tensión (ilustración 78). Estos bloques están aplicados a cada subsistema debido a:

- **Batería basada en Litio:** la regulación de su aportación requiere la incorporación de un componente de potencia que permita el control por corriente. A esto nos referimos como gestión con “G”.
- **Supercondensadores:** la funcionalidad “G” sigue siendo la misma que el punto anterior. En cuanto al equilibrado (“E”) es debido a que como en la vasta mayoría de HESS planteados por otros estudios, la asociación en serie de los SC no iguala la tensión del bus de continua, debido a que no es óptimo asociar los SC pertinentes para conseguir tal tensión desde la perspectiva del coste y optimización del sistema.

No es óptimo ya que el banco de SC tiene la intención de aportar corriente y no energía. En aumentar la tensión, aumentaríamos la energía almacenada ($E = V * C (Ah)$), y una vez se sobrepasan unos mínimos de tensión (establecidos por el componente conversor) cuando la corriente necesaria ya ha sido garantizada mediante la asociación en paralelo, estamos desaprovechando SC utilizándolos bajo el principio de energía y autonomía, que repetimos, no es la intención de su aportación.

Numerosos estudios realizados con sistemas HESS en la aplicación de VE han optado por la tipología activo distribuido, la cual cuenta con dos convertidores DC/DC (buck-boost). El primer convertidor se controla por tensión y eleva la tensión de la batería para mantener constante la tensión del Bus de continua. Al tratarse de un convertidor buck-boost, se permite la bidireccionalidad del flujo de energía por lo que, en momentos de desaceleración del vehículo, esta potencia negativa puede ser en parte absorbida por la batería.

El segundo convertidor conecta los SC con el Bus de continua y a diferencia del anterior, éste se controla por corriente. Su objetivo satisfacer la demanda de corriente del sistema, de manera que, durante periodos de elevada potencia, sean los SC los que soporten el esfuerzo y también en los tramos de regeneración sean éstos los que absorban la mayor parte de energía (se ha demostrado que de esta manera aumenta la eficiencia del sistema)

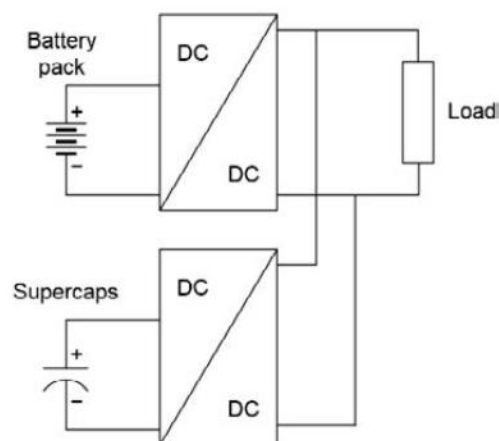


Ilustración 79 - Sistema HESS activo-paralelo (Moreno-torres 2016)

Al contar con dos elementos activos para el control del sistema (V_{DC} y I_{SC}), esta topología permite la utilización de técnicas de control muy complejas con algoritmos predictivos para conseguir la mayor optimización del sistema, como las utilizadas en los estudios Dhia et al. 2018; Hu et al. 2018; Yu et al. 2018. La principal desventaja de

este sistema es el peso que supone utilizar dos convertidores DC/DC de elevada potencia y las pérdidas eléctricas de estos, como hemos comentado anteriormente estos factores son cruciales para el correcto desarrollo de un sistema HESS en VE.

La topología que utilizaremos en nuestro estudio y que ha obtenido resultados satisfactorios en la tesis doctoral Moreno-torres, 2016, consiste en conectar la batería directamente al Bus de continua (la tensión del Bus vendrá impuesta por la tensión de la batería) y conectar los SC en paralelo a través un convertidor buck-boost. De la misma forma que en la topología activo distribuido el convertidor de los SC se controla por corriente y su objetivo es entregar al Bus de continua la intensidad (I_{SC}) calculada en cada momento por la ley de control.

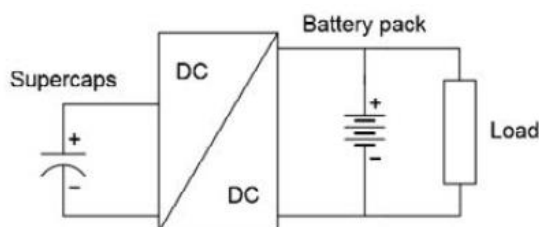


Ilustración 80 - Sistema HESS two stage battery / SC (Moreno-torres 2016)

Al tratarse de un convertidor buck-boost el sistema permitirá a los SC absorber la energía cuando el VE trabaje como generador y también posibilita cargar los SC a través de la batería en momentos puntuales derivados de la lógica de control. Al tener un único convertidor y una variable que controlar (I_{SC}) se disminuyen las pérdidas eléctricas y el peso debido a los convertidores y el sistema no requiere de complejas lógicas de control como veremos más adelante.

10.4. CONTROL DEL SISTEMA HESS

El control del sistema híbrido se realiza mediante el cálculo de la consigna de potencia que deberán entregar los SC. Dicha consigna será evaluada a su tiempo por el convertidor de tal manera que los SC se descargarán a la intensidad deseada.

Antes de introducir el algoritmo de control vamos a definir los parámetros a evaluar para decidir que consigna se envía al bloque de SC.

- P_{Req} : Es la potencia que debe entregar el sistema de almacenamiento de energía para que el vehículo cumpla con la velocidad y el par demandado por el

conductor.

- P_{BT_Min} : Un parámetro decidido durante el ajuste del control y que corresponde al valor eficaz de la potencia a la que se desea que se descargue la batería, expresada en múltiplos de la potencia nominal de la batería. El objetivo de ello es que la batería se descargue a una corriente aproximadamente constante durante todo el ciclo, sobrepasando el valor especificado en escasas ocasiones, prácticamente eliminando los picos de corriente que suelen ser perjudiciales para la batería. El valor de dicha corriente tiene efectos en la eficiencia como muestra (Moreno-torres 2016).
- P_{SC_Disp} : Se entiende como la potencia que sería capaz de entregar un condensador sin sufrir ningún daño. Se calcula multiplicando la tensión del supercondensador por la corriente continua máxima del bloque de SC, que es de 41A por condensador.
- V_{SC} : La tensión del pack de condensadores en su conjunto.
- V_{SC_Req} : Esta tensión se calcula con el objetivo de preparar al bloque de SC de manera “predictiva” para ser capaz de soportar acelerones y frenado regenerativo. Se basa en la velocidad del vehículo y en la posibilidad de que se requiera potencia para una aceleración brusca a bajas velocidades, así como de que se requiera absorber potencia debido a un frenado a altas velocidades. Obedece a la fórmula:

$$V_{Req} = V_{SCmax} \cdot \sqrt{1 - \frac{v}{k_v}} \quad (21)$$

Donde v es la velocidad del móvil y k_v una constante que depende de cada vehículo y de la tensión máxima y mínima del bloque de SC. Es descrita por:

$$k_v = \frac{v_{max}}{\left(1 - \frac{V_{SCmin}}{V_{SCmax}}\right)^2} \quad (22)$$

v_{max} es la velocidad máxima del vehículo. La ecuación 21 y 22 se obtiene de (Moreno-torres 2016).

- P_{SC_Ch} es la potencia con la que se cargarán los supercondensadores. De igual manera que P_{Min} se establece arbitrariamente. Calculamos P_{SC_Ch} como:

$$P_{SCch} = (V_{SCReq} - V_{SC}) * I_{ctmax} \quad (23)$$

Donde I_{ct_max} es la corriente continua máxima del bloque de SC.

Dicho esto, vamos a detallar el algoritmo de control y sus explicaciones. El algoritmo de

control que usamos es el modificado por (Moreno-torres 2016) en base al propuesto por (Carter, Cruden y Hall 2012).

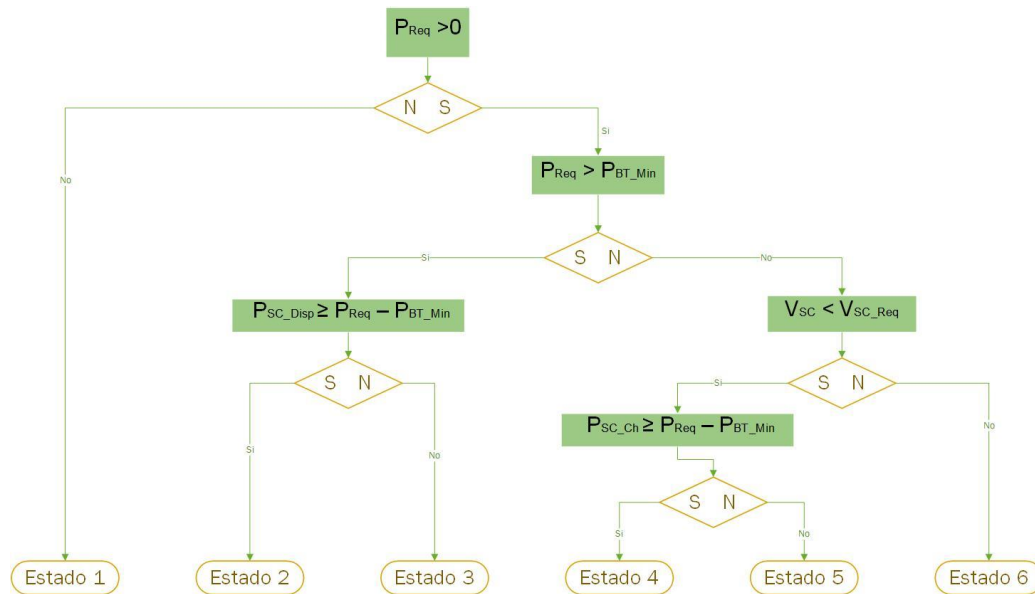


Ilustración 81 - Algoritmo de control del sistema HESS

Comienza observando la potencia requerida por el vehículo. En caso de ser negativa significa que estamos en frenado regenerativo y es necesario que los SC absorban toda la potencia de la que son capaces, ya que la mayoría de químicas de Li-Ion no admiten corrientes de carga elevadas. Es por ello que se pasa al **Estado 1**.

En caso contrario se abre un abanico de posibilidades en el que el primer paso es comparar la potencia requerida con la mínima de la batería.

En el caso positivo se analiza si los SC pueden suministrar la diferencia entre la potencia requerida y la mínima, de tal manera que la batería se descargaría según lo deseado y los SC se encargarían del resto, entrando en el **Estado 2**. En caso negativo, los SC entregarían toda la potencia que tienen y la batería se ocuparía del resto. El **Estado 3** es por tanto indirectamente controlado por el SoC de los SC aunque no se encuentre en la ecuación.

Vamos a ver ahora el caso en que la potencia requerida por el vehículo sea menor que la establecida como constante para la batería. Se debe analizar la tensión de los SC (que va ligada al SoC) en comparación con la tensión requerida para los mismos según la ecuación 21.

En caso de ser menor la batería deberá suministrar la potencia necesaria al motor y a la vez cargar los SC con una potencia P_{Ch} . Para decidir el valor de dicha potencia hemos

introducido otra condición: si la potencia de carga calculada es menor que la diferencia entre la potencia requerida por el vehículo y la deseada para descargar la batería, limitaremos la carga a dicha diferencia para no sobrepasar la ratio de descarga deseada. Entramos en el **Estado 4**.

Si la potencia calculada es menor que la mencionada diferencia, no existe ningún problema en cargar los SC a dicha potencia, como se ve en el **Estado 5**.

Para entrar en el **Estado 6**, la tensión del bloque de SC debe ser mayor que la calculada en la ecuación 21. En este estado se introduce la mejora propuesta por (Moreno-torres 2016) frente al original, quien proponía simplemente que solo la batería entregase potencia al motor quedando el bloque de SC parado. La mejora consiste en que para asegurar que los SC puedan absorber la regeneración producida por un frenazo brusco (recordar que debido a la V_{req} solo entraremos en este estado a velocidades altas), el SC carga la batería a la potencia P_{Ch} antes mencionada.

En la tabla 14 se detalla el valor de la consigna de potencia que deberá entregar el bloque de SC según los estados del algoritmo de control.

Estado	Consigna: Potencia demandada al bloque de SC	El condensador se...
1	P_{req}	Carga
2	$P_{req} - P_{min}$	Descarga
3	$I_{SC_ct_max} \cdot V_{SC}$	Descarga
4	$P_{req} - P_{min}$	Carga
5	P_{Ch}	Carga
6	$- P_{Ch}$	Descarga

Tabla 14 - Consignas del bloque de SC según los estados del control

Sobre estos estados, hemos añadido un nuevo lazo de control que tiene en cuenta el SoC de los SC, no permitiéndoles cargarse por encima del 100%. A este estado en que el control limita la recarga de los SC, le llamamos Estado 7.

10.5. METODOLOGÍAS DE DIMENSIONADO DEL HESS

Al tratarse de un sistema con tecnologías cuyas propiedades son prácticamente inversas y que su perfil de trabajo va a ser virtualmente continuo en numerosas casuísticas difícilmente resumibles y/o simulables, la especificación de las características de la batería y del bloque de SC del HESS es esencial que esté realizada bajo un criterio específico. El dimensionado y justificación del mismo no ha sido un punto extendido en los estudios sobre HESS encontrados, incluso en donde había ejemplos empíricos no se entraba a justificar este punto.

Es clara la evidencia de que añadir un bloque de SC al que sería el bloque de batería ya dimensionado bajo los criterios generales de un ESS (sistema no-híbrido), tiene implicaciones en el criterio de diseño de comodidad, debido al volumen y, sobretodo, al peso añadido al vehículo, por la implicación de tal característica en las ecuaciones del modelo dinámico.

En este estudio se utilizarán dos metodologías de dimensionado resumibles como:

- Sustitución de masa de batería por la propia en SC para un vehículo eléctrico de gama y autonomía media de referencia actual. Metodología basada en la tesis doctoral (Moreno-torres 2016) de la UPM. Nos referiremos a esta metodología como "Dimensionado tipo 1".

- Reducción del bloque de baterías de los vehículos de referencia para asumir la futura escasez de Litio ante la demanda esperada y los recursos/reservas del mineral detalladas en el apartado 5.7. A su vez, el bloque de SC será masa añadida al bloque de baterías. Nos referiremos a esta metodología como “Dimensionado tipo 2”.

10.5.1. DIMENSIONADO TIPO 1

Para no comprometer el criterio de diseño de comodidad ante las necesidades actuales, esta metodología de dimensionado parte en base al HybPer (%), siendo el “hybridization percentage”, que especifica la masa de batería propia del ESS que ha sido sustituida por el bloque de SC del HESS (la masa restante sigue siendo de batería). Este valor presenta la siguiente ecuación:

$$HybPer (\%) = \frac{m_{SC}(kg)}{m_{BT}(kg)+m_{SC}(kg)} \times 100 \quad (24)$$

El denominador de la ecuación 24 corresponde a la masa inicial del vehículo antes de la sustitución. Esta ponderación de masa permite dimensionar fácilmente los dos bloques en base a la densidad energética y específica de ambas tecnologías para después distribuir los valores de energía y potencia resultante en una configuración de celdas a tensión nominal en serie hasta asimilar la tensión del bus de continua deseada y el resto de celdas en paralelo para conseguir la capacidad o intensidad correspondiente.

Tomando como ley de control explicada en el apartado 10.4, el aumento del HybPer tiene implicaciones críticas en términos energéticos y de potencia; la sustitución en masa de 1 kg de batería por SC significa que esa porción de masa tendrá 20-30 veces menos energía (Wh) pero alrededor de 20 veces más potencia disponible (W). La energía en SC es interesante aumentarla para conseguir garantizar un tiempo mínimo de pico cubierto, del orden de algunos segundos. Por otra parte, cuanto mayor sea el HybPer menor será el SoC final del bloque de baterías del HESS al final del mismo ciclo de conducción/descarga.

Es muy interesante fijarse en la tesis comentada (Moreno-torres 2016) debido a su análisis diferencial de la implicación del dimensionado en términos de eficiencia y vida útil del bloque de baterías. Para la misma ley de control que este estudio, se detalla la evolución del término de eficiencia y la degradación de las baterías a lo largo de 1000 ciclos de conducción Artemis, conforme el HybPer se ve incrementado.

La eficiencia se establece en cuanto a las pérdidas térmicas debido a las impedancias internas, factores de convección y conducción (la radiación se desprecia), debido a la variación de la temperatura del bloque de baterías (se desprecian las pérdidas del bloque de SC) a lo largo del perfil de conducción Artemis, resumible a un perfil de descarga a corriente variable con una duración de 3255s (54min).

Este ciclo de conducción no está aceptado ni estandarizado por organismos legislativos, por ello en este estudio no se considera este ciclo de conducción para ningún vehículo. El ciclo Artemis sí se ha utilizado para contrastar resultados de nuestro HESS en Simulink con las gráficas de resultados de la tesis detallada, datos tales como: modelo dinámico, corrientes de descarga, temperatura y SoC del bloque de baterías.

Su análisis establece un 1% medio de mejora en la eficiencia y hasta la mitad de degradación al cabo de 1000 ciclos Artemis (formados por 3 sub-ciclos Artemis Urban). Es remarcable el 1% debido a la escala en la que nos encontramos, donde el margen de mejora tiene un máximo de un 5% en pérdidas (el 1% medio representa un 20% del total de mejoría posible).

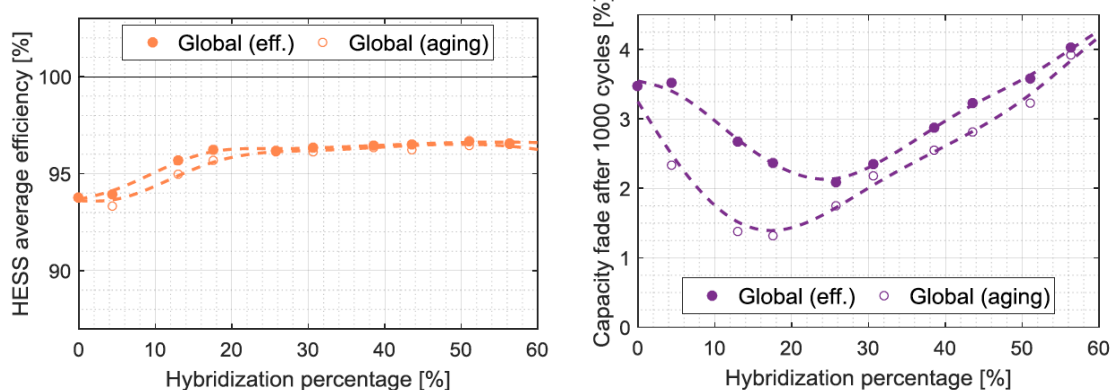


Ilustración 82 - Eficiencia y degradación del sistema HESS según el HybPer para 3 ciclos Artemis Urban consecutivos (1000 secuencias para la degradación). Ley de control optimizada para la mayor eficiencia o la menor degradación en cada análisis (Moreno-torres 2016)

Como vemos en la ilustración 82, alrededor del 10-25% de HybPer es donde se encuentra el máximo de beneficios en ambas características. Comentar que el análisis de la referencia se ha realizado mediante las mismas ecuaciones dinámicas detalladas

en el apartado 8 y con el dimensionado en base a un Mitsubishi i-MiEV de 2015, también la tipología del HESS simulado para tales resultados es la propia a un HESS activo distribuido con un convertidor Buck/Boost dedicado al bloque de SC.

Se han tenido en cuenta los resultados de este estudio para fijar en 22% el valor del HybPer aplicado a los 3 vehículos simulados, debido a que en el artículo (Nájera et al. 2017) donde el mismo autor de la tesis está involucrado, se demuestran resultados muy parecidos para el mismo rango del 10-25% de HybPer, en diferentes ciclos de conducción, aplicado esta vez a un autobús eléctrico, es decir, dos vehículos de formato y dinámicas diferentes han presentado el mismo rango y resultados satisfactorios. Los resultados del 22% de HybPer se detallarán en las tablas de cada vehículo del apartado 12. Se simularán diversos valores de P_{\min} para cada vehículo, viendo el efecto en las características del sistema.

10.5.2. DIMENSIONADO TIPO 2

Durante las simulaciones de los sistemas bajo el Dimensionado Tipo 1 se ha observado que las baterías de los vehículos de referencia son de muy alta capacidad (mayor energía) comparadas con las simuladas en la tesis y/o artículos de las referencias de la metodología anterior. Al ser capacidades elevadas, aun aplicando el HybPer con la disminución de capacidad consecuente, resultan ser baterías que se descargan a un máximo de 1,5C en muy pocos instantes, esto se establece como un “inconveniente” ante la viabilidad del Dimensionado Tipo 2 y la ley de control aplicada, en las conclusiones se detallaran estas observaciones.

Más aún, teniendo en cuenta la ilustración 19 del apartado 5.7 (Kushnir y Sandén 2012) dónde tomando 36 kWh de baterías aplicadas a un escenario del 95% de adopción de EVs para la descarbonización propia a los planes para 2050, ni con un 80% de reciclaje del mineral, al cabo de 10 años de vida útil por vehículo, estaremos exentos de una problemática seria ante los recursos y reservas de Li en la segunda mitad del siglo. Por ello, hemos visto aún más exageradas las capacidades del Tesla Model 3 y el Irizar ie bus 12 (54 kWh y 350 kWh respectivamente) para la situación esperada dentro de 30-40 años.

Estas altas capacidades parten de la problemática actual de los puntos de recarga, tiempo de recarga y, por lo tanto, autonomía. Estos puntos han sido explicados en el criterio de diseño de comodidad, apartado 10.1.1; aun así este problema actual debe solucionarse para aligerar la futura problemática de escasez de Li comentada.

Se ha comprobado que en la ilustración 19 del apartado 5.7 la demanda kg/kWh de Li es lineal entre los dos ejes de las ordenadas que representan dos valores energéticos de baterías asimilados ante toda la demanda de vehículos estudiada en (Kushnir y Sandén 2012). Esta linealización nos ha permitido escalar la barrera de las 30 Mt (valor que el estudio establece como máximo rentable) de demanda acumulada de Li de forma que, con un 80% de reciclaje, para final de siglo nos encontramos a mitad de la banda amarilla, siendo un escenario plausible. Para trasladar el límite de las 30 Mt los vehículos deberían incorporar una batería media de 21,6 kWh como se resume en la ilustración 83:

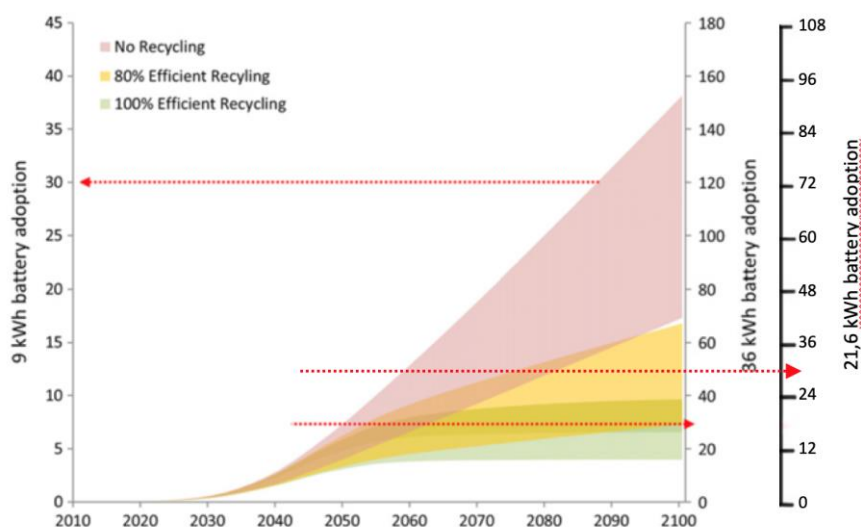


Ilustración 83 - Modificación de la ilustración 20 para escalar la barrera de 30 Mt a la mitad del escenario de demanda acumulada de Li con un 80% de reciclaje, resultando en que la batería de adopción debería ser de 21,6 kWh medios, resultado debido a la linealidad observada en la ilustración original (Kushnir y Sandén 2012) entre los 9 kWh y 36 kWh de ambos ejes

Debido a que el estudio detrás de ilustración 19 se centraba en vehículos del formato tipo coche y se comprueba que los 21,6 kWh son razonables para una autonomía que puede variar entre los 160-200 km según los factores dinámicos, aproximaremos en este estudio a 22 kWh la energía del bloque de baterías del coche simulado bajo el Dimensionado Tipo 2. Tal coche mantendrá las mismas características dinámicas que el Tesla Model 3, excepto la masa como se justificará próximamente.

Esta reducción en la capacidad de la batería ha dejado al hipotético Model 3 del futuro con una pérdida de 206 kg de masa del bloque de baterías (aplicando la densidad media de 155 Wh/kg actual en la química NMC). Esta masa ha sido cubierta por SC en un 25%, 50% y 100% y se ha testado el sistema resultante para una P_{\min} (de la ley de control) equivalente a 1.5C de descarga de la batería de 22 kWh (lo que sería una P_{\min} de 33 kW).

Para el autobús se ha aplicado primeramente la misma proporción de reducción que el coche dejando al hipotético Irizar ie bus 12 del futuro con 142 kWh en el bloque de baterías, siendo una reducción de 1891 kg en el bloque respecto al modelo actual real de referencia (aplicando la densidad media de 110 Wh/kg actual en la química LFP).

Aun así, tomando como referencia a (Ortenzi et al. 2019) vemos la viabilidad de reducir sustancialmente más la energía del bloque de baterías del autobús al aplicar un HESS. Esto es debido a que el estudio sobre un bus urbano de línea con sistema HESS y una infraestructura de recarga de alta potencia en cada parada por pantógrafo (tendencia que ya se está empezando a ver en grandes ciudades) demuestra que si hay recargas de muy alta potencia y SC que puedan recibirla, el autobús puede ver recortada su autonomía, es decir, su bloque de baterías y así también conseguir que la carga del mismo sea más rápida.

Por ello, para el HESS del autobús, la batería la hemos reducido a la misma energía del coche, 22 kWh, viendo también que (Nájera et al. 2017) esta reducción deja -1091 kg de margen que han sido cubiertos en un 50% y 75%; el margen se establece respecto a la referencia ESS del autobús de 142 kWh con el que se comparará en el Dimensionado Tipo 2. Como en el coche, se mantendrán las mismas características dinámicas que el Irizar ie bus 12, excepto la masa, que se justificará próximamente.

Para intentar simular el proceso de recarga por parada se ha modificado el ciclo SORT 2 del autobús sustituyendo aproximadamente el 30% del tiempo de parada del ciclo por un proceso de recarga a potencia constante de 150 kW. Este proceso de carga lo hemos concentrado en los 20 s finales del ciclo donde el vehículo se encuentra parado.

Tanto para el coche como para el autobús se ha visto conveniente añadir una masa de pasajeros al modelo dinámico. Justificamos la decisión debido a que la masa pasa a tener un papel mucho más influyente en la demanda de potencia tras la reducción de la capacidad de los bloques de baterías, tanto en el ESS como el HESS. No es lo mismo añadir a una persona en un vehículo con 350 kWh que en uno de 142 kWh (caso del autobús) aun teniendo en cuenta la pérdida de masa por la diferencia de capacidades. Se ha supuesto una masa media de 60 kg por pasajero, en el coche se han añadido 2 pasajeros y en el autobús 40 pasajeros (un 50% de su aforo); siendo el peso total debido a los pasajeros de 120 kg y 2400 kg respectivamente.

En la moto se ha decidido no aplicar esta metodología de dimensionado debido a que las baterías ya son suficientemente pequeñas y ya se tiene una autonomía “justa” para su uso que, ante una reducción similar del bloque de baterías, dejaría de ser un vehículo con características razonables. Además, la demanda de Li debida a la flota de motos eléctricas en un futuro será forzosamente insignificante ante la del resto de tipologías de vehículos.

11. IMPLEMENTACIÓN PRÁCTICA DEL SISTEMA HESS

Una vez se han explicado individualmente todos los elementos del sistema y la función de cada uno para garantizar el correcto funcionamiento del vehículo, procederemos a analizar el modelo Simulink del sistema HESS en conjunto que hemos utilizado para realizar las simulaciones.

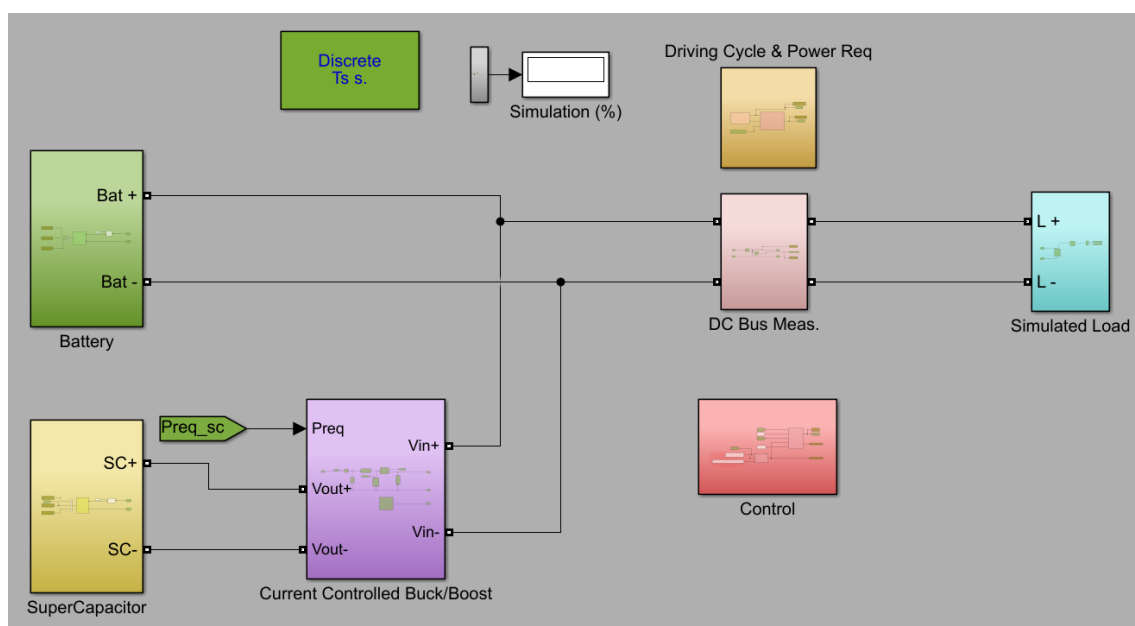


Ilustración 84 - Esquema Simulink implementación HESS

Como hemos comentado anteriormente para nuestro estudio utilizamos la topología de HESS con un solo convertidor DC/DC, controlado por corriente. En cuanto al circuito eléctrico, se conectan en paralelo la batería de Litio y los SC a través del convertidor, junto con subsistema que simula la demanda eléctrica del motor del VE.

El bloque de *Driving Cycle & Power Req* se encarga de parametrizar la demanda de potencia de la carga en función del tipo de vehículo escogido (coche, moto, autobús) y el ciclo de conducción. El subsistema de *Control* realiza un análisis a tiempo real del estado de la carga y mediante la lógica explicada anteriormente, envía una consigna de potencia al convertidor (P_{req_sc}). Finalmente, el *DC Bus Measurement* mide el voltaje y la intensidad del Bus de continua en todo momento.

El sistema está diseñado de tal manera que se adapte a cada vehículo modificando únicamente una serie de parámetros de dimensionado de los componentes, la lógica de control y el sistema eléctrico es el mismo para los tres tipos de vehículos.

11.1. CONSIDERACIONES Y AJUSTE

Primeramente, no se han considerado pérdidas ni rendimientos en el bloque de SC como en muchos de los estudios encontrados, justificándose por el alto rendimiento de los SC y baja dependencia térmica, puntos explicados en el apartado 6.2.

Tanto el bloque de SC como el de BT se han simulado para una temperatura ambiente de 20°C.

Para el bloque de SC se ha tomado la referencia BCAP310 de MAXWELL con la siguiente tabla de características:

Magnitud	Valor	Unidades
Capacitancia	310	F
Tensión nominal	2,7	V
ESR	2,2	mΩ
Corriente continua máxima	41	A
Energía específica	5,2	Wh/kg
Potencia específica	6600	W/kg
Masa	60	g

Tabla 15 - Características del SC BCAP310 de Maxwell utilizado en Simulink

Se han considerado los valores predeterminados del bloque Simulink del SC que no sean la capacitancia, ESR, tensión máxima, número de series y paralelos. Es decir, la pestaña Stern del bloque no se ha modificado y aparece así:

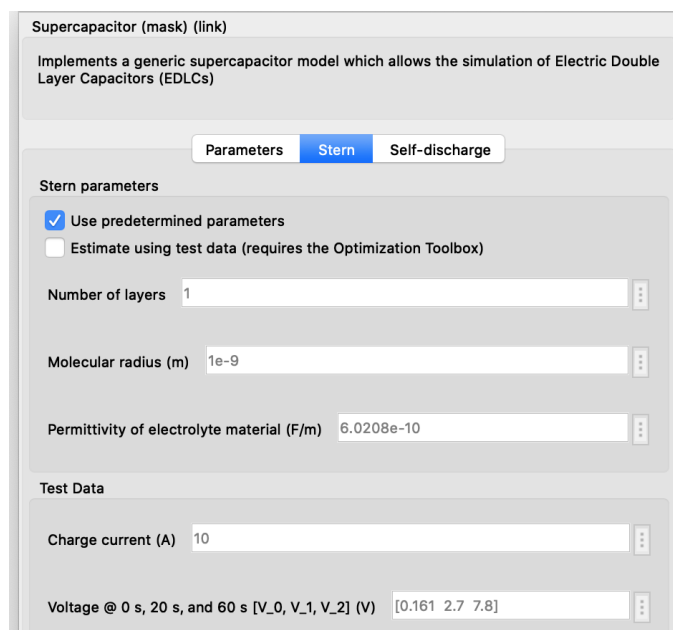


Ilustración 85 - Pestaña Stern del bloque de Simulink de SC con valores predeterminados

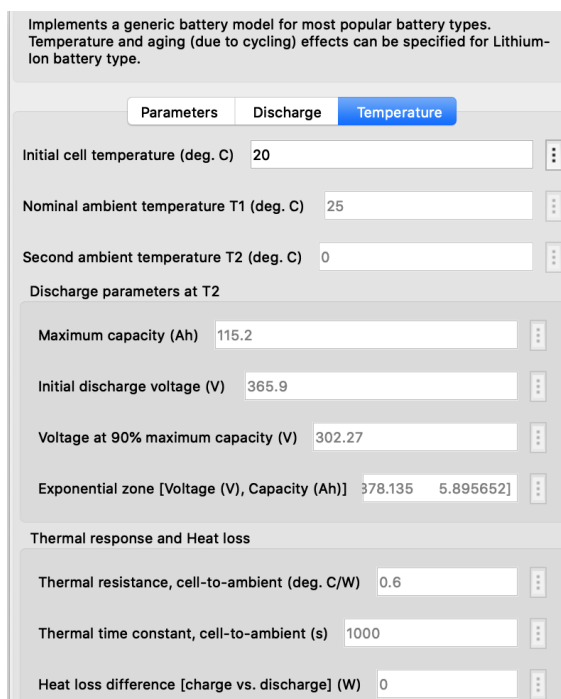
Se ha observado que el tiempo de carga del bloque es mayor al que debería ser en el SC real con 5,2 Wh/kg. Esto se puede justificar por qué en el bloque Simulink en ningún parámetro se indica la masa del SC y por ello de intuye que el modelo simula un SC con una densidad energética mayor (que conlleva un mayor tiempo de carga por unidad de masa o SC).

Para paliar esta diferencia se deberían modificar los valores de la pestaña Stern con valores de fabricante que no tenemos, aun así se ha observado que la diferencia es constante únicamente dependiente de la temperatura. El modelo Simulink muestra un tiempo de recarga 2,0067 y 2.0126 veces mayor a 0 K y 20°C, respectivamente, que los propios para una densidad energética de 5,2 Wh/kg (propia del BCAP310) lo que significa que la densidad energética del bloque de SC con la pestaña Stern predeterminada resulta ser de 10.0630 Wh/kg a 20°C.

La solución que se ha planteado ha sido aceptar la densidad de 10.0630 Wh/kg y su tiempo de recarga mayor para cuando la recarga proviene del bloque de baterías, en caso de aplicar potencias de carga externas como en el autobús se ha multiplicado internamente el valor de potencia teórico por 2.0126 para compensar tal diferencia.

Para cualquier caso de recarga del bloque de SC se ha establecido como límite los 41 A de carga continua por SC. Teniendo en cuenta que puede soportar hasta 250 A hemos visto que con las configuraciones resultantes en cada vehículo los 41 A ya resultan mucho más que suficientes.

Se ha simulado la temperatura del bloque de baterías con la mayoría de los valores térmicos predeterminados por el *preset* incluido en el bloque original de Matlab de “3.3 V 2.0 Ah (LiFePO4)” que se muestran así:



Implements a generic battery model for most popular battery types. Temperature and aging (due to cycling) effects can be specified for Lithium-ion battery type.

Parameters Discharge **Temperature**

Initial cell temperature (deg. C) 20

Nominal ambient temperature T1 (deg. C) 25

Second ambient temperature T2 (deg. C) 0

Discharge parameters at T2

Maximum capacity (Ah) 115.2

Initial discharge voltage (V) 365.9

Voltage at 90% maximum capacity (V) 302.27

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)] 378.135 5.895652

Thermal response and Heat loss

Thermal resistance, cell-to-ambient (deg. C/W) 0.6

Thermal time constant, cell-to-ambient (s) 1000

Heat loss difference [charge vs. discharge] (W) 0

Ilustración 86 - Parámetros térmicos predeterminados por el *preset* LFP del bloque Simulink de batería

Contrastando resultados de temperatura con (Moreno-torres 2016) exigiendo exactamente la misma demanda por celda, siendo la misma química y capacidad se observó que el modelo Simulink no variaba la temperatura más de 1°C en contraste con los 15-18 de incremento máximo esperado como tampoco se veía la correlación del perfil de temperatura con el perfil de corriente aplicada. Por ello, basándonos en (Mendoza y Fathy 2014) se han modificado la constante térmica (*cell to ambient*) a 256,41 s y así se ha obtenido un error máximo de 3°C respecto a la tesis doctoral de referencia.

Se ha simulado la temperatura a nivel de celda asumiéndola como representativa de la temperatura de la batería entera, sin considerar el efecto de la agrupación de las celdas.

Una vez que se comprobó que la demanda establecida por las ecuaciones dinámicas y potencia teórica resultante en varios ensayos eran con exactitud el mismo consumo que con el modelo Simulink del motor, se pasó a idealizar el motor como una fuente de corriente programable para así reducir substancialmente el tiempo de simulación. Esta fuente se puede observar como el bloque Simulated Load de la ilustración 84.

Se ha tomado la tensión de la batería de los vehículos de referencia como la tensión del

bus de continua, pertinente a la del bloque de batería para todos los ensayos realizados. No se consideran pérdidas del convertidor de potencia o el convertidor DC/DC debido que suelen tener rendimientos por encima del 90% y pueden estar refrigerados activamente. No se consideran consumos por sistemas de refrigeración/calefacción.

No se consideran sistemas de balanceado de SC o batería.

12. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados de las simulaciones, para un sistema ESS simple comparado al sistema HESS, del que se han realizado tres ensayos a diferentes corrientes de descarga de la batería. Como se explica en el apartado 10.1, el ajuste por parte del investigador se realiza actuando sobre una P_{MIN} , que corresponde con la potencia a la que se descargaría la batería a una corriente constante deseada, y que en el control es el primer paso de decisión para activar o desactivar los condensadores.

Para el primer dimensionado, viendo que en el sistema ESS las corrientes de descarga no llegan a 1C, se decide ensayar intentado que la batería se descargue a diversos C de descarga, los que hemos creído que aportan resultados más favorables.

En el segundo dimensionado, se ensayan distintas ratios de descarga dependiendo del vehículo. Se han realizado multitud de simulaciones intentando encontrar la ratio óptima si atendemos a criterios de SoC final de la batería, utilidad de los SC y temperatura y degradación de la celda.

Primero vamos a detallar los parámetros correspondientes a cada vehículo según este dimensionado para después analizar los resultados.

La notación utilizada en las gráficas se codifica como:

- E / H para ESS y HESS.
- dim1 y dim 2 para los dimensionados. dim3 es lo mismo que dim2.
- X C: Donde X es un número. Corresponde a la corriente de descarga deseada.
- Y mm: Donde Y es un número. Corresponde al margen de masa (apartado 12.2)

12.1. DIMENSIONADO TIPO 1

El dimensionado para un 22% del HybPer deja las siguientes tablas de características para los HESS aplicados, los ESS con que se contrastaran presentan las características del apartado 9, la tensión de los bloques de baterías recordamos que no se han modificado respecto al sistema ESS.

AUTOBÚS	Bloque	Magnitud	Valor	Unidades
	BT	Energía	273	kWh
		Capacidad	390	Ah
	SC	Tensión máxima Ns	465	V
		Ns	172	-
		Tensión máxima 1s	2,7	V
		Tensión mínima (para ley de control)	186	V
		Np	68	-
		Capacitancia NsNp	122	F
		Energía NsNp	3,64	kWh
ESR NsNp		5,6	mΩ	
Corriente continua máxima NsNp		2780	A	
Unidades NsNp	11667	-		

Tabla 16 - Características del sistema HESS para el autobús bajo la metodología Dimensionado Tipo 1

COCHE	Bloque	Magnitud	Valor	Unidades
	BT	Energía	42	kWh
		Capacidad	120	Ah
	SC	Tensión máxima Ns	232	V
		Ns	86	-
		Tensión máxima 1s	2,7	V
		Tensión mínima (para ley de control)	93	V
		Np	15	-
		Capacitancia NsNp	53	F
		Energía NsNp	0,4	kWh
ESR NsNp		12,7	mΩ	
Corriente continua máxima NsNp		609	A	
Unidades NsNp	1277	-		

Tabla 17 - Características del sistema HESS para el coche bajo la metodología Dimensionado Tipo 1

MOTO	Bloque	Magnitud	Valor	Unidades
	BT	Energía	9,8	kWh
		Capacidad	96	Ah
	SC	Tensión máxima Ns	68	V
		Ns	25	-
		Tensión máxima 1s	2,7	V
		Tensión mínima (para ley de control)	27	V
		Np	12	-
		Capacitancia NsNp	147	F
		Energía NsNp	0,09	kWh
ESR NsNp		4,6	mΩ	
Corriente continua máxima NsNp		487	A	
Unidades NsNp	298	-		

Tabla 18 - Características del sistema HESS para la moto bajo la metodología Dimensionado Tipo 1

Recordar también que en esta metodología no se han modificado las variables del modelo dinámico respecto a las propias en el apartado 9.

Pasamos entonces a discutir los resultados de cada sistema diferenciando por vehículo.

12.1.1. AUTOBÚS

Se han analizado varios ciclos SORT 2, obteniendo como resultado que con el modelo dinámico implementado se consume 0.9197 kWh por ciclo. Si tenemos en cuenta que el sistema ESS (con la batería original) tiene una capacidad de 350 kWh, debería tener energía para 380.56 ciclos SORT 2, que multiplicados por los 920m de cada ciclo coinciden con los 350 km de autonomía proporcionados por el fabricante.

Esto nos permite dar por bueno el modelo dinámico de este vehículo y permite asegurar la aplicación dinámica de los resultados.

Comenzaremos atendiendo al estado de carga de la batería, pero es importante tener en cuenta que si bien está pensada para 380 ciclos, solo mostramos 2 (368 segundos). Es por ello que el porcentaje de descarga es mínimo, manteniéndose la batería a un SoC muy alto en todos los casos.

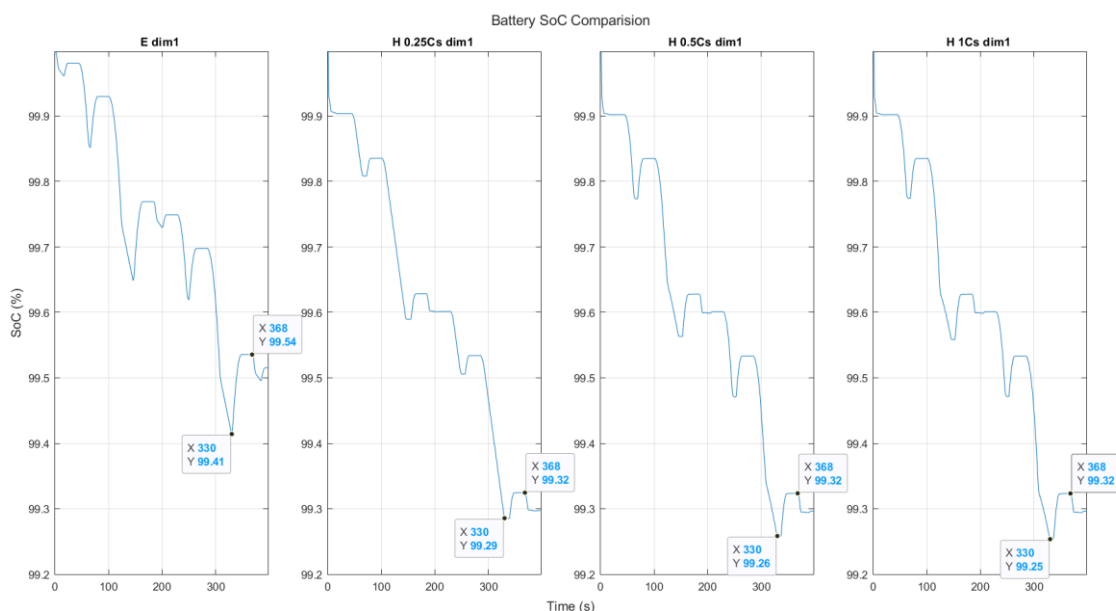


Ilustración 87 - SoC de la batería del autobús durante dos ciclos para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Lo primero que observamos es que en el caso del ESS el SoC final del ciclo es prácticamente ligeramente superior al de los sistemas HESS (0.1% de SoC). Recordar que en el dimensionado Tipo 1 se ha reducido masa de la batería (y por tanto capacidad, ya que obviamente la tensión se mantiene) y por tanto resulta significativo que aun con una batería de menor capacidad el SoC sea prácticamente igual. Las diferencias entre la variación del SoC a distintos C (en los ensayos HESS) son mínimas y pueden deberse a que los condensadores no trabajan lo mismo para diferentes corrientes, cosa que se aprecia muy bien en la ilustración 88, en la que se muestra la corriente entregada por la batería.

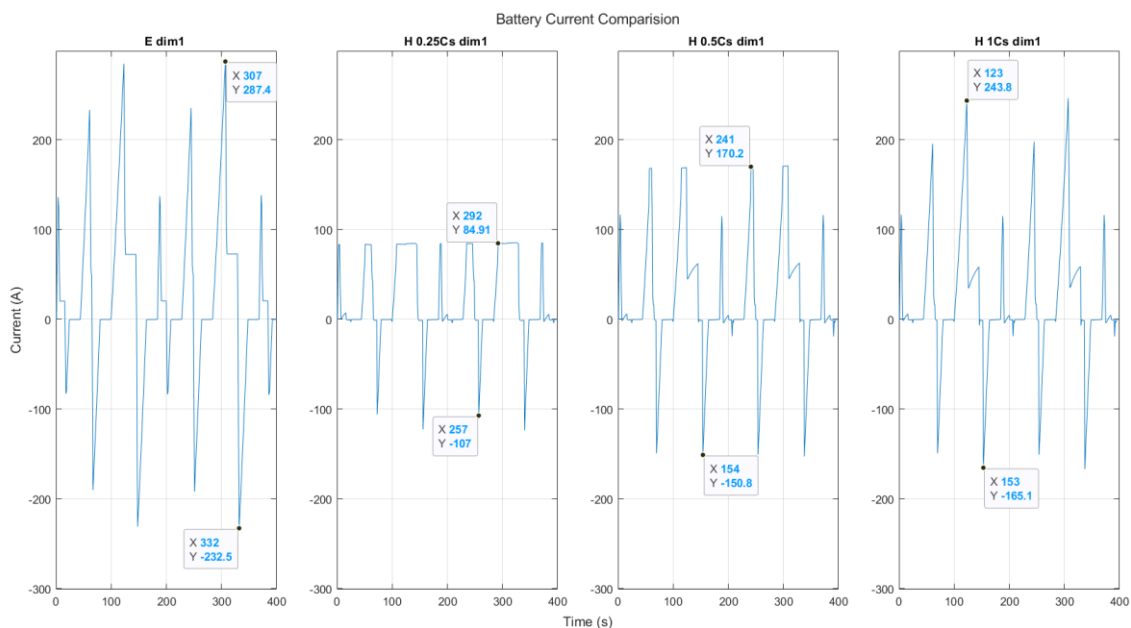


Ilustración 88 - Corriente de la batería del autobús para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Como se puede observar en la Ilustración 88 que la corriente de la batería en el sistema ESS tiene mucha más variación que en los ensayos del sistema HESS. Al parar un poco más de atención, y recordando que la capacidad de la batería HESS en este dimensionado es de 390 Ah, se aprecia claramente que la máxima corriente proporcionada por la batería corresponde de manera bastante exacta con la fijada a través del control mediante la limitación de la potencia de descarga de la batería. Puesto que la batería nunca llega a descargarse a 1C, es natural que para la gráfica de dicho ensayo la corriente no sea tan elevada.

Por otra parte, se aprecia muy claramente el efecto de los SC en la recarga: la batería se recarga significativamente menos en el HESS, si comparamos con el sistema ESS. También coincide con lo esperado que a medida que aumenta la corriente de descarga deseada para la batería aumenta el valor de la corriente regenerada. La explicación de la gran diferencia entre la corriente regenerada por la batería en el caso en que esta se descarga a 0.25C consiste en que los SC están más descargados y por tanto absorben más energía en la regeneración.

Antes de pasar a analizar el comportamiento del bloque de SC, nos detendremos a mencionar que la tensión de la batería se encuentra durante los dos primeros ciclos en la parte exponencial de la curva, siempre por encima de la tensión nominal al estar cargadas al 100% en un inicio. Esta gráfica y la correspondiente al bloque de SC, se pueden consultar en las ilustraciones 1 y 9 del anexo I.

Analizando el estado de carga del bloque de SC, como podemos ver en la ilustración 89, es patente que no solo los condensadores apenas se descargan, si no que recuperan su carga en poco tiempo. También se aprecia la repetibilidad del ciclo, que como vemos en el apartado 8.2.2, está compuesto de trapecios en los que la velocidad aumenta, se mantiene y descende otra vez a cero. Es en ese tramo de deceleración en que los SC se cargan. Sin embargo, puede resultar llamativo que se carguen tanto como se descarguen, pero la explicación de este hecho reside en que mientras para la descarga la batería entrega una potencia fijada, en la regeneración se prioriza la carga de los SC.

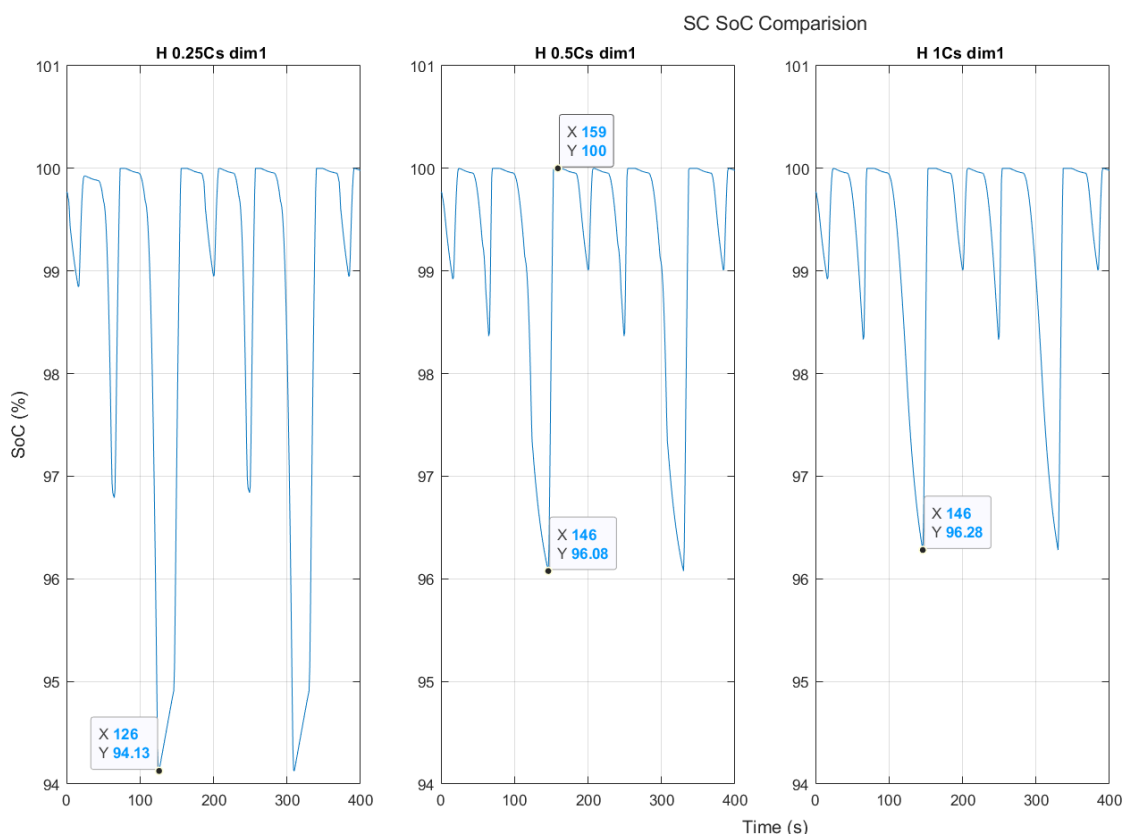


Ilustración 89 - SoC del bloque de SC del autobús para el dimensionado Tipo 1. Solo HESS

Por otra parte, se podría pensar que el bloque de SC no participa en el suministro de potencia, ya que una descarga de máximo el 6% del SoC puede parecer poco, pero si se observa la ilustración 10 del anexo I, en la que se muestra la corriente de los SC respecto al tiempo, se dan picos de hasta -400 A en los instantes en que el SoC aumenta, y también entregan picos de hasta 380 A en el caso de la descarga de la batería a 0.25C.

Sin embargo, sí que se puede concluir que el potencial de los SC está desaprovechado. Por este motivo se plantea el dimensionado Tipo 2, en el que se espera obtener mejores resultados.

Vamos a ver ahora una gráfica con el balance de potencias para cada caso, es decir, la potencia total frente a la proporcionada por SC y batería. Es fácil observar en la ilustración 90 que la potencia requerida por el ciclo es la suma de la potencia entregada entre la batería y los SC, y que a medida que va aumentando la corriente demandada a la batería, disminuye la de los SC. Una vez más se aprecia como la regeneración es absorbida íntegramente por los SC.

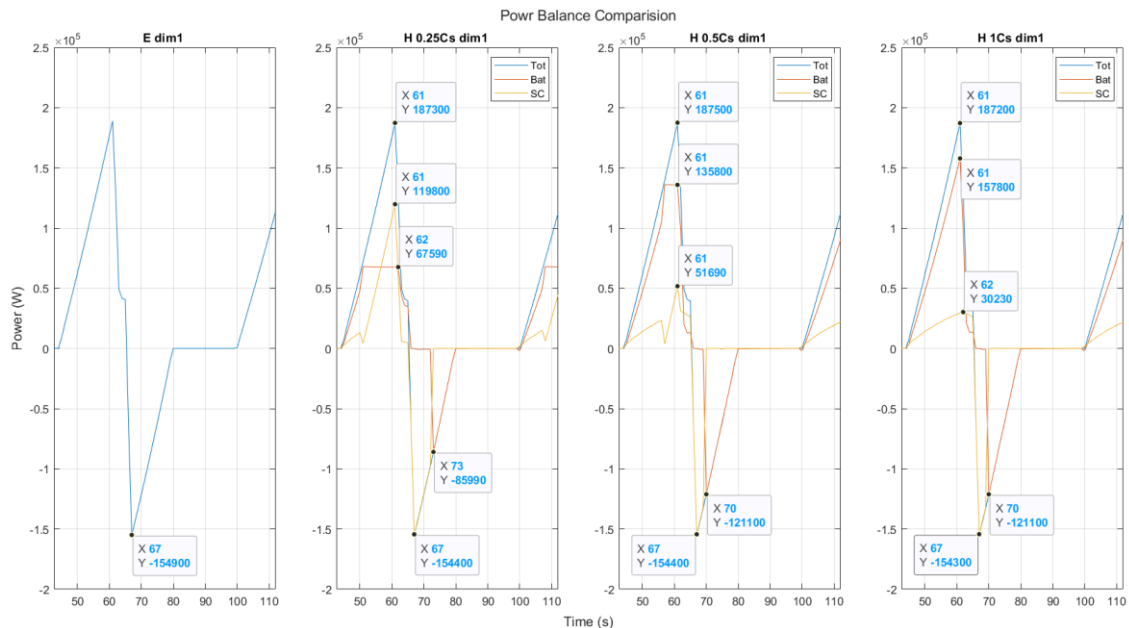


Ilustración 90 - Balance de potencias del autobús para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Es interesante la gráfica de la temperatura (ilustración 91), en la que se muestra la evolución de la temperatura de la celda a lo largo de los ciclos.

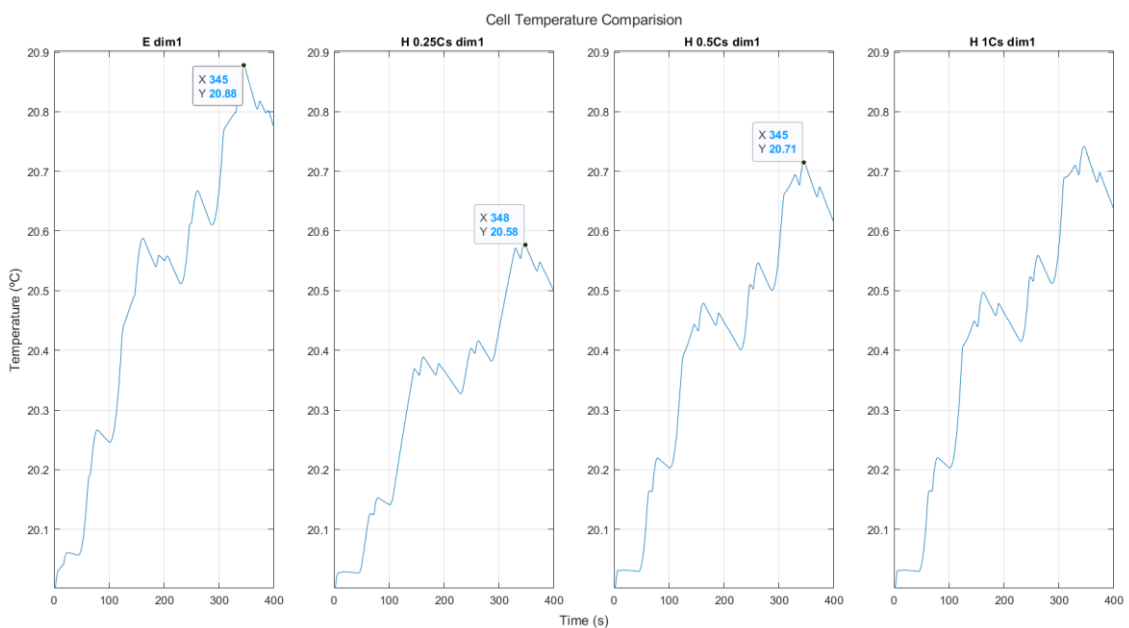


Ilustración 91 - Temperatura de la celda del autobús para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Primero mencionar que el sistema se comporta como se preveía, ya que la implementación del HESS influye de manera positiva en la temperatura y que como es de esperar la temperatura aumenta a medida de que se le exige más a la batería.

El escaso incremento de la temperatura se explica en las bajas corrientes de descarga, ya que una de las principales pérdidas es debido al efecto Joule. Para corroborar esta afirmación, veamos la ilustración 92, donde se muestra el ratio de descarga de la batería en forma de histograma. En el eje X vemos las distintas ratios de descarga agrupadas cada 0,1C y en el eje Y la frecuencia en tanto por ciento en que ocurren durante un ciclo.

Se aprecia una mayor variedad en el caso del sistema ESS, y la explicación de dicho fenómeno es debida a la acción de los SC: se aprecia claramente como absorben los picos de corriente tanto para la regeneración de energía como en instantes de aceleración elevada.

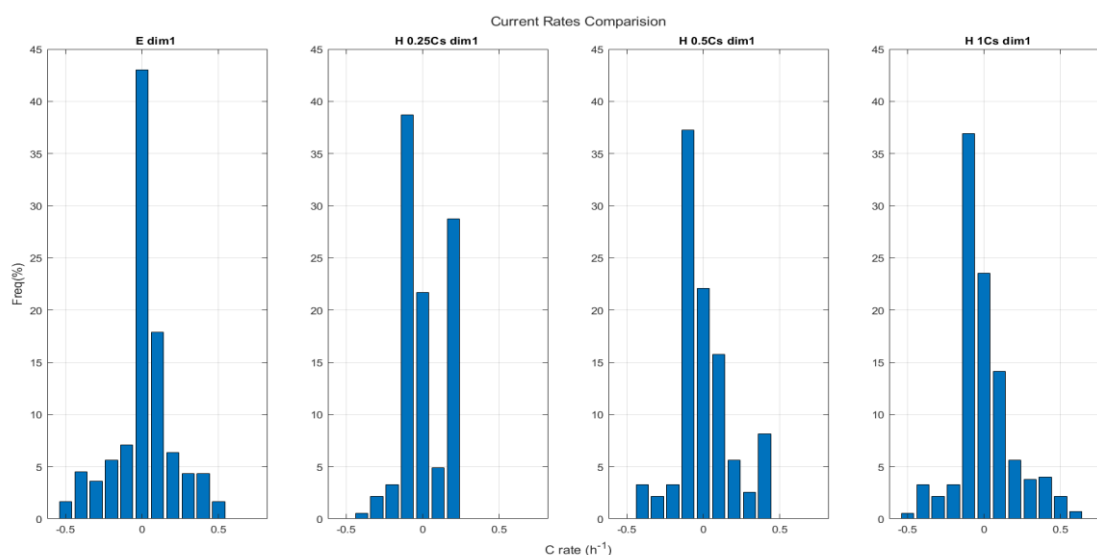


Ilustración 92 - Tasas de descarga de la batería del autobús para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Sin embargo, a primera vista resulta curioso que en los diferentes ensayos del HESS la frecuencia de la ratio máxima de descarga aumenta respecto a ese mismo ratio en el caso ESS. Lo que no resulta curioso, si no esperable, es que la ratio demandada de descarga (el correspondiente a la P_{min} del control) sea el máximo ratio de descarga. La explicación del aumento de esa frecuencia es debido a que a corrientes mayores que la deseada, el control impone la acción del bloque de SC, por lo que como mucho, la batería entregará la potencia deseada.

En el caso en que la potencia deseada corresponde a 1C de descarga lo expuesto no se cumple ya que directamente la batería no llega a tener que descargarse a 1C. En este caso, como ya se ha visto en las gráficas anteriores, los SC trabajan menos y por tanto es más probable caer en el estado 6, en el que los SC cargan ligeramente la batería.

12.1.2. COCHE

La simulación del coche se ha realizado utilizando el ciclo de conducción WLTP y analizando los resultados obtenidos comparándolos en todo momento con el modelo de referencia ESS (sin bloque de SC). Siguiendo el dimensionado Tipo 1 explicado anteriormente, se fijarán diferentes valores de P_{min} para que el límite de descarga de la batería quede fijado a 0.85 y 1C.

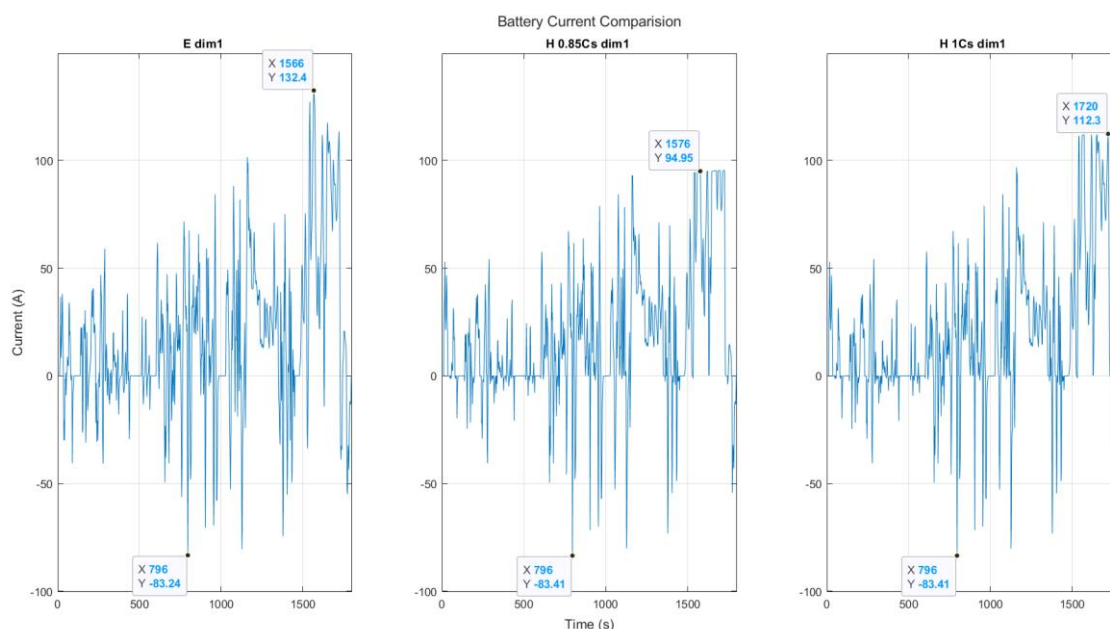


Ilustración 93 - Corriente de la batería del coche para del dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

En el sistema ESS la batería tiene que suministrar toda la corriente al motor y absorber toda la que éste le entregue, llegando a suministrar picos de 132A y a recibir hasta 83A de máxima.

En la descarga de los ensayos del modelo HESS se aprecia como la corriente de descarga deseada se recorta en sus valores máximos, según el límite establecido por el parámetro P_{min} del control.

Respecto a la regeneración, apreciamos como la batería se carga a potencias menores de 1C. El motivo por el que no existe una gran diferencia entre el ensayo ESS y el HESS,

es que como veremos en la ilustración 98, los SC no se descargan demasiado y por tanto no absorben toda la carga.

Veamos ahora la ratio de descarga de la batería: resulta llamativo que entre el ensayo del ESS y el del HESS a 1C aumente la frecuencia a ratios de descarga cercanos al máximo. También se puede observar un perfil de trabajo más continuo, puesto que la frecuencia a 0C se ha visto reducida en un 6%. La consecuencia directa de este hecho es que entra más veces en el estado 6, en que la batería carga al SC.

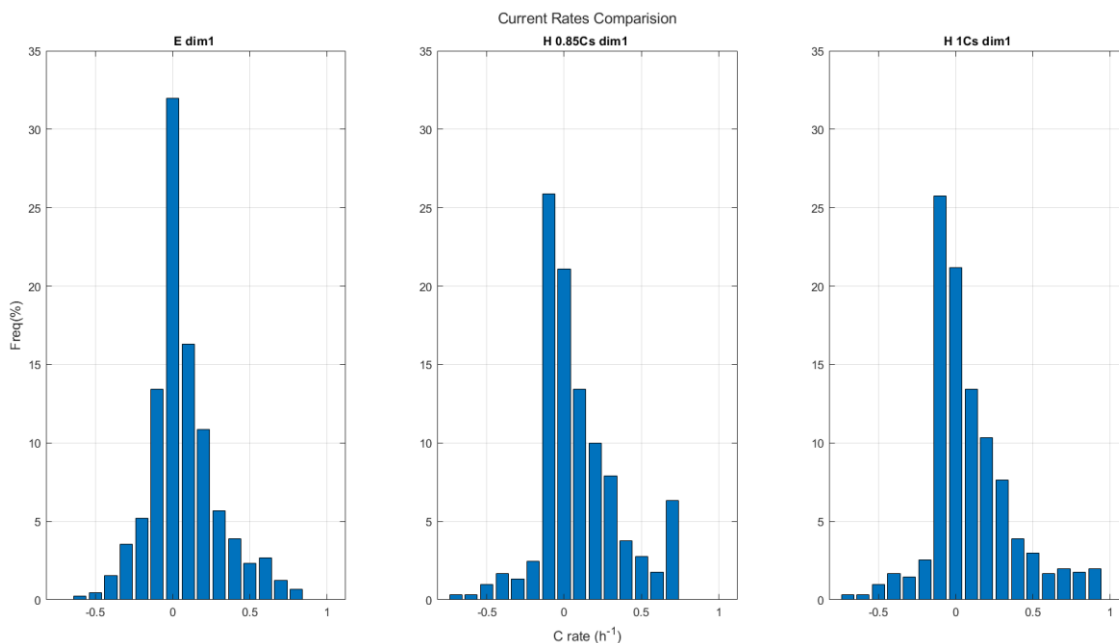


Ilustración 94 - Ratio de descarga de la batería del coche para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

La ilustración 95 muestra el SoC de la batería:

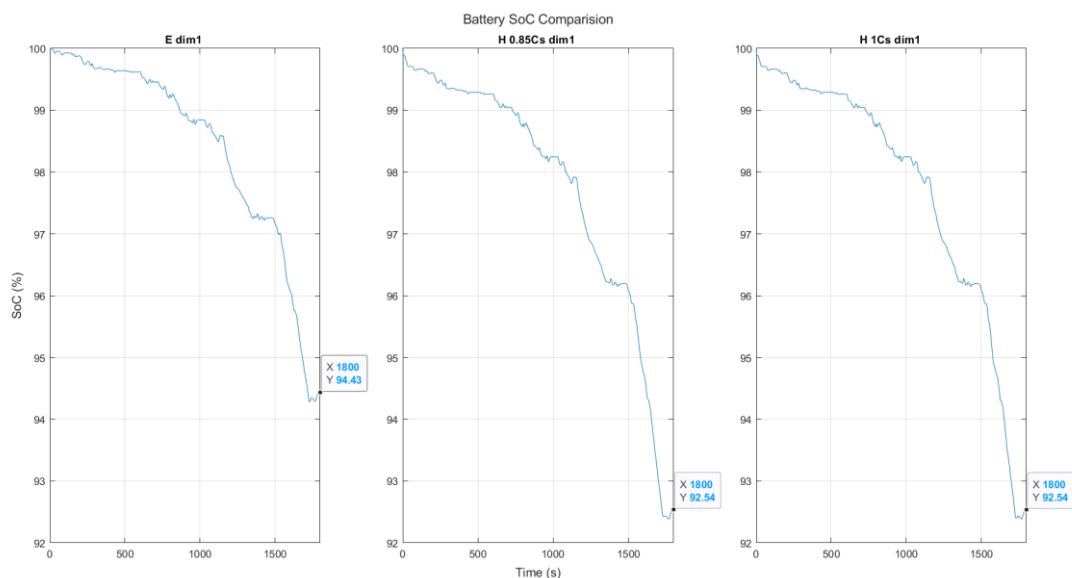


Ilustración 95 - SoC de la batería del coche para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Respecto al SoC, el sistema ESS termina el ciclo con un valor de 94.43% y se aprecia como en la primera mitad del ciclo ésta se descarga de manera más pausada coincidiendo con las velocidades baja y media del vehículo. En el último tramo del ciclo, a velocidades altas, se encuentra el mayor decremento del SoC.

En cuanto al modelo HESS, tanto el modelo a 0.85C como a 1C acaban el ciclo habiéndose descargado un 1,89% respecto al modelo ESS siguiendo la misma curva de descarga según la velocidad. Se puede concluir que no existe diferencia apreciable en cuanto al SoC entre descargar a 0.85C y a 1C.

Si atendemos a la temperatura de la celda (ilustración 96), se aprecia que tanto la temperatura máxima como la final son superiores en el HESS respecto al ESS. Esto se debe a que en el HESS la batería carga a los SC.

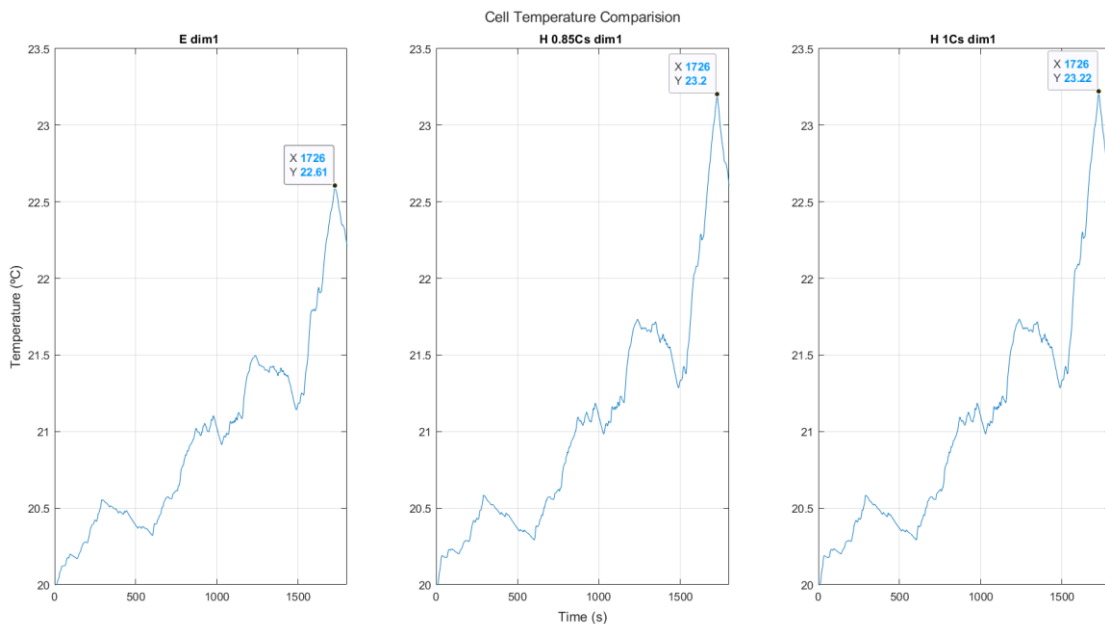


Ilustración 96 - Temperatura de la celda del coche para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Es el turno ahora de analizar el comportamiento de los SC.

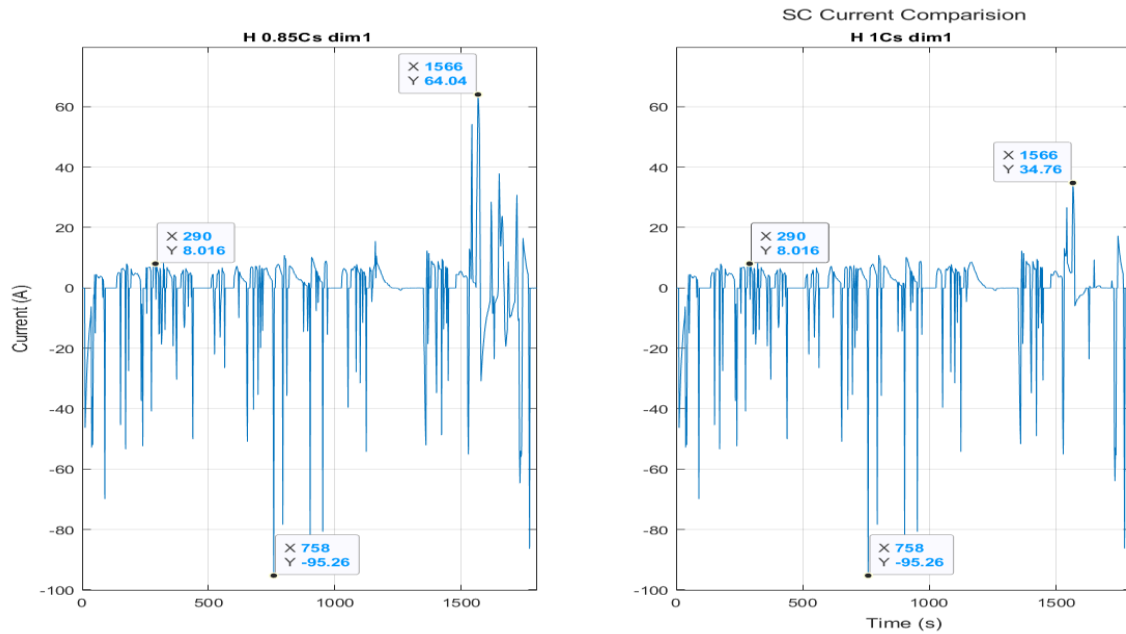


Ilustración 97 - Corriente del SC del coche para el dimensionado Tipo 1. Solo HESS

Se observa el gran peso que tienen los SC en los tramos de regeneración y también que en esta aplicación solo aportan una diferencia en el tramo final del ciclo, a velocidades altas, y siempre teniendo en cuenta que la batería se descarga a un ratio deseado, como en la gráfica H 1C.

En cuanto al SoC de los SC, los resultados concuerdan con el párrafo anterior, solo pudiendo destacar el bajo porcentaje de SoC que pierden durante el ciclo, que recuperan prácticamente al instante.

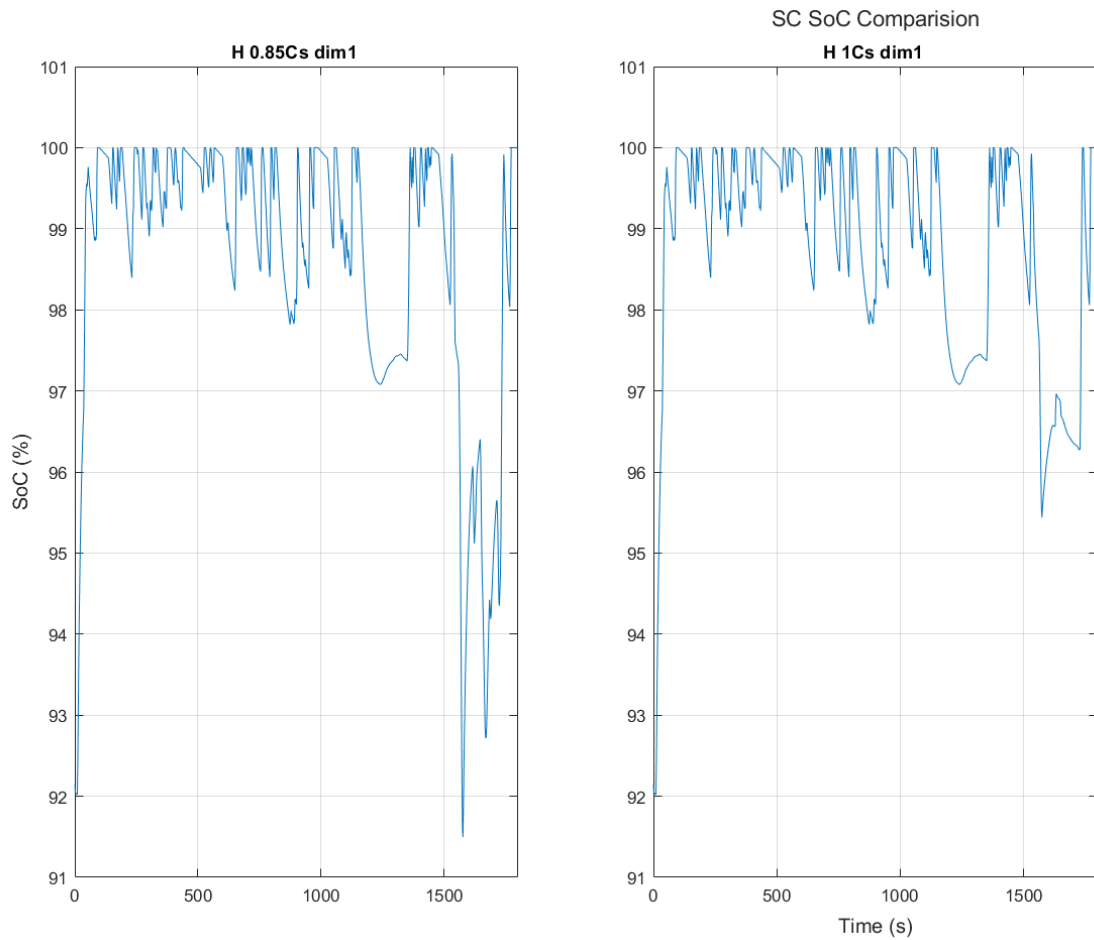


Ilustración 98 - SoC del SC del coche para el dimensionado Tipo 1. Solo HESS.

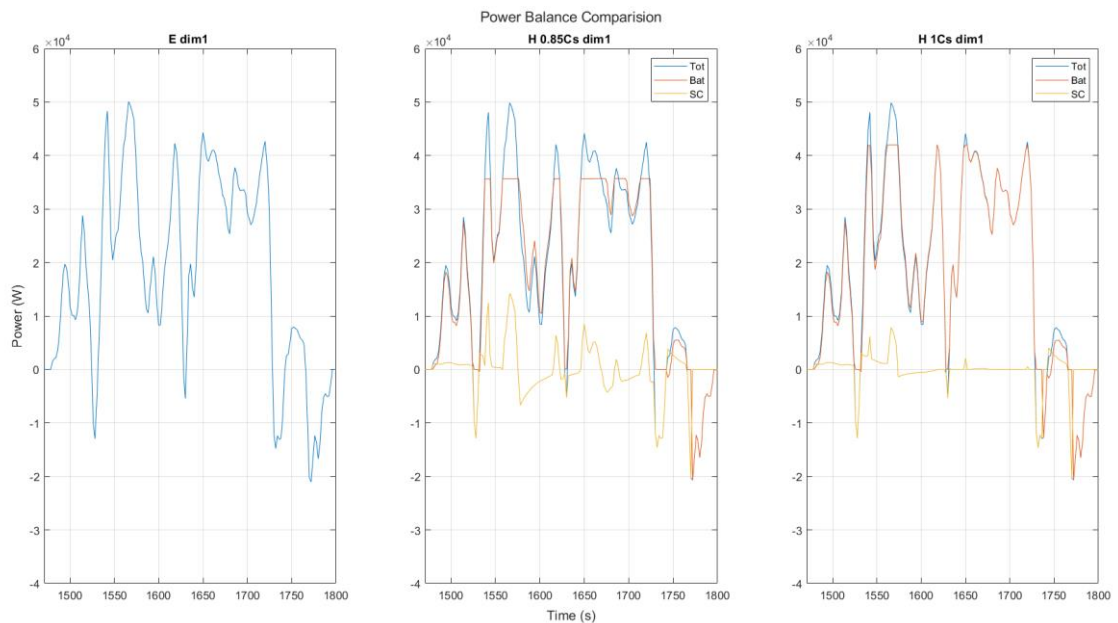


Ilustración 99 - Balance de potencias del coche para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS.

En la ilustración 99 se muestra el detalle del balance de potencias entre el segundo 1500 y el 1800. Apreciamos nuevamente que la potencia total corresponde a la suma de la proporcionada por el SC y la batería. Sin embargo, resulta interesante ver como en

ocasiones (segundo 1670) de la gráfica del ensayo a 0.85C, la batería no solo tiene que aportar la potencia necesaria para cumplir con el requerimiento dinámico si no que además debe mantener dicha potencia para cargar los SC. Este resultado sugiere la necesidad de un ajuste en el control.

12.1.3. MOTO

La simulación de la moto se ha realizado sobre el ciclo WMTC a distintos C de descarga. Los resultados mostrados son los mejores entre todas las ratios ensayados, y corresponden a 0.85C y 1C. Sin embargo, como mostramos a continuación, la viabilidad del sistema HESS requiere un análisis más profundo.

Comenzamos mostrando la corriente de las baterías (ilustración 100). Como en el coche, el bloque de SC absorbe la mayoría de los picos de regeneración y la corriente se ve limitada por la ratio de descarga deseado.

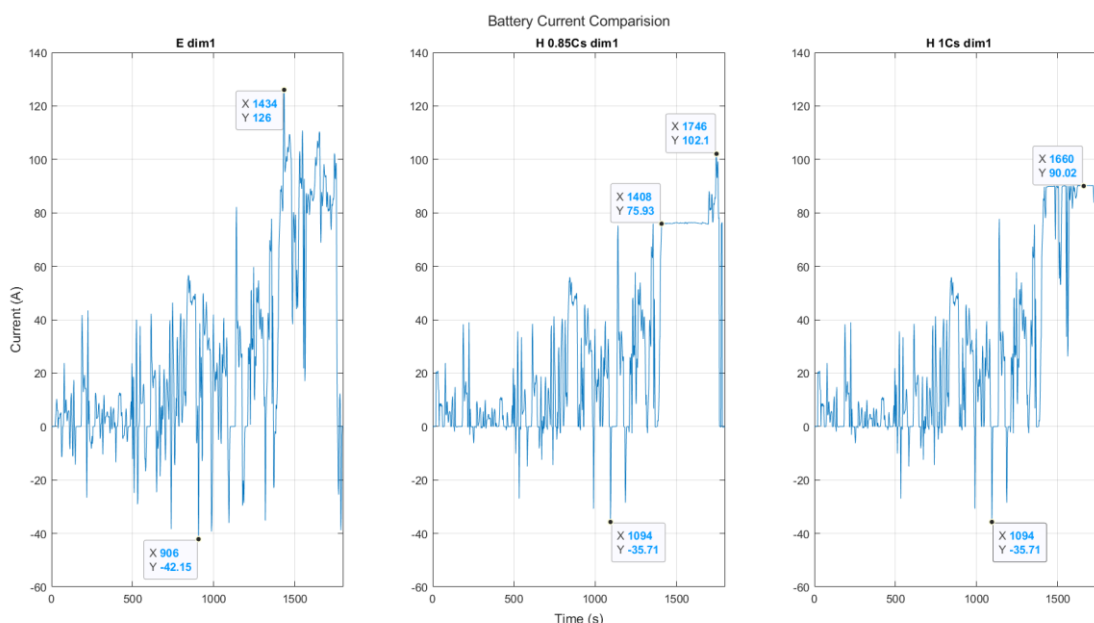


Ilustración 100 - Corriente de la batería de la moto para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Sin embargo, para la descarga a 0,85C, se aprecia al final del ciclo un incremento de la corriente a niveles como los del ESS. Ello es debido a la descarga completa de los SC, como se verá en la ilustración 103.

A continuación, vamos a ver la ilustración 101, en la que se muestra el SoC de la batería.

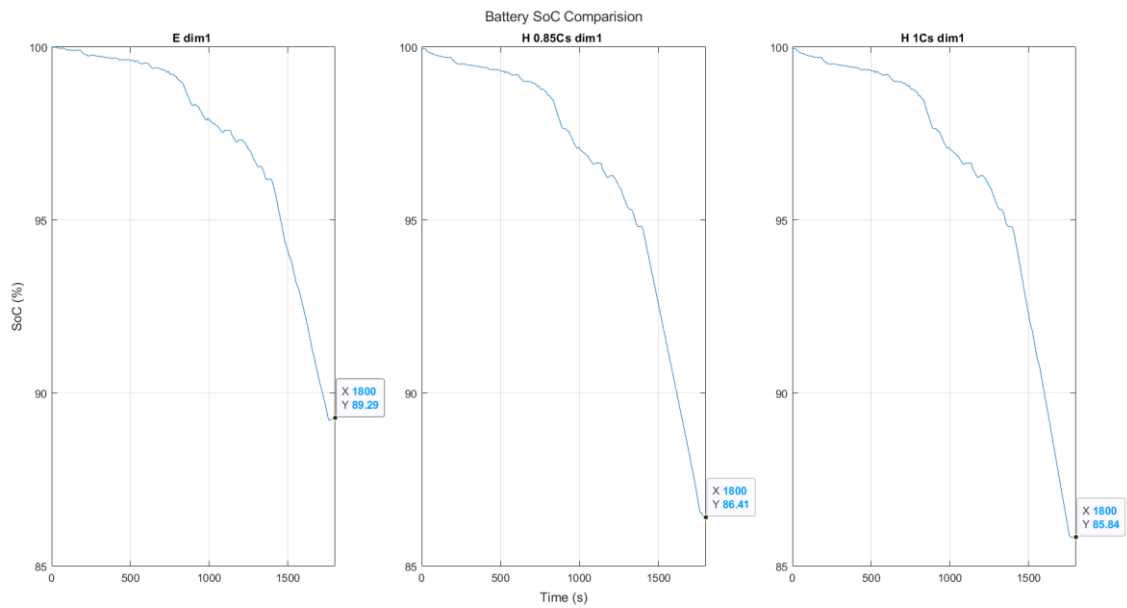


Ilustración 101 - SoC de la batería de la moto para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

En esta ocasión, se ve claramente la diferencia en el SoC final entre el ESS y el HESS, hasta un máximo del 3,45%. No es extraño si recordamos que estamos reduciendo la capacidad de la batería, pero para una moto en que en el vehículo de referencia la capacidad de la batería no es muy elevada, un 3,45% de SoC es importante.

Veamos ahora la corriente a la que trabajan los SC: en la ilustración 102 observamos la gran diferencia entre descargar a 0,85C ya 1C: mientras que para el segundo ensayo la corriente máxima y mínima no llega a los 70 A, en 0,85C tenemos 155 A para la descarga y 350 A para la carga.

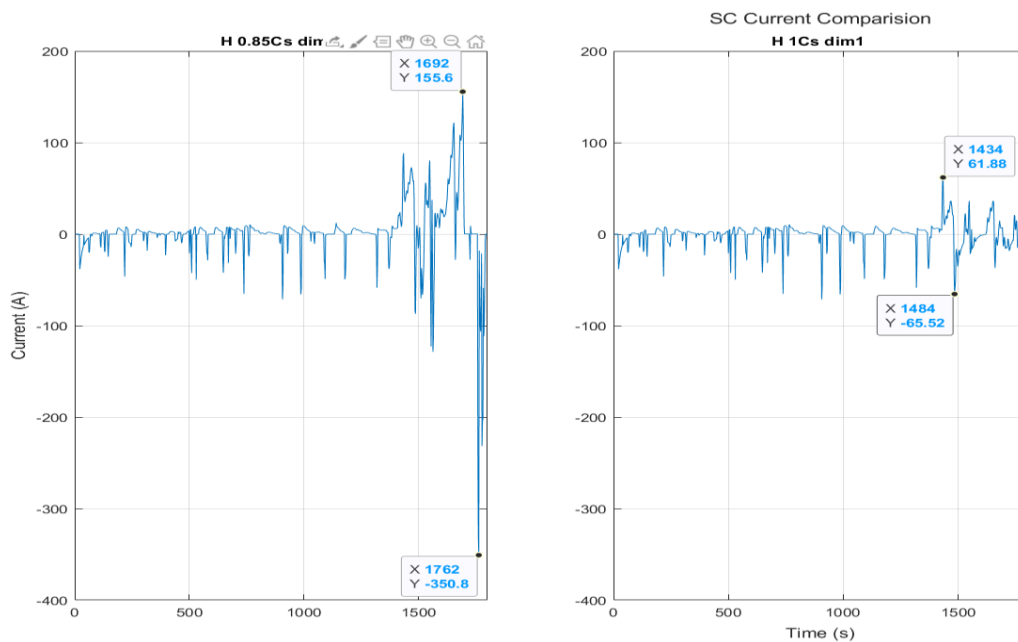


Ilustración 102 - Corriente de los SC de la moto para el dimensionado Tipo 1. Solo HESS

Este mayor trabajo de los SC en el primer ensayo se traduce en que estos se descargan por completo a las velocidades altas del final del ciclo. El SoC del bloque de SC se presenta en la figura 103.

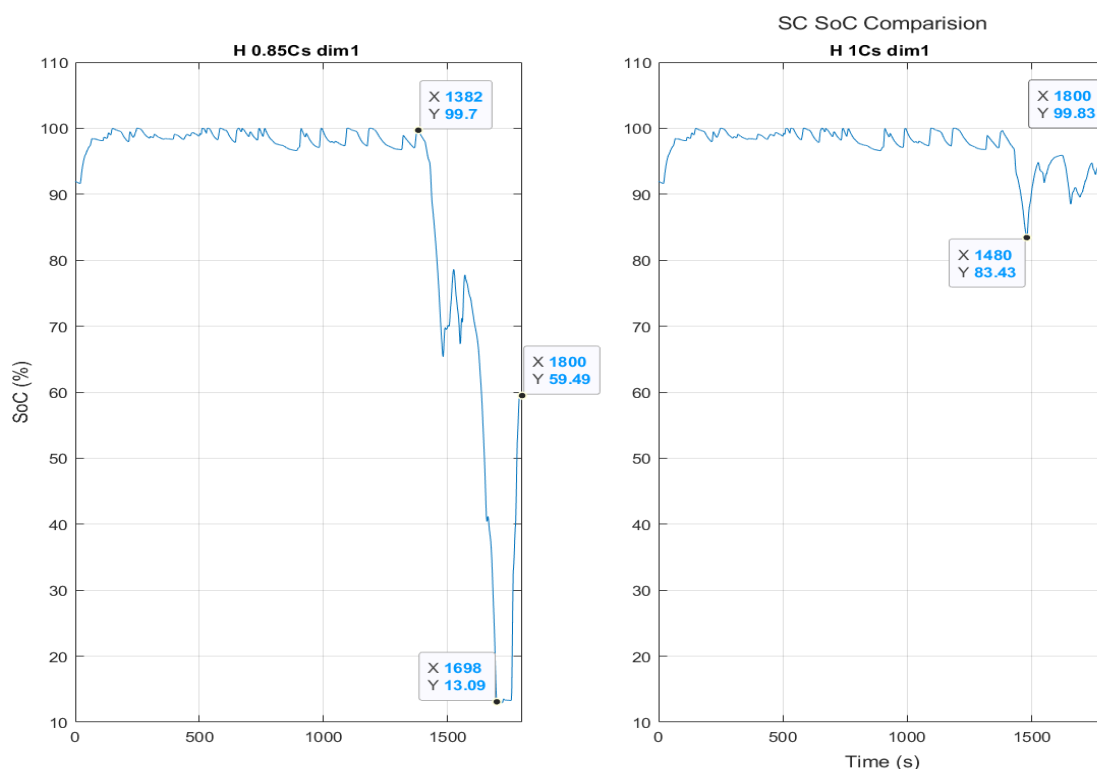


Ilustración 103 - SoC de los SC de la moto para el dimensionado Tipo 1. Solo HESS

El tramo del final del ciclo, con un tramo de deceleración prolongado, tiene su efecto en el ensayo de 0,85C, instante en el que los SC se recargan hasta un 59,49% de su SoC. Es de suponer que comenzando el nuevo ciclo tan descargados, no serán capaces de permanecer activos durante el ciclo siguiente.

La evolución de los SC en el ensayo a 1C es bien distinta: con sus escasos picos y el alto SoC mínimo, recargándose al 100% al final del ciclo, hace suponer que podría continuar en este régimen de trabajo indefinidamente.

Veamos ahora el balance de potencias, ya que resume bastante bien todo lo mencionado, pudiéndose observar en la ilustración 104 como los SC contribuyen poco a las velocidades bajas y medias del ciclo (excepto en las cargas, que las absorben prácticamente todas) pero tienen un gran peso a altas velocidades.

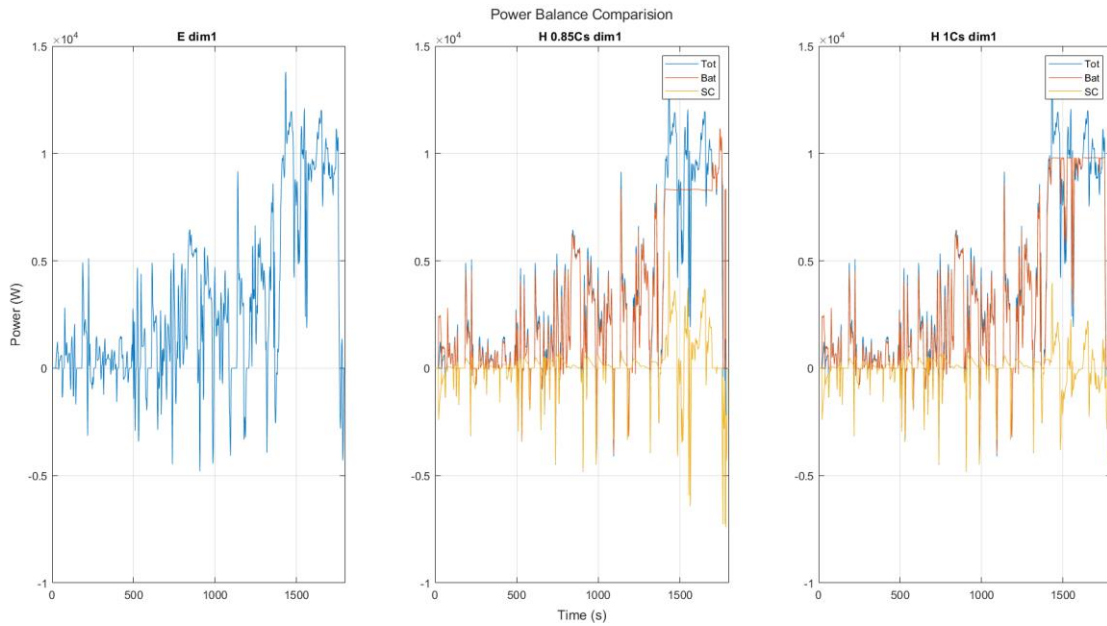


Ilustración 104 - Balance de potencias de la moto para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

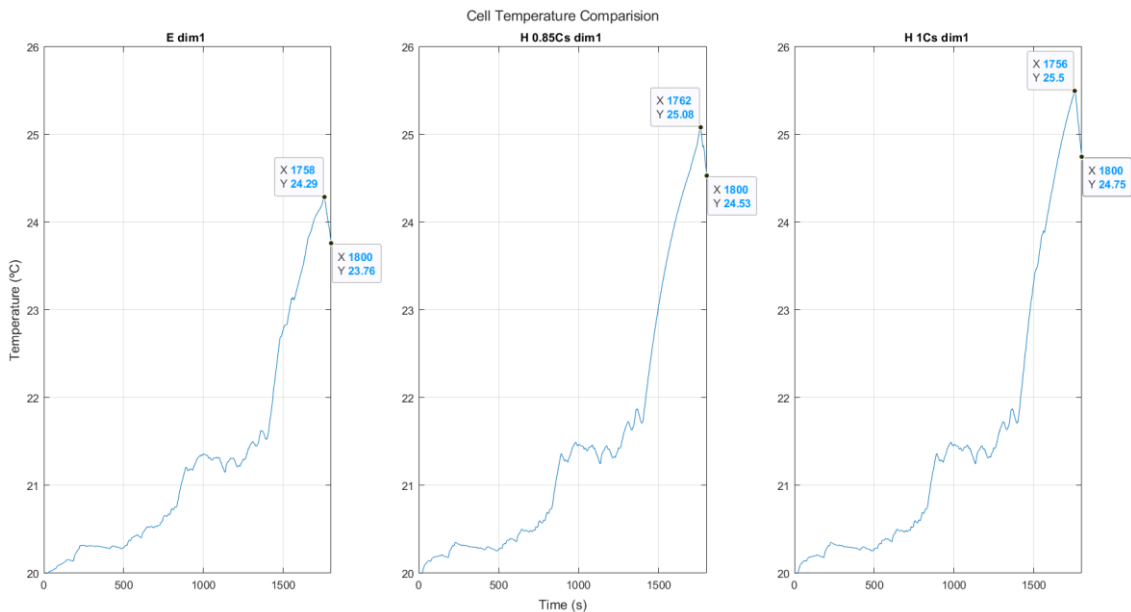


Ilustración 105 - Temperatura de la celda de la moto para el dimensionado Tipo 1. ESS y HESS

Sobre la temperatura podemos decir que aumenta en sus picos máximos y al final del ciclo en los ensayos HESS y a su vez, es mayor en el de descarga a 1C que a 0,85C. La explicación se da en que si miramos el ratio de descarga de la batería, en el sistema ESS hay más tramos en los que la batería ni se carga ni se descarga. Recordamos que en el control existen estados (4 y 5) en los que la batería debe cargar a los SC. Si además, en el ensayo a 1C la batería se descarga a 1C en lugar de a 0,85C, tiene sentido que para dicho ensayo la temperatura sea hasta 1,2°C mayor que en el caso ESS. Las descargas de la batería pueden consultarse en las ilustraciones YY anexo XX.

12.2. DIMENSIONADO TIPO 2

Los porcentajes del margen de masa incorporado en cada ensayo como en masa de SC para el autobús y el coche (ver apartado 10.5.2) han sido fruto de numerosas simulaciones hasta encontrar que tales valores son interesantes de contrastar ante los principios de utilidad, efectividad o la inversa. Cada vehículo se introducirá primeramente con la tabla de características resultante para los porcentajes de masa añadida de SC ensayados.

A continuación, detallamos los sistemas ESS a los que se hará referencia:

AUTOBÚS	Sistema	Magnitud	Valor	Unidades
	ESS (BT)	Energía	142	kWh
		Capacidad	203	Ah
	Magnitud	Balance	Valor	Unidades
	Masa	Respecto Dimensionado Tipo 2	-1891	kg
		Pasajeros	2400	
Total vehículo		21709		

Tabla 19 - Características del sistema ESS para el autobús bajo la metodología Dimensionado Tipo 2

COCHE	Sistema	Magnitud	Valor	Unidades
	ESS (BT)	Energía	22	kWh
		Capacidad	63	Ah
	Magnitud	Balance	Valor	Unidades
	Masa	Respecto Dimensionado Tipo 2	-206	kg
		Pasajeros	120	
Total vehículo		1526		

Tabla 20 - Características del sistema ESS para el coche bajo la metodología Dimensionado Tipo 2

12.2.1. AUTOBÚS

Aunque ya se ha explicado en la introducción de este apartado, nos permitimos repetir que las ilustraciones que se muestran a continuación, que comparan el sistema ESS para varios márgenes de masa y tasas de descarga, resultan un poco difíciles en tanto en cuanto se muestra una batería de 203 Ah para el ESS contra una de 31Ah para el HESS.

AUTOBÚS 50% de masa de SC añadida	Bloque	Magnitud	Valor	Unidades
	BT	Energía	22	kWh
		Capacidad	31	Ah
	SC	Tensión máxima Ns	465	V
		Ns	172	-
		Tensión máxima 1s	2,7	V
		Tensión mínima (para ley de control)	186	V
		Margen de masa total posible	-1091	kg
		% de margen en masa cubierto por NsNp	50%	-
		Masa cubierta por NsNp	545	kg
		Np	53	-
		Capacitancia NsNp	95	F
		Energía NsNp	2,84	kWh
		ESR NsNp	7,2	mΩ
		Corriente continua máxima NsNp	2166	A
Unidades NsNp	9091	-		
Vehículo	Masa	21164	kg	

Tabla 21 - Características del sistema HESS para el autobús bajo la metodología Dimensionado Tipo 2 con un 50% de masa de SC añadida

AUTOBÚS 75% de masa de SC añadida	Bloque	Magnitud	Valor	Unidades
	BT	Energía	22	kWh
		Capacidad	31	Ah
	SC	Tensión máxima Ns	465	V
		Ns	172	-
		Tensión máxima 1s	2,7	V
		Tensión mínima (para ley de control)	186	V
		Margen de masa total posible	-1091	kg
		% de margen en masa cubierto por NsNp	75%	-
		Masa cubierta por NsNp	818	kg
		Np	79	-
		Capacitancia NsNp	143	F
		Energía NsNp	4,25	kWh
		ESR NsNp	4,8	mΩ
		Corriente continua máxima NsNp	3249	A
Unidades NsNp	13636	-		
Vehículo	Masa	21436	kg	

Tabla 22 - Características del sistema HESS para el autobús bajo la metodología Dimensionado Tipo 2 con un 75% de masa de SC añadida

Se han realizado ensayos para todos los márgenes de masa de SC a distintos C de descarga. Sin embargo, para no abrumar al lector con multitud de gráficas, procederemos a explicar el caso que hemos encontrado óptimo, que corresponde con descargar la batería a 0.5C y a un 50 y 75% de margen de masa.

Por lo impactante que resulta a la vista comenzaremos mostrando, en la ilustración 106, la gráfica de corriente de la batería.

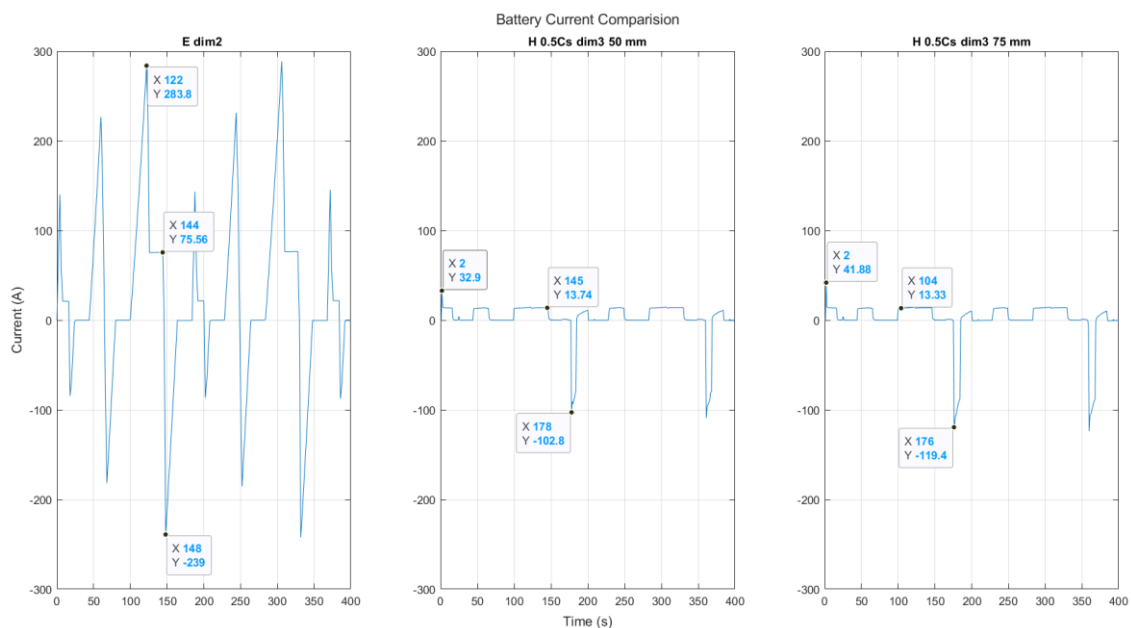


Ilustración 106 - Corriente de la batería del autobús para el dimensionado Tipo 2 a 0.5. HESS y ESS

Nótese que las tres graficas están a la misma escala. Las corrientes conseguidas para la descarga son mucho menores, y aunque eso se produce por qué es lo deseado para el C de descarga especificado y regulado por el control, es muy significativa la importante reducción de la corriente conseguida. Aquí ya podemos hacernos una idea de la importante actuación del SC, pero antes de verla, vamos a corroborar la gráfica anterior mirando el SoC de la batería en la ilustración 107:

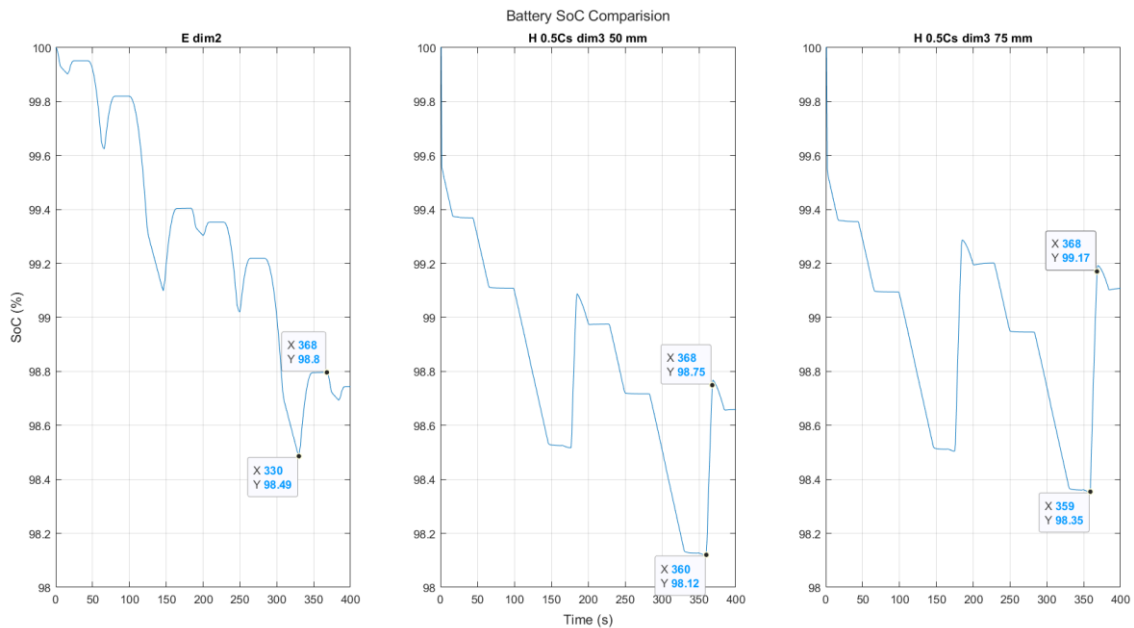


Ilustración 107 - SoC de la batería del autobús para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

Observando las etiquetas, podemos apreciar que aunque el SoC mínimo sea algo menor para los dos casos del HESS, el SoC final es igual para un 50% de margen de masa y notablemente superior (0.42%) en el caso del 75% de dicho margen. Si bien puede parecer poco, para un ciclo de 3 minutos de duración y un vehículo destinado a jornadas de más de 10h diarias, creemos que sí, es superior.

Sobre el trabajo del bloque de SC, antes de mostrar el balance de potencias (ilustración 108), mencionar que los condensadores trabajan entre un rango de 600 a -600 A, y participan en todas las partes del ciclo, aun en las de velocidad constante. Este dato sirve para hacernos una idea de qué son capaces estos dispositivos cuando su trabajo está bien regulado.

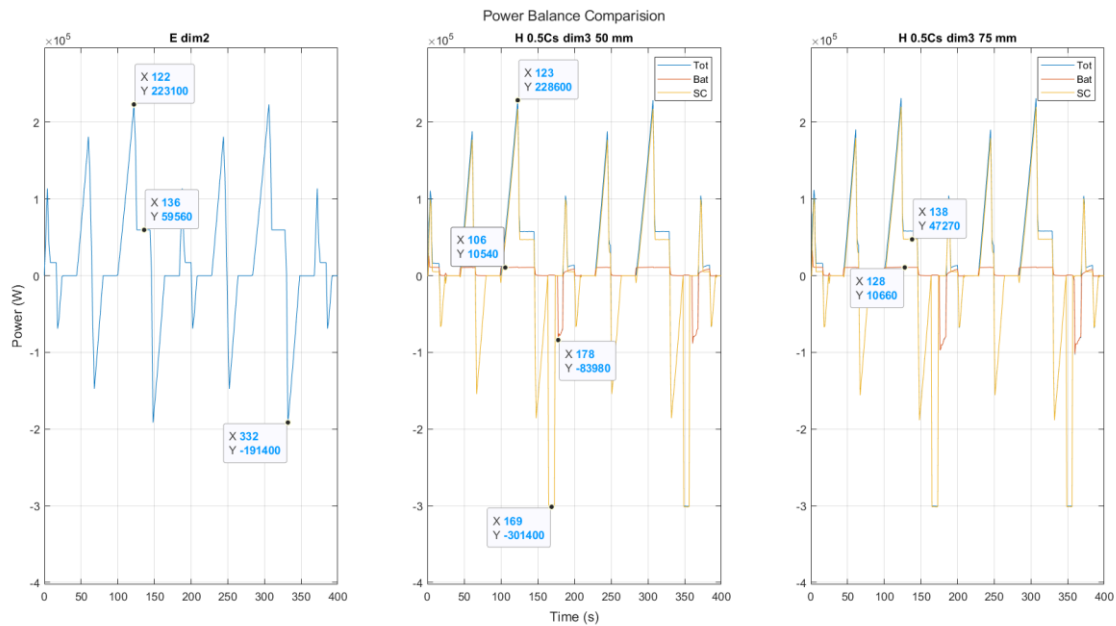


Ilustración 108 - Balance de potencias del autobús para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

Como podemos apreciar, para los dos márgenes de masa se observa el enorme trabajo de los SC, que trabajan en todo momento. La batería participa solo con la potencia de descarga deseada, y se carga solo cuando ya están cargados los SC, pero a una potencia de unos 80 kW, que si bien puede ser elevada para una batería de 22 kWh (aproximadamente 4C), el resultado muestra que no afecta en la degradación.

Probablemente esta pérdida de capacidad podría ser mucho menor si no tuviésemos esos picos de 80kW en la batería, pero creemos que compensa si pensamos en términos de que tenemos la misma autonomía con una batería de 142 kWh que con una de 22 kWh, en la que además la degradación es menor que para la de 142 kWh. Aun así, en caso de que se decidiera eliminar estos picos para alargar todavía más la vida útil de la batería, una sencilla modificación en el control de la carga bastaría.

En cuanto a la temperatura de la celda, resulta interesante ver que para el final del ciclo pero antes de la carga (segundo 348), la temperatura es significativamente menor para los dos casos del HESS, y que el principal incremento de temperatura es debido al instante de carga a 4C. Si la temperatura aumenta perceptiblemente más en el caso en que el margen de masa es del 75%, es porque los condensadores están más cargados y hay más energía que absorbe la batería. Por otra parte, resulta curioso que en el ensayo a 50% de margen de masa, la temperatura al final del ciclo (segundo 368) sea aproximadamente igual a la del sistema ESS. Recordar que en el ESS no se carga la batería y que la capacidad es 6.45 veces mayor que la del HESS.

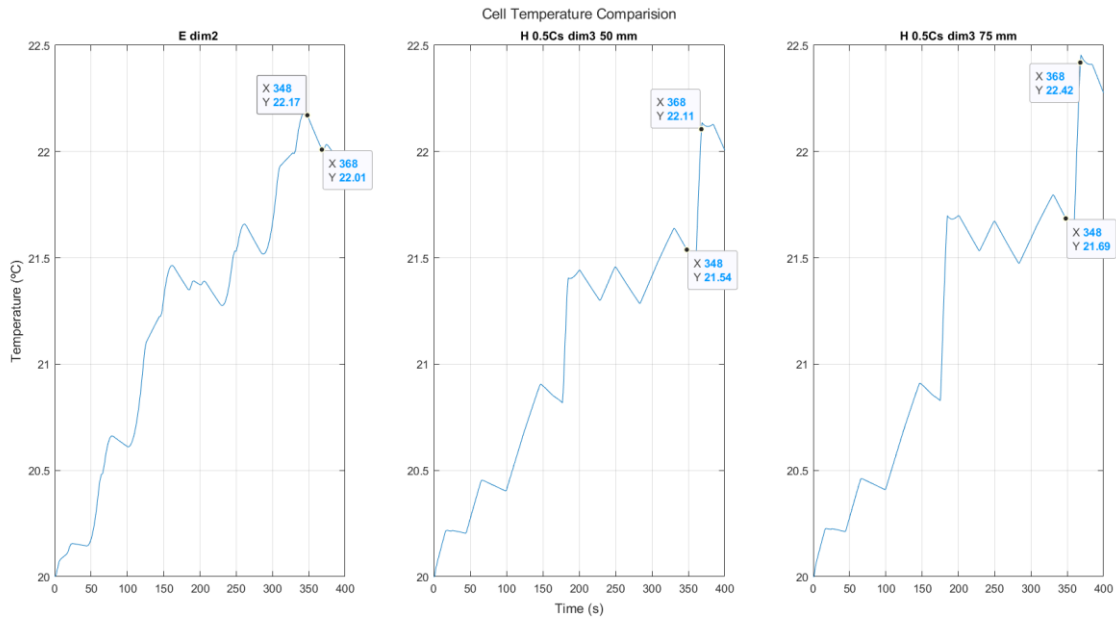


Ilustración 109 - Temperatura de la celda del autobús para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

Por último, mostraremos el histograma en frecuencia de las tasas de descarga de la celda en la ilustración 110.

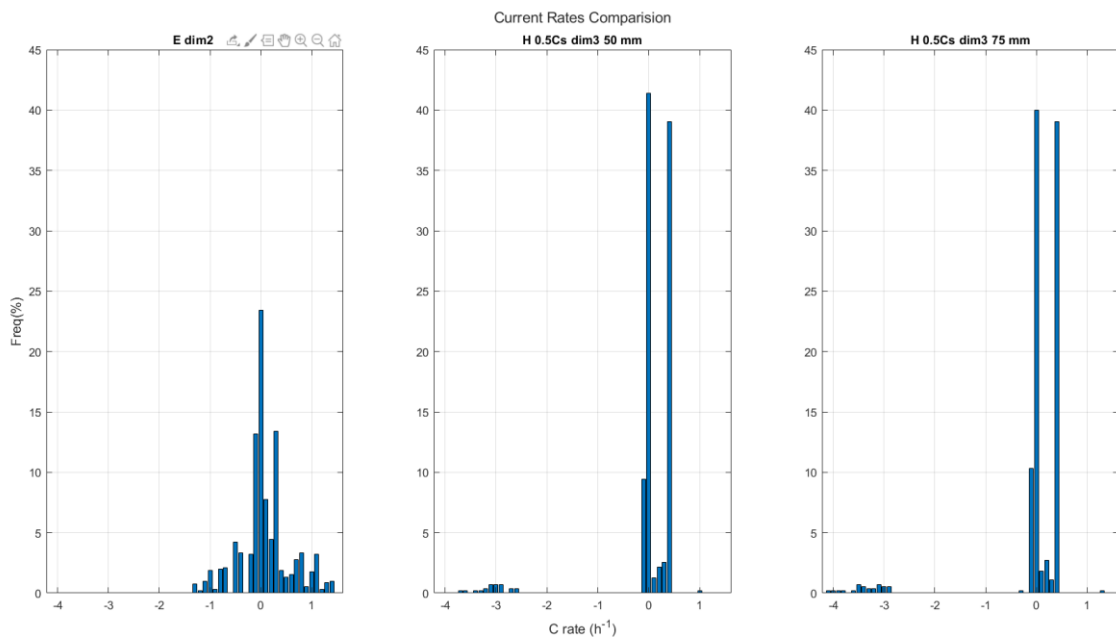


Ilustración 110 - Ratio de descargas de la celda del autobús para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

Es esperable que en la ratio de descargas positivo de la batería se reduzca en sobremanera las descargas superiores a 0.5C, y que por tanto la frecuencia de esta ratio aumente en el sistema HESS. Los puntos a altos C de carga (entre -4 y -3) corresponden a la etapa de carga que no se da en el sistema ESS. Por otra parte, nótese que la frecuencia de los bajos C de descarga es mínima, ya que una batería con una capacidad tan reducida para un ciclo como este estaría descargándose siempre a ratios altos. Pero debido a la actuación de los SC esto no sucede.

Vistos estos resultados, creemos que esta configuración de 0.5C de descarga deseada de la batería y un dimensionado del 50% de margen de masa de SC es perceptiblemente mejor que cualquiera de las otras ensayadas para el autobús, ya que sacrificando un porcentaje de 0,42% del SoC al final del ciclo no perdemos en ninguno de los otros parámetros y aparte se reduce el costo al reducir un tercio de los SC.

12.2.2. COCHE

Las tablas del dimensionado se muestran a continuación.

COCHE 25% de masa de SC añadida	Bloque	Magnitud	Valor	Unidades
	BT	Energía	22	kWh
		Capacidad	63	Ah
	SC	Tensión máxima Ns	232	V
		Ns	86	-
		Tensión máxima 1s	3	V
		Tensión mínima (para ley de control)	93	V
		Margen de masa total posible	-206	kg
		% de margen en masa cubierto por NsNp	25%	-
		Masa cubierta por NsNp	52	kg
		Np	10	-
		Capacitancia NsNp	36	F
		Energía NsNp	0,27	kWh
		ESR NsNp	18,9	mΩ
		Corriente continua máxima NsNp	353	A
Unidades NsNp	860	-		
Vehículo	Masa	1577	kg	

Tabla 23 - Características del sistema HESS para el coche bajo la metodología Dimensionado Tipo 2 con un 25% de masa de SC añadida

COCHE 50% de masa de SC añadida	Bloque	Magnitud	Valor	Unidades
	BT	Energía	22	kWh
		Capacidad	63	Ah
	SC	Tensión máxima Ns	232	V
		Ns	86	-
		Tensión máxima 1s	3	V
		Tensión mínima (para ley de control)	93	V
		Margen de masa total posible	-206	kg
		% de margen en masa cubierto por NsNp	50%	-
		Masa cubierta por NsNp	103	kg
		Np	20	-
		Capacitancia NsNp	72	F
		Energía NsNp	0,54	kWh
		ESR NsNp	9,5	mΩ
		Corriente continua máxima NsNp	176	A
Unidades NsNp	1720	-		
Vehículo	Masa	1629	kg	

Tabla 24 - Características del sistema HESS para el coche bajo la metodología Dimensionado Tipo 2 con un 50% de masa de SC añadida

COCHE 100% de masa de SC añadida	Bloque	Magnitud	Valor	Unidades
	BT	Energía	22	kWh
		Capacidad	63	Ah
	SC	Tensión máxima Ns	232	V
		Ns	86	-
		Tensión máxima 1s	3	V
		Tensión mínima (para ley de control)	93	V
		Margen de masa total posible	-206	kg
		% de margen en masa cubierto por NsNp	100%	-
		Masa cubierta por NsNp	206	kg
		Np	40	-
		Capacitancia NsNp	144	F
		Energía NsNp	1,07	kWh
		ESR NsNp	4,7	mΩ
		Corriente continua máxima NsNp	88	A
Unidades NsNp	3441	-		
Vehículo	Masa	1732	kg	

Tabla 25 - Características del sistema HESS para el coche bajo la metodología Dimensionado Tipo 2 con un 100% de masa de SC añadida

Como se muestra en las siguientes ilustraciones, nos encontramos para ciertas variables a primera vista contraintuitivos, pero que, bajo un análisis más profundo, no solo se confirman como correctos, si no que demuestran la viabilidad del sistema HESS para el dimensionado Tipo 2 en este vehículo.

Como en el resto de simulaciones, la ilustración 111 confirma que se cumple la restricción de la tasa de descarga según la especificada en la ley de control.

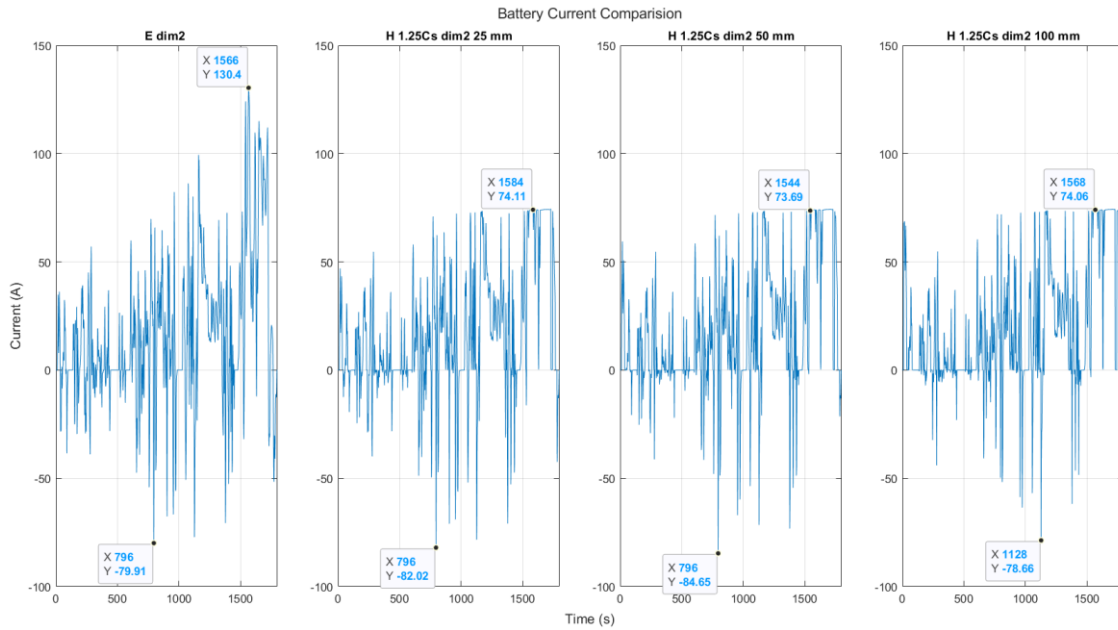


Ilustración 111 - Corriente de la batería del coche para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

Lo primero que nos resulta llamativo es el SoC de la batería: al aumentar el margen de masa de condensadores (energía añadida a la propia del bloque ESS) el porcentaje de carga al final del ciclo baja. Esto se puede observar en la ilustración 112.

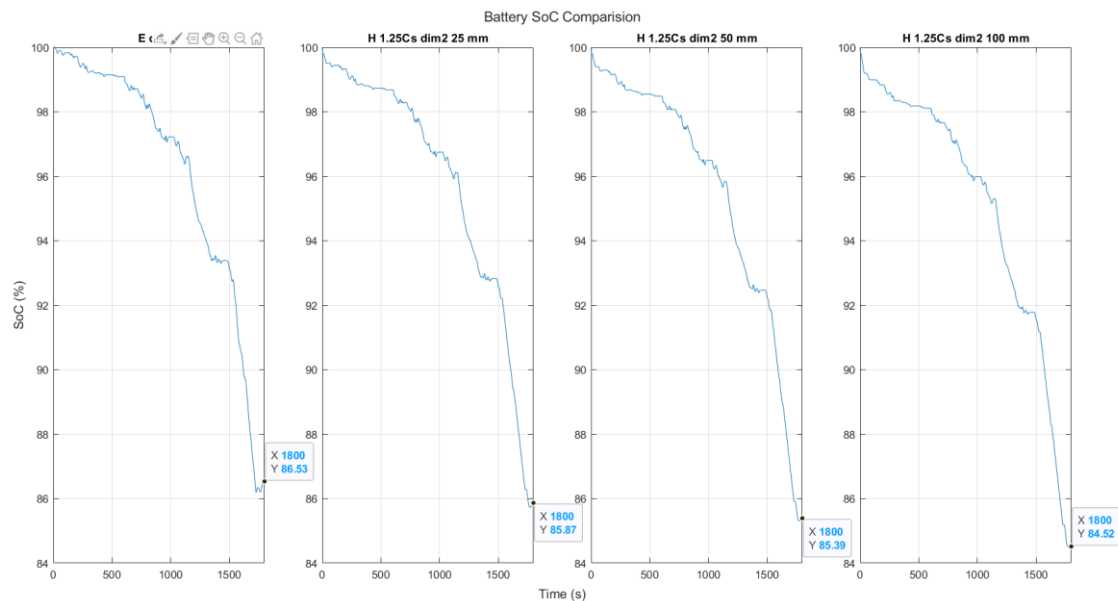


Ilustración 112 - SoC de la batería del coche para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

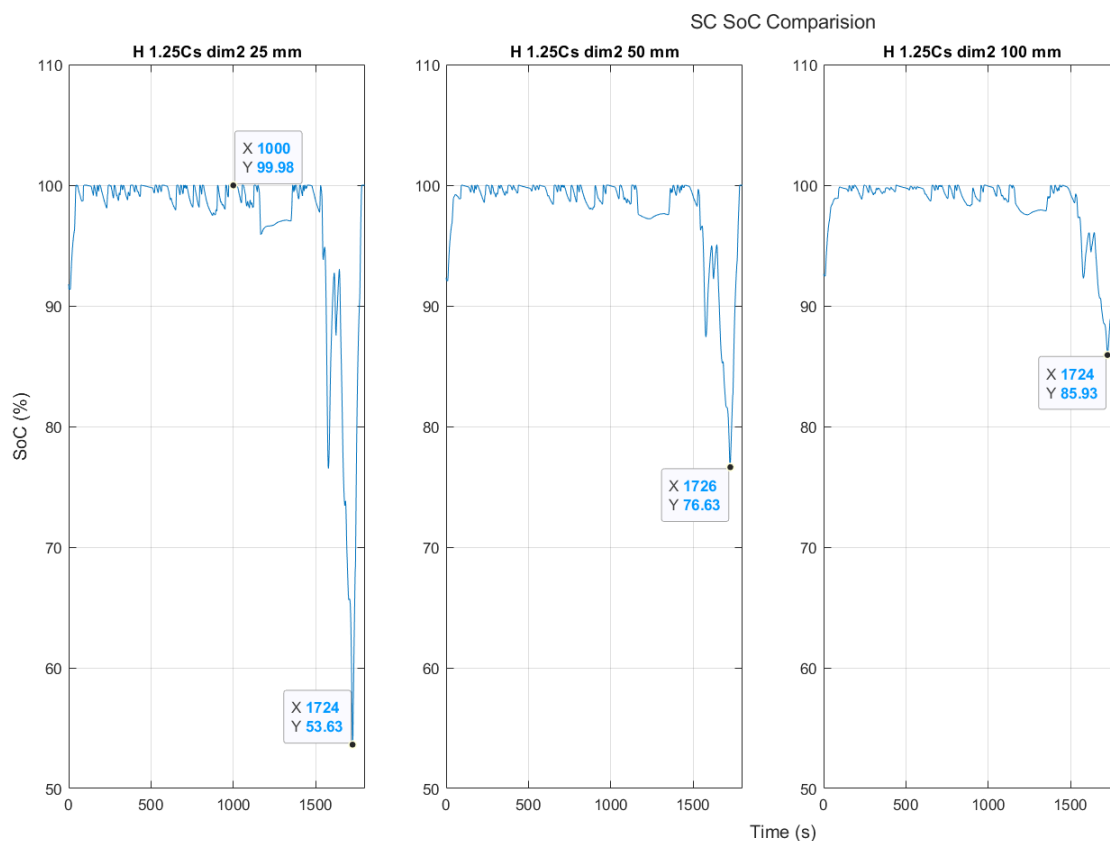


Ilustración 113 - SoC de los SC del coche para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

En la ilustración 113 se muestra el SoC de los SC. De la misma manera que en el dimensionado Tipo 1, los SC entregan potencia a altas velocidades, siendo ahí la variación del SoC máxima. Pero esta vez los SC se descargan porcentajes perceptiblemente mayores que en el otro dimensionado. Como al final del ciclo, durante el tramo final de deceleración final, el SoC llega a su máximo, se espera que para los ciclos siguientes el comportamiento sea el mismo. A bajas velocidades, donde el SoC baja menos de un 5%, la corriente entregada por los SC tampoco es muy elevada, del orden de los 10 A.

En contraste a lo expuesto anteriormente, la temperatura de la batería disminuye a medida que aumenta el porcentaje de masa de SC. Si bien esto no es extraño en tanto en cuanto se reduce la corriente de la batería, con la baja participación de los SC durante la mayor parte del ciclo a la vez que la disminución del SoC final de la batería, sorprende este resultado.

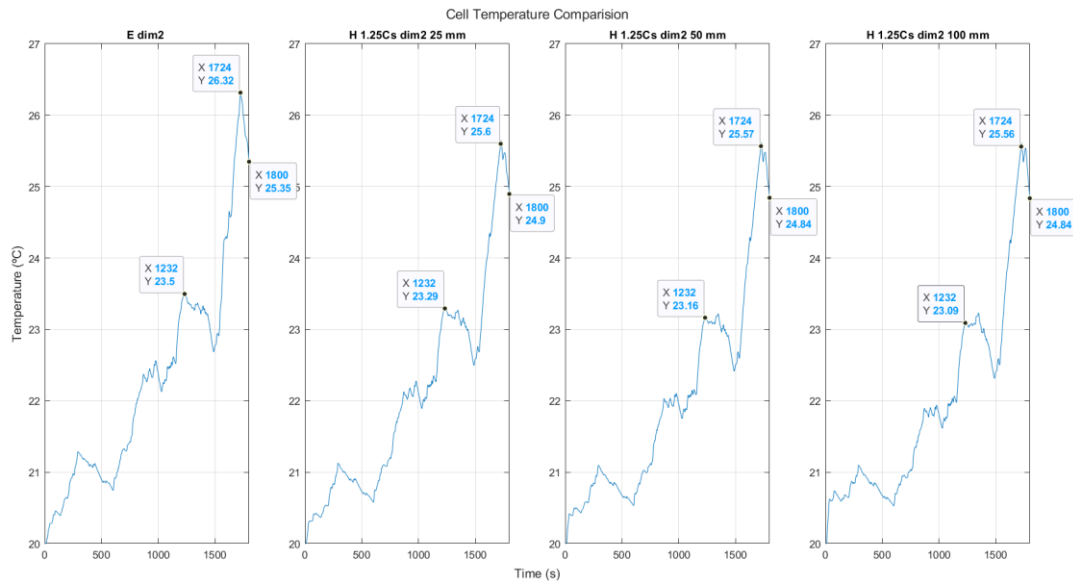


Ilustración 114 - Temperatura de la celda del coche para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

Para finalizar, mostraremos un detalle del balance de potencias que resulta bastante interesante para ilustrar el comportamiento del sistema en el estado 6 de la ley de control, que sucede en esta simulación en muchas más ocasiones que en el resto de ensayos. Lo esperable sería que la temperatura aumentase al disminuir el SoC (ya que entrega más energía), pero lo que realmente sucede es que se descarga más a bajas ratios de descarga.

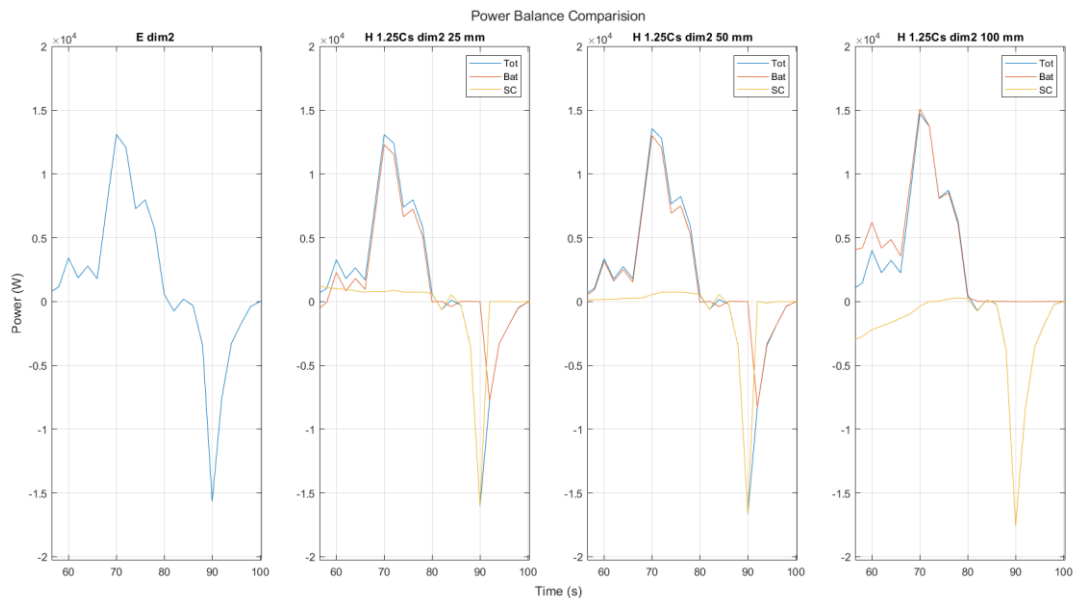


Ilustración 115 - Detalle del balance de potencias del coche para el dimensionado Tipo 2. ESS y HESS

En este estado, en que la potencia requerida es menor a la P_{min} , pero los SC se encuentran más cargados de lo necesario para esa velocidad (recordar V_{req} , ver apartado 10.4) vemos el SC descargándose a una baja potencia, aliviando la descarga de la batería. Aunque en el 100% de margen de masa esto también sucede, se aprecia más claramente para los otros dos márgenes de masa.

13. CONCLUSIONES

La hibridación de las baterías basadas en Litio y SC se ha demostrado que, tanto a nivel teórico como simulado, muestra beneficios claros según la casuística a la vez que puede ser inviable en otros casos.

El sistema HESS no se categorizaría como viable en la situación actual en la que se encuentra el mercado del vehículo eléctrico y su infraestructura asociada. Esto es debido al patrón actual basado en conseguir autonomías elevadas para suplir la claramente limitada infraestructura de recarga. Esta búsqueda incesante de altas autonomías basada en la aplicación de baterías sobredimensionadas conlleva a su vez que las potencias de carga sean igual o más elevadas, siendo un claro punto de debate la viabilidad de que la red eléctrica actual pueda ofrecer tal suministro de energía para una demanda de vehículos eléctricos comparable a la del vehículo de combustión actual. Aún más se ha comprobado que tal demanda de baterías, propias a modelos de gama media de coche o autobús eléctrico que se están implementando a día de hoy, llevará a una situación insostenible ante las reservas de Litio existentes antes de la mitad de siglo, justamente para cuando se espera sustituir el vehículo de combustión por eléctricos.

La conclusión ante la inviabilidad del sistema según las tendencias actuales proviene de los resultados del Dimensionado Tipo 1, donde se demuestra que en la mayoría de casos, a pesar de mejorar en algún aspecto respecto al modelo ESS, tenemos primeramente una pérdida de autonomía a la vez que las baterías de Litio se estarían descargando por debajo de 1C, dejando mucho por aprovechar de tal tecnología sabiendo que pueden descargarse de forma continua alrededor de 2C sin tener consecuencias drásticas en la degradación. El Dimensionado Tipo 2 intentaría responder a las necesidades actuales de la movilidad eléctrica a la vez que mejorar el sistema ESS, pero podemos establecer que para que un sistema HESS sea realmente viable, en el que los SC actúen sobre el máximo de picos de demanda posibles, deben forzosamente existir tales picos en el sistema ESS; hemos visto que para baterías de tan alta capacidad no se exigen los picos esperados.

La viabilidad del sistema HESS se la escasez futura de Litio. El Dimensionado Tipo 2, diseñado por los autores del estudio, demuestra que el sistema HESS es viable para vehículos con baterías de media-baja capacidad, las cuáles se deberán ver forzosamente implementadas si se espera sustentar gran parte del sector de transportes

con las baterías de Litio como fuente de energía principal. Este futuro donde la reducción de la capacidad de las baterías sea viable, sólo se presenta cuando la red de electrolineras haya evolucionado y permita al usuario tener un coche con 150-200 km de autonomía sin ser una molestia. Al tener baterías de media-baja capacidad la exigencia a la red sería proporcionalmente menor y más constante.

Se ha observado que tal tendencia de reducción se muestra mucho más cercana en el autobús eléctrico de línea, debido a la creciente tendencia de instalación de puntos de recarga de alta potencia en las paradas del circuito de los autobuses de línea en las grandes ciudades. Estas rutinas de recarga cambian totalmente el dimensionado del vehículo ya que la autonomía y tiempo de recarga ya no son los ejes principales del dimensionado del vehículo. Para la misma rutina de recarga el sistema HESS se muestra claramente superior al ESS debido a que tales recargas cortas y a elevada potencia son sinónimo de una aplicación apropiada para SC, ya que una batería se vería afectada en su vida útil. Como hemos visto en el dimensionado Tipo 2, con una batería mucho menor y una cantidad suficiente de SC, se ha conseguido superar las prestaciones del ESS.

En la misma línea, la viabilidad en el coche supone una degradación menor para baterías de poca capacidad, como se demuestra en nuestros resultados para el dimensionado Tipo 2.

En cambio, para vehículos como la moto es necesario un estudio con mayor profundidad y alcance, ya que en según qué experimentos hemos conseguido un buen régimen de trabajo del sistema híbrido pero sin presentar ventajas claras ni desventajas significativas.

Hemos visto el potencial y posibilidades que aporta la distribución energética del sistema HESS bajo una misma ley de control para diferentes vehículos y ciclos de conducción, es decir, el sistema HESS es un sistema fácilmente escalable, tanto de forma práctica como teórica, a cadenas de tracción de formatos variados de vehículo eléctrico.

Se concluye también que para la optimización máxima del sistema HESS, el dimensionado y estudio de las cargas dinámicas para un ciclo de conducción se muestra como el punto principal a desarrollar. Cabe recalcar la importancia de representar con la mayor exactitud posible el ciclo de conducción y el modelo dinámico del vehículo ya que pequeñas variaciones en cualquiera de ellos puede conllevar diferencias drásticas

en los resultados.

Aún más, hemos visto que la optimización y mejora de las baterías actuales está llegando a su máximo posible, en cambio, la tecnología del SC se muestra como una tecnología y sector emergente, con mucho margen de mejora si la tendencia de inversión en I+D sigue como hasta ahora. Los SC híbridos se muestran con el mejor potencial para llegar a densidades energéticas respetables ante las baterías, queda claro que esto solo será posible con la mejora de la ciencia de materiales y procesos de fabricación promovida por de los principales fabricantes del sector.

Resumiendo hasta ahora, el sistema HESS se muestra potencialmente viable para un futuro próximo en 30 años, debido a las escasas reservas de Litio, la reducción de las baterías en consecuencia y al efecto beneficioso de la suplencia de los picos de demanda esperados, para tales baterías reducidas, de la aportación de los SC en el sistema. Además, debido a que se está hablando de un futuro relativo a décadas, la tendencia actual indica que para ese entonces las prestaciones de los SC serán exponencialmente mejores ya que no se encuentran limitados ante nada más que la inversión en I+D.

La única alternativa al sistema HESS que se podría plantear para enfrentarse a la escasez del mineral comentado sería la pila de combustible, basada en hidrógeno, pero tal tecnología no era intención de ser estudiada por los autores en este trabajo de final de grado.

También concluir que durante los dos años en los que los autores han tenido esta idea de estudio en mente, han visto un crecimiento destacable del interés general ante la tecnología de los SC. Es ejemplo los movimientos de grandes fabricantes como Tesla apostando por esta tecnología, el crecimiento exponencial del sector durante la última década, pero sobretodo la reciente divulgación de las características y potencial de los SC a nivel popular, fuera de estudios técnicos ingenieriles.

Queremos concluir que hemos encontrado gran dificultad en la obtención de datos con los que otros estudios han conseguido modelos de simulación aproximados a la realidad. La búsqueda de información ha tenido que ser muy amplia ya que no hemos encontrado trabajo que se extienda, englobe y detalle de la forma en que lo hemos realizado nosotros. Básicamente la información ha tenido que salir de numerosos estudios muy específicos con los que nos hemos encontrado después de, a nuestra opinión, demasiado tiempo o incluso a veces, por suerte; decimos “demasiado tiempo”

debido a que a veces solo buscábamos un dato específico pero común en el área de estudio, aun así, nos ha sorprendido la gran especificación de los estudios sin concretar tales valores comunes/básicos. Esta conclusión nos lleva a afirmar que para el correcto estudio o planteamiento del sistema HESS, se debe estudiar un abanico muy amplio de temáticas.

Volviendo a la dificultad para encontrar información, queremos destacar el caso de la degradación de las celdas, caso en el que hemos llegado a tener implementado el modelo a corrientes constantes. Pero para corrientes variables no hemos encontrado la información necesaria para el tratamiento estadístico de los datos y por tanto, hemos sido incapaces de reproducir los experimentos de la literatura.

Creemos que únicamente por la búsqueda de información, comprensión, contraste y concentración de la misma, este estudio necesitaba 3 autores y 2 tutores; sin contar el traslado de esta información a la creación de los modelos simulados, la resolución de los incontables errores de simulación/código, la estrategia, organización y redacción del estudio como también la observación y crítica de los resultados.

14. TRABAJO FUTURO

En caso de disponer tiempo y recursos para continuar con este proyecto en el futuro, tenemos claros cuales serían los siguientes aspectos a tratar, que, si bien no son necesarios para la consecución de los objetivos planteados para nuestro Trabajo Final de Grado, sí que resultarían enormemente interesantes para satisfacer nuestra curiosidad y acabar de explorar la viabilidad del sistema HESS.

Primeramente, veríamos necesario modelizar y simular las eficiencias de los elementos pasivos del circuito, principalmente del DC/DC, para todas las combinaciones y así poder encontrar el punto de máxima eficiencia. Esto debería suceder con los componentes pasivos dimensionados por nosotros mismos para las distintas aplicaciones, pues si bien los valores actuales dan resultados buenos, serían probablemente mejores en un convertidor hecho a medida. También se debería tomar en cuenta la eficiencia, efecto térmico y degradación de los SC.

Otro punto a realizar sería una mejora en el control. Como hemos observado, dependiendo del vehículo algunos estados del control ocurren con mayor frecuencia que otros. Este puede ser un punto a optimizar. En los casos en los que el SC se descarga por completo, intentar evitar que la batería gaste más energía en cargarlos que en el propio ciclo puede ser una mejora. Incorporar un lazo de control dependiente del estado de carga de los SC es una buena manera de comenzar.

Realizar simulaciones más largas también sería un buen punto: podríamos observar si realmente la temperatura se estabiliza como se ha mostrado en el autobús. Esto abriría la puerta a nuevas mejoras en el control, dando más trabajo a los SC en caso de que la temperatura de la batería aumentase. En la misma línea, otra posibilidad es simular en baterías de alta capacidad como las de los vehículos utilizados variaciones del *HybPer*, la masa sustituida de batería por SC. Creemos que con ello se podría optimizar el coche y probablemente obtener conclusiones más sólidas de la moto.

El siguiente paso sería la implementación a escala de un sistema híbrido, aplicando la ley de control y realizando las mediciones necesarias. Creemos que un sistema a escala es factible y si bien las tensiones y corrientes de trabajo no serían comparables, sí que puede ser una buena aportación al ajuste del control. Del ajuste de este hardware se podría corroborar o en su defecto correlacionar los puntos de eficiencia máximas para a su vez aplicarle la ley de control reajustada. Este sería sin duda el paso de mayor

peso, ya que trasladar todo lo simulado a un Hardware real tendría su costo económico, pero sobre todo en tiempo para que todo funcionase correctamente y poder repetir los experimentos.

En cuanto al modelo dinámico, creemos que la incorporación de un estudio que corrobore valores de la velocidad del viento, el estudio inercial del vehículo, un estudio según las pendientes típicas en el área de aplicación del vehículo, añadir los consumos de los sistemas de confort (calefacción o aire acondicionado) a la vez que sistemas de refrigeración de la cadena de tracción; serían puntos que mejorarían sustancialmente el modelo dinámico y, por lo tanto, aproximarían aún más la demanda de energía y potencia a extraer del sistema HESS.

Concretamente en el caso del autobús urbano, debido a la pandemia ha quedado relegado a trabajo futuro el estudio con un ciclo de conducción real basado en la telemetría de una línea de autobús en servicio en una ciudad como Barcelona.

Por último, y tal vez cambiando un poco de ámbito de investigación, durante la realización de este trabajo hemos observado que el futuro del vehículo eléctrico depende enormemente de la infraestructura de recarga. No hace falta este TFG para ver que un usuario de vehículo eléctrico tiene serios problemas para cargar su batería en poco tiempo, pero si hemos encontrado literatura y hemos tenido ideas sobre la innovación en la recarga.

15. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo no hubiera sido posible sin la ayuda de muchos ya sea directa o indirectamente, por ello aquí listamos nuestro agradecimiento como grupo y a nivel individual.

Primero de todo debemos agradecer a los doctores Jaume Miret y Rafa Ramos, los tutores de este estudio, de forma equitativa su ayuda, objetividad en su crítica, apoyo y sobretodo su experiencia, necesaria para guiar este trabajo de final de grado. Les hemos necesitado en momentos donde nos podíamos fácilmente perder en temas secundarios o atascarnos en las simulaciones por errores simples de principiante. Debemos añadir que han sido dos doctores que aceptaron y encontraron interesante el proyecto desde un inicio sin tener que insistir ni justificar que el trabajo era apropiado para 3 alumnos, cuando en verdad nos encontramos con negativas de otros doctores, por ese hecho, que no creyeron en nosotros.

Agradecer a la EPSEVG, el campus más pequeño de la UPC, por ser la universidad que nos ha aportado una atención muy cercana a lo largo de nuestra carrera, unos conocimientos a la altura y una capacidad de análisis, autocrítica e independencia intelectual, que hasta la realización de este estudio no habíamos podido poner a prueba a este nivel. Estamos gratamente contentos con la educación que hemos recibido al poder compararnos, entender y contrastar numerosos estudios de otras universidades, que en la gran mayoría de veces estaban por encima de nuestro nivel académico supuesto como estudiantes de grado sin experiencia.

Debemos dar gracias otra vez a la EPSEVG, esta vez por ofrecer a numerosos alumnos, entre ellos los 3 autores del estudio, la oportunidad de haber participado voluntariamente en el equipo de competición eléctrica E3-Team. Este equipo, con todos sus integrantes y doctores implicados, nos ha servido como una plataforma de aprendizaje exponencial sobre la movilidad eléctrica de forma práctica, cosa que hubiese sido imposible de otra forma.

Agradecer al doctor Balduí Blanqué por su ayuda en las simulaciones relativas al bloque de motor. A parte, le debemos dar las gracias por su involucración técnica en el proyecto del equipo mencionado. Balduí ha sido nuestro mentor en el ámbito de la movilidad eléctrica durante ya varios años.

Agradecer al doctor Pere Andrada el contenido de calidad y realista de su optativa de Vehículos Eléctricos en la que los 3 autores fuimos alumnos. Esta asignatura nos dio una base previa sobre el estudio dinámico, propiedades de las baterías y la movilidad eléctrica en general, que sin ella este estudio no hubiese sido posible en 4 meses.

Agradecer conjuntamente a los autores de todos los estudios mencionados en la bibliografía, por la generosidad en ofrecer información de alta calidad de forma gratuita.

Por último, agradecer a nuestras familias y amigos el apoyo en momentos difíciles y la paciencia por escucharnos hablar sobre “el tema” todo el día.

16. BIBLIOGRAFIA

- ADAMAS_INTELLIGENCE, 2018. Adamas Intelligence Critical Materials Research. [en línea], no. May. Disponible en: <https://www.adamasintel.com/subscription/ev-motor-power-monthly/>.
- CARTER, R., CRUDEN, A. y HALL, P.J., 2012. Optimizing for efficiency or battery life in a battery/supercapacitor electric vehicle. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 4, pp. 1526-1533. ISSN 00189545. DOI 10.1109/TVT.2012.2188551.
- CLEAN FLEETS, 2014. *Vehicle test cycles* [en línea]. 2014. S.l.: s.n. Disponible en: http://www.clean-fleets.eu/fileadmin/files/documents/Publications/Test_cycles_-_Clean_Fleets_factsheet.pdf.
- COMISIÓN EUROPEA, 2019. Reglamento (UE) No 1308/2019 del parlamento europeo y del consejo de 17 de diciembre de 2019. *Diario Oficial de la Unión Europea*, vol. 2019, no. 20.12.2013, pp. 671-854.
- COSSUTTA, M., VRETENAR, V., CENTENO, T.A., KOTRUSZ, P., MCKECHNIE, J. y PICKERING, S.J., 2020. A comparative life cycle assessment of graphene and activated carbon in a supercapacitor application. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 242, pp. 118468. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.118468. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118468>.
- CUSENZA, M.A., BOBBA, S., ARDENTE, F., CELLURA, M. y DI PERSIO, F., 2019. Energy and environmental assessment of a traction lithium-ion battery pack for plug-in hybrid electric vehicles. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 215, pp. 634-649. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2019.01.056. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.056>.
- DAI, Q., KELLY, J.C., GAINES, L. y WANG, M., 2019. Life cycle analysis of lithium-ion batteries for automotive applications. *Batteries*, vol. 5, no. 2. ISSN 23130105. DOI 10.3390/batteries5020048.
- DHIA, T., MARDIYAH, N.A. y NURHADI, N., 2018. Fuzzy Logic Control Design in Hybrid Energy Storage System Super-Capacitor Battery for Electric Vehicle. *Kinetik: Game Technology, Information System, Computer Network, Computing, Electronics, and Control*, vol. 4, no. 1, pp. 75-86. ISSN 2503-2259. DOI 10.22219/kinetik.v4i1.658.
- ERICKSON, R.W. y MAKSIMOVIC, D., 2004. *Fundamentals of Power Electronics 2nd Edition*. S.l.: s.n. ISBN 0306480484.
- ESBER, C. y MOUBAYED, N., 2013. Impact of temperature and current variation on the supercapacitor functioning. *Citeseer*, pp. 71-114.
- EU: Heavy-duty: Braunschweig | Transport Policy. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 30 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.transportpolicy.net/standard/eu-heavy-duty-braunschweig/>.
- GIERAS, J.F. y WING, M., 2002. *Permanent Magnet Technology: Design and applications*. S.l.: s.n. ISBN 0824707397.
- GIS, W., KRUCZYŃSKI, S., TAUBERT, S., WIERZEJSKI, A., 2017. Studies of energy use by electric buses in SORT tests. , vol. 170, no. June, pp. 135-138. DOI 10.19206/CE-2017-323.
- Global Supercapacitors Industry. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-supercapacitors-industry-301034058.html>.
- HANNAH RITCHIE y MAX ROSER, 2020. *CO₂ and Greenhouse Gas Emissions*. 2020. S.l.: s.n.
- HU, J., JIANG, X., JIA, M. y ZHENG, Y., 2018. Energy management strategy for the hybrid energy storage system of pure electric vehicle considering traffic information. *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 8, no. 8. ISSN 20763417. DOI 10.3390/app8081266.
- KOWAL, J., AVAROGLU, E., CHAMEKH, F., ŠENFELDS, A., THIEN, T., WIJAYA, D. y

- SAUER, D.U., 2011. Detailed analysis of the self-discharge of supercapacitors. *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 1, pp. 573-579. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2009.12.028.
- KREZANIK, P., VENET, P., HIJAZI, A. y CLERC, G., 2014. Study of supercapacitor aging and lifetime estimation according to voltage, temperature, and RMS current. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 9, pp. 4895-4902. ISSN 02780046. DOI 10.1109/TIE.2013.2293695.
- KUSHNIR, D. y SANDÉN, B.A., 2012. The time dimension and lithium resource constraints for electric vehicles. *Resources Policy*, vol. 37, no. 1, pp. 93-103. ISSN 03014207. DOI 10.1016/j.resourpol.2011.11.003.
- LARMINIE, J. y LOWRY, J., 2003. *Electric Vehicle Technology Explained*. S.I.: s.n. ISBN 0470090693.
- Lithium Ion Battery Market by Source, Type, Application & Geography| COVID-19 Impact Analysis|MarketsandMarkets™. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 4 junio 2020]. Disponible en: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/lithium-ion-battery-market-49714593.html>.
- MENDOZA, S. y FATHY, H.K., 2014. Entropy coefficient and thermal time constant estimation from dynamic thermal cycling of a cylindrical LiFePO4 battery cell. *ASME 2014 Dynamic Systems and Control Conference, DSCC 2014*, vol. 2, no. February. DOI 10.1115/DSCC2014-6176.
- MIAO, Y., HYNAN, P., VON JOUANNE, A. y YOKOCHI, A., 2019. Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements. *Energies*, vol. 12, no. 6, pp. 1-20. ISSN 19961073. DOI 10.3390/en12061074.
- MISANOVIC, S. y SPASOJEVIC, V., 2015. Measurement the fuel consumption of buses for public transport by the methodology SORT. , vol. 41, no. 2.
- MOHAN, N., UNDERLAND, T.D. y ROBBINS, W.P., 2003. *Power Electronics - Converters, Applications, and Design John Wiley & Sons, Inc.* S.I.: s.n. ISBN 0471429082.
- MORENO-TORRES, P., 2016. Analysis and Design Considerations of an Electric Vehicle Powertrain regarding Energy Efficiency and Magnetic Field Exposure. ,
- NÁJERA, J., MORENO-TORRES, P., LAFOZ, M., DE CASTRO, R.M. y ARRIBAS, J.R., 2017. Approach to Hybrid Energy Storage Systems dimensioning for Urban electric buses regarding efficiency and battery aging. *Energies*, vol. 10, no. 11. ISSN 19961073. DOI 10.3390/en10111708.
- OLIVEIRA, L., MESSAGIE, M., RANGARAJU, S., SANFELIX, J., HERNANDEZ RIVAS, M. y VAN MIERLO, J., 2015. Key issues of lithium-ion batteries - From resource depletion to environmental performance indicators. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 108, pp. 354-362. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.06.021. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.021>.
- ORTENZI, F., PASQUALI, M., PROSINI, P.P., LIDOZZI, A. y DI BENEDETTO, M., 2019. Design and validation of ultra-fast charging infrastructures based on supercapacitors for urban public transportation applications. *Energies*, vol. 12, no. 12. ISSN 19961073. DOI 10.3390/en12122348.
- PEDRAYES, J.F., MELERO, M.G., NORNIELLA, J.G., CANO, J.M., CABANAS, M.F., ORCAJO, G.A. y ROJAS, C.H., 2019. A novel analytical solution for the calculation of temperature in supercapacitors operating at constant power. *Energy*, vol. 188. ISSN 03605442. DOI 10.1016/j.energy.2019.116047.
- PETERS, J.F., BAUMANN, M., ZIMMERMANN, B., BRAUN, J. y WEIL, M., 2017. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 67, pp. 491-506. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2016.08.039. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.039>.
- Por delante en autonomía - Irizar e-mobility. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 1 junio 2020]. Disponible en: <https://www.irizar-emobility.com/soluciones-y-servicios/por->

- que-un-irizar/por-delante-en-autonomia/.
- SALEH, M., 2020. *Current Controller DC/DC Bidirectional Converter* [en línea]. 2020. S.I.: MATLAB Central File Exchange. Retrieved June 29,2020. Disponible en: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/63330-current-controller-dc-dc-bidirectional-converter>.
- SAW, L.H., SOMASUNDARAM, K., YE, Y. y TAY, A.A.O., 2014. Electro-thermal analysis of Lithium Iron Phosphate battery for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, vol. 249, pp. 231-238. ISSN 03787753. DOI 10.1016/j.jpowsour.2013.10.052.
- STEPHEN J. CHAPMAN, 2012. *Maquinas Eléctricas-Chapman-5ta-edición* [en línea]. 4: s.n. ISBN 9701049470. Disponible en: <https://www.yumpu.com/es/document/read/59512622/maquinas-electricas-chapman-5ta-edicion>.
- Supercapacitor - Wikipedia. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 5 abril 2020]. Disponible en: <https://en.wikipedia.org/wiki/Supercapacitor>.
- Supercapacitors Market | Growth, Trends, and Forecast (2020-2025). [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/supercapacitor-market>.
- Tesla Completes Acquisition of Maxwell Technologies | Tesla, Inc. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <https://ir.tesla.com/news-releases/news-release-details/tesla-completes-acquisition-maxwell-technologies>.
- THOMAS, K.E. y NEWMAN, J., 2003. Thermal Modeling of Porous Insertion Electrodes. *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 150, no. 2, pp. A176. ISSN 00134651. DOI 10.1149/1.1531194.
- TREMBLAY, O. y DESSAINT, L.A., 2009. Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications. *24th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium and Exhibition 2009, EVS 24*, vol. 2, pp. 930-939.
- TUTUIANU, M., MAROTTA, A., STEVEN, H., ERICSSON, E., HANIU, T., ICHIKAWA, N. y ISHII, H., 2014. Development of a World-wide Worldwide harmonized Light duty driving Test Cycle. *Technical Report* [en línea]. S.I.: Disponible en: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2014/wp29grpe/GRPE-68-03e.pdf>.
- Types of Lithium-ion Batteries – Battery University. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 4 junio 2020]. Disponible en: https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- UNECE, 2004. Worldwide harmonized motorcycle emissions certification procedure (WMTC) : technical report / transmitted by the expert from Germany Rosenthal, Gert Rosenthal, Gert. . S.I.:
- VALLEJO, L., 2019. *Movilidad eléctrica en el transporte de viajeros*. S.I.: Universida de Valladolid.
- VISWANATHA, V. y VENKATA SIVA REDDY, R., 2018. Microcontroller based bidirectional buck–boost converter for photo-voltaic power plant. *Journal of Electrical Systems and Information Technology* [en línea], vol. 5, no. 3, pp. 745-758. ISSN 23147172. DOI 10.1016/j.jesit.2017.04.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jesit.2017.04.002>.
- What is Supercapacitor (Ultracapacitor) - Characteristics, Working & Types. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 5 abril 2020]. Disponible en: <https://electricalfundablog.com/supercapacitor-ultracapacitor-characteristics-working/>.
- Why Did Elon Musk Spend \$218 Million on an Ultracapacitor Company? | Greentech Media. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 15 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.greentechmedia.com/articles/read/why-did-elon-musk-spend-218-million-on-an-ultracapacitor-company>.
- WLTPfacts.eu - Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure. [en línea], [sin fecha]. [Consulta: 28 marzo 2020]. Disponible en: <https://www.wltpfacts.eu/>.
- Worldwide electric vehicle sales by model 2019 | Statista. [en línea], [sin fecha].

[Consulta: 27 mayo 2020]. Disponible en: <https://www.statista.com/statistics/960121/sales-of-all-electric-vehicles-worldwide-by-model/>.

- XU, B., MEMBER, S., OUDALOV, A. y ULBIG, A., 2016. Modeling of Lithium-Ion Battery Degradation for Cell Life Assessment. , no. June. DOI 10.1109/TSG.2016.2578950.
- YU, H., CASTELLI-DEZZA, F. y CHELI, F., 2018. Multi-objective Optimal Sizing and Energy Management of Hybrid Energy Storage System for Electric Vehicles. [en línea], pp. 1-10. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1801.07183>.