



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Tesis de Maestría

Análisis y diseño de un sistema de almacenamiento
de energía híbrido para un vehículo eléctrico

Presentada por

Ing. Moises Rendon Valdez

Como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en ciencias en ingeniería
electrónica**

Director de tesis:

Dr. Jarniel García Morales

Codirector de tesis

Dr. Abraham Claudio Sánchez

Cuernavaca, Morelos, México. Septiembre de 2026



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Electrónica

Cuernavaca, Mor; 25/agosto/2026

Oficio No. DIE/0155/2026

Asunto: Aceptación de documentos de tesis.

CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **C. MOISES RENDON VALDEZ**, número de control **M24CE073** de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Electrónica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis profesional titulado **"ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO"**, y hemos encontrado que se han realizado todas las correcciones y observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.

DIRECTOR DE TESIS

CODIRECTOR DE TESIS

DR. JARNIEL GARCIA MORALES

Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 11106825

DR. ABRAHAM CLAUDIO SANCHEZ

Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 9526506

REVISOR 1

REVISOR 2

M.C. ALFREDO GONZALEZ ORTEGA

M.C. en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 5695647

DR. RODOLFO AMALIO VARGAS MENDEZ

Doctorado en Ciencias en Ingeniería Electrónica
Cédula profesional 7675050

C.c.p. Mtra. Verónica Sotelo Boyas. Jefa del Departamento de Servicios Escolares
Estudiante

JGM/ ibm



2026
año de
Margarita
Maza





Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, **27/agosto/2026**

Oficio No. SAC/270/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

MOISES RENDON VALDEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"ANÁLISIS Y DISEÑO DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA HÍBRIDO PARA UN VEHÍCULO ELÉCTRICO"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

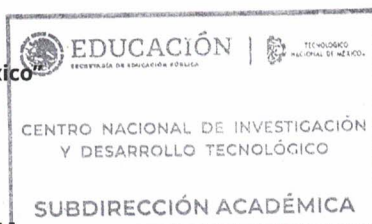
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Electrónica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



Dedicatoria

A Dios, que nunca me ha abandonado y siempre me ha provisto de lo necesario.

A mis familiares, que me apoyan en todas mis empresas.

A mis amigos, que están cuando se necesitan.

Agradecimientos

A Dios, que me ha permitido seguir pese a las circunstancias adversas que he vivido durante este periodo formativo, siendo que nunca me faltaron medicamentos, herramientas y recursos para lograr mis objetivos.

A mis padres, compañeros y amigos, que han hecho de red de seguridad, apoyándome cuando yo no puedo seguir más, buscando siempre estar conmigo cuando enfrento dificultades.

Al Tecnológico Nacional de México (TECNM) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por brindarme la oportunidad de seguir con mis estudios en el programa de maestría, al facilitarme los medios tangibles e intangibles (herramientas, espacios, servicios, etc.) con los que trabajar.

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por destinar recursos económicos a los programas de estudio de posgrados, pues me permitió acceder a una de las becas disponibles y beneficiarme del apoyo que supone mantenerse concentrado en completar este proceso formativo.

A mis asesores, que pacientemente me han guiado y corregido con tal de fomentar mi crecimiento académico al desarrollar este proyecto, y a mis revisores, que se encargaron de poner a prueba mis capacidades con tal de llevarme a percibir aquello a lo que era ciego y sordo.

Resumen

Este trabajo aborda el problema crítico de las baterías en los vehículos eléctricos: el desgaste acelerado que estas sufren debido a las variaciones de energía típicas de la conducción urbana. Para solucionar esto, se propone la integración de un sistema de almacenamiento de energía híbrido que combina la capacidad de las baterías con la rapidez de los supercondensadores, coordinándolos mediante una estrategia de administración de energía.

Este sistema basa su funcionamiento en el aprovechamiento de las características de cada dispositivo de almacenamiento de energía, designando roles a fin de repartir la carga de manera prudente, manteniendo el estrés térmico y eléctrico en niveles mínimos.

El objetivo de esta implementación es contribuir a la durabilidad de los componentes y extender la autonomía de los vehículos eléctricos. Al favorecer que las baterías operen bajo condiciones de menor estrés, se plantea una alternativa orientada a mejorar la movilidad eléctrica, en línea con los problemas de movilidad vistos actualmente en México y en el resto del mundo.

Palabras clave: vehículos eléctricos, baterías, supercondensadores, sistema de almacenamiento de energía híbrido, estrategia de administración de energía, durabilidad.

Abstract

This work addresses the critical issue of batteries in electric vehicles: the accelerated wear they suffer due to the energy fluctuations typical of urban driving. To solve this problem, we propose the integration of a hybrid energy storage system that combines the capacity of batteries with the speed of supercapacitors, coordinating them through an energy management strategy.

This system operates by leveraging the characteristics of each energy storage device, assigning roles to distribute the load prudently while keeping thermal and electrical stress at minimum levels.

The goal of this implementation is to contribute to the durability of the components and extend the range of electric vehicles. By enabling batteries to operate under less stressful conditions, this approach offers an alternative aimed at improving electric mobility, in line with the mobility challenges currently faced in Mexico and around the world.

Key words: electric vehicles, batteries, supercapacitors, hybrid energy storage system, energy management strategy, durability.

Contenido

<i>Dedicatoria</i>	II
<i>Agradecimientos</i>	III
<i>Resumen</i>	IV
<i>Abstract</i>	V
Índice de figuras	VIII
Índice de tablas	X
Acrónimos y simbología	XI
Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Justificación	2
1.4. Objetivos	2
1.4.1. General	2
1.4.2. Específicos.....	2
1.5. Alcances y limitaciones	3
Capítulo 2. Fundamentos teóricos	4
2.1. Dispositivos de almacenamiento de energía.....	4
2.2. Justificación de la tecnología seleccionada	7
2.3. Topologías del HESS	7
2.3.1. Pasiva	7
2.3.2. Semi-Activa.....	8
2.3.3. Activa	8
2.4. Estrategias de administración de energía	11
2.4.1. Basadas en optimización	11
2.4.2. Basadas en reglas	11
2.4.3. Lógica difusa.....	11
2.5. Estado del arte	13
2.5.1. Trabajos sobre HESS de batería-supercondensador.....	13
2.5.2. Trabajos sobre EMS	15

2.5.3. Trabajos sobre EV con HESS	17
2.6. Conclusión del estado del arte	17
2.7. Propuesta de solución.....	18
Capítulo 3. Análisis del EV y sus sistemas.....	19
3.1. Dinámica del vehículo	19
3.2. Caracterización de los ESD	21
3.3. Ciclos de conducción	24
Capítulo 4. Diseño e implementación del HESS	27
4.1. Dimensionamiento del HESS	27
4.2. Diseño de la estrategia de administración de energía	30
Capítulo 5. Resultados	40
5.1. Entorno de simulación.....	40
5.2. Desempeño del EMS propuesto	41
5.3. Comparación entre ciclos de manejo	45
5.4. Discusión	48
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro.....	53
Bibliografía	56
Anexos	62
Anexo A - Código de dimensionamiento del HESS	62
Anexo B - Código de simulación completa.....	66
Anexo C - Sistema de inferencia difusa (EMS)	78
Anexo D - Simulador destilado para prueba de ciclos individuales	91
Anexo E - Código para la comprobación del dimensionamiento del HESS ..	97
Anexo F - Hojas de datos	108
Anexo G - Tutorial de uso de la plataforma de simulación	118

Índice de figuras

Fig. 1 - Esquema de una batería [21]	4
Fig. 2 - Comparación de los distintos tipos de baterías [26]	6
Fig. 3 - Topología pasiva [12]	7
Fig. 4 - Topología capacitor semiactiva [12]	8
Fig. 5 - Topología paralela semiactiva [12]	8
Fig. 6 - Topología batería semiactiva [12]	8
Fig. 7 - Topología cascada activa [12]	8
Fig. 8 - Topología paralela activa [12]	8
Fig. 9 - Controlador basado en lógica difusa (FL) [49]	11
Fig. 10 - Diagrama de funcionamiento del vehículo eléctrico propuesto	19
Fig. 11 - Fuerzas que actúan sobre el vehículo [71]	19
Fig. 12 - Modelo Rint [74]	21
Fig. 13 - Ciclos de manejo evaluados	25
Fig. 14 - Ciclo de manejo superpuesto	26
Fig. 15 - Diagrama de Bode	29
Fig. 16 - Reparto de potencia ideal	29
Fig. 17 - Estrategia base (nominal)	33
Fig. 18 - Escenario de batería descargada	34
Fig. 19 - Escenario de batería cargada	35
Fig. 20 - Escenario de supercondensadores descargados	35
Fig. 21 - Escenario de supercondensadores cargados	36
Fig. 22 - Supervisor jerárquico	36
Fig. 23 - Ciclo de trabajo y comportamiento del convertidor Buck-Boost bidireccional	39
Fig. 24 - Reparto de potencia del sistema difuso	41
Fig. 25 - Comportamiento del supervisor	42
Fig. 26 - Acercamiento al reparto de potencia del sistema difuso	42
Fig. 27 - Comparativa de comportamiento del reparto de potencia (ideal vs. difuso)	43
Fig. 28 - Seguimiento del SOC del HESS	44
Fig. 29 - Ciclo de manejo y autonomía lograda	45
Fig. 30 - Ciclo de manejo de carácter urbano	46
Fig. 31 - Ciclo de manejo de carácter de carretera con velocidad sostenida	46
Fig. 32 - Ciclo de manejo de carácter mixto y de mayor recorrido	47
Fig. 33 - Uso y aprovechamiento del SC	49
Fig. 34 - Relación entre el estrés térmico y el tamaño del banco de supercondensadores	50
Fig. 35 - Voltaje en el banco de supercondensadores	50

Fig. 36 - Corriente demandada al banco de supercondensadores.....	51
---	----

Índice de tablas

Tabla 1 - Comparación de topologías de HESS para EV	9
Tabla 2 - Comparación de Convertidores DC-DC.....	10
Tabla 3 - Comparación de EMS para HESS en EV	12
Tabla 4 - Valores típicos en microvehículos.....	21
Tabla 5 - Datos de la curva OCV-SOC por celda NMC	23
Tabla 6 - Ecuaciones involucradas en el dimensionamiento preliminar.....	27
Tabla 7 - Variables del universo de discurso	31
Tabla 8 - Funciones membresía de la demanda.....	32
Tabla 9 - Funciones membresía del incremento de la demanda	32
Tabla 10 - Funciones membresía de estado de carga del banco de baterías	32
Tabla 11 - Funciones membresía de estado de carga del banco de SC	32
Tabla 12 - Distinción entre carga y descarga.....	33
Tabla 13 - Comportamiento del supervisor	36
Tabla 14 - Barrido paramétrico del banco de SC.....	48
Tabla 15 – Secuencia de ejecución	118

Acrónimos y simbología

<i>Acrónimo</i>	Significado
<i>NBB</i>	Baterías a base de níquel (Nickel-Based Batteries)
<i>LIB</i>	Baterías de ion de litio (Lithium-ion Batteries)
<i>SIB</i>	Baterías de ion de sodio (sodium-ion batteries)
<i>LB</i>	Baterías de plomo-ácido (Lead-Acid Batteries)
<i>DRC</i>	Ciclo de manejo (Driving Cycle)
<i>ESD</i>	Dispositivo de almacenamiento de energía (Energy Storage Device)
<i>SOC</i>	Estado de carga (State of Charge)
<i>SOE</i>	Estado de energía (State of Energy)
<i>SOH</i>	Estado de salud (State of Health)
<i>EMS</i>	Estrategia de administración de energía (Energy Management Strategy)
<i>FL</i>	Lógica difusa (Fuzzy Logic)
<i>PWM</i>	Modulación por ancho de pulso (Pulse Width Modulation)
<i>ESR</i>	Resistencia serie equivalente
<i>BMS</i>	Sistema de administración de batería (Battery Management System)
<i>ESS</i>	Sistema de almacenamiento de energía (Energy Storage System)
<i>HESS</i>	Sistema de almacenamiento de energía híbrido (Hybrid Energy Storage System)
<i>PDS</i>	Sistema de distribución de energía (Power Distribution System)
<i>SC</i>	Supercondensadores (Supercapacitors)
<i>EV</i>	Vehículos eléctricos (Electric Vehicles)
<i>OCV</i>	Voltaje de circuito abierto (Open Circuit Voltage)

<i>Símbolo</i>	Significado	Unidad
g	Aceleración gravitacional (gravedad)	$\frac{m}{s^2}$
a_x	Aceleración longitudinal	$\frac{m}{s^2}$
θ	Ángulo del camino (pendiente)	rad
A	Área frontal de vehículo	m^2
d_o	Autonomía (rango de conducción)	km
Q_{rated}	Capacidad requerida de la batería	Ah
C	Capacitancia	F
C_{SC}	Capacitancia requerida del SC	F
E_{bat}	Carga consumida por ciclo	J
D	Ciclo de trabajo del convertidor	-
C_a	Coefficiente de arrastre aerodinámico	-
C_r	Coefficiente de resistencia a la rodadura	-
α	Coefficiente de suavizado del filtro	-
P_{bat}^+	Componente positiva de la potencia de la batería	W
τ	Constante de tiempo del filtro exponencial adaptativo	s
$E_{bat(cicle)}$	Consumo específico	$\frac{Ah}{km}$
I_{bat}	Corriente de batería	A
I_L	Corriente de descarga	A
I_{SC}	Corriente del SC	A
I_{RMS}	Corriente eficaz de la batería	A
I_{bus}	Corriente en el BUS	A
ρ	Densidad del aire	$\frac{kg}{m^3}$
d_r	Distancia recorrida	km
T	Duración del ciclo	s
η_{trasn}	Eficiencia de la transmisión	-
η_{motor}	Eficiencia del motor	-
E	Energía disponible	J
E_{SC}	Energía en el supercondensador	J
E_0	Energía inicial	J
E_{max}	Energía total disponible	J
SOC_{bat}	Estado de carga del banco de baterías	%
SOC_{SC}	Estado de carga del banco de supercondensadores	%
$SOC_{SC(min)}$	Estado de carga del banco mínimo del banco de supercondensadores	%

$SOC_{SC(max)}$	Estado de carga máximo del banco de supercondensadores	%
$S_f(bat)$	Factor de seguridad (baterías)	-
$S_f(SC)$	Factor de seguridad (SC)	-
ΔE_{SC}	Fluctuación de energía del supercondensador	J
$\Delta E_{SC(max)}$	Fluctuación máxima de energía del supercondensador	J
ω	Frecuencia angular	$\frac{rad}{s}$
ω_c	Frecuencia angular de corte	$\frac{rad}{s}$
f_c	Frecuencia de corte	Hz
f_s	Frecuencia de muestreo	Hz
F_x	Fuerza de tracción	N
J	Función de costo	-
H_{LPF}	Función de transferencia del filtro pasa-bajas	-
$\Delta Pd(t_k)$	Incremento en la potencia demandada	kW/s
k	Índice de muestra	-
$F_{inertia}$	Inercia del vehículo	N
t_0	Instante inicial	-
τ_{min}, τ_{max}	Límites de la constante de tiempo	s
M_{SC}	Masa del banco de supercondensadores	kg
M	Masa total del vehículo	kg
t_k	Momento actual	-
N	Orden del filtro	-
$t_k - 1$	Pasado inmediato	-
D_{car}	Pendiente de carga/descarga	$\frac{V}{\%}$
T_s, τ_{min}	Periodo de muestreo	s
W_{bat}, W_{SC}	Pesos de importancia (batería y SC)	-
$P_{SC(max)}$	Pico de potencia máximo en el banco de supercondensador	kW
P_{bat}	Potencia de la batería	kW
P_{run}	Potencia de propulsión	kW
P_{SC}	Potencia del supercondensador	kW
Pd	Potencia demandada	kW
P_L	Potencia en terminales	kW
P_{bus}	Potencia real requerida en BUS	kW
DoD_{max}	Profundidad de descarga máxima	-

I_{SCref}	Referencia de corriente del supercondensador	A
F_{roll}	Resistencia a la rodadura	N
F_{slope}	Resistencia de la pendiente	N
F_{air}	Resistencia del aire	N
R_{SC}	Resistencia en el supercondensador	Ω
R_O	Resistencia interna	Ω
F_{res}	Resistencia total	N
$H(\omega)$	Respuesta en frecuencia	-
K	Salida del sistema difuso	-
S	Universo de discurso	-
s	Variable de Laplace	-
v	Velocidad del vehículo	$\frac{m}{s}$
U_{OC}	Voltaje de circuito abierto	V
$V_{bat(OCV)}$	Voltaje de circuito abierto de la batería	V
$V_{SC(OCV)}$	Voltaje de circuito abierto del supercondensador	V
V_{in}	Voltaje de entrada	V
V_{out}	Voltaje de salida	V
$V_{SC(max)}$	Voltaje de trabajo máximo del supercondensador	V
$V_{bat(min)}$	Voltaje de trabajo mínimo de la batería	V
$V_{SC(min)}$	Voltaje de trabajo mínimo del supercondensador	V
$V_{SC(int)}$	Voltaje disponible/instantáneo del supercondensador	V
V_{bus}	Voltaje en el BUS	V
U_L	Voltaje en terminales	V
$V_{SC(nom)}$	Voltaje nominal del supercondensador	V
$V_{SC(term)}$	Voltaje terminal del supercondensador	V

Capítulo 1. Introducción

1.1. Antecedentes

El transporte es uno de los ámbitos donde el avance tecnológico ha sido más notable, desde la invención del automóvil en 1885 por Carl Benz. El automóvil eléctrico apareció en el mercado a comienzos del siglo XX, pero no logró consolidarse: las baterías estaban en una etapa incipiente de desarrollo, desventaja que se agravó con la caída del precio de los combustibles y la popularidad de los vehículos de Henry Ford [1]. Con el tiempo, el aumento de la temperatura global y la contaminación del aire dejaron de poder ignorarse [2-4]. Los vehículos eléctricos (EV) desempeñan un papel crucial en la reducción del impacto ambiental del transporte; sin embargo, aunque superan a los de combustión interna en muchos aspectos, su autonomía sigue limitada por las restricciones intrínsecas de los bancos de baterías [5]. El desgaste acumulado de las celdas agrava estas limitaciones y, a gran escala, restringe el aprovechamiento de los beneficios del EV. La tecnología actual aún requiere mejoras, sin embargo, la combinación de distintos sistemas de almacenamiento de energía (ESS) permite potenciar el desempeño individual de estos [6, 7]. Tesla ha presionado a fabricantes como Nissan y Renault a mejorar para no rezagarse en esta carrera tecnológica [3, 8, 9], sin embargo, las propuestas presentadas requieren de consideraciones ante la aplicación específica que se desee abordar. La propuesta más relevante es el sistema de almacenamiento de energía híbrido (HESS), que combina distintos ESS para compensar las deficiencias de cada uno por separado. El caso más estudiado integra baterías de ion de litio (LIB) y supercondensadores (SC) interconectados [10, 11], cuyo comportamiento se ajusta según la topología adoptada [12, 13]. Esta flexibilidad le permite adaptarse a diversas condiciones operativas y explotar simultáneamente la alta densidad de energía de las LIB y la elevada densidad de potencia de los SC [7, 10, 14].

El presente trabajo se desarrolla dentro de la línea de investigación «Acondicionamiento Electrónico de Energías Limpias y Ahorro de Energía», en la cual se han generado contribuciones previas sobre modelado, control y aprovechamiento energético en vehículos eléctricos. En [15] se abordó el modelado y la evaluación del desempeño de un vehículo eléctrico, estableciendo la base metodológica para el análisis de la dinámica longitudinal y de las demandas de potencia que aquí se retoma. En [16] se desarrolló el control de un motor de inducción con frenado regenerativo, aportando criterios sobre la recuperación de energía que se incorporan al diseño de la EMS. En [17] se estudió el manejo de energía con supercondensadores, sentando precedente para el papel del banco de SC en la absorción de transitorios. Sobre estos antecedentes, esta tesis extiende la línea al integrar un HESS batería-supercondensador en topología semiactiva, gobernado por una EMS de lógica difusa jerárquica, validada en simulación bajo ciclos de manejo urbanos.

1.2. Planteamiento del problema

El problema central es la dificultad de las baterías para sostener sus capacidades ante las exigencias de carga y descarga propias de los ciclos de conducción reales. Como estas demandas son dinámicas, generan picos de alta potencia que someten a las baterías a un estrés continuo, lo que acelera la pérdida de su vida útil y, con ello, merma las capacidades del vehículo [5].

Los sistemas de almacenamiento de energía híbrido (HESS) [10] y las estrategias de administración de energía (EMS) [6] constituyen parte fundamental de la solución; por ello, en este trabajo se exploran los elementos necesarios para lograr su implementación conjunta.

1.3. Justificación

La implementación de un sistema de almacenamiento de energía híbrido (HESS) de batería-SC es una solución efectiva para atenuar las limitaciones típicas del banco de baterías en el vehículo eléctrico (baja vida útil, alto desgaste, estrés térmico continuo, etc.), pues combina las fortalezas de cada elemento: la alta densidad de energía permite sostener la operación durante periodos prolongados, mientras que la alta densidad de potencia permite absorber los picos de consumo y de generación de energía. [5, 7, 10, 14, 18]

Dado que uno de los retos más importantes en los vehículos eléctricos es la mejora de la autonomía [9, 19], este proyecto contribuye a mejorar las condiciones bajo las cuales se cubre la necesidad básica de transportarse. La movilidad eficiente es un fenómeno que trasciende fronteras y, pese a los múltiples impedimentos que existen en todos los niveles, la adopción de nuevas tecnologías para resolver las problemáticas inmediatas constituye una prioridad.

1.4. Objetivos

1.4.1. General

Analizar un sistema de almacenamiento de energía híbrido (HESS) y plantear un sistema de administración de energía, que sea conveniente para su uso en vehículos eléctricos.

1.4.2. Específicos

- Realizar una revisión exhaustiva de los sistemas híbridos de almacenamiento de energía y seleccionar el adecuado para el contexto de los vehículos eléctricos (EV).
- Analizar y comparar las diferentes estrategias de administración de energía (EMS) en vehículos eléctricos, para seleccionar la adecuada para el sistema de almacenamiento híbrido (HESS).
- Diseñar e implementar en simulación el HESS y la estrategia de gestión de energía (EMS) seleccionada.

- Obtener los resultados para verificar el buen funcionamiento del sistema conjunto (HESS y EMS).

1.5. Alcances y limitaciones

Se exploran en profundidad distintos conceptos relacionados con los vehículos eléctricos, en particular los referentes a los HESS de batería-supercondensador y a las EMS. Su análisis permite visualizar las alternativas de diseño para un control efectivo.

No obstante, es necesario aclarar que en el presente documento se presenta un diseño en el que no se desarrollan los siguientes aspectos:

- La construcción de un prototipo, ni su implementación práctica.
- Un análisis exhaustivo de costos o viabilidad económica.
- Consideraciones detalladas sobre la seguridad y estrategias de tolerancia de fallas.
- Modelos matemáticos detallados y validados experimentalmente.

Aunque son aspectos importantes, se plantean como trabajo futuro.

Capítulo 2. Fundamentos teóricos

La complejidad propia de los EV está en la gestión de sus componentes, pues es necesario balancear dos aspectos críticos: la energía total disponible (autonomía) y la potencia. A través de la revisión de la literatura se puede observar que en los EV el uso de las baterías está ampliamente extendido, sin embargo, estas carecen de capacidad para dar una respuesta dinámica capaz de suplir los transitorios de alta potencia sin sufrir de un desgaste prematuro.

2.1. Dispositivos de almacenamiento de energía

Las baterías son sistemas electroquímicos de almacenamiento de energía, constituidos por tres partes fundamentales: un ánodo, un cátodo y un electrolito impregnado en un separador *microporoso*, siendo que existen diversas configuraciones de electrolito, como se muestra en la Fig. 1. [6, 20-22]

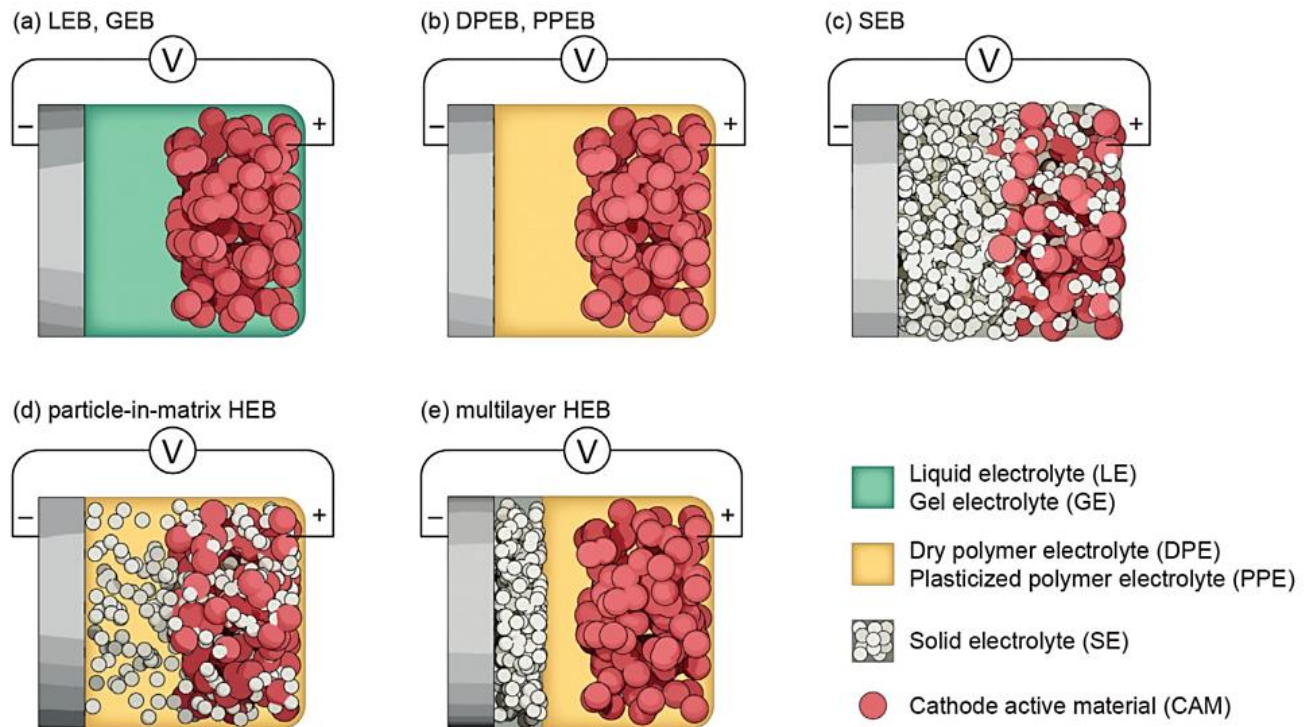


Fig. 1 - Esquema de una batería [21]

En las LIB, el material del que usualmente está hecho el cátodo es óxido de cobalto y litio, o fosfato de hierro y litio, mientras que el ánodo es usualmente de grafito. Además, han sido ampliamente utilizadas por los fabricantes de EV, pues son intrínsecamente mejores que las baterías que las precedieron, ya que proveen de una alta densidad energética, peso relativamente bajo, pocas pérdidas de carga/descarga, una lenta tasa de autodescarga, un tiempo de vida y capacidad de almacenamiento energético alta, además de ser más accesibles a nivel económico que otras opciones que aún se encuentran en desarrollo. [23]

Estas ventajas permiten dotar a los vehículos que las integran de una autonomía alta a un precio razonable; sin embargo, las LIB también tienen inconvenientes. En primer lugar, al contener disolventes inflamables y manejar una alta densidad energética, presentan el riesgo inherente de sobrecalentarse, cortocircuitarse e incluso explotar ante un mal uso o condiciones extremas, por lo que deben manejarse con cuidado. En segundo lugar, la disponibilidad del material utilizado baja, ya que el litio es un elemento limitado y no renovable, con lo que el alza en la demanda incrementa su costo y desestabiliza la cadena de suministro. Adicionalmente, el reciclaje de estos productos es un proceso importante y complejo que busca mitigar estos problemas. [20, 24]

Las baterías de ion de sodio (SIB) utilizan iones de sodio como portador de carga, su cátodo está hecho usualmente de óxido metálico de sodio, óxido de níquel u óxido de cobalto y el ánodo usualmente es de materiales con base de carbono. Los electrodos pueden tener distintas composiciones, así como distintas capacidades de almacenamiento de energía, temperatura de operación, profundidad de descarga, resistencia interna y estabilidad en su comportamiento.[6]

Una de las principales ventajas de las SIB es la disponibilidad de los materiales para su construcción, contrario a lo visto en los materiales utilizados en las LIB, puesto que el sodio es más abundante en la corteza terrestre, con lo que el suministro es estable y el precio bajo debido a la disponibilidad. Al mismo tiempo, presenta una resistencia al desgaste mayor, llegando incluso a más de 3000 ciclos de carga/descarga, un excelente desempeño en distintas temperaturas de trabajo, soporta condiciones extremas, con lo que son menos susceptibles a brechas de seguridad (cortocircuito, sobrecarga, sobredescarga, etc.) y tienen una recarga sorprendentemente rápida, sin embargo, su densidad energética es relativamente baja y hay ausencia de la infraestructura necesaria para su producción. Aunque el desarrollo de estas las sitúa cerca de las LIB en sus características generales, aún requiere perfeccionarse la composición de sus electrodos, electrolitos y aditivos para que su comportamiento esté completamente balanceado. [6, 24, 25]

Las baterías de plomo-ácido (LB), además de los componentes básicos de una batería, tienen válvulas de seguridad y una carcasa protectora, pues es necesario contener adecuadamente los componentes potencialmente peligrosos, ya que el cátodo es de óxido de plomo, el ánodo es de plomo esponjoso, y el electrolito es ácido sulfúrico. Son las baterías más comunes en el mundo, pues constituyen una tecnología madura y ampliamente extendida, con buena relación calidad-precio y baja probabilidad de brechas de seguridad durante su uso. No obstante, presentan serias desventajas: son ESD sumamente voluminosos y pesados, con una densidad energética baja, además de ser altamente contaminantes. [23]

Las baterías a base de níquel (NBB) tienen un cátodo de hidróxido de níquel y un electrolito de hidróxido de potasio, sin embargo, el ánodo puede estar hecho de distintos compuestos, como hidróxido de hierro, cadmio o zinc. La composición de estas baterías puede variar, sin embargo, estas se caracterizan por tener una alta tasa de carga/descarga sin perder sus capacidades nominales con el tiempo, además de tener un tiempo de respuesta corto, pero dependiendo de la composición de sus electrodos y su electrolito, pueden tener características muy distintas, cambiando por completo su comportamiento, y aunado a eso, son sustancialmente más caras y contaminantes que otras alternativas. [22]

Las baterías de estado sólido son un ESD similar a las LIB, pero con un electrolito de estado sólido, que está compuesto por una variedad de óxidos, trifosfatos y otros compuestos iónicos. El electrolito sólido mejora las características ya vistas en las LIB, siendo que son más seguras que estas, pues no existe riesgo de filtración del electrolito, evadiendo de esta manera la posibilidad de fuego o explosión causada por la combustión de este. Al tratarse de un electrolito de estado sólido, las baterías tienen un punto de fusión muy alto, proveyendo así de estabilidad térmica a la batería, sin embargo, esta tecnología no es perfecta, pues, la formación de grietas por expansión de volumen o reacciones interfaciales es frecuente, causando así la pérdida de contacto en las interfaces (electrodos), así como el crecimiento dendrítico que puede provocar un cortocircuito en la celda. [21]

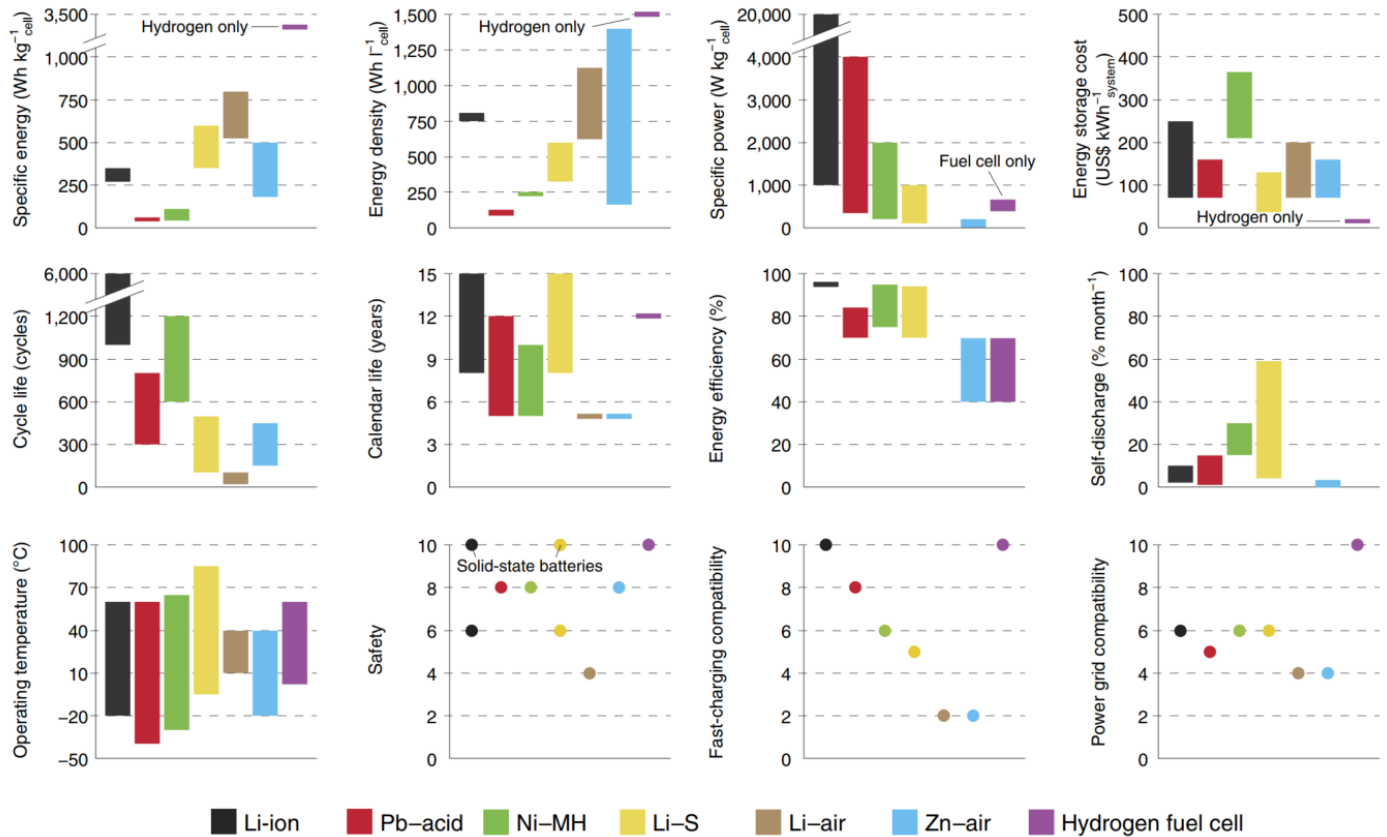


Fig. 2 - Comparación de los distintos tipos de baterías [26]

2.2. Justificación de la tecnología seleccionada

Se ha optado por adoptar las LIB como ESD principal, ya que han sido ampliamente utilizadas por los fabricantes de EV. Aunque actualmente existen muchos tipos de baterías, las LIB se mantienen como el estándar indiscutible [6, 27-30], pues son intrínsecamente mejores que otras opciones (Fig. 2): proveen una alta densidad energética, un tiempo de vida y una capacidad de almacenamiento energético equilibrados, y resultan económicamente más accesibles que otras tecnologías aún en desarrollo, como las SIB [25].

La conducción urbana exige un comportamiento dinámico por parte de las LIB, sin embargo, dicha capacidad está severamente restringida debido a factores físicos, como es el caso de las resistencias internas o procesos electroquímicos irreversibles (degradación del cátodo, crecimiento de dendritas, expansión y deformación de los electrodos) [24, 29, 31-35].

En vista de las deficiencias de las LIB, los SC emergen como el complemento idóneo, pues, a diferencia de las baterías, donde el almacenamiento de energía es químico y se da por medio de reacciones redox, los SC almacenan energía de manera electrostática o mediante reacciones farádicas superficiales rápidas. Debido a esta naturaleza, son más robustos, superan el millón de ciclos de uso y pueden cargarse o descargarse a una velocidad significativamente superior (en el orden de los milisegundos). [20, 36, 37]

La simple combinación de fuentes resulta insuficiente si no se define cómo se interconectarán y controlarán. Se han identificado tres configuraciones de interconexión (topologías), y su selección dependerá del aspecto que se priorice: control energético, eficiencia de conversión o costo de implementación. [7, 10]

2.3. Topologías del HESS

2.3.1. Pasiva

La topología pasiva consiste en la conexión en paralelo del banco de baterías y SC directamente al BUS, como se muestra en la Fig. 3. Aunque destaca por su simplicidad y bajo costo, carece de un control activo del flujo de energía, con lo que el voltaje del SC queda 'inmovilizado' por el correspondiente al banco de baterías, dejándolo de esta manera inhabilitado para asumir la carga impuesta por las fluctuaciones de voltaje del BUS, haciendo que el banco de baterías se vea seriamente afectado [12].

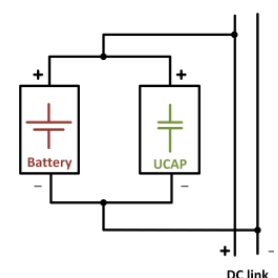


Fig. 3 - Topología pasiva [12]

2.3.2. Semi-Activa

La topología semiactiva (Fig. 4, Fig. 5, Fig. 6) se posiciona como una configuración equilibrada al evaluar su relación costo-beneficio [38], pues integra un convertidor bidireccional (típicamente *Buck-Boost* o *SEPIC*) únicamente en una rama (típicamente en el SC), por lo que logra proteger eficazmente el banco de baterías mientras mantiene un rango de acción flexible, con lo que mantiene una efectividad alta aun cuando tiene una menor cantidad de elementos que una topología activa (Tabla 1). [39-41]

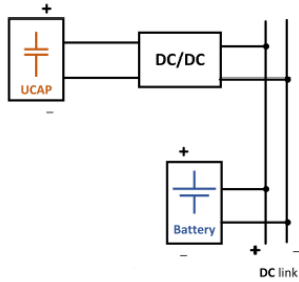


Fig. 4 - Topología capacitor semiactiva [12]

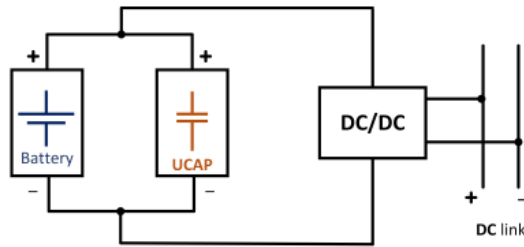


Fig. 5 - Topología paralela semiactiva [12]

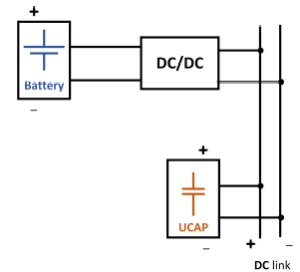


Fig. 6 - Topología batería semiactiva [12]

2.3.3. Activa

La topología totalmente activa, en cambio, emplea convertidores dedicados para cada fuente de energía (Fig. 7, Fig. 8), lo que permite un control preciso y el desacople total de los voltajes respecto al BUS. Sin embargo, estos beneficios se ven opacados por su mayor peso, volumen y costo, así como por una menor eficiencia global: las múltiples etapas de conversión introducen pérdidas de conmutación y mayor complejidad computacional [42].

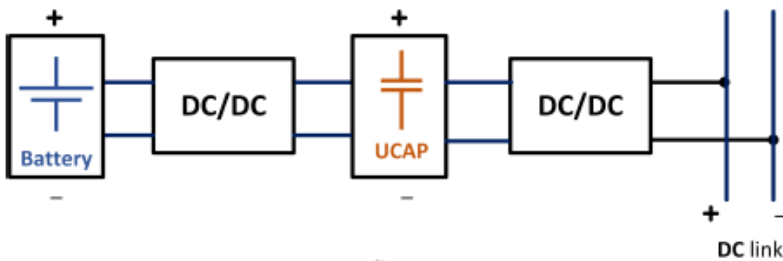


Fig. 7 - Topología cascada activa [12]

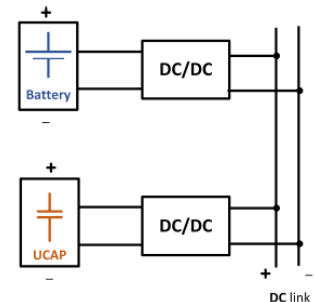


Fig. 8 - Topología paralela activa [12]

Tabla 1 - Comparación de topologías de HESS para EV

Topología	Pasiva	Semiactiva	Activa
Descripción	Batería y SC conectados directamente en paralelo al <i>BUS DC</i> .	Una fuente (SC, batería o ambos) conectada al <i>BUS DC</i> a través de un convertidor DC-DC bidireccional, mientras la otra fuente se encuentra conectada de manera directa.	Ambas fuentes (SC y batería) conectadas al <i>BUS DC</i> a través de convertidores DC-DC bidireccionales independientes.
Control de flujo de potencia [7, 38, 41]	Nulo, pues la distribución se da de manera no controlada.	Activo sobre la fuente acoplada al convertidor. Permite gestionar la contribución de potencia.	Activo sobre ambas fuentes, lo que permite mantener el total control sobre la gestión de las contribuciones de potencia simultáneamente.
Complejidad del hardware	Baja, pues no requiere de convertidores.	Media, pues requiere de un convertidor bidireccional.	Alta, pues requiere de dos convertidores bidireccionales.
Costo	Bajo.	Medio.	Alto.
Eficiencia [5, 38]	Baja, pues las cargas dinámicas no están controladas.	Media, pues la adición de un convertidor permite manejar de mejor manera los transitorios (carga y descarga).	Potencialmente alta, ya que con el uso de múltiples convertidores las pérdidas pueden ser significativas.
Manejo de los transitorios [5, 7, 41]	Limitado debido a una respuesta pasiva.	Efectivo, ya que con el convertidor se vuelve sencillo absorber y entregar la potencia (en los picos), protegiendo así el banco de baterías.	Muy efectivo. El control logrado ante los transitorios permite aprovechar al máximo las fuentes de poder.
Gestión de vida útil de la batería [18, 43]	Limitada.	Mejor, debido al desvío de los transitorios al SC.	Máxima flexibilidad al optimizar la operación del banco de baterías y prolongar su vida útil.
Recuperación de energía [14]	Limitada en eficiencia y control.	Mejorada al permitir la carga eficiente del SC.	Máxima, pues permite optimizar la recuperación y distribución de la energía.

Tabla 2 - Comparación de Convertidores DC-DC

Convertidor	Buck	Boost	Buck-Boost Bidireccional	Multinivel	Basados en impedancia
<i>Función principal</i>	Reductor de voltaje.	Elevador de voltaje.	Reductor y elevador de voltaje.	Elevación o reducción de voltaje con múltiples niveles.	Elevación de voltaje con capacidad de un 'Buck-Boost' inherente.
<i>Bidireccionalidad [40, 44-46]</i>	Unidireccional.	Unidireccional.	Bidireccional.	Puede ser bidireccional.	Puede ser bidireccional.
<i>Aplicación típica en HESS [40, 45, 46]</i>	Carga de una fuente de menor voltaje desde un BUS de mayor voltaje.	Descarga de una fuente de menor voltaje a un BUS de mayor voltaje.	Acoplamiento de fuente con voltaje variable al BUS, permitiendo de esta manera la carga y descarga.	Aplicaciones de alta potencia o alto voltaje, o bien, donde se requiere manejo de fallas.	Aplicaciones que requieren una alta elevación de voltaje y robustez ante las perturbaciones.
<i>Complejidad</i>	Baja.	Baja.	Media, pues requiere de control para operar de manera bidireccional.	Alta, debido a su gran cantidad de componentes.	Media alta.
<i>Rango de voltaje</i>	$V_{out} < V_{in}$	$V_{out} > V_{in}$	Maneja un amplio rango de voltajes. $V_{out} < V_{in}$ o $V_{out} > V_{in}$	Ideal para altos voltajes.	Ideal para altas relaciones de elevación. $V_{out} > V_{in}$
<i>Adecuado para acoplar un SC [40, 44-48]</i>	No.	No.	Altamente adecuado, por el abanico de opciones de control.	Potencialmente adecuado, pero es complejo en su aplicación.	Potencialmente adecuado, pero no es común este uso particular.

2.4. Estrategias de administración de energía

2.4.1. Basadas en optimización

El enfoque basado en optimización permite adaptar el sistema a situaciones específicas o complejas, por medio del cálculo del punto óptimo al minimizar la función de costo sobre un parámetro conocido, lo que conduce a una solución global [35, 49, 50]. Aunque esta aproximación es superior al lograr el balance entre eficiencia y autonomía útil en los EV, genera una carga computacional significativa que obliga a simplificar los algoritmos para aplicaciones en tiempo real (Tabla 3).

2.4.2. Basadas en reglas

El enfoque basado en reglas prioriza la robustez y la simplicidad computacional, facilitando su implementación en microcontroladores de bajo costo. Este enfoque está fundamentado en trasladar el comportamiento físico (modelos matemáticos) de los componentes al diseño de estrategias altamente especializadas en aprovechar al máximo las capacidades del sistema, sin embargo, las reglas fijas suelen dar respuestas subóptimas (poca o nula flexibilidad). [42, 51]

2.4.3. Lógica difusa

La lógica difusa (FL) usa reglas con una estructura 'Si-Entonces' e 'intervalos' para definir el significado de los valores de entrada, en otras palabras, se traduce el razonamiento humano en un marco matemático [49]. Esta técnica se aplica mediante tres etapas (Fig. 9): la 'Fusificación', que convierte variables físicas a conjuntos difusos, 'Motor de inferencia', que evalúa las reglas lingüísticas y la 'Defusificación' que convierte la respuesta difusa a una señal de control. Este esquema se extenderá en la sección 4.2 mediante una arquitectura jerárquica.

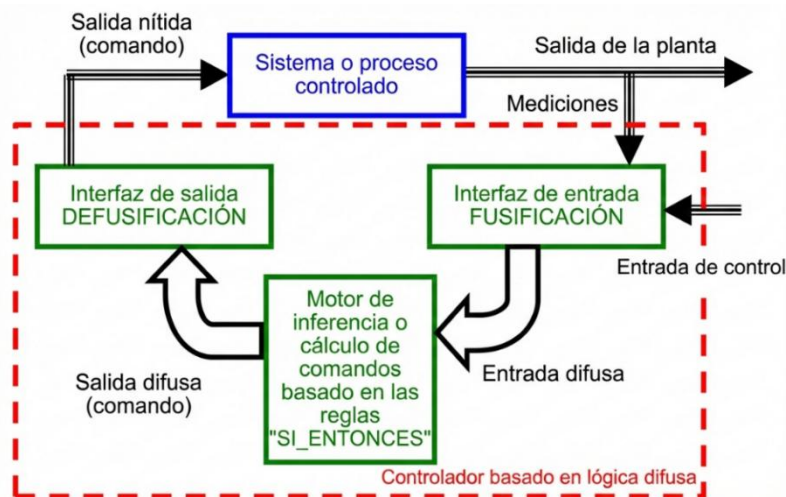


Fig. 9 - Controlador basado en lógica difusa (FL) [49]

Tabla 3 - Comparación de EMS para HESS en EV

Estrategia	Basada en reglas	Basadas en optimización	Basadas en inteligencia artificial
Descripción [43, 51-57]	Utilizan un conjunto de reglas lógicas y umbrales para distribuir la potencia. Pueden ser determinísticas o usar lógica difusa con tal de lograr mayor flexibilidad.	Buscan optimizar una función objetivo en un horizonte de tiempo limitado, basándose en modelos del sistema.	Utilizan algoritmos para aprender la manera de controlar de manera óptima el sistema, a partir de datos o interacción con el entorno.
Complejidad de desarrollo o implementación [42, 51, 53-55, 57]	Baja a media, pues depende de las reglas impuestas, sin embargo, es relativamente sencilla la implementación.	Alta, pues requiere de un modelado preciso y de algoritmos de optimización.	Alta, pues requiere de la recolección y procesamiento de datos, y entrenamiento de modelos complejos.
Carga computacional [42, 51, 53, 54, 57]	Baja.	Media alta.	Alta.
Adaptabilidad en condiciones cambiantes [51-56]	Limitada si las reglas son fijas.	Alta, pues puede adaptarse a cambios en las condiciones de operación y estado del sistema.	Muy alta, pues puede aprender y adaptarse a patrones complejos y no lineales.
Transparencia de la lógica de decisión [43, 51, 57]	Alta, pues las reglas son explícitas y comprensibles.	Media, ya que se basa en modelos matemáticos y la función objetivo.	Baja, por el problema de la 'caja negra' en los modelos complejos.
Capacidad de optimización [5, 18, 53-56]	Subóptima a nivel general.	Alta.	Potencialmente alta, pues permite optimizar múltiples objetivos simultáneamente.
Requerimientos de información [43, 57]	No requiere de información.	Requiere de predicciones del ciclo de conducción o demanda futura para optimizar.	Requiere de datos históricos para predecir o adaptarse.
Adecuado para el proyecto [33, 58-60]	Altamente adecuada, pues ofrece un buen equilibrio entre el rendimiento y la simplicidad de comprensión e implementación.	Adecuada, pero en la fase inicial tiene una alta complejidad y requisitos computacionales.	Adecuada, pero tiene una alta complejidad de desarrollo y de interpretación.

2.5. Estado del arte

La literatura sobre los EV es extensa y abarca múltiples temáticas, por lo que resulta necesario acotarla. A partir de la revisión realizada, el alcance de este trabajo se delimita en los apartados siguientes.

2.5.1. Trabajos sobre HESS de batería-supercondensador

En [13] se presenta una revisión exhaustiva de las topologías aplicables a vehículos híbridos o eléctricos. Sus aplicaciones no se limitan a estos, ya que la captación de energías renovables es otro objetivo clave. Conocer estas topologías permite reducir costos al implementar la que mejor se ajuste a las características del proyecto.

En [61] se aborda la comparación de la topología semiactiva y activa de los HESS, para determinar cuál de ellas es más efectiva cuando existe una carga variable sobre el sistema de almacenamiento híbrido. Después de concluir con la comparativa, la topología activa paralela terminó siendo la mejor para su utilización en vehículos eléctricos, pues soportó mejor las variaciones de carga y descarga.

En [12] se hace una revisión de las distintas configuraciones y topologías que pueden tener los sistemas de almacenamiento de energía híbrido, de modo que se denotan sus virtudes, defectos, interconexión, comportamiento y utilidad. Concluyendo que las topologías pasiva y semiactiva no respondían bien una vez que se les somete a estrés, mientras que la topología activa dio mejores resultados bajo la misma carga. La información contenida es sumamente ilustrativa, pues contiene gráficos que corresponden a los diagramas de conexión, tablas comparativas y gráficas de comportamiento.

En [33] realizan comparaciones entre distintas topologías de convertidores DC-DC para HESS y EMS, siendo su principal enfoque el análisis de las características de cada una de ellas, partiendo del hecho de que existen exigencias dinámicas que dependen del entorno y la situación.

En [7] se realizó una revisión exhaustiva de los HESS, abarcando sus distintas topologías, tipos de convertidores (no aislados, aislados y multinivel) y estrategias de control. Las estrategias de control se clasificaron como basadas en reglas y basadas en optimización. La primera ofrece simplicidad y robustez, mientras que la segunda ofrece soluciones óptimas, pero con una mayor complejidad computacional. Al mismo tiempo, se destacó la importancia de la gestión energética, pues es crítico no solo para mejorar el rendimiento del HESS al lidiar con el manejo de transitorios de potencia o dar una respuesta dinámica, sino que contribuye significativamente a mejorar la longevidad de los componentes. Este trabajo facilita la información para la selección de la topología del HESS, y la estrategia de manejo de energía para aplicaciones específicas de los EV, considerando requisitos de potencia y autonomía, tanto como las restricciones de eficiencia, costo y durabilidad del sistema.

En [38] se explora un estudio comparativo sobre las HESS y sus diversas topologías (pasiva, semiactiva y totalmente activa) aplicadas en EV, siendo que se evaluaron criterios fundamentales como el rendimiento dinámico del vehículo, la eficiencia energética del sistema de almacenamiento, el costo de implementación del hardware, la complejidad del sistema de control y su impacto en la vida útil de

la batería. Los resultados de este estudio señalan que la topología semiactiva, en tanto integre un convertidor DC-DC bidireccional en el SC, ofrecerá un equilibrio entre los factores mencionados, puesto que protege eficazmente la batería de corrientes pico y transitorios de potencia, desviándolos al SC, que es en esencia mejor para lidiar con este tipo de fluctuaciones rápidas, logrando un control adecuado sin incurrir en la complejidad y costos elevados de la topología totalmente activa.

En [39] se investigó un sistema de control de picos para un HESS de batería-SC, utilizando una topología semiactiva con un convertidor SEPIC auxiliar para la distribución de potencia, esto con el objetivo de mitigar los efectos perjudiciales de las corrientes de alta magnitud y transitorios rápidos que la batería experimenta, y que causan su degradación. El control de corriente de pico implementado demostró ser eficaz en la supresión de las perturbaciones de carga de alta amplitud, limitando la corriente máxima de la batería. El enfoque que proponen es crucial para garantizar la estabilidad operativa y la longevidad del HESS, pues permite a la batería operar en un régimen más suave y controlado, lo que conlleva una mayor fiabilidad y un menor costo de mantenimiento.

En [41] se propone una topología semiactiva modificada para un HESS con un banco de baterías de ion de litio y SC en EV. En esta propuesta, el sistema integra un convertidor DC-DC bidireccional y un esquema de control para la distribución de potencia, validado por medio de simulaciones y verificación experimental. De esta manera, el sistema demostró sus capacidades para manejar demandas de cargas fluctuantes y reducir la corriente sobre la batería al permitir que el SC absorba los picos de potencia, logrando de esta manera una mejora significativa en el rendimiento, mejorando también la eficiencia energética global y la prolongación sustancial de la vida útil de la batería.

La propuesta que se maneja en este artículo es sumamente relevante, puesto que da las pautas para lograr integrar eficazmente un sistema similar al propuesto en esta tesis.

En [35] se presenta un marco de optimización multicapa para HESS en EV, permitiendo la combinación estratégica de diferentes celdas de batería (níquel cobalto aluminio y níquel manganeso cobalto). El marco optimiza conjuntamente la distribución de capacidad entre químicas y la división de potencia entre fuentes para un ciclo de conducción específico, resultando de esta manera una combinación híbrida de químicas de batería que ofrece un equilibrio superior entre eficiencia energética y peso, optimizando el rendimiento del EV, incluyendo la autonomía, respuesta dinámica y durabilidad. Con este enfoque es posible plantear un diseño específico y eficiente del HESS al adaptarse a necesidades vehiculares específicas.

En [51] se realiza una revisión exhaustiva sobre las aplicaciones de los FLC en la gestión de energía de los vehículos eléctricos híbridos y con sistemas HESS, siendo que los FLC pueden gestionar eficazmente el flujo de potencia entre diferentes fuentes de energía (motor de combustión, motor eléctrico, batería, SC, etc.). La revisión concluye que la lógica difusa ofrece una solución robusta y flexible para manejar la incertidumbre y la complejidad de los EMS en los EV, esto debido a su capacidad para procesar información imprecisa y tomar decisiones basadas en reglas lingüísticas, lo que se traduce en una mejora significativa de la eficiencia, reducción de emisiones y optimización del rendimiento general del HESS para EV.

En [40] se realizó el análisis, modelado e implementación de un convertidor Buck-Boost bidireccional conmutado para su uso en un sistema de almacenamiento de energía híbrido de un EV con capacidad V2G (Vehicle to Grid), donde la integración de dicho convertidor desempeñó un papel fundamental al permitir la interacción bidireccional con la red al mantener un control eficiente del flujo de energía.

En [10] se realiza una revisión exhaustiva de los HESS (la combinación de las baterías y supercondensadores), cubriendo su concepto, las diversas topologías de conexión (pasiva, activa y semiactiva) y EMS. Este trabajo es fundamental para comprender lo que esta combinación representa respecto a la alta densidad de energía y de potencia que maneja, cómo es que actúan de manera sinérgica, su capacidad para manejar picos de energía, mantener una alta eficiencia operativa y extender la vida útil de la batería en un EV. Esta revisión es una guía indispensable para el planteamiento del diseño de un HESS, pues proporciona una base sólida de la que partir.

2.5.2. Trabajos sobre EMS

En [50] se aborda el modelado y la optimización de los EMS en un EV al presentar un modelo matemático detallado del tren motriz, componentes de propulsión y almacenamiento de energía. Se parte de un EMS basado en reglas para estudios sobre la optimización avanzada. El resultado de la investigación subraya que la optimización del EMS es un factor clave para reducir el consumo de energía y mejorar la eficiencia global del sistema, puesto que es crucial para cumplir con regulaciones y las expectativas del consumidor. Si bien en este trabajo se exploraron diversas técnicas de modelado y algoritmos de optimización, lo más importante de este trabajo es que proporciona las herramientas necesarias para idear y construir una EMS efectiva.

En [18] se investigó la influencia de las EMS en el estado de salud de la batería en vehículos eléctricos híbridos, al utilizar modelos de envejecimiento para cuantificar el impacto de diferentes EMS en la degradación de la batería, simulando la pérdida de capacidad y el aumento de la resistencia interna. El estudio demostró que una EMS diseñada óptimamente mitiga significativamente la degradación de la batería al evitar ciclos profundos de descarga o limitando la exposición a altas temperaturas y corrientes, dicha atenuación prolonga sustancialmente la vida útil de la batería. Resaltar la importancia de los mecanismos de degradación en el diseño de la EMS para la sostenibilidad y viabilidad económica de los vehículos eléctricos híbridos es totalmente necesario, pues en caso de no tomarse en cuenta, los resultados serán poco favorables.

En [62] se propuso un EMS para EV con HESS de batería-SC basada en un nuevo algoritmo de filtrado adaptativo. Este algoritmo descompone la señal de potencia demandada en componentes de baja frecuencia y alta frecuencia, asignando a la batería por su densidad energética y al SC por su densidad de potencia respectivamente, logrando con esta asignación de roles, una dinámica con la que se optimiza la distribución de corrientes entre las fuentes, mejorando la eficiencia energética al reducir pérdidas por calentamiento en la batería al protegerla de corrientes pulsantes y fluctuaciones rápidas.

En [42] se propone la implementación física de un controlador de lógica difusa (FLC) para la gestión de energía de un HESS con una topología paralela totalmente activa y un banco de baterías de ion de litio. La implementación demostró su capacidad para asegurar la distribución eficiente y dinámica de

potencia entre las fuentes, decidiendo cuándo el SC debe absorber energía regenerada o asistir a la batería, reduciendo la degradación de la batería al evitar condiciones de estrés, validando de esta manera la viabilidad de los FLC en EMS de EV reales por sus capacidades ante la incertidumbre.

En [63] el estudio se centra en los EMS, con un particular enfoque en el aprovechamiento de la energía de frenado regenerativo para su almacenamiento en el HESS, probando por medio de simulaciones detalladas diferentes algoritmos de control de flujo de energía. Demostrando en el proceso la efectividad de los SC para reducir la carga de trabajo sobre la batería, especialmente al manejar la energía recuperada durante la regeneración, que, de otro modo, generaría picos de corriente perjudiciales.

En [43] se realizó el análisis de distintas EMS (basadas en reglas, basadas en optimización y basadas en aprendizaje automático) y se halló que la integración de modelos de envejecimiento, que pueden predecir la pérdida de capacidad o el aumento en la resistencia interna durante el diseño de las EMS, es un factor importante al minimizar la degradación de la batería. Una EMS bien diseñada no solo optimiza el rendimiento al distribuir eficientemente la energía, sino que también actúa activamente mitigando el envejecimiento prematuro de la batería, al evitar ciclos profundos de descarga o picos de corriente excesivos.

En [11] se llevó a cabo una revisión sistemática de las EMS específicamente diseñadas para aplicaciones en EV que emplean HESS de batería-SC, iniciando por la clasificación y evaluación de diversas EMS basándose en sus objetivos primordiales (maximizar la eficiencia, prolongar la vida útil de la batería o mejorar el rendimiento dinámico), las metodologías implementadas (heurística, optimización, IA) y el rendimiento logrado en diferentes escenarios de conducción, enfatizando que una EMS efectiva y robusta es indispensable para lograr una optimización integral de la distribución de potencia entre la batería y el SC.

En [52] se muestra una EMS, que mediante el uso de un controlador de lógica difusa y un HESS, busca distribuir de manera eficiente la energía con tal de evitar el desgaste prematuro del banco de baterías. Situación que consiguen lograr a través del uso de la topología activa paralela de un HESS y reglas estrictas para el controlador de lógica difusa.

En [64] se mencionan factores que influyen en el desgaste prematuro de las baterías, al mismo tiempo que se plantea cómo mantener la salud del banco de baterías a través del uso de supercondensadores y estrategias de administración de energía (EMS), que, según el enfoque, pueden implicar el uso de IA u otras técnicas que se valen de sistemas informáticos.

En [65] se realiza un análisis completo sobre los aspectos a considerar para optimizar el consumo de carga, además de una revisión de distintas EMS (algoritmos genéticos, redes neuronales, etc.), que mediante el muestreo en tiempo real sobre la velocidad del vehículo se realicen afinaciones a los parámetros de funcionamiento sin caer en la dependencia del HESS, partiendo del modelado del comportamiento del vehículo en condiciones de conducción.

En [66] se presenta un modelo predictivo de control (MPC) con un enfoque a los HESS, cuyo fin es disminuir el estrés que sufre la batería, al asignar las fluctuaciones de alta frecuencia a los supercondensadores y de baja frecuencia a la batería.

2.5.3. Trabajos sobre EV con HESS

En [67] se aborda el trayecto que ha llevado al desarrollo de los vehículos eléctricos, los retos que se han solucionado y aquellos que depara el futuro, al mismo tiempo que señala las ventanas de oportunidad para lograr el máximo aprovechamiento de los componentes del vehículo. Es necesario aclarar que las problemáticas como la autonomía deficiente, la baja densidad energética del banco de baterías, el comportamiento del sistema motriz, entre otras muchas, son en realidad los aspectos con los que todavía se trabaja, y se espera que se siga trabajando debido a que no se ha llegado al pico tecnológico donde estas situaciones sean cosa del pasado.

En [14] analizan el comportamiento del freno regenerativo al compararlo con un sistema de recuperación de energía cinética, cuyos resultados son relevantes para la mejora e implementación del sistema de recuperación de energía en vehículos alimentados total o parcialmente por un banco de baterías. Concluyendo que realmente es mejor el freno regenerativo que el sistema de recuperación cinético, ya que el sistema cinético supone una masa adicional que debe considerarse.

En [68] se realiza un experimento mediante el cual se busca demostrar el impacto del uso del freno regenerativo en la autonomía total del vehículo, para de esta manera encontrar la forma de optimizar la recuperación energética dada a lo largo de un camino que pudiera estar en condiciones diversas (tipo de terreno, modo de manejo, condición climática, etc.).

En [36] aborda el desarrollo de un controlador no lineal con el que sea posible hacer la conversión de energía de manera que se aproveche de mejor manera, evitando la degradación de la batería y sacándole el máximo provecho al HESS en una configuración activa. Finalmente, el diseño llevó a dos controladores por modos deslizantes: uno para regular la corriente de la batería y otro para regular el voltaje en la carga, con lo que se logró garantizar la estabilidad global del sistema al evitar la degradación de la batería.

2.6. Conclusión del estado del arte

La investigación realizada desemboca en tres hallazgos principalmente: los picos de corriente y transitorios de potencia rápidos constituyen el factor principal en la degradación del banco de baterías de un EV, y la hibridación batería-SC es la respuesta directa a esta problemática, dadas sus características complementarias, al unir fuentes con una alta densidad de potencia y energía [7, 10, 69]. La evidencia disponible, dadas las condiciones de simulación o validación experimental, coincide en que desviar los transitorios al SC reduce el estrés de corriente sobre la batería y prolonga su vida útil [39, 41, 42]. Aunque las topologías totalmente activas muestran un mejor comportamiento ante cargas dinámicas [12, 61], son penalizadas dada la complejidad de su control y alto coste. Comparativamente, la topología semiactiva con convertidor bidireccional en el SC mantiene un mejor equilibrio entre la complejidad en el control y el coste [7, 38], pues el convertidor define las limitaciones prácticas del arreglo [33, 40]. El potencial del HESS se materializa a través de la EMS [11, 18, 43].

Los trabajos revisados tienden a abordar estos elementos por separado, ya que el acoplamiento del dimensionamiento y EMS se plantea únicamente desde la optimización para un ciclo de conducción

específico [35], las estrategias reportadas operan sobre arquitecturas previamente definidas [42, 52], y la división frecuencial se estudia como mecanismo de reparto sin vincular sus parámetros con la etapa de dimensionamiento del HESS [62, 66]. Con esto claro, este trabajo apunta a abordar la integración del dimensionamiento a partir de la demanda de ciclos de manejo reales, con una división frecuencial cuya constante de tiempo se adapte mediante inferencia difusa bajo una supervisión jerárquica por estados de carga, y evaluar el conjunto ante escenarios de conducción dinámica constante.

2.7. Propuesta de solución

Con la revisión de la literatura se han encontrado datos que señalan lo siguiente:

- La topología del HESS idónea para mantener la estabilidad e integridad del banco de baterías en un EV es la semiactiva, pues, aun cuando la topología activa permite un mayor control, tiene más componentes y es más compleja, con lo que su aplicación estaría limitada a vehículos de grandes dimensiones o alto precio, mientras que la topología semiactiva es sumamente flexible, con lo que puede adaptarse fácilmente a la mayoría de EV, con precios relativamente bajos y dimensiones variadas.
- El convertidor es una parte fundamental del HESS, pues es la parte que permite distribuir la energía efectivamente, con lo que el tipo de convertidor definirá en gran medida las limitaciones del HESS en cuestión. Es necesario que sea un convertidor flexible, sencillo y capaz de desempeñar el rol que le corresponde con fiabilidad, con lo que el convertidor Buck-Boost termina por ser ideal para su utilización con la topología semiactiva. Existen muchos tipos de convertidores adecuados para distintas aplicaciones, pero son pocos los que resultan robustos y flexibles a la vez, ya sea por el número de componentes o por su sensibilidad a factores externos.
- Los SC son sumamente importantes en los HESS batería-SC, pues permiten absorber los picos de entrada o salida de corriente, con lo que, al igual que en el caso de los HESS, es necesario tomar en cuenta aquellos que tengan la mayor flexibilidad al usarlos (evaluar el factor de forma al plantearlos en un entorno real).
- La EMS es el mecanismo que establece el control de las variables presentes en el sistema, siendo el área que mayor atención requiere. La más efectiva para lograr un control flexible y adaptable es una estrategia basada en reglas: las estrategias basadas en optimización e IA ofrecen un desempeño notable, pero exigen modelos matemáticos precisos y un alto costo computacional durante su entrenamiento.

En resumen, para este trabajo se optará por una topología semiactiva con el convertidor Buck-Boost en el SC para el HESS y una EMS basada en reglas con lógica difusa jerárquica. De esta manera se maximizarán las capacidades del SC para amortiguar los transitorios, al tiempo que la EMS pueda ser diseñada sin problemas dados por los modelos matemáticos. La combinación seleccionada ofrece el mejor compromiso entre desempeño, robustez y simplicidad de implementación para el caso de estudio.

Capítulo 3. Análisis del EV y sus sistemas

Dado que este proyecto se enfoca en explorar el funcionamiento e implementación de un HESS, como caso de estudio se optó por un HESS con topología semiactiva (Fig. 10), por el equilibrio entre sus capacidades y complejidad, implementado dentro de un microvehículo eléctrico de uso urbano. Esta configuración plantea grandes beneficios, al considerar que las tendencias marcan la urbanización como el futuro de muchas locaciones [70].

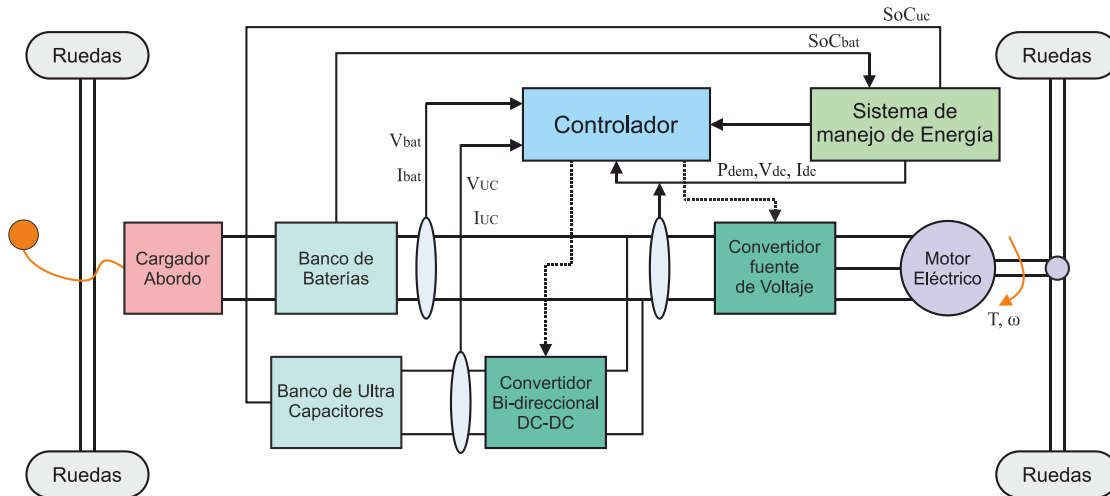


Fig. 10 - Diagrama de funcionamiento del vehículo eléctrico propuesto

3.1. Dinámica del vehículo

Para interpretar correctamente las demandas energéticas que experimentará el HESS en los ciclos de manejo (DRC) planteados, es necesario entender la interacción del EV con su entorno, tal como se muestra en el siguiente diagrama (Fig. 11):

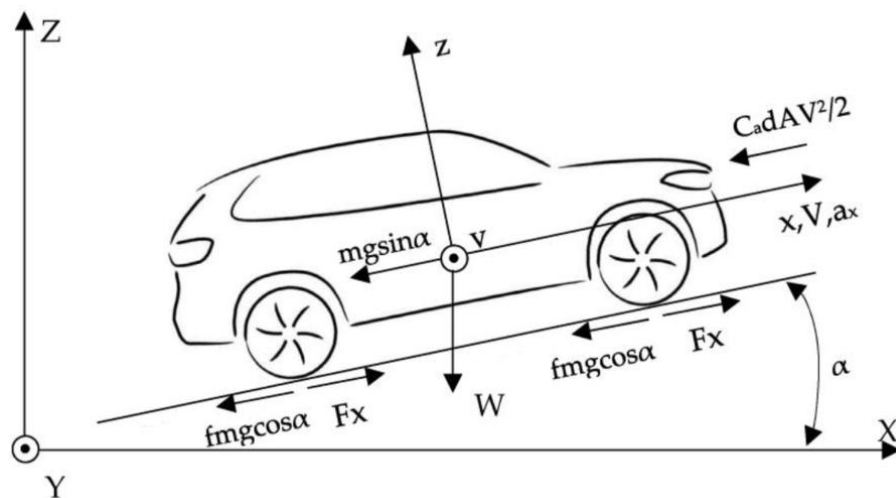


Fig. 11 - Fuerzas que actúan sobre el vehículo [71]

El vehículo se representa en un diagrama de cuerpo rígido con un centro de masa, situándolo sobre una línea recta en el plano cartesiano (eje X), de manera que sea posible evaluar las fuerzas que actúan sobre él con mayor precisión. [71-73]

Las fuerzas de resistencia que actúan sobre el movimiento longitudinal del vehículo son las siguientes:

$$F_{air} = C_a * \rho * A * \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

La resistencia aerodinámica (1), donde C_a es el coeficiente de arrastre, ρ es la densidad del aire, A es el área frontal del vehículo y v es la velocidad del vehículo.

$$F_{roll} = C_r * M * g \cos(\theta) \quad (2)$$

$$F_{slope} = M * g \sin(\theta) \quad (3)$$

La resistencia de rodadura (2) y la resistencia por pendiente (3), donde C_r es el coeficiente de resistencia a la rodadura, M es la masa total del vehículo, g es la aceleración gravitacional (gravedad) y θ es el ángulo del camino.

$$F_{inertia} = M * a_x \quad (4)$$

$$F_x = F_{inertia} + F_{air} + F_{roll} + F_{slope} \quad (5)$$

Por lo tanto, la fuerza de tracción transmitida (5) sería la suma de los distintos componentes de resistencia, incluyendo la inercia del vehículo (4), donde a_x es la aceleración del vehículo. Considerando que la resistencia de la pendiente está ligada al ángulo del camino, esta puede despreciarse, debido a que el recorrido se considera plano, con lo que la potencia requerida se calculará de la siguiente manera (6):

$$P_{run} = F_x v = (F_{inertia} + F_{air} + F_{roll})v \quad (6)$$

Sin embargo, ha de considerarse la eficiencia del tren motriz (η_{motor} motor y η_{trasn} transmisión en el vehículo) para que los cálculos de la potencia requerida real (P_{bus}) sean acertados (7).

$$\begin{aligned} \text{Si } (P_{run} > 0) \text{ entonces } P_{bus} &= \frac{P_{run}}{\eta_{motor} * \eta_{trasn}} \\ \text{Si } (P_{run} \leq 0) \text{ entonces } P_{bus} &= P_{run} * (\eta_{motor} * \eta_{trasn}) \end{aligned} \quad (7)$$

Es necesario notar que los valores de la eficiencia conmutan según las variaciones en la potencia dada para propulsar el vehículo, de manera que habrá entonces variaciones en la energía necesaria para la propulsión y la disponible debido al frenado regenerativo (7).

Tabla 4 - Valores típicos en microvehículos

Tipo de VE	Micro – vehículo	Peso del vehículo (ideal)	500kg
Coeficiente de arrastre aerodinámico	0.3	Peso del vehículo (estimado)	740kg
Coeficiente de resistencia a la rodadura	0.015	Autonomía	100 km
Voltaje nominal del sistema	400V	Área frontal	1.8 m ²
Eficiencia del motor (propulsión/regeneración)	95% – 80%	Eficiencia de la transmisión (propulsión/regeneración)	90% – 85%

3.2. Caracterización de los ESD

El HESS depende en gran medida de las características individuales de cada uno de los ESD, pues, pese a la intervención del sistema de distribución de energía (PDS), si la energía no está disponible o lo está bajo condiciones no previstas, el sistema fallará ineludiblemente. [67]

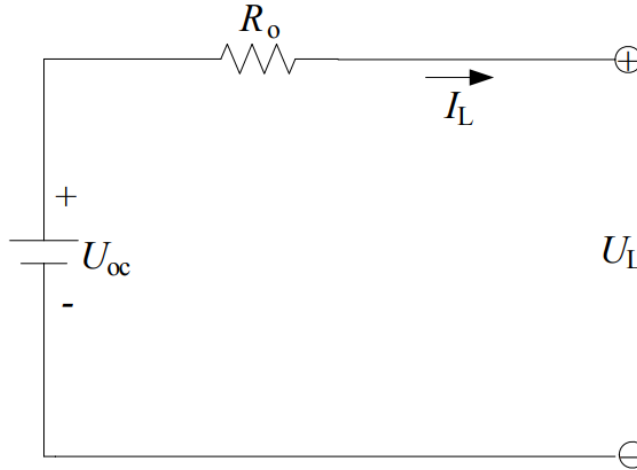


Fig. 12 - Modelo Rint [74]

$$U_L = U_{oc} - I_L R_O \quad (8)$$

$$P_L = U_L * I_L \quad (9)$$

$$P_L = (U_{oc} - I_L R_O) * I_L \rightarrow I_L U_{oc} - I_L^2 R_O \quad (10)$$

$$I_L = \frac{-(-U_{oc}) \pm \sqrt{(-U_{oc})^2 - 4(R_O)(P_L)}}{2(R_O)} = \frac{U_{oc} \pm \sqrt{U_{oc}^2 - 4(R_O)(P_L)}}{2R_O} \quad (11)$$

El modelo de resistencia interna (R_{int}) es el circuito eléctrico equivalente más sencillo (Fig. 12), utilizado para representar el comportamiento de distintos ESD, como es con las LIB y SC. Este únicamente consiste en una fuente ideal U_{OC} en serie con una resistencia interna R_O , siendo U_L el voltaje de descarga y I_L la corriente de descarga (8), siendo el desglose posterior (9) y (10) la manera de definir un parámetro que impactará la manera en que se realiza el dimensionamiento del HESS. Si bien existen distintos modelos matemáticos, para representar el funcionamiento de distintos ESD [74, 75], este modelo brinda flexibilidad debido a su simplicidad, siendo que requiere de pocos recursos de cómputo, funciona excelente en etapas tempranas de diseño y requiere pocos datos, sin embargo, debido a su simplicidad, este modelo pasa por alto distintos efectos, como es el caso de la polarización por transferencia de carga, difusión energética, histéresis y efectos térmicos en el caso de las LIB, y en el caso de los SC pasa por alto la dependencia de la capacitancia con el voltaje, la polarización por transferencia de carga y la difusión energética [75-77]. Por sí mismo, este modelo no representa una opción adecuada, sin embargo, este modelo puede complementarse.

Para el caso de las LIB, es crucial llevar el seguimiento del estado de carga (SOC), puesto que con esta información es posible tomar decisiones sobre el modo en que se administra la energía disponible. Uno de los métodos comúnmente usados en conjunto con el modelo R_{int} es el denominado conteo de Coulomb (Coulomb counting), este es un método usado para calcular la carga eléctrica (Coulomb) que entra o sale de la LIB, siendo que no requiere la curva OCV-SOC para el seguimiento del SOC, sin embargo, el modelo R_{int} sí la utiliza para determinar el voltaje de circuito abierto a cada instante [78].

$$SOC_{bat}(t) = SOC_{bat}(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t I_{bat}(t) dt}{Q_{rated}} \quad (12)$$

$$SOC_{bat}(t) = SOC_{bat}(t - 1) - \left(\frac{I_{bat} * Ts}{Q_{rated} * 3600} \right) * 100 \quad (13)$$

$$V_{bat(OCV)} = V_{bat(min)} + (D_{car} * SOC_{bat}) \quad (14)$$

La ecuación (12), $SOC_{bat}(t_0)$ corresponde a los valores iniciales del SOC del banco de LIB, mientras que I_{bat} representa la corriente que circula en él y Q_{rated} es la capacidad nominal de la batería, siendo la ecuación (13) el desglose con el que se simplifica el cálculo de las variaciones en SOC al considerar el periodo de muestreo T_s , y la conversión de segundos a horas, habiendo definido claramente el comportamiento del banco de LIB, definiendo el voltaje de circuito abierto ($V_{bat(OCV)}$), el voltaje de trabajo mínimo ($V_{bat(min)}$) y la pendiente de carga/descarga (D_{car}). Este método es particularmente sencillo de implementar, sin embargo, requiere de un SOC inicial para comenzar con los cálculos, que, dependiendo de la lectura, señal de muestreo (oscilador), cambios en el comportamiento y estado de salud (SOH), puede generar errores en los cálculos. El modo en que se complementa el modelo R_{int} con el método del conteo de Coulomb está dado en cómo el seguimiento del SOC implica la continua integración de la corriente, lo que a su vez permite determinar la variación en el voltaje de circuito

abierto (OCV) en cada instante para de esta manera calcular adecuadamente el voltaje de salida [75, 78, 79]. Es necesario notar que el modelo lineal de voltaje de circuito abierto expresado en la ecuación (14) se dejó de lado en el simulador, siendo que, en lugar de visualizar directamente el OCV del banco de baterías como una relación proporcional y constante, se considera, la no linealidad de su comportamiento, siendo la interpolación de su valor un medio más efectivo y atinado para corresponder a las dinámicas que sigue su comportamiento (Tabla 5).

Tabla 5 - Datos de la curva OCV-SOC por celda NMC

SOC	0%	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
OCV	3	3.3	3.45	3.52	3.55	3.58	3.62	3.67	3.75	3.90	4.20

El comportamiento de los SC es esencialmente distinto debido a que el comportamiento al almacenar voltaje es lineal, de manera que llevar el seguimiento del estado de energía (SOE) es parte esencial para comprender adecuadamente el SOC.

$$E_{max} = \frac{1}{2} C_{SC} V_{SC(nom)}^2 \rightarrow \frac{1}{2} C_{SC} (V_{SC(max)}^2 - V_{SC(min)}^2) \quad (15)$$

$$C_{SC} = \frac{2E_{max}}{V_{SC(max)}^2 - V_{SC(min)}^2} \quad (16)$$

$$SOC_{SC} = \frac{E_o}{E_{max}} \quad (17)$$

$$SOC_{SC} = \frac{E(t)}{E_{max}} * 100 \quad (18)$$

$$SOC_{SC} = \frac{\frac{1}{2} C V_{SC(int)}^2}{\frac{1}{2} C V_{SC(nom)}^2} \rightarrow \left(\frac{V_{SC(int)}}{V_{SC(nom)}} \right)^2 \therefore V_{SC(int)}(t) = V_{SC(nom)} \sqrt{SOC_{sc}(t)} \quad (19)$$

$$\Delta E_{SC} = P_{SC}(t) * T_s \quad (20)$$

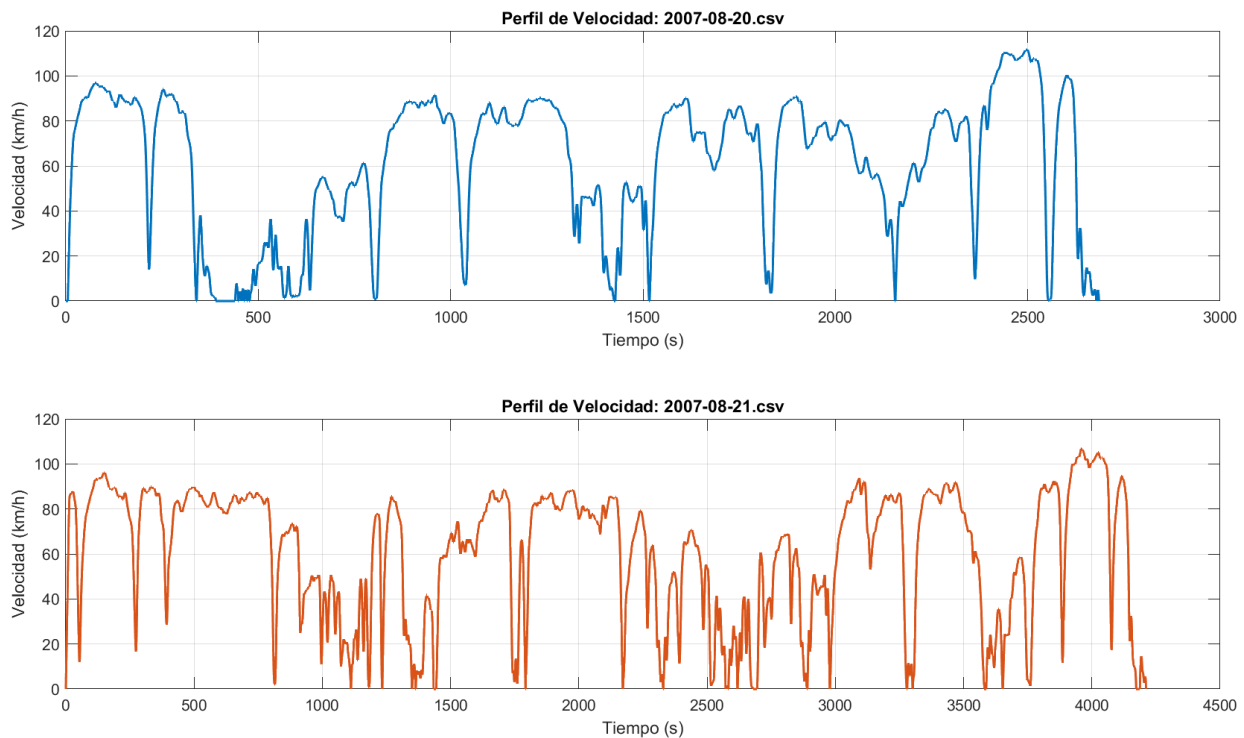
$$E(t) = E(t - 1) - \Delta E_{SC} - I_{SC}^2(t) * R_{SC} * T_s \quad (21)$$

Debido a que los SC almacenan energía de manera electrostática, es necesario desglosar detalles de su comportamiento, como la energía que el SC ha de almacenar (15) y la capacidad resultante (16), para de esta manera poder considerar posteriormente la energía disponible E y la energía que se consume en un momento dado en relación con el incremento en la demanda ΔE_{SC} , durante el seguimiento del estado de carga (18).

3.3. Ciclos de conducción

Las condiciones bajo las cuales se desempeña el EV son importantes para acoplar el HESS a las exigencias del recorrido, siendo los ciclos de conducción la herramienta necesaria para describirlas, plasmando el tipo de terreno, las variaciones de velocidad en el manejo, junto a otras variables como la altitud, ángulo de inclinación del vehículo, etc.

Debido a la importancia que tienen los ciclos de manejo en este tipo de trabajos, lo ideal sería caracterizarlos para las condiciones que se desea evaluar [80], sin embargo, en este trabajo se utilizaron los ciclos de manejo disponibles en el inventario regional de viajes de hogares de Chicago del Laboratorio Nacional de las Montañas Rocosas (National Laboratory of the Rockies), del Departamento de Energía de los Estados Unidos (Fig. 13).



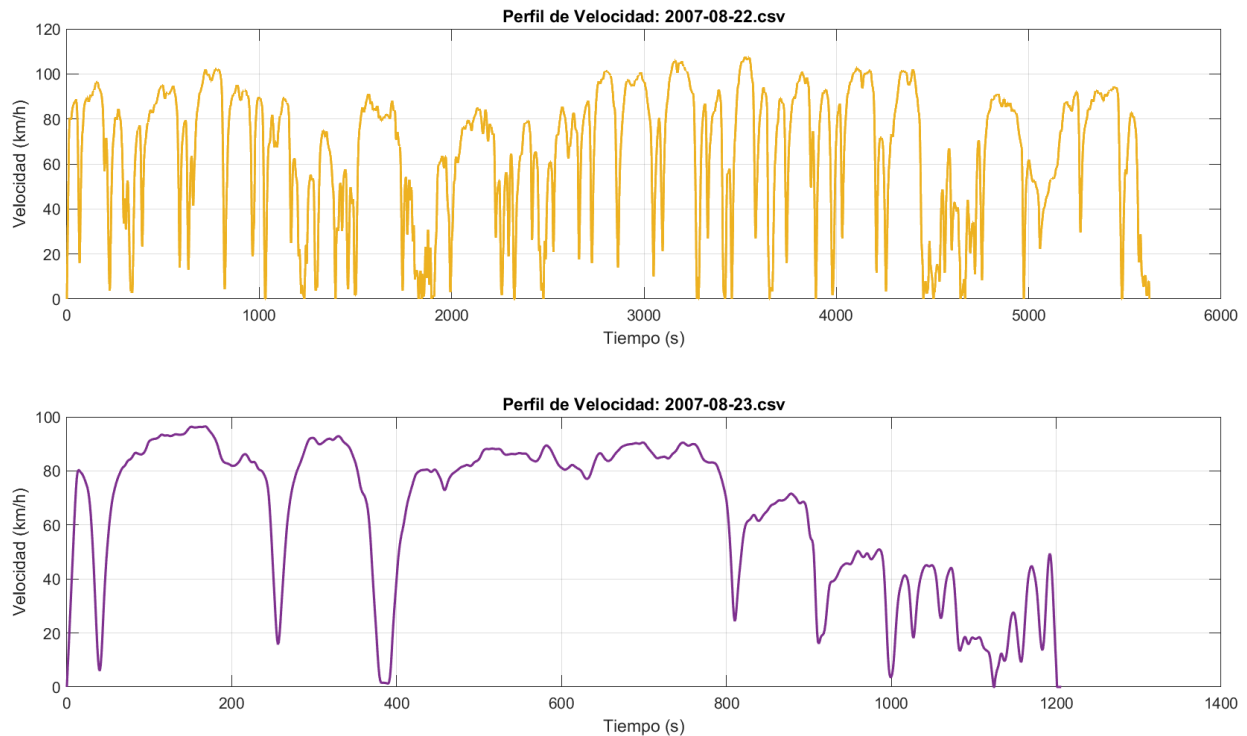


Fig. 13 - Ciclos de manejo evaluados

Estos ciclos de manejo fueron elegidos considerando un manejo urbano, e ilustran las características únicas de distintos trayectos, sin embargo, para el correcto dimensionamiento del HESS se requiere procesar la información para obtener un perfil de máxima demanda, unificando las condiciones de manejo vistas y planteando la demanda máxima exhibida en los distintos ciclos de manejo [71].

Para obtener este perfil de máxima demanda, se superpusieron los datos de los ciclos de manejo, para tomar únicamente los valores más altos pertenecientes a la velocidad, pues de ella se calcula la demanda, como se ve a continuación (Fig. 14):

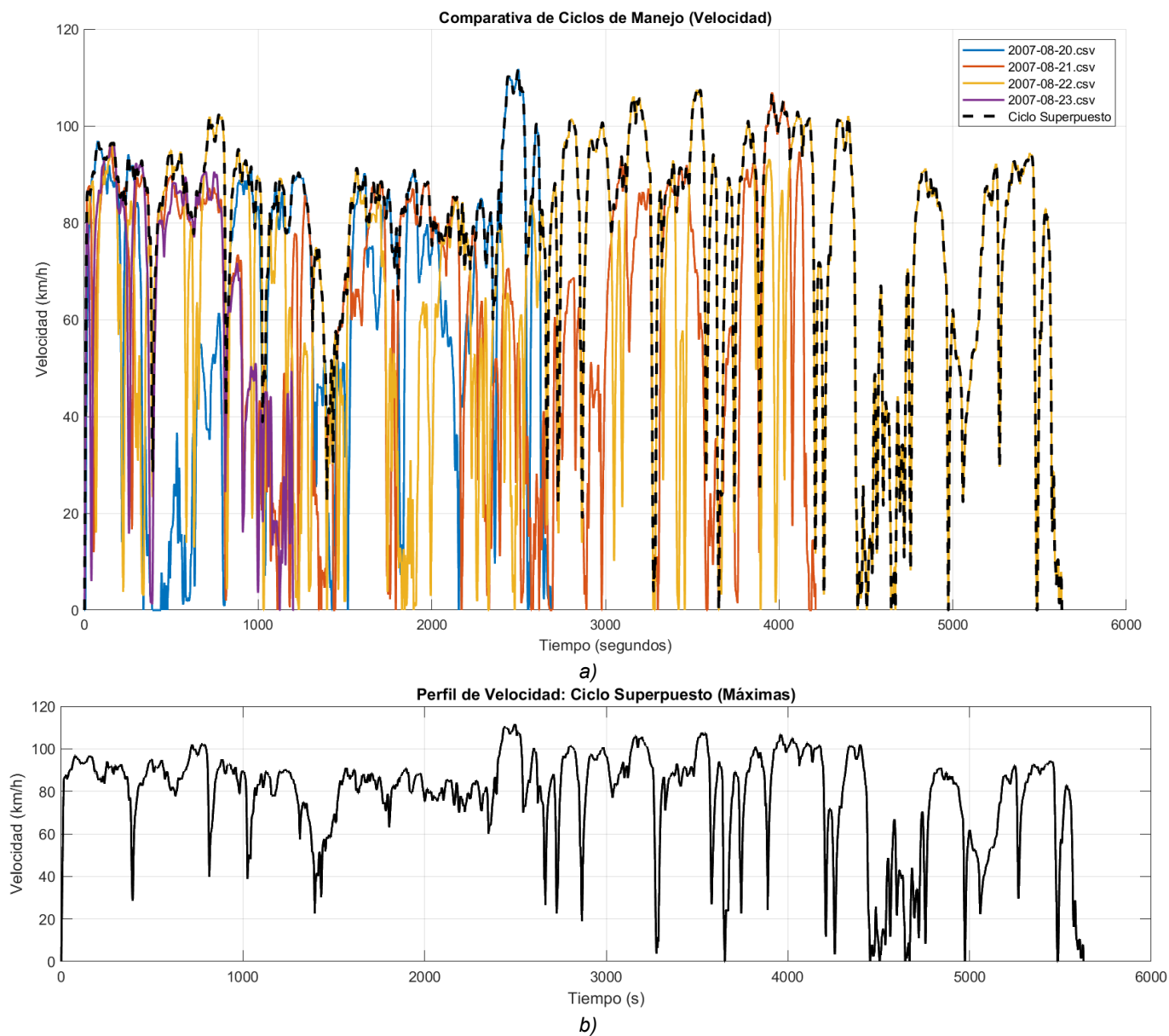


Fig. 14 - Ciclo de manejo superpuesto

Conocer el perfil de máxima demanda (ciclo de manejo superpuesto) permite caracterizar la dinámica del comportamiento del EV a través del análisis de cuerpo libre del EV.

Capítulo 4. Diseño e implementación del HESS

4.1. Dimensionamiento del HESS

El dimensionamiento se abordó por medio del análisis de la demanda, consolidando las bases matemáticas del comportamiento del vehículo (Tabla 6) y algunas características de este (Tabla 4). Cabe aclarar que el análisis se realizó tomando valores típicamente encontrados en vehículos ligeros de uso urbano, puesto que la urbanización es un fenómeno que se mantiene al alza. [70, 81]

Tabla 6 - Ecuaciones involucradas en el dimensionamiento preliminar

$P_{bat}(t) = P_{bus}(t) * H_{LPF}(t)$	Potencia de la batería
$P_{SC}(t) = P_{bus}(t) - P_{bat}(t)$	Potencia del SC
$I_{RMS} = \min \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{P_{bat}(t)}{V_{bus}} \right)^2 dt}$	Corriente eficaz de la batería
$E_{bat} = \frac{\int_0^T P_{bat}^+(t) dt}{V_{bus} * 3600}$	Carga consumida por ciclo (Ah)
$E_{bat(cicle)} = \frac{E_{bat}}{d_r}$	Consumo específico ($\frac{Ah}{km}$)
$Q_{rated} = \frac{E_{bat(cicle)} * d_o}{DoD_{max}} * S_f(bat)$	Capacidad requerida de la batería (Ah)
$E_{SC}(t) = \int_0^t P_{sc}(t) dt$	Perfil de energía del SC
$\Delta E_{SC(max)} = [\max(E_{SC}) - \min(E_{SC})] * S_f(SC)$	Fluctuación máxima de energía en el SC (J)
$C_{SC} = \frac{2\Delta E_{SC(max)}}{V_{SC(max)}^2 - V_{SC(min)}^2}$	Capacitancia requerida del SC (F)
$ H_{LPF}(\omega) ^2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)^{2N}}$	Magnitud del filtro pasa-bajas ($\omega_c = 2\pi f_c$)

Los datos se procesaron por medio de un programa hecho dentro de la plataforma MATLAB, puesto que hay muchos datos por procesar y es necesario ser precisos, ya que el dimensionamiento plantea una serie de retos que cambiarán si los procesos se hacen por medio de algoritmos de optimización [82-84], donde mediante algún algoritmo, se determinará cuál sería la configuración más equilibrada para que el sistema cubra la demanda, o bien, por medio del análisis de la demanda y la administración del HESS, de manera que la sintonización manual o semiautomática de algunos valores determine las limitaciones de su comportamiento. [71, 85-88]

El criterio adoptado para el dimensionamiento consiste en minimizar las fluctuaciones de potencia demandada a la batería a lo largo de todo el ciclo, asignando al SC la componente dinámica que completa la demanda, es decir, la batería recibe la componente de baja frecuencia de la demanda, mientras que el SC absorbe toda componente de alta frecuencia. Este criterio de filtrado de baja frecuencia se distingue de las estrategias de supresión de picos, en las que el SC interviene únicamente ante los excesos puntuales que la batería no puede asumir: aquí, en cambio, se busca que el perfil de corriente de la batería sea lo más plano posible, maximizando su vida útil a costa de un banco de SC de mayor capacidad.

Para hacer el dimensionamiento, fue necesario aplicar una estrategia sencilla con la cual repartir la energía entre el banco de baterías y el SC, con lo que se procedió a hacer uso de un filtro pasa-baja (Butterworth de 2.º orden), pues su salida, una señal “máximamente plana”, será la correspondiente a la demanda hacia la batería, y su complemento será aquella con la que trabaje el SC (Fig. 16).

La selección de la frecuencia de corte f_c para el filtro pasa-bajas no se determinó de manera arbitraria, sino a través de un proceso de optimización multiobjetivo. Se formuló una función de costo $J(f_c)$ que evalúa el compromiso entre dos variables críticas del sistema: la reducción del estrés en la batería (medido a través de la corriente RMS) y el incremento en la masa vehicular debido al dimensionamiento del supercondensador (SC).

$$J(f_c) = W_{bat} * \frac{I_{RMS}(f_c)}{\max(f_c) I_{RMS}} + W_{SC} * \frac{M_{SC}(f_c)}{\max(f_c) M_{SC}} \quad (22)$$

$$f_c = \arg \min f_c J(f_c)$$

Donde W_{bat} y W_{SC} representan los pesos de importancia relativa para la preservación de la batería y el impacto en el peso del vehículo, respectivamente, por ello, con tal de mantener el equilibrio, se designó que ambos tendrían el mismo valor (0.5).

Como se observa en la Fig. 16, al disminuir la frecuencia de corte, la corriente RMS de la batería I_{RMS} se reduce significativamente, alargando su vida útil estimada, sin embargo, una frecuencia de corte más baja asigna al SC una banda espectral más amplia de la demanda, lo que incrementa la fluctuación máxima de la energía $\Delta E_{SC(max)}$ que el banco debe gestionar a lo largo del ciclo. Dado que la capacitancia requerida se deriva directamente de la fluctuación energética (Tabla 6), tal y como indica la relación (16), una fluctuación energética mayor requiere de una capacitancia acorde y, por tanto, un mayor número de celdas, elevando la masa total M_{SC} y el costo del HESS.

El voltaje de trabajo del sistema es de 400 V, pues, supone una mejora en el desempeño, ya que disminuye las pérdidas y mejora la velocidad de carga [89, 90]. El voltaje mínimo del banco de SC se fija en $V_{min} = 200 \text{ V}$ (50 % del voltaje nominal), límite a partir del cual la energía recuperable cae por debajo del umbral operativo y el convertidor Buck-Boost no puede mantener la regulación del BUS.

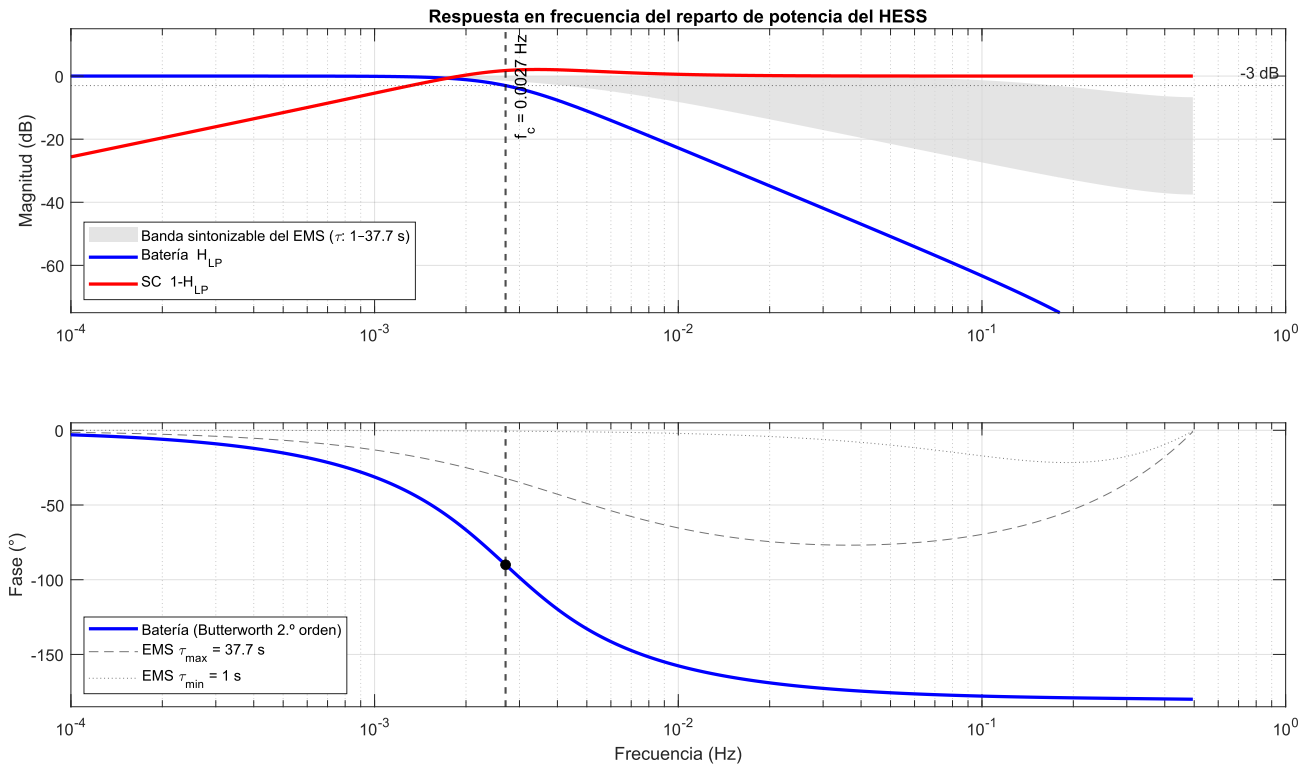


Fig. 15 - Diagrama de Bode

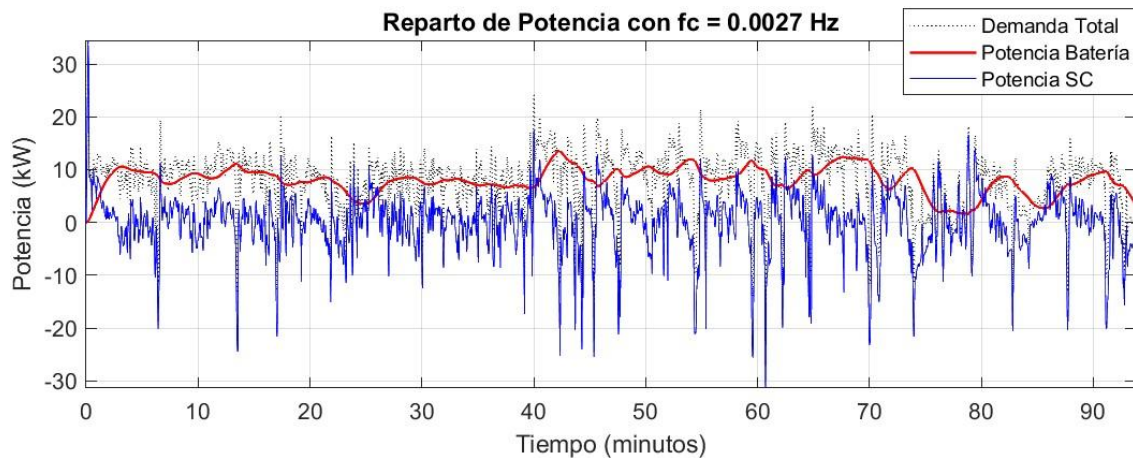


Fig. 16 - Reparto de potencia ideal

El valor de la frecuencia de corte fue seleccionado como el punto óptimo en la frontera de Pareto (Fig. 15), garantizando una mitigación efectiva de los picos de corriente sin comprometer la viabilidad física del microvehículo descrita en la Tabla 4. [91]

Los valores reportados para lograr una autonomía de 100km respecto al recorrido de 122.14 km, son los siguientes:

- Pico de potencia en SC: 34.3194 kW
- Capacidad de la batería: 50 Ah
- Voltaje del BUS: 400 V
- Capacitancia total: 22.3881 F
- Peso del banco de SC: 61.6 kg
- Número de SC: 134

El banco de SC está constituido por 134 celdas en serie ($134 \times 3 V = 402 V$), mientras que el banco de baterías está constituido por 112 celdas en serie ($112 \times 3.6 V = 403.2 V$), valores aproximados a 400 V en el cálculo del dimensionamiento.

Esto tomando como referencia los valores encontrados en los SC *Maxwell BCAP3000 P300 K04*:

- Voltaje de trabajo: 3 V
- Pico de corriente: 2600 A
- Capacitancia: 3000 F
- Peso de la celda: 460 g

El tamaño del banco de supercondensadores no responde a un requerimiento de potencia, sino de energía. La potencia pico que el SC debe manejar (34 kW, equivalente a $\approx 172 A$ en el límite inferior de 200 V) es cubierta holgadamente por una sola rama de celdas, cuya corriente admisible es de 2600 A. Lo que determina el número de celdas es la máxima fluctuación de energía que la componente de alta frecuencia de la demanda impone a lo largo del ciclo. Bajo el criterio de filtrado adoptado de asignar a la batería únicamente la componente de baja frecuencia y al SC toda la componente dinámica restante, la fluctuación alcanza aproximadamente 1.34 MJ (incluyendo el factor de seguridad), que mapeada sobre la ventana de operación de 200 V a 400 V fija la capacitancia en 22.39 F.

De ahí que el banco resultante almacene una energía de aproximadamente 1.81 MJ $\approx 503 Wh$, de la cual la fracción útil entre el 25% y el 98% del SOC corresponde a la energía útil con un valor aproximado de 1.32 MJ. Conviene subrayar que esta magnitud es consecuencia directa de la filosofía de diseño: al perseguir el perfil de corriente más plano posible en la batería, se traslada al SC una banda espectral amplia de la demanda, lo que exige un banco mayor que el que requeriría una estrategia de supresión de picos. El dimensionamiento del supercondensador es, por tanto, el costo deliberado de maximizar la protección de la batería.

El reparto de la demanda (Fig. 16) es un elemento, que ilustra el modo en que se plantea el dimensionamiento del HESS inicialmente, puesto que se considera una situación ideal donde el banco de baterías experimenta una cantidad mínima de estrés, mientras que se aprovechan al completo las capacidades del SC. Considerando que el dimensionamiento del HESS está hecho con el fin de acoplarse a un vehículo ligero de uso urbano (microvehículo), y el diseño de la PDS debe estar centrado en controlar efectivamente el convertidor bidireccional Buck-Boost en tiempo real, debe primar la rapidez y flexibilidad al procesar los cambios en la demanda para responder a la variedad de situaciones de conducción que pudieran surgir.

4.2. Diseño de la estrategia de administración de energía

Los parámetros físicos y eléctricos del dimensionamiento preliminar son indispensables para definir las restricciones dinámicas del EMS. Para garantizar que el control por lógica difusa opere dentro de un marco físicamente razonable, la capacitancia del SC y los límites de potencia de la batería se impusieron como fronteras de saturación rígidas en la lógica de protección del simulador. [33]

De este modo, la arquitectura de control propuesta es de naturaleza jerárquica: un supervisor difuso en el nivel superior evalúa el SOC de ambos ESD para determinar el reparto de potencia más adecuado, mientras que en una implementación física los controladores locales se encargarían de traducir la referencia de potencia a señales PWM para el convertidor DC/DC. [92]

Tabla 7 - Variables del universo de discurso

Variables	Significado
SOC_{bat}	Estado de carga del banco de baterías (%)
SOC_{SC}	Estado de carga del banco de supercondensadores (%)
I_{bus}	Corriente en el BUS (A)
V_{bus}	Tensión en el BUS (V)
K	Salida del sistema difuso
f_s	Frecuencia de muestreo (Hz)
$T_s = \frac{1}{f_s}$	Periodo de muestreo (seg)
$t_k = k * T_s$	Momento actual (seg)
t_{k-1}	Pasado inmediato
$P_d(t_k) = I_{bus}(t_k) * V_{bus}(t_k)$	Potencia demandada (W)
$\Delta P_d(t_k) = \frac{(P_d(t_k) - P_d(t_{k-1}))}{T_s}$	Incremento en la potencia demandada (W)

El universo de discurso (23) define las restricciones bajo las cuales opera el sistema difuso y, junto con las variables de trabajo (Tabla 7), delimita su campo de acción.

$$T = \{t_k | k \in \mathbb{N}\} \quad (23)$$

$$S = \{t_k \in T | -35kW \leq P_d(t_k) \leq 35kW \text{ y } (-70)kW \leq \Delta P_d(t_k) \leq 70kW\}$$

El acercamiento por el que se optó para definir las reglas de la EMS inicialmente fue como en el método Mamdani (de manera verbal), sin embargo, ese método es computacionalmente costoso debido al proceso de defusificación, cuyos requerimientos pueden variar dependiendo del método (centroide, bisector, media de máximos, etc.), con lo que se eligió trabajar con el método Takagi-Sugeno, pues se utiliza el método de promedio ponderado, que es sustancialmente más rápido y facilita el proceso de defusificación. [93, 94]

Para establecer claramente las reglas, es necesario entender la manera en que se han de interpretar las señales, como son las variaciones en la demanda y estado de carga de los distintos dispositivos de almacenamiento de energía. Las funciones membresía permiten entender el marco de referencia, pues estas estarán ajustadas a las capacidades del sistema al gestionar la demanda acorde a las variaciones en el SOC del HESS.

Tabla 8 - Funciones membresía de la demanda

Conjunto	$P_d(t_k)$				
Rango	$-35kW, 35kW$				
Denominación	Bajo (B)	Medio-Bajo (MB)	Medio (M)	Medio-Alto (MA)	Alto (A)
Valor (kW)	$[-\infty, -30, -20, -10]$	$[-20, -10, 0]$	$[-10, 0, 10]$	$[0, 10, 20]$	$[10, 20, 30, \infty]$
Forma	Trapezoidal abierta	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal abierta

Tabla 9 - Funciones membresía del incremento de la demanda

Conjunto	$\Delta P_d(t_k)$				
Rango	$-70kW/s, 70kW/s$				
Denominación	Bajo (B)	Medio-Bajo (MB)	Medio (M)	Medio-Alto (MA)	Alto (A)
Valor (kW/s)	$[-\infty, -60, -40, -20]$	$[-40, -20, 0]$	$[-20, 0, 20,]$	$[0, 20, 40]$	$[20, 40, 60, \infty]$
Forma	Trapezoidal abierta	Triangular	Triangular	Triangular	Trapezoidal abierta

Tabla 10 - Funciones membresía de estado de carga del banco de baterías

Conjunto	SOC_{bat}				
Denominación	Bajo (B)	Medio-Bajo (MB)	Medio (M)	Medio-Alto (MA)	Alto (A)
Valor (%)	$[-\infty, 0, 20, 25]$	$[20, 28, 36]$	$[30, 38, 68, 75]$	$[68, 74, 80]$	$[76, 80, 100, \infty]$
Forma	Trapezoidal abierta	Triangular	Trapezoidal	Triangular	Trapezoidal abierta

Tabla 11 - Funciones membresía de estado de carga del banco de SC

Conjunto	SOC_{sc}				
Denominación	Bajo (B)	Medio-Bajo (MB)	Medio (M)	Medio-Alto (MA)	Alto (A)
Valor (%)	$[-\infty, 0, 25, 32]$	$[25, 34, 44]$	$[38, 46, 84, 90]$	$[84, 92, 98]$	$[95, 98, 100, \infty]$
Forma	Trapezoidal abierta	Triangular	Trapezoidal	Triangular	Trapezoidal abierta

El estado de manejo se caracteriza con dos señales: la demanda instantánea (Tabla 8) y su tasa de cambio (Tabla 9). Por sí solas no permiten decidir el reparto, pero combinadas indican si el vehículo está en reposo, acelerando o frenando. A partir de esa interpretación se determina el comportamiento que el HESS debe asumir en cada instante. De manera tal que, mediante el comportamiento del SOC

en el banco de baterías (Tabla 10) y supercondensadores (Tabla 11), se puedan establecer variaciones en los escenarios de funcionamiento para afinar la calibración de las respuestas del sistema.

Tabla 12 - Distinción entre carga y descarga

Variable	Condición	Interpretación física	Implicación del sistema
$P_d > 0$	Propulsión	El BUS demanda energía del HESS	El HESS se descarga para satisfacer la tracción
$P_d < 0$	Regeneración	El motor devuelve energía al BUS	El HESS absorbe energía del frenado
$\Delta P_d > 0$	Demanda creciente	El vehículo acelera o reduce la intensidad de frenado	El SC debe responder al transitorio positivo
$\Delta P_d < 0$	Demanda decreciente	El vehículo desacelera o intensifica el frenado	El SC debe responder al transitorio negativo

Al tratar con un sistema difuso, es necesario establecer la relación entre las entradas y la salida, tal como se muestra en la Tabla 12, pues con esto se puede establecer la dirección a la que se apunta con el control. La salida del sistema difuso o factor ‘K’ es un valor adimensional con el que se establece la respuesta que ha de tomarse, es decir, si interviene más la batería (0.1) o el supercondensador (0.9), al ser un valor entre 0 y 1, el reparto conserva su flexibilidad en todo momento, sin dar una respuesta binaria (todo para la batería o todo para el SC).

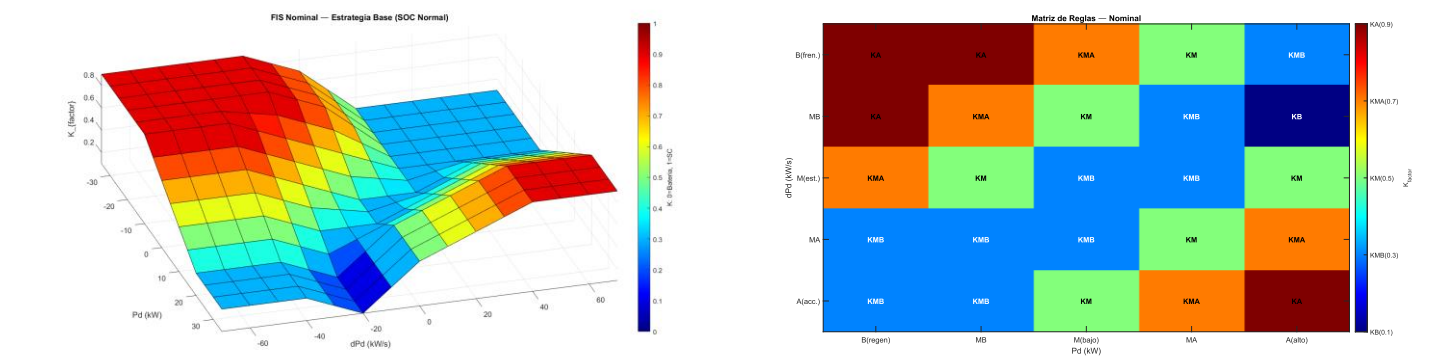


Fig. 17 - Estrategia base (nominal)

En un sistema de control difuso jerárquico es necesario establecer una estrategia base (Fig. 17), cuyo comportamiento sea equilibrado y, por tanto, implique que ninguna fuente deba corregir el desbalance del SOC de la otra, para estar en su zona de equilibrio, ya que cada uno de los escenarios propuestos es una adaptación de esta a diversas condiciones de carga del HESS. En este escenario se considera que dicho punto de equilibrio se encuentra entre el 30%-75% del SOC de la batería y el 38%-90% del

SOC del SC, debido a que hay margen operativo para disponer de la energía o bien, de recargarla a través del frenado regenerativo.

Esta estrategia base considera 5 casos de demanda:

Crucero: Es cuando ha de mantenerse la velocidad y existen muy pocas variaciones en la demanda, con lo que el SC descansa o absorbe pequeñas fluctuaciones, es decir, la batería asume la demanda de manera estable y sostenida, siendo que la batería es más eficiente que el SC para carga constante sostenida.

Aceleración gradual: Es cuando la demanda tiene un transitorio suave, de manera que, la batería cubre la mayor parte de la demanda creciente, es decir, el SC solo absorbe la rampa (pequeños picos) de demanda, mientras que la batería brinda la potencia gradualmente.

Aceleración súbita: Es cuando la demanda tiene un transitorio agresivo, donde el SC absorbe el pico de potencia a fin de amortiguar el daño a la batería. Aunque la batería esté en zona segura, protegerla de corrientes pico de descarga es siempre beneficioso para maximizar su estado de salud y, por tanto, su tiempo de vida.

Frenado gradual: Es cuando la demanda disminuye gradualmente hasta valores negativos y entra en el rango del frenado regenerativo, de manera que el SC absorbe la mayor parte de la energía regenerada. Siendo que ambos bancos tienen margen, el SC es el receptor preferente porque no tiene restricciones electroquímicas de velocidad de carga.

Frenado súbito: Es cuando la demanda disminuye drásticamente hasta llegar a cero y entrar en el rango del frenado regenerativo, de manera que el SC captura al completo el pulso de regeneración, siendo que la velocidad de respuesta del SC es su ventaja principal aquí. La batería no debe recibir corrientes de carga pico.

Estos casos han de modificarse según el estado de carga del HESS.

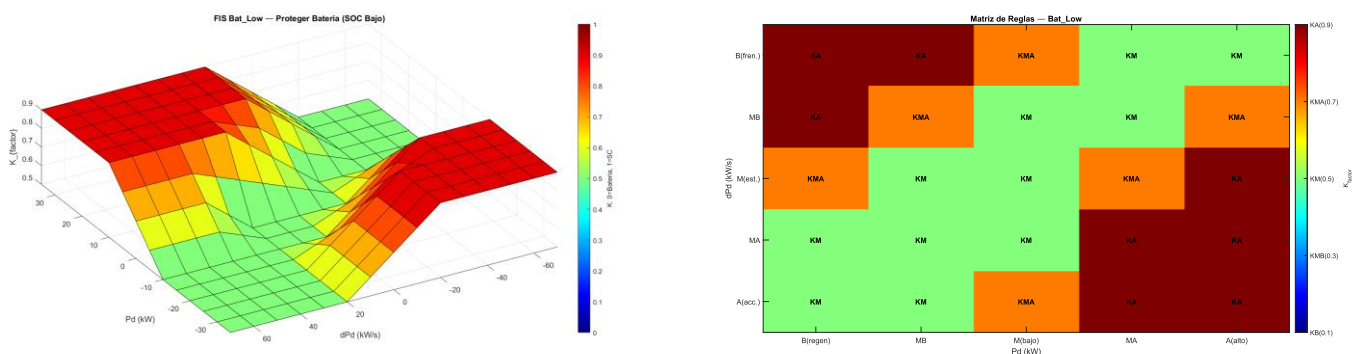
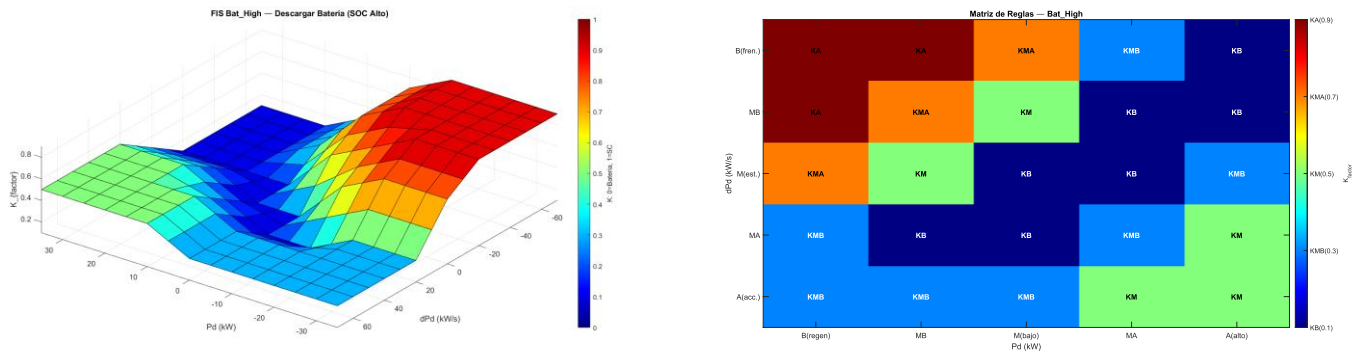
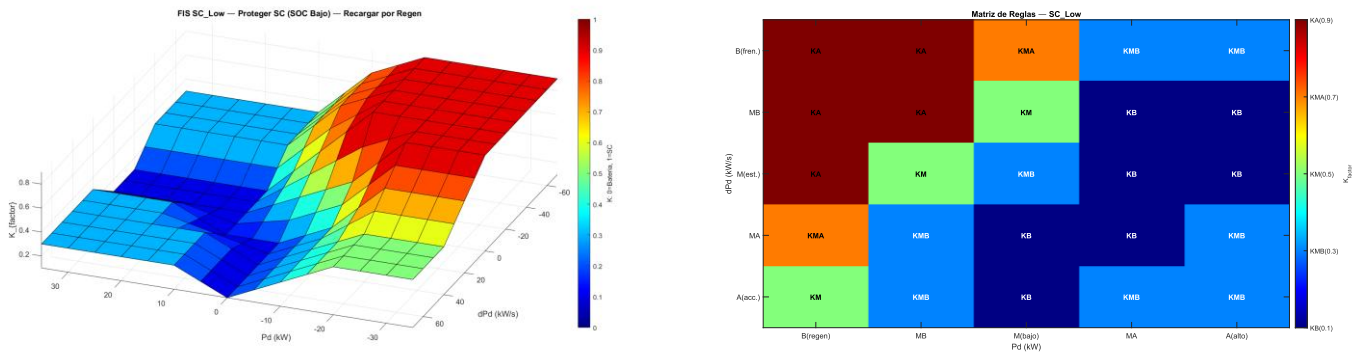


Fig. 18 - Escenario de batería descargada



Los escenarios de batería descargada (Fig. 18) y cargada (Fig. 19) son simétricamente opuestos, sin embargo, ambos responden al SOC de batería saliendo de la zona de equilibrio. En el escenario donde las baterías están descargadas, o bien, por debajo de la zona de equilibrio, la prioridad es *retener carga*, mientras que en el escenario donde están cargadas, o por encima de la zona de equilibrio, la prioridad es *descargarse para mantenerse en el margen de operación*.



El escenario donde el supercondensador está descargado (Fig. 20) responde a una lógica de recuperación selectiva, pues a diferencia de la batería, que puede mantener su carga con el frenado regenerativo o el control de su tasa de utilización, el supercondensador únicamente puede recuperarse mediante frenado regenerativo debido a las limitaciones intrínsecas a su constitución. Por esta razón, la prioridad en este escenario no es simplemente *retener carga*, sino capturar activamente cada oportunidad de regeneración disponible. De manera que, en propulsión, el SC queda en reposo, para que la batería asuma toda la demanda, pues el SC no tiene energía para contribuir, mientras que, durante la regeneración, la estrategia se invierte completamente, para que se priorice que el SC absorba el pulso de energía disponible, independientemente de si el frenado es gradual o súbito.

El objetivo primario es el de *reincorporar el SC a la zona de equilibrio* para que el modo nominal pueda retomar el control y el sistema opere con toda su capacidad disponible.

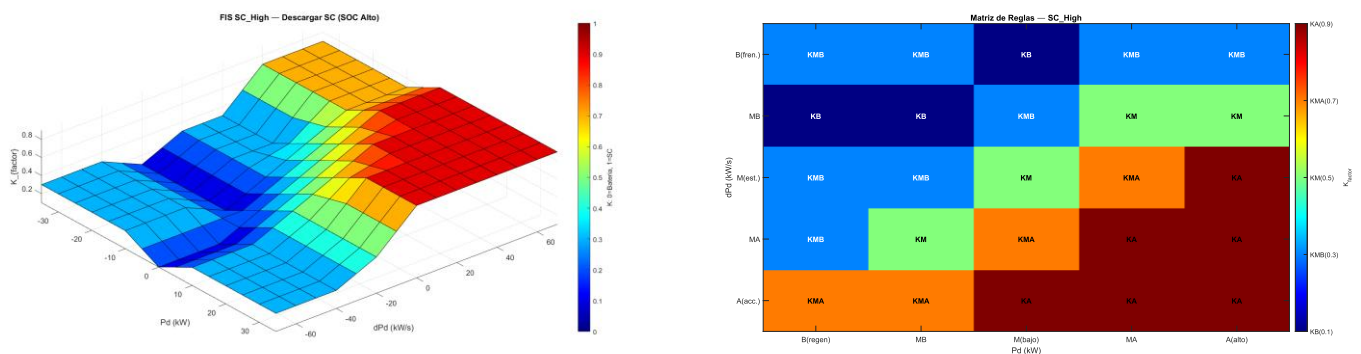


Fig. 21 - Escenario de supercondensadores cargados

El escenario donde el supercondensador está cargado es simétricamente opuesto al de SC descargado, sin embargo, comparte el mismo principio: el SOC ha salido de la zona de equilibrio y debe corregirse. En este caso, la prioridad es 'descargarse para crear margen de absorción'.

Los cuatro escenarios de gestión por estado de carga forman dos pares simétricos que operan sobre el mismo principio: *Detectar cuándo una fuente ha salido de su zona de equilibrio y activar una estrategia que la devuelva a ella.*

En la batería, la simetría es directa porque puede recibir y entregar energía en cualquier escenario, pero en el caso del supercondensador, esa simetría es solo aparente, pues, cuando el SOC es bajo, solo puede recuperar energía por frenado regenerativo, mientras que cuando el SOC es alto, solo puede descargarse por propulsión. Esta restricción hace que las superficies de control del SC sean las más asimétricas del banco de estrategias, y su correcta calibración resulta determinante para que el sistema difuso jerárquico aproveche al máximo la capacidad del banco de supercondensadores.

Tabla 13 - Comportamiento del supervisor

Color	Nombre de la estrategia	Prioridad
Gris	Nominal	Ambos en equilibrio, operación estándar
Azul	Bat_Low	Proteger batería, SC compensa
Verde	Bat_High	Descargar batería, ella trabaja
Naranja	SC_Low	Proteger SC, recargar por regeneración
Rojo	SC_High	Descargar SC, él trabaja en propulsión

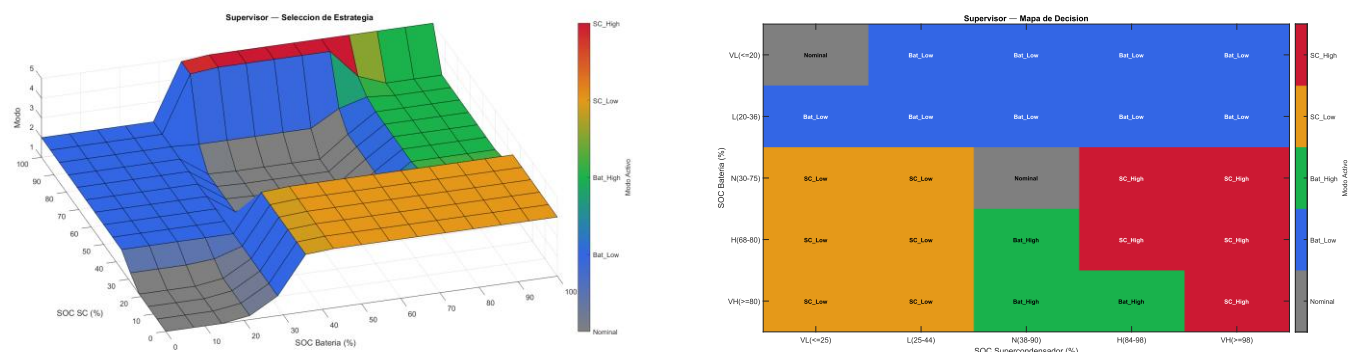


Fig. 22 - Supervisor jerárquico

El supervisor es un sistema de inferencia, independiente de los cinco escenarios propuestos (obreros), cuya función es decidir en cada instante cuál de las cinco estrategias de reparto de potencia debe estar activa. No interviene en el cálculo de potencias ni genera señales de control sobre el hardware, su única salida es un número entero entre 1 y 5 que representa el modo operativo vigente (Tabla 13).

Se incluye un caso de emergencia para la condición simultánea de ambas fuentes en zona crítica baja, el supervisor activa el modo *Nominal* en lugar de *Bat_Low*. Esta decisión evita que el sistema quede en un estado de protección mutua donde ninguna fuente pueda aportar energía; al activar *Nominal*, se permite una distribución mínima que mantiene el vehículo operativo hasta que alguna fuente recupere margen por frenado regenerativo.

El supervisor no observa la demanda de potencia ($P_d(t_k)$) ni su derivada ($\Delta P_d(t_k)$), esa información se procesa exclusivamente en las estrategias dadas en los distintos escenarios (obreros). Esta separación es deliberada, ya que el supervisor toma decisiones de gestión energética a largo plazo (basadas en el estado de carga), mientras los obreros toman decisiones de reparto a corto plazo (basadas en demanda).

El problema que resuelve es conceptualmente simple, pero operativamente delicado, pues si el sistema utilizara una sola estrategia de reparto para todas las condiciones de SOC, esa estrategia tendría que ser lo suficientemente conservadora como para no violar los límites de ninguna fuente en ningún momento, lo que la haría ineficiente y poco efectiva la mayor parte del tiempo. El supervisor permite que la estrategia activa sea la más apropiada para las condiciones instantáneas del sistema, alternando entre agresividad y conservadurismo según lo dicte el estado de carga.

El mecanismo central del reparto de potencia es un filtro exponencial de primer orden, cuya constante de tiempo τ se ajusta en cada instante mediante el factor K producido por el controlador difuso activo. La ecuación de actualización es:

$$P_{bat}(t_k) = \alpha(t_k) \cdot P_d(t_k) + (1 - \alpha(t_k)) \cdot P_{bat}(t_{k-1}) \quad (24)$$

Donde:

$$\alpha(t_k) = 1 - e^{-\frac{\tau_{min}}{\tau(t_k)}} \quad (25)$$

$$\tau(t_k) = \tau_{min} + K(t_k) \cdot (\tau_{max} - \tau_{min}) \quad (26)$$

$$E_{util} = E_{max}(SOC_{SC(max)} - SOC_{SC(min)}) \quad (27)$$

$$\tau_{max} = \frac{E_{util}}{P_{SC(max)}} \quad (28)$$

La potencia asignada al SC resulta del complemento:

$$Pd(t_k) = P_{bat}(t_k) + P_{SC}(t_k) \rightarrow P_{SC}(t_k) = Pd(t_k) - P_{bat}(t_k) \quad (29)$$

Este filtro reproduce exactamente en tiempo discreto el comportamiento de un filtro paso-bajas analógico de primer orden, con la ventaja de que su única variable de sintonización (τ) puede modificarse en cada paso de simulación sin introducir discontinuidades en la señal de salida.

En una implementación física, la potencia P_{SC} calculada por la EMS se traduce en una referencia de corriente para el lazo interno de control del convertidor bidireccional Buck-Boost.

Para determinar la dinámica del convertidor en la simulación (Fig. 23), el ciclo de trabajo promedio se calcula a partir del voltaje terminal del supercondensador ($V_{SC(term)}$) que contempla las pérdidas sujetas al valor de la resistencia en serie:

$$V_{SC(ocv)}(t) = V_{SC(nom)} * \sqrt{\max\left(0.001, \frac{SOC_{SC}(t)}{100}\right)} \quad (30)$$

$$I_{SC}(t) = \frac{P_{SC}(t) * 1000}{V_{SC(ocv)}(t)} \quad (31)$$

$$V_{SC(term)}(t) = V_{SC(ocv)}(t) - I_{SC}(t) * R_{SC} \quad (32)$$

A partir de este voltaje y del voltaje objetivo del BUS, la relación de conversión se conmuta dinámicamente según la dirección del flujo de energía:

$$\begin{aligned} D(t) &= 1 - \frac{V_{SC(term)}(t)}{V_{bus}} \rightarrow (P_{SC} \geq 0) \text{ Modo Boost} \\ D(t) &= \frac{V_{SC(term)}(t)}{V_{bus}} \rightarrow (P_{SC} \leq 0) \text{ Modo Buck} \end{aligned} \quad (33)$$

Para prevenir la saturación magnética del inductor y garantizar un margen de control seguro, la señal se acota en el intervalo:

$$D(t) \in [0, 0.98] \quad (34)$$

En el hardware real, este valor promedio es ajustado ciclo a ciclo por un controlador de alta frecuencia (PI o modo deslizante), el cual genera los pulsos para aplicar la modulación por ancho de pulso (PWM) que conmutarán los interruptores de potencia para garantizar el seguimiento preciso de la corriente y la estabilidad del BUS.

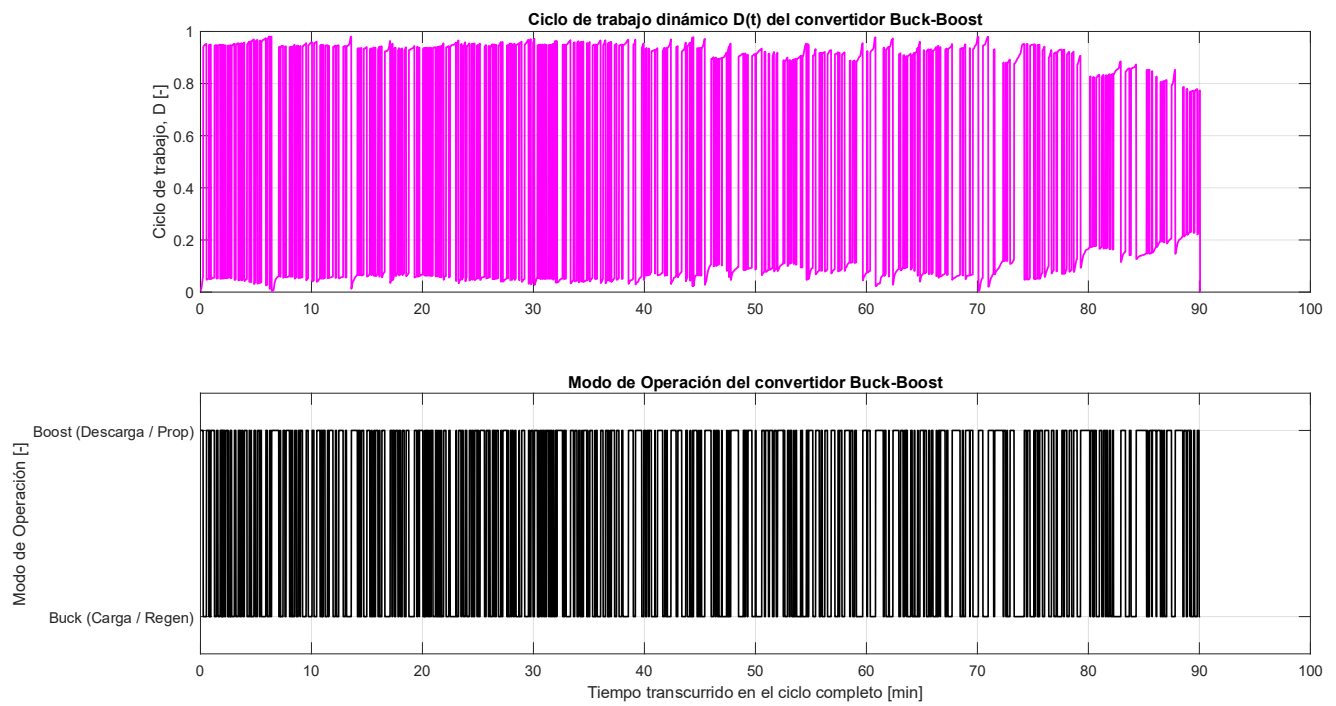


Fig. 23 - Ciclo de trabajo y comportamiento del convertidor Buck-Boost bidireccional

Capítulo 5. Resultados

5.1. Entorno de simulación

La ejecución de las distintas tareas se realizó en el entorno de MATLAB, partiendo de distintos scripts (programas) para delimitar cada una de las operaciones y facilitar la mejora, edición o reemplazo de cada uno de estos. Para lograr un avance consistente, se procedió a desarrollar los scripts siguiendo las fases que se muestran a continuación:

Fase I: Definición del entorno y dimensionamiento

- 1. Construcción del ciclo de manejo superpuesto:** Se recolectan distintos ciclos de conducción, para después superponerlos o encimarlos, de modo que se combinen las características de estos, para obtener así el escenario de máxima demanda.
- 2. Adquisición del perfil de carga:** Se importa y preprocesa el perfil de ciclo de manejo superpuesto junto a las características propias del EV para obtener la demanda de potencia, siendo que se reconozca la frecuencia de muestreo del sistema (correspondiente a los datos recolectados).
- 3. Dimensionamiento del hardware:** Con base en los requerimientos energéticos de la demanda, se establecen los parámetros físicos y las capacidades nominales del banco de baterías y de supercondensadores.
 - 3.1. Ajuste automático:** Mediante una función de optimización multiobjetivo de la frecuencia de corte, se obliga al sistema a equilibrar el tamaño que tendrá el banco de supercondensadores y el estrés que soportarán las baterías, de modo que se elija la configuración en la que el banco sea del tamaño adecuado para mantener el estrés al mínimo.
- 4. Establecimiento de restricciones:** Se definen los umbrales críticos operativos, imponiendo límites máximos y mínimos para el SOC de ambas fuentes para garantizar su vida útil y seguridad.

Fase II: Configuración de la arquitectura de control

- 1. Carga del banco de decisiones:** Se inicializan los diferentes sistemas de inferencia difusa (*.FIS) que componen la EMS. Esto incluye a los controladores obreros diseñados para condiciones específicas de operación y al supervisor jerárquico.
- 2. Ajuste de referencias dinámicas:** Se autocalibran los límites de la constante de tiempo del filtro pasa-bajas, asegurando que la acción de control sea proporcional a la capacidad de respuesta física de los supercondensadores.

Fase III: Simulación dinámica y gestión de energía

La simulación se ejecuta iterativamente (paso a paso) evaluando las siguientes acciones para cada instante de tiempo:

- 1. Decisión del supervisor:** El 'supervisor' evalúa el SOC de las baterías y SC, para determinar el estado energético del sistema y selecciona el controlador difuso más adecuado para ese instante.
- 2. Filtrado y asignación de potencia:** El controlador seleccionado analiza la magnitud y la tasa de cambio de la demanda para calcular la constante de tiempo, pues con este valor, el filtro digital

separa la demanda en una componente de baja frecuencia (asignada a la batería) y una de alta frecuencia (asignada a los supercondensadores).

3. **Validación y seguimiento:** Las potencias demandadas por la EMS se introducen en el modelo físico resistivo, para calcular la corriente extraída, considerando las caídas de tensión por resistencia interna y así actualizar los niveles de SOC de ambas fuentes (coulomb counting para la batería y balance de energía para el SC).
4. **Aplicación de medidas de seguridad:** Se aplican los limitadores de hardware que restringen y redirigen la potencia bidireccionalmente, para prevenir daños virtuales en el sistema si alguna de las fuentes alcanza su límite de potencia o capacidad.
5. **Auditoría del sistema de gestión de batería (BMS):** Al finalizar el ciclo de simulación, un módulo de diagnóstico evalúa la integridad del sistema, identificando si en algún punto la batería rompió sus márgenes de seguridad o si operó dentro de zonas seguras, siendo que se corte la simulación en el instante exacto donde el SOC de las baterías alcance el límite de descarga.
6. **Análisis de desviación:** Finalmente, se comparan las respuestas dinámicas obtenidas por la EMS difusa contra las referencias ideales del dimensionamiento hasta el momento de corte y se cuantifican métricas de error, para generar los reportes gráficos de comportamiento.

5.2. Desempeño del EMS propuesto

Si bien el filtrado pasa-bajas *ideal* (Fig. 16) provee una referencia matemática para el reparto de potencias, el desempeño del EMS debe evaluarse considerando las dinámicas de los componentes. Por ello, la validación del sistema se llevó a cabo implementando el modelo *Rint* para la batería de iones de litio, pues, pese a las limitaciones del modelo, este puede ser complementado para llevar un seguimiento preciso de las fluctuaciones que puede haber en la simulación [75].

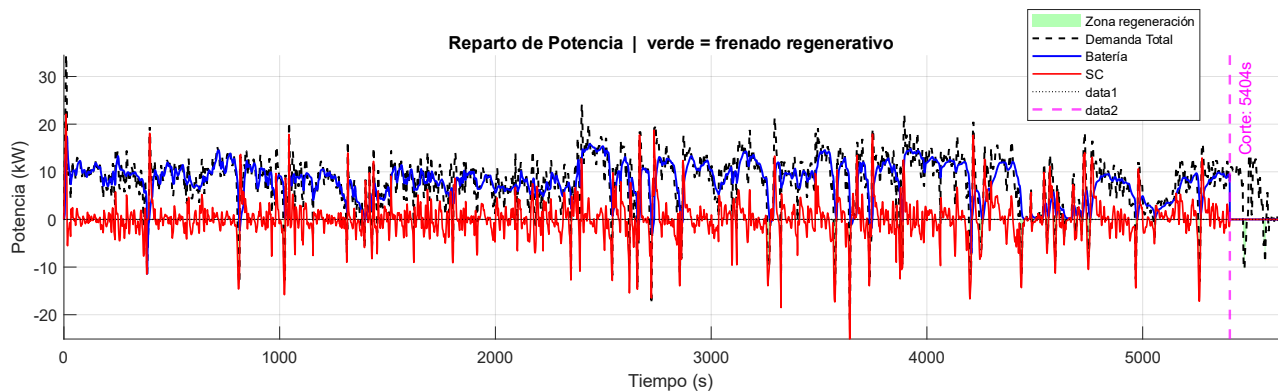


Fig. 24 - Reparto de potencia del sistema difuso

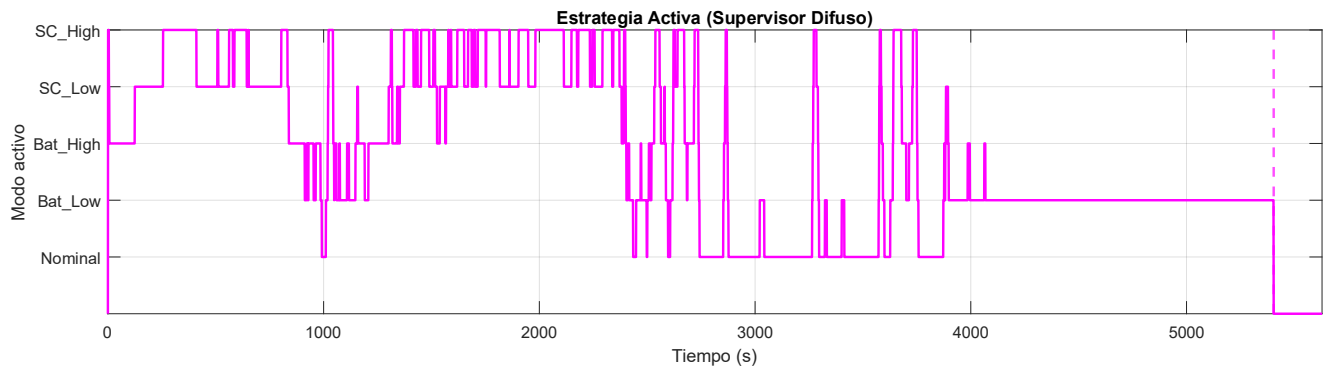


Fig. 25 - Comportamiento del supervisor

El reparto de potencia (Fig. 24) logrado con el sistema difuso difiere del reparto ideal del dimensionamiento, pues el controlador ajusta dinámicamente la constante de tiempo del filtro adaptativo según las condiciones instantáneas de manejo y el estado de carga de ambas fuentes, mientras que el filtro Butterworth del dimensionamiento opera con una frecuencia de corte fija. En la gráfica se muestra la demanda total del BUS (Fig. 24) como una línea negra punteada, y su distribución entre la batería (línea azul) y el supercondensador (línea roja). Los valores positivos representan propulsión y los negativos regeneración, mientras que las zonas sombreadas en verde identifican los instantes donde la demanda es negativa, es decir, donde el vehículo recupera energía por frenado. La línea vertical magenta señala el instante en que la batería alcanzó su límite inferior de SOC (20%), momento a partir del cual el vehículo se detiene y los datos posteriores carecen de significado físico.

La gráfica muestra la estrategia activa del supervisor en cada instante (Fig. 25). Se observa que durante los primeros 2000 segundos el sistema opera principalmente en modo *Nominal* (ambas fuentes en zona segura), con activaciones intermitentes de *SC_High* y *SC_Low* conforme el supercondensador oscila al absorber y entregar potencia. A partir del segundo 3000 aproximadamente, las activaciones de *Bat_Low* se vuelven más frecuentes conforme la batería se acerca a su límite inferior, lo que indica que el supervisor detecta la necesidad de protegerla.

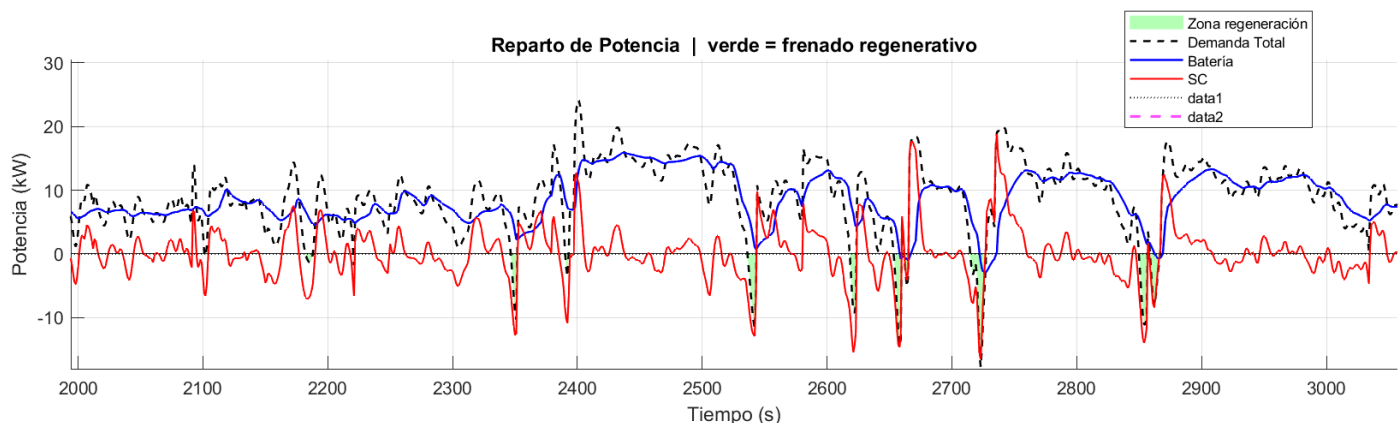


Fig. 26 - Acercamiento al reparto de potencia del sistema difuso

Se amplió un segmento representativo del reparto de potencia (Fig. 26) para observar con mayor detalle la interacción entre las tres señales. Se puede apreciar cómo la línea azul (batería) sigue una trayectoria suavizada de la demanda total, mientras que la línea roja (supercondensador) captura los

picos de aceleración y los pulsos de frenado regenerativo. La separación entre la línea negra y la azul en cada transitorio corresponde a la potencia que el SC absorbe o entrega en ese instante, siendo esta separación mayor cuanto más abrupto es el cambio de demanda.

Al comparar el reparto logrado por la EMS difusa y el reparto ideal calculado durante el dimensionamiento (Fig. 27), se puede señalar que esta desviación no representa un error del controlador, sino la consecuencia de tres diferencias entre el reparto ideal y el de la EMS:

1. El dimensionamiento usa un filtro Butterworth de 2.º orden con una frecuencia de corte fija, elegida por optimización global sobre todo el ciclo, mientras que la EMS emplea un filtro exponencial de 1.er orden con constante de tiempo variable, decidida instante a instante.
2. La EMS reajusta la constante de tiempo según el estado de carga mediante el supervisor.
3. La EMS aplica saturaciones de potencia y límites del estado de carga (redireccionamiento de la carga/descarga) que el reparto ideal no contempla.

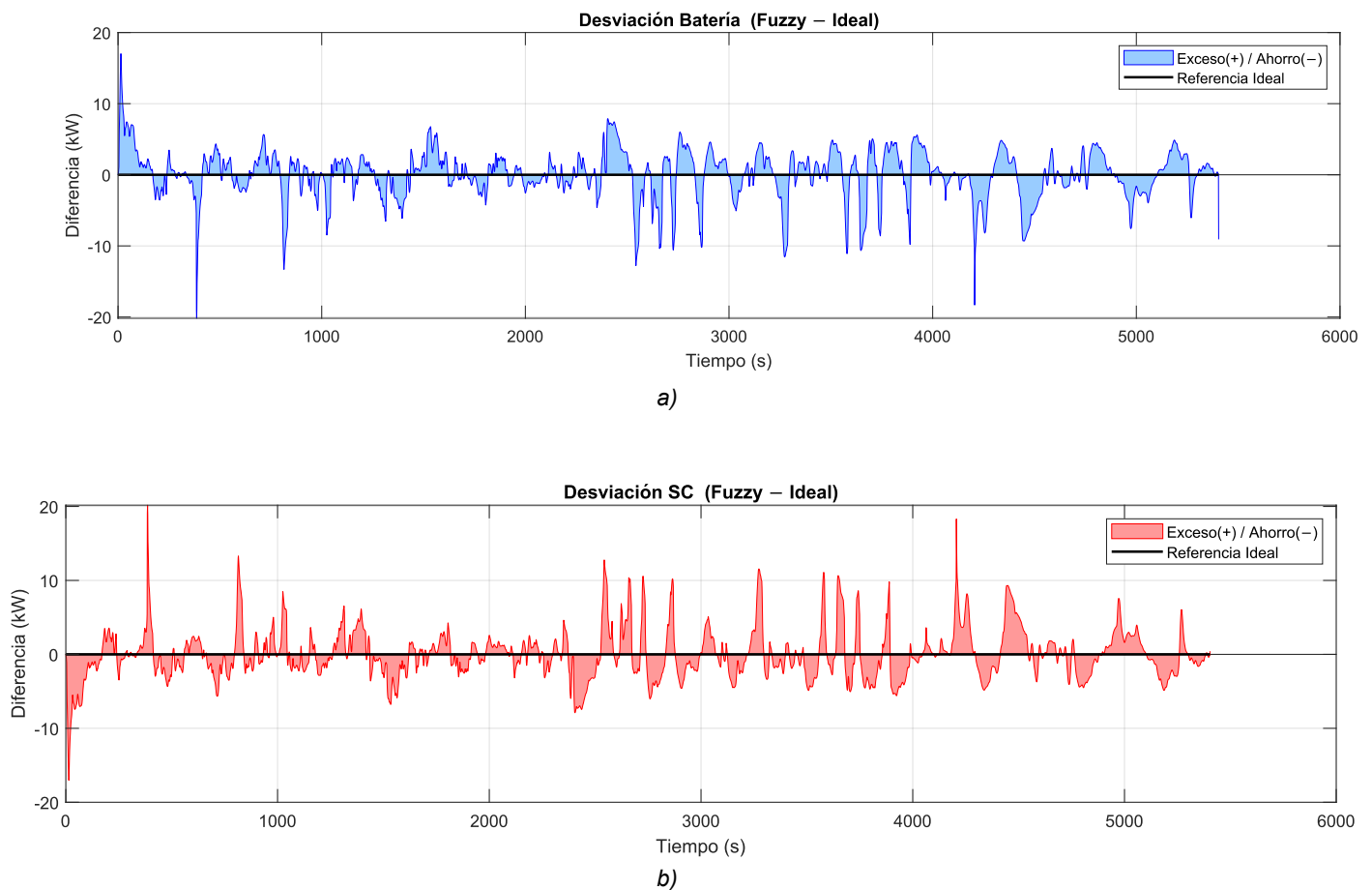
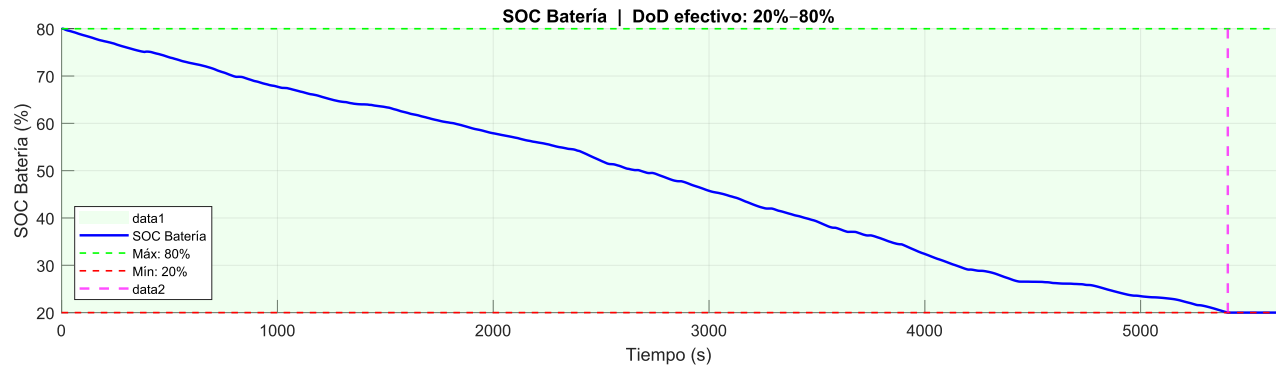
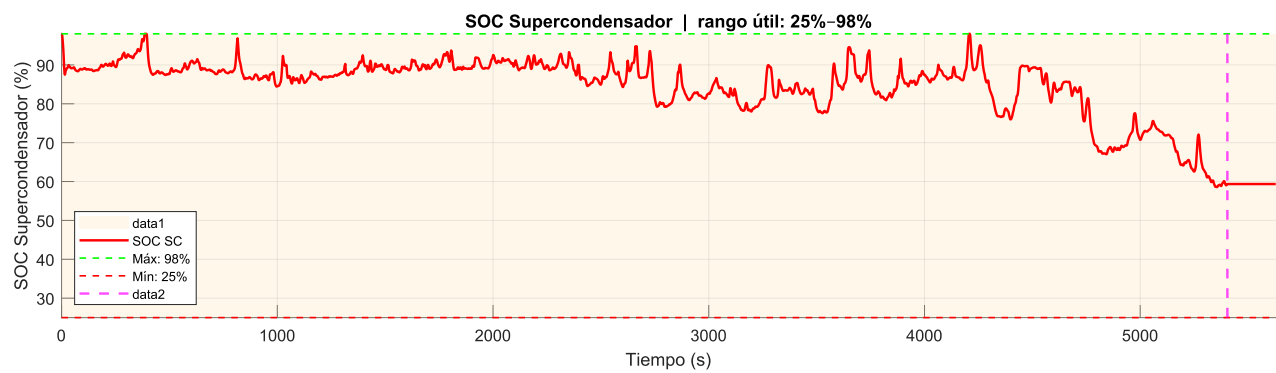


Fig. 27 - Comparativa de comportamiento del reparto de potencia (ideal vs. difuso)

Las métricas de desviación hasta el punto de corte son: Desviación (Bias) = $+0.019 \text{ kW}$, Error absoluto medio (MAE) = 2.556 kW y desviación máxima = 20.180 kW . La desviación cercana a cero indica que el controlador difuso no sobreexige ni subutiliza la batería respecto al ideal en promedio.



a)



b)

Fig. 28 - Seguimiento del SOC del HESS

La evolución temporal del estado de carga de ambas fuentes (Fig. 28a) muestra el SOC de la batería descendiendo desde su límite máximo permitido (80%) hasta alcanzar el límite inferior (20%) en el segundo 5404, instante en el que el simulador corta la operación del vehículo. La pendiente de descenso no es constante: se pronuncia durante los segmentos de alta demanda y se suaviza o invierte brevemente durante los eventos de frenado regenerativo donde algo de energía retorna a la batería. La gráfica inferior (Fig. 28b) muestra el SOC del supercondensador oscilando dentro de su rango operativo, exhibiendo un comportamiento cíclico: desciende al entregar potencia durante aceleraciones y asciende al absorber energía durante frenados. La amplitud de estas oscilaciones refleja la participación del SC en el reparto de potencia, observada conforme avanza la simulación. El SOC del SC tiende a un valor medio menor, lo que indica que la energía consumida en propulsión supera la recuperada por regeneración. Aun así, el SC nunca descendió del 58.58% de carga a lo largo del recorrido, muy por encima de su límite inferior, lo que confirma que la batería (no el supercondensador) fue el factor limitante de la autonomía.

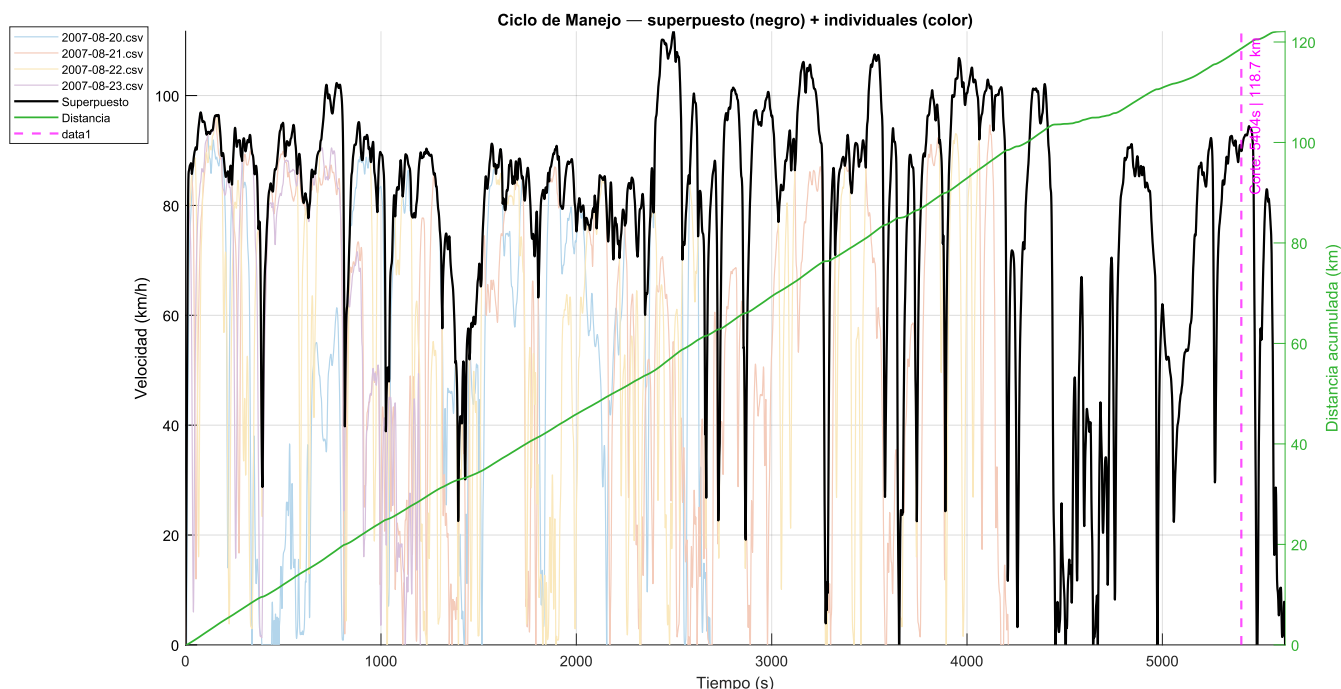


Fig. 29 - Ciclo de manejo y autonomía lograda

La verificación de integridad confirmó que el ciclo reconstruido (5629 muestras) coincide exactamente con el perfil del dimensionador (Fig. 29). El vehículo recorrió 118.7km antes de agotar la batería, superando el objetivo de diseño de 100km y cubriendo el 97.18% del ciclo completo de 122.14km. Este margen es consistente con el factor de seguridad de 1.15 aplicado en el dimensionamiento, complementado por la energía recuperada en el frenado. La energía de frenado regenerativo disponible en el BUS fue de 0.545 kWh a lo largo de 419 instantes de frenado regenerativo (7.8% del ciclo). La energía neta recuperada en los bancos sería algo menor.

5.3. Comparación entre ciclos de manejo

Una vez caracterizado el desempeño del EMS sobre el ciclo de diseño (ciclo de máxima demanda), se evaluó el mismo sistema (utilizando las configuraciones del hardware y los controladores difusos sin modificación alguna) ante ciclos de manejo individuales de dinámica contrastante. El objetivo no es repetir el análisis, sino observar la adaptabilidad de la estrategia frente a escenarios de exigencia distinta. Se seleccionaron tres ciclos representativos del inventario de viajes: uno de carácter urbano con alta densidad de transitorios (Fig. 30), uno mixto y de mayor recorrido (Fig. 32) y uno de tipo carretera con velocidad sostenida (Fig. 31).

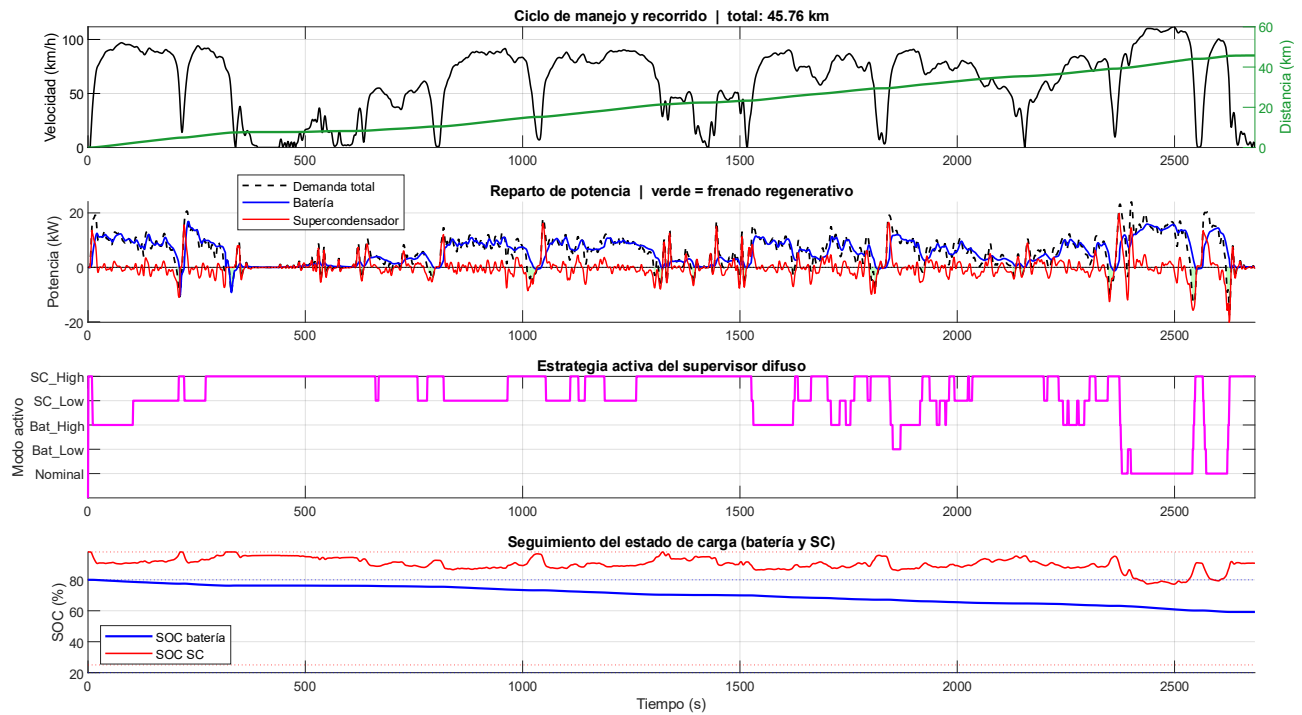


Fig. 30 - Ciclo de manejo de carácter urbano

El ciclo urbano (Fig. 30), concentra la mayor variabilidad de velocidad y la mayor densidad de paros por kilómetro, lo que se traduce en transitorios frecuentes sobre recorridos cortos. El ciclo mixto, además de ser el más largo, combina tramos sostenidos con detenciones periódicas, y es el que mayor energía de propulsión y de regeneración acumula.

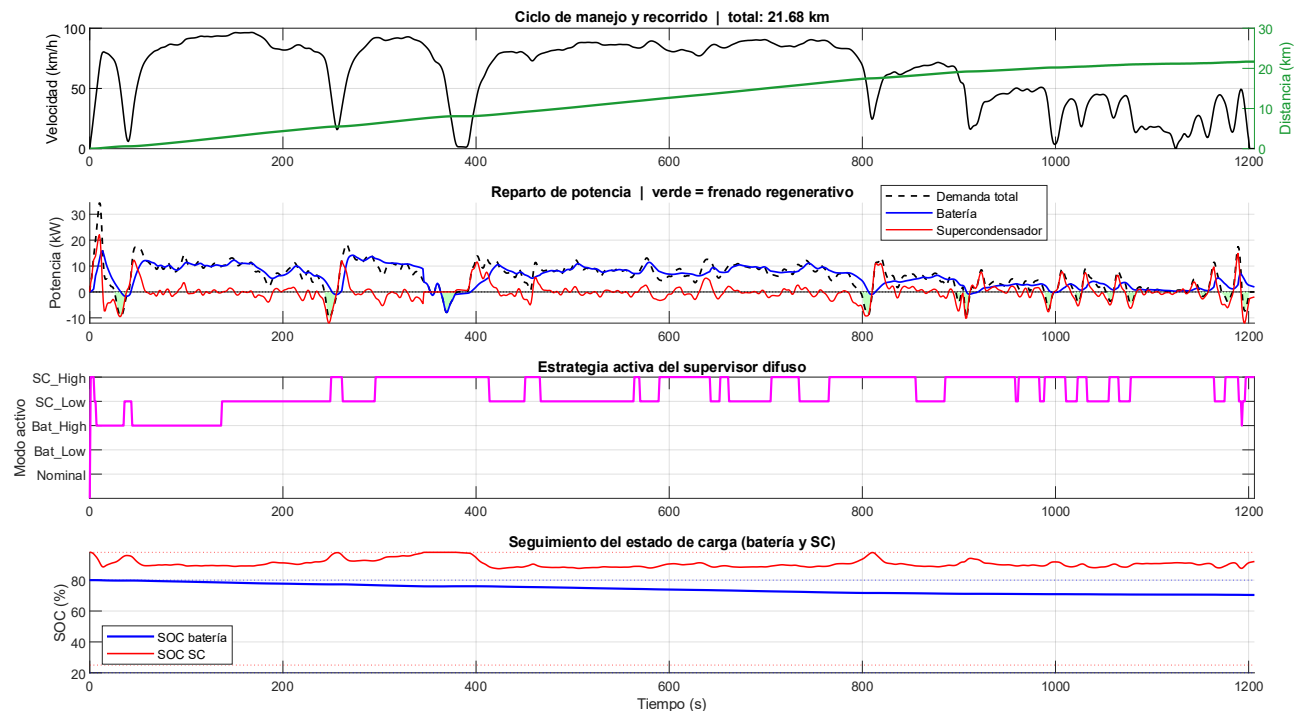


Fig. 31 - Ciclo de manejo de carácter de carretera con velocidad sostenida

El ciclo de carretera (Fig. 31), en el extremo opuesto, presenta velocidad sostenida, escasos paros y la menor variabilidad, donde hay situaciones en que se permite al vehículo mantener su inercia, de manera que se mantiene una demanda dominada por la componente aerodinámica de baja frecuencia.

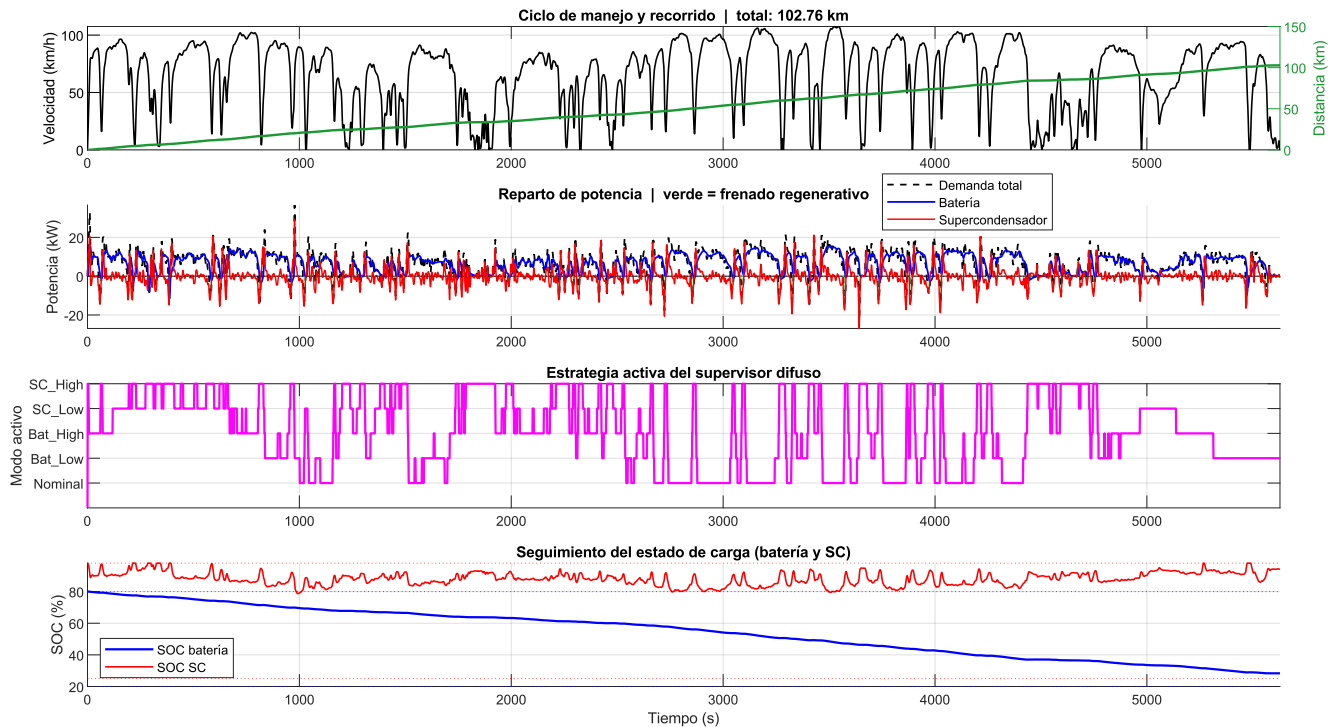


Fig. 32 - Ciclo de manejo de carácter mixto y de mayor recorrido

El ciclo de carácter mixto (Fig. 32), como indica su nombre, incluye características del ciclo urbano y de carretera, con paros y variaciones de velocidad bruscas por momentos, pero buscando mantener una velocidad crucero.

En los tres escenarios, el reparto de potencia conserva la estructura observada en el caso de diseño: la batería sigue una versión suavizada de la demanda y el SC asume los transitorios de aceleración y los pulsos de frenado regenerativo. La diferencia entre ciclos se manifiesta en la intensidad de esa participación. En el ciclo urbano, los transitorios frecuentes mantienen al SC en actividad casi continua y elevan la proporción de instantes de regeneración; en el ciclo carretera, el régimen sostenido reduce su intervención, y el SC permanece mayormente en reposo mientras la batería cubre una demanda estable.

Un hallazgo transversal a los tres ciclos es que el estado de carga del supercondensador nunca desciende por debajo del 70%, muy por encima de su límite operativo inferior del 25%, señalando a la estrategia por subutilizar las capacidades del SC, sin embargo, este margen no es accidental: refleja que el EMS difuso, por diseño, es menos agresivo que el filtro empleado en el dimensionamiento. Mientras que el filtro de dimensionamiento Butterworth de 2.º orden (equivalente a $\tau_{max} \approx 59\text{ s}$) llevaría al SC a recorrer prácticamente toda su ventana sin considerar las condiciones y requerimientos del vehículo, el filtro exponencial adaptativo del EMS opera con una constante de tiempo acotada por las condiciones y requerimientos del vehículo ($\tau_{max} \approx 37.7\text{ s}$), de modo que, aun con máxima

intervención ($K = 1$), suaviza menos la demanda de la batería y exige menos al SC. La consecuencia es que el supercondensador conserva reserva energética en todos los escenarios evaluados, y que es la batería el elemento que determina la autonomía del vehículo.

Conviene precisar que el factor de reparto K no constituye un parámetro ajustable, sino la salida instantánea de los controladores difusos en función de la demanda y su tasa de cambio. Por ello, su efecto no se evalúa mediante un barrido de valores, sino observando cómo cambia el comportamiento del sistema ante ciclos de distinta dinámica. La distribución de los modos del supervisor evidencia esa adaptación: el ciclo mixto, por su mayor duración y variedad dinámica, es el que registra más conmutaciones de modo y un reparto más equilibrado entre las cinco estrategias; el ciclo urbano se mantiene sobre todo en los modos de gestión donde se prioriza el uso del SC, con conmutaciones frecuentes entre SC_Low y SC_High , en cambio, el ciclo de carretera, con demanda estable y un supercondensador que apenas se descarga, permanece la mayor parte del tiempo en SC_High . Esta capacidad de reconfigurar la estrategia según el estado de carga y la demanda constituye una ventaja del EMS adaptativo frente a un divisor de potencia de ganancia fija.

5.4. Discusión

Los resultados permiten valorar en qué medida la estrategia propuesta cumple su objetivo. El EMS difuso jerárquico mantiene a la batería operando con un perfil de potencia suavizado, con una desviación media cercana a cero respecto al reparto ideal, y desvía hacia el supercondensador los transitorios de mayor amplitud, en línea con el propósito de reducir el estrés sobre el banco de baterías. La autonomía alcanzada sobre el ciclo de máxima demanda (118.77 km) supera el objetivo de 100 km, y en los ciclos individuales evaluados el supercondensador conserva reserva en todo momento, lo que confirma que la batería constituye el factor limitante de la autonomía.

Tabla 14 - Barrido paramétrico del banco de SC

C	Energía útil	Cambio de masa	Recorrido (masa fija)	Recorrido (masa variada)	Potencia pico	SOC_{min}	Porcentaje de uso	Picos en la batería
5F	82Wh	-47.8kg	117.62km	120.95km	28.97kW	25%	100%	24
7.64F	125Wh	-40.6kg	118.02km	120.89km	26.61kW	25%	100%	15
11F	180Wh	-31.3kg	118.57km	120.24km	23.34kW	25%	100%	8
15F	246Wh	-20.3kg	118.32km	119.59km	21.12kW	47.03%	69.9%	8
22.39F	367Wh	+0kg	118.7km	118.7km	17.42kW	58.58%	54%	3
33.58F	550Wh	+30.8kg	118.95km	116.57km	16.27kW	65.51%	44.5%	5
44.78F	734Wh	+61.6kg	119.54km	115.26km	16kW	69.62%	38.9%	5
67.16F	1100Wh	+123.2kg	119.62km	111.17km	15.35kW	77.52%	28.1%	3
89.55F	1467Wh	+184.8kg	119.78km	106.73km	14.87kW	82.49%	21.2%	0

Aunado a esto, al realizar más pruebas variando la capacitancia del banco de supercondensadores (Tabla 14), se halló que, aunque la capacitancia designada supone un excelente punto de equilibrio entre el rendimiento y el costo (peso, volumen, precio, etc.), al evaluar las capacidades de suministro de energía del convertidor (valor pico de $\pm 35kW$) y la ventana del utilizable SOC del SC, se hizo evidente que es posible mejorar su aprovechamiento (Fig. 33). Debido a que el banco de supercondensadores en la mayoría de los casos no agota su capacidad operativa o alcanza el límite de suministro del convertidor, debido a que, el EMS deliberadamente conservador, no le impone la carga que el filtro de dimensionamiento sí impondría. Esto, lejos de ser un defecto, debe interpretarse como un margen de robustez, pues garantiza capacidad de respuesta ante ciclos más exigentes que los evaluados, ante la degradación de las celdas y ante cargas o pérdidas no contempladas en el modelo, entre ellas, las del convertidor DC/DC, no incluido en la simulación.

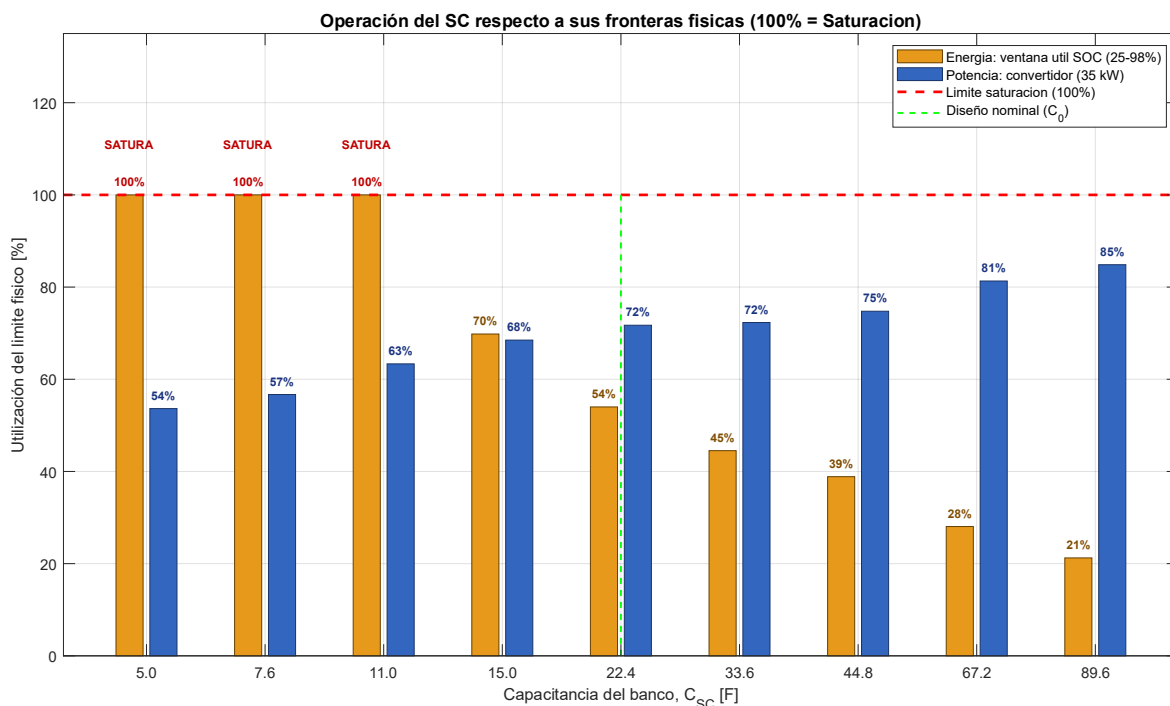


Fig. 33 - Uso y aprovechamiento del SC

La contrapartida de esta situación radica en el costo material que supone tener cualidades sin explotar, pese a que es el precio de primar la longevidad de la batería, tal y como se observa a continuación (Fig. 34):

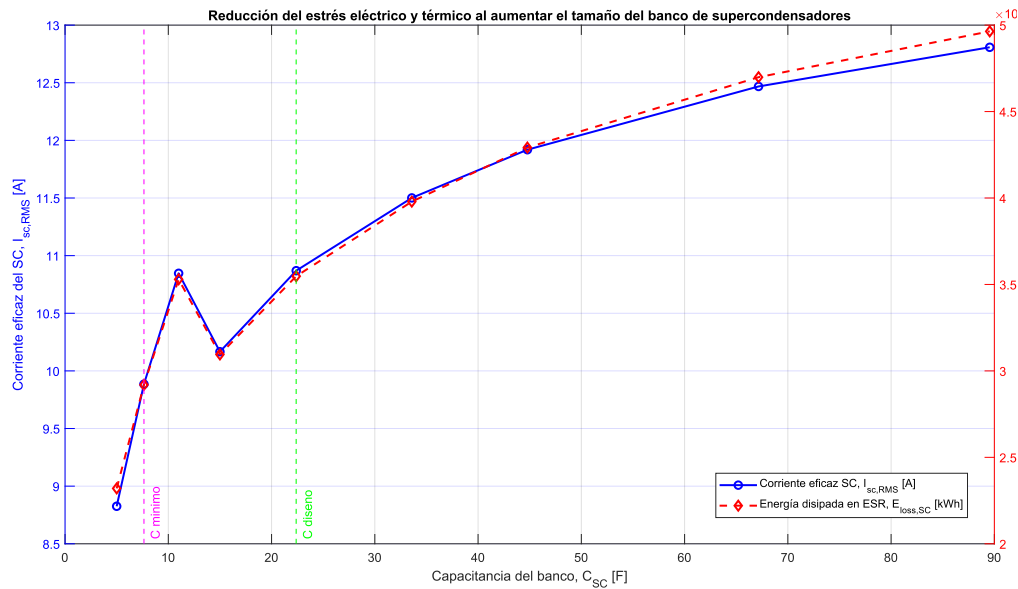


Fig. 34 - Relación entre el estrés térmico y el tamaño del banco de supercondensadores

Aunado a esto, es preciso que la repartición de potencia se entienda considerando que en las simulaciones se consideran únicamente las pérdidas óhmicas de cada fuente: la resistencia interna de la batería (0.05Ω), incorporada al modelo *Rint*, y la resistencia serie equivalente del supercondensador (0.02Ω), incluida en su balance de energía. Las pérdidas del tren motriz se representan de forma agregada mediante eficiencias constantes (85.5% en propulsión y 68% en regeneración).

Al continuar con la evaluación de los resultados previamente obtenidos durante las pruebas con el ciclo superpuesto, se observó que el comportamiento del voltaje (Fig. 35) y corriente (Fig. 36) en el supercondensador corresponde a lo visto en la distribución de potencia, sin embargo, debido al acercamiento realizado (distribución de la energía basado en una ventana de carga), la variación de voltaje se mantuvo al mínimo, mientras que los picos de corriente corresponden a las dinámicas de demanda vistas.

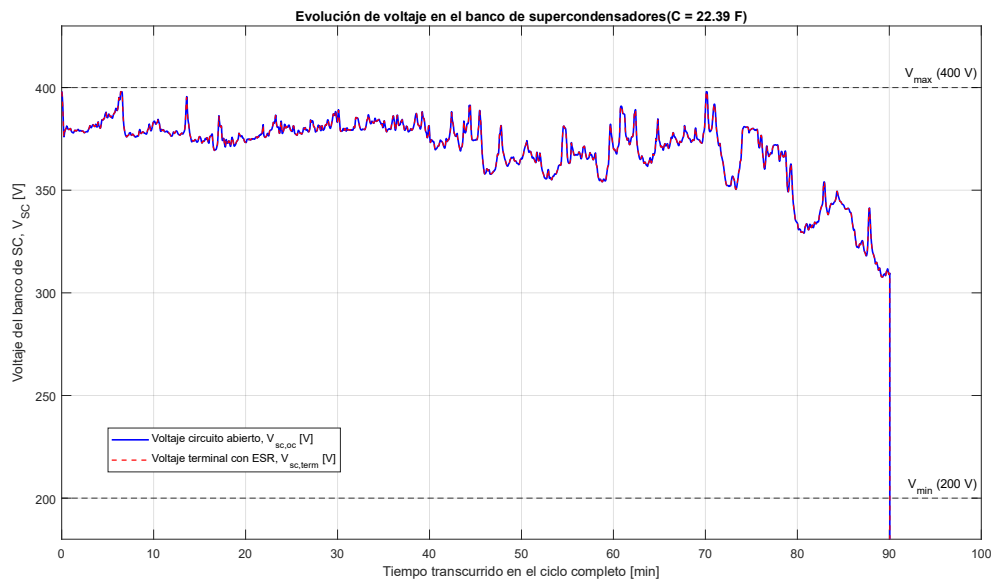


Fig. 35 - Voltaje en el banco de supercondensadores

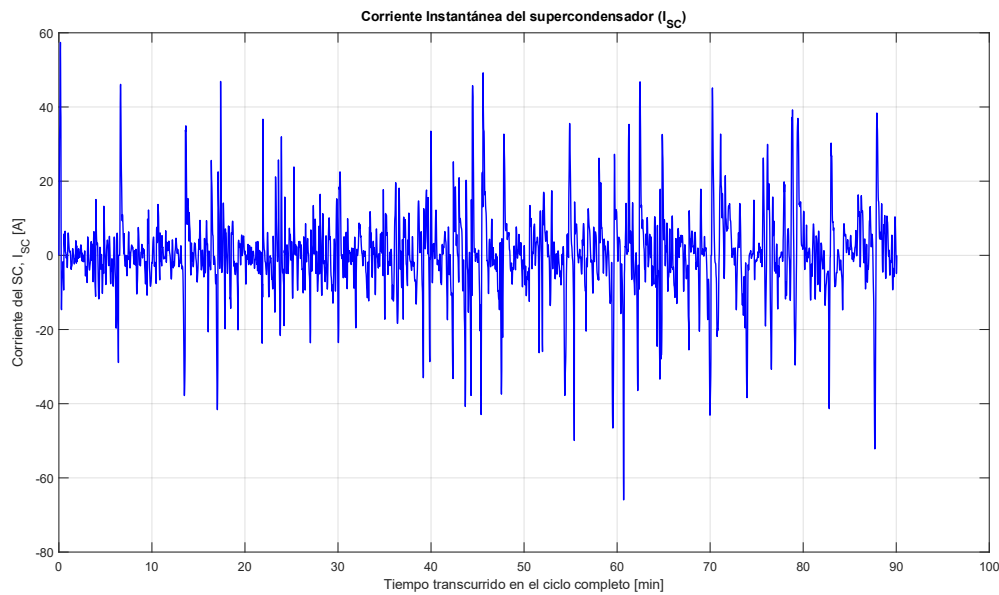


Fig. 36 - Corriente demandada al banco de supercondensadores

Esta manera de distribuir la energía disponible surgió con el fin de aprovechar de manera controlada las capacidades del supercondensador, evitando operarlo con márgenes más amplios, propios del completo uso de las capacidades del convertidor, puesto que esto implicaría el análisis exhaustivo de las características de este, su diseño y modelado posterior.

Estas observaciones naturalmente abren una línea de mejora: Ajustar el criterio de dimensionamiento del HESS para utilizar otras estrategias asociadas al aprovechamiento de las capacidades del supercondensador, para reducir el tamaño del banco de supercondensadores sin comprometer la protección de la batería al tiempo que se aprovechan las virtudes de estos y las capacidades del convertidor *Buck-Boost* bidireccional, al tiempo que se implementan modelos matemáticos que representen fielmente los comportamientos asociados a las fuentes de energía, tales como envejecimiento por cambios de temperatura y degradación electroquímica, etc.

En vista de lo anterior, conviene tener presente lo siguiente:

1. En los programas, el cálculo del estado de carga mediante el conteo de Coulomb opera en lazo abierto, que en una implementación física, implicaría que el ruido y el sesgo de los sensores de corriente se acumulen continuamente con el tiempo, y dado que el supervisor jerárquico selecciona el modo de operación en función de los niveles del SOC de la batería y del SC, cualquier deriva en la medición puede hacer que el control asuma estados de energía incorrectos, lo que en la práctica derivaría en conmutaciones de modo en momentos inadecuados o en lecturas falsas de agotamiento. Por ello, una implementación requiere un estimador en lazo cerrado con corrección activa como el filtro de Kalman.
2. La eficiencia de ida y vuelta (*round-trip*) del supercondensador se reduce por la combinación de las pérdidas del convertidor DC/DC bidireccional (conducción y conmutación) y la resistencia serie equivalente del banco ante pulsos de alta frecuencia. Pues las pérdidas por efecto Joule no solo disipan energía, sino que progresivamente elevan la temperatura de las celdas, haciendo que modifiquen su resistencia interna y, por consiguiente, aceleren su degradación al

instaurarse el ciclo. Pese a la poca relevancia de este fenómeno en periodos de tiempo cortos, al mantenerse este ciclo durante más tiempo, los daños serán proporcionalmente más altos.

3. Durante transitorios agresivos de aceleración o frenado, una fracción significativa de la energía no se entrega o almacena, pues se disipa internamente, lo que genera que el banco alcance sus límites de corte antes de lo proyectado, activando con mayor frecuencia la lógica de protección y redirección de energía, lo que termina trasladando más transitorios directos hacia la batería.
4. Para que la estrategia pudiera plantearse adecuadamente en una implementación física, ha de considerarse que, dada la naturaleza del sistema difuso jerárquico (un supervisor y cinco modos de operación), habrá latencia según las capacidades de cómputo en la ECU, además de que, dada la ausencia de bandas de histéresis en las transiciones de las variables de estado, las conmutaciones ruidosas de alta frecuencia entre modos de control ante ligeras oscilaciones del sensor, se vería degradada la suavidad del filtrado sobre la batería.

Estas limitaciones refuerzan la interpretación del margen observado en el SC: la reserva de carga no solo aporta robustez ante ciclos más exigentes o perfiles superpuestos (para dimensionamiento), sino que en una implementación real garantiza disponibilidad de energía la necesaria, pese a pérdidas generadas por los comportamientos intrínsecos de los elementos electroquímicos, térmicos y magnéticos interconectados en el sistema, logrando así que los rizados de conmutación, la degradación por altas temperaturas y los recortes de capacidad por desbalance de celdas estén dentro de los parámetros operativos, garantizando de esta manera que el filtrado de transitorios sobre la batería se mantenga efectivo aun cuando el desempeño del banco difiera del escenario simulado.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo a futuro

En el presente proyecto se examinaron minuciosamente los conceptos esenciales para el desarrollo, diseño y dimensionamiento de un HESS de batería-supercondensador para un vehículo eléctrico de uso urbano, y se diseñó una EMS difusa jerárquica encargada de repartir la demanda entre ambas fuentes.

El proyecto se planteó secuencialmente, comenzando con la construcción de un ciclo de manejo de máxima demanda a partir de registros reales de conducción (122.14 km, 5629 s), para seguir con el dimensionamiento mediante una función de optimización multiobjetivo de la frecuencia de corte del filtro Butterworth de 2°. Orden ($f_c = 0.0027 \text{ Hz}$, equivalente a $\tau_{max} \approx 59 \text{ s}$), y para finalizar se procedió con la validación del conjunto (HESS) a través de un simulador con modelo *Rint* con las protecciones de hardware consideradas.

Finalmente, el HESS quedó constituido por un banco de baterías de 50 Ah a 403.2 V nominales (112 celdas en serie por 10 ramas en paralelo, lo que equivale a 1120 celdas), cuya energía total es igual a 20.16 kWh y donde únicamente 12.1 kWh son útiles (considerando la ventana de operación de 20% – 80% de SOC_{bat}), y por un banco de supercondensadores de 134 celdas en serie, con una capacitancia de 22.39 F a 402 V, que almacena 1.81 MJ y de los cuales 1.32 MJ son útiles (considerando la ventana de operación de 25% – 98% de SOC_{SC}), con una capacidad de potencia pico de 35 kW. Con esta configuración, el vehículo alcanzó una autonomía de 118.70 km sobre el ciclo de máxima demanda de 122.14 km (97.18% del recorrido), superando en 18.7% la meta de diseño de 100 km, con un consumo aproximado de 102 Wh/km. La operación se detuvo en el segundo 5404 al agotarse la ventana útil de la batería, mientras que el supercondensador mantuvo una reserva en todo momento ($SOC_{SC} \approx 58.58\%$), lo que confirma cuantitativamente que la batería es el elemento que determina la autonomía del vehículo.

En cuanto a la efectividad de la propuesta, la EMS difusa reprodujo el reparto ideal del dimensionamiento con una desviación media de 0.019 kW y un error absoluto medio de 2.556 kW, y redujo de manera sustancial el estrés sobre la batería respecto al escenario equivalente sin supercondensador. La potencia pico exigida a la batería se redujo de 34.5 kW a 17.4 kW, al tiempo que se suprimieron los transitorios superiores a 20 kW y los 85.5% de los superiores a 15 kW.

Del frenado regenerativo se recuperaron 0.545 kWh en 419 instantes, de los cuales el 94.3% fue canalizado hacia el supercondensador y menos del 6% ingresó directamente a la batería, en congruencia con el objetivo de evitarle pulsos de carga. De forma consistente, el supervisor jerárquico mantuvo activo el modo de protección de la batería (*Bat_Low*) durante el 33.9% del tiempo de operación, el mayor porcentaje de los cinco modos disponibles.

Es importante señalar que el dimensionamiento del banco de SC resulta mayor que el requerido por una estrategia convencional de supresión de picos, ya que el criterio adoptado exige que el SC absorba la componente de alta frecuencia de la dinámica del perfil de demanda. Esto es consecuencia directa de la filosofía de filtrado adaptativo y representa el precio de lograr el perfil más plano posible en la

batería, pues constituye a la vez un margen de robustez ante ciclos más exigentes, degradación de las celdas y pérdidas no modeladas.

Algunos de los puntos que pueden desarrollarse como trabajo a futuro son:

- **Modelos basados en datos de los ESD:** Desarrollar representaciones del comportamiento de las baterías y los supercondensadores a partir de datos experimentales, mediante redes neuronales recurrentes o modelos de degradación empírica, para reemplazar el modelo *Rint* con formulaciones que capturen los efectos de polarización, histéresis y temperatura que este omite.
- **Modelo dinámico completo del vehículo:** Extender el modelo de dinámica longitudinal para incorporar fuerzas secundarias como la deformación del neumático, variaciones en la pendiente, efectos del viento lateral e inercias rotacionales de los elementos del tren motriz, a fin de obtener perfiles de demanda más representativos de la operación real.
- **Caracterización de pérdidas del sistema:** Cuantificar las pérdidas térmicas, eléctricas, mecánicas y de desgaste de los componentes principales del HESS (celdas de batería, celdas de SC y convertidor) y del tren motriz (motor) e incorporarlas al modelo de simulación para obtener estimaciones de eficiencia y vida útil más realistas.
- **Modelado, control y paradigma del convertidor DC/DC:** Caracterizar la dinámica del convertidor bidireccional Buck-Boost (función de transferencia, comportamiento en conducción discontinua, límites de saturación) e implementar el lazo de control correspondiente (control por deslizamiento, PI adaptativo u otro) que traduzca la referencia de potencia del EMS en ciclo de trabajo de forma estable; evaluar además si la referencia óptima para el control es de potencia, corriente o voltaje, pues esta elección constituye un cambio de paradigma con implicaciones directas en la respuesta dinámica del sistema.
- **Regulación activa del SOC en el EMS:** Incorporar un objetivo de gestión de estado de carga que permita no solo repartir la potencia demandada en cada instante, sino dirigir activamente el SOC de la batería hacia su zona de equilibrio cuando las condiciones de conducción lo permitan, complementando así la estrategia de suavizado con una capa de recuperación energética a largo plazo.
- **Caracterización de ciclos de manejo en ciudades mexicanas:** Construir ciclos de conducción representativos de distintos entornos urbanos mexicanos, de modo que se diferencien por densidad vial, altitud, infraestructura y patrones de movilidad, para disponer de perfiles de demanda localmente relevantes que guíen tanto el dimensionamiento del HESS como la sintonización del EMS.
- **Validación experimental:** Implementar el HESS y el EMS propuesto en un banco de pruebas físico o en un entorno de simulación HIL (hardware in the loop) para identificar las discrepancias entre el modelo de simulación y el comportamiento real, y ajustar los parámetros del sistema en consecuencia.
- **Extensión a otras plataformas vehiculares:** Adaptar el método de dimensionamiento y la arquitectura de control a vehículos de movilidad urbana de menor escala (motocicletas, triciclos, cuatrimotos), donde las restricciones de peso y volumen del banco de SC son más severas y condicionan fuertemente la selección de topología.

- **Generalización del método de dimensionamiento:** Extender el proceso de optimización multiobjetivo para evaluar de forma automatizada familias de celdas comerciales y experimentales con distintas tecnologías de batería, SC híbridos y convertidores de alta frecuencia, de modo que el *dimensionador* pueda comparar configuraciones alternativas sin necesidad de intervención manual en cada caso.
- **Plataforma integrada de diseño y simulación:** Desarrollar una herramienta de software que centralice el dimensionamiento, la configuración del EMS, la simulación dinámica y la evaluación de factores de seguridad del HESS para distintas configuraciones vehiculares, facilitando la exploración sistemática del espacio de diseño y reduciendo la barrera de entrada para nuevos estudios en el área.

Bibliografía

- [1] J. B. Rae and A. K. Binder, "Automobile industry," in *Encyclopedia Britannica*, T. e. o. E. Britannica, Ed., ed, 2024.
- [2] S.-P. L. F. Velepucha Sánchez Jorge Milton, "EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES EN VEHÍCULOS LIVIANOS A GASOLINA " *INGENIAR*, vol. 4, pp. 78–95, 2021, doi: 10.46296/ig.v4i8.0024
- [3] J. A. Sanguesa, V. Torres-Sanz, P. Garrido, F. J. Martinez, and J. M. Marquez-Barja, "A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges," *Smart Cities*, vol. 4, no. 1, pp. 372–404doi: 10.3390/smartcities4010022.
- [4] "El mundo pone fin a la era de la gasolina con plomo y elimina una grave amenaza para la salud humana y ambiental," U. d. C. d. P. e. A. L. y. e. Caribe., Ed., ed. ONU, 2021.
- [5] M. S. Wasim, S. Habib, M. Amjad, A. R. Bhatti, E. M. Ahmed, and M. A. Qureshi, "Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System to Increase Battery Life under Pulse Loads," *IEEE Access*, vol. PP, pp. 1–1, 2022.
- [6] W. Liu, T. Placke, and K. T. Chau, "Overview of batteries and battery management for electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 4058–4084, 2022/11/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.016>.
- [7] T. S. Babu, K. R. Vasudevan, V. K. Ramachandaramurthy, S. B. Sani, S. Chemud, and R. M. Lajim, "A Comprehensive Review of Hybrid Energy Storage Systems: Converter Topologies, Control Strategies and Future Prospects," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 148702–148721, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015919.
- [8] "Electric car," in *Encyclopedia Britannica*, T. e. o. E. Britannica, Ed., ed, 2024.
- [9] R. Xiong *et al.*, "Key technologies for electric vehicles," *Green Energy and Intelligent Transportation*, vol. 1, no. 2, p. 100041, 2022/09/01/ 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geits.2022.100041>.
- [10] Z. Dong *et al.*, "A Survey of Battery–Supercapacitor Hybrid Energy Storage Systems: Concept, Topology, Control and Application," *Symmetry*, vol. 14, no. 6, p. 1085doi: 10.3390/sym14061085.
- [11] A. Wangsupphaphol, S. Phichaisawat, N. R. Nik Idris, A. Jusoh, N. D. Muhamad, and R. Lengkeyan, "A Systematic Review of Energy Management Systems for Battery/Supercapacitor Electric Vehicle Applications," *Sustainability*, 2023.
- [12] A. Banerjee, "Impact of Hybrid Energy Storage System (HESS) Topologies on Performance: Exploration for Hydropower Hybrids," 2020.
- [13] A. Affam, Y. M. Buswig, A.-K. B. H. Othman, N. B. Julai, and O. Qays, "A review of multiple input DC-DC converter topologies linked with hybrid electric vehicles and renewable energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 135, p. 110186, 2021/01/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110186>.
- [14] C. C. Monroy, C. A. Siachoque, I. C. Durán-Tovar, and A. R. Marulanda Guerra, "Estudio Comparativo de un Sistema de Freno Regenerativo y Regeneración con Energía Cinética Constante en Vehículos Eléctricos de Batería," *Ingeniería*, vol. 25, pp. 305–322, 2020.
- [15] G. B. Román, "Análisis y modelado de un vehículo eléctrico para evaluar su desempeño bajo diferentes condiciones de manejo," MAESTRIA, TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO, SAC/246/2018, 2018.
- [16] B. A. N. Arias, "Control de Velocidad de un Motor de Inducción Trifásico con Frenado Regenerativo," MAESTRIA, TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO, SAC/215/2025, 2015.
- [17] A. M. Hernández, "Análisis y Diseño de Manejo de Energía en Ultracapacitores Conectados en Serie," MAESTRIA, TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO, SAC/206/2015, 2015.

- [18] U. Previti, S. Brusca, A. Galvagno, and F. Famoso, "Influence of Energy Management System Control Strategies on the Battery State of Health in Hybrid Electric Vehicles," *Sustainability*, 2022.
- [19] I. Husain *et al.*, "Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles," *Proceedings of the IEEE*, vol. 109, no. 6, pp. 1039–1059, 2021, doi: 10.1109/JPROC.2020.3046112.
- [20] M. K. Hasan, M. Mahmud, Mahmud, A. A. Habib, S. M. A. Motakabber, and S. Islam, "Review of electric vehicle energy storage and management system: Standards, issues, and challenges," *Journal of energy storage*, vol. 41, p. 102940, 2021.
- [21] S. Sen and F. H. Richter, "Typology of Battery Cells – From Liquid to Solid Electrolytes," *Advanced Science*, vol. 10, no. 33, p. 2303985, 2023/11/01 2023, doi: <https://doi.org/10.1002/advs.202303985>.
- [22] Z. N. Kurtulmuş and A. Karakaya, "Review of lithium-ion, fuel cell, sodium-beta, nickel-based and metal-air battery technologies used in electric vehicles," (in en), *International Journal of Energy Applications and Technologies*, vol. 10, no. 2, pp. 103–113, December 2023, doi: 10.31593/ijeat.1307361.
- [23] Y. U. Dai, Y. Liu, Z. Shu, and J. Zou, "CLASSIFICATION AND DEVELOPMENT STATUS OF BATTERY TYPES FOR NEW ENERGY VEHICLES," *HIGHLIGHTS IN SCIENCE, ENGINEERING AND TECHNOLOGY* Учредители: Darcy & Roy Press Co. Ltd., vol. 120, pp. 143–150, 2024.
- [24] Q. Chen, "Types of Batteries for New Energy Electric Vehicles," *Science and Technology of Engineering, Chemistry and Environmental Protection*, 2024.
- [25] F. Wu, "Enhancing Sodium-Ion Battery Performance: A Focus on Electrode Materials," *Highlights in Science, Engineering and Technology*, vol. 121, pp. 253–258, %12/%24 2024, doi: 10.54097/gcheev16.
- [26] Z. P. Cano *et al.*, "Batteries and fuel cells for emerging electric vehicle markets," *Nature Energy*, vol. 3, pp. 279–289, 2018.
- [27] C. Iclodean, B. Varga, N. Burnete, D. Cimerdean, and B. Jurchiş, "Comparison of Different Battery Types for Electric Vehicles," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 252, no. 1, p. 012058, 2017/10/01 2017, doi: 10.1088/1757-899X/252/1/012058.
- [28] M. Z. Afzal *et al.*, "A Novel Electric Vehicle Battery Management System Using an Artificial Neural Network-Based Adaptive Droop Control Theory," *International Journal of Energy Research*, 2023.
- [29] Y. Cao, H. Liang, W. Peng, and Y. Su, "Construction of Battery Health Monitoring System for New Energy Vehicles from a Multi-dimensional Perspective," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2442, 2023.
- [30] C. K. Chan, C.-H. Chung, and J. Raman, "Optimizing Thermal Management System in Electric Vehicle Battery Packs for Sustainable Transportation," *Sustainability*, 2023.
- [31] C. A. Rufino Júnior *et al.*, "Unraveling the Degradation Mechanisms of Lithium-Ion Batteries," *Energies*, vol. 17, no. 14, p. 3372doi: 10.3390/en17143372.
- [32] P. Mohtat, S. Lee, J. B. Siegel, and A. G. Stefanopoulou, "Reversible and irreversible expansion of lithium-ion batteries under a wide range of stress factors," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 168, no. 10, p. 100520, 2021.
- [33] V. Sidharthan Panaparambil, Y. Kashyap, and R. Vijay Castelino, "A review on hybrid source energy management strategies for electric vehicle," *International Journal of Energy Research*, vol. 45, pp. 19819 – 19850, 2021.
- [34] D. Dan, Y. Zhao, M. Wei, and X. Wang, "Review of Thermal Management Technology for Electric Vehicles," *Energies*, 2023.

- [35] W. Andriesse, J. Van Kampen, and T. Hofman, "Multi-layer optimisation of hybrid energy storage systems for electric vehicles," in *2024 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2024: IEEE, pp. 1–6.
- [36] D. G. M. Carlos Andrés Ramos Paja, Sergio Ignacio Serna Garcés, "Power Conversion System for Hybrid Battery-Capacitor Storage," (in English), *Ingeniería*, vol. 25, pp. 194–211, 2020, doi: 10.14483/23448393.15741.
- [37] E. F. A. MÉNDEZ, Estalin V. ; MOROCHO, Andrés F. , "Supercapacitores como aporte al desarrollo energético eléctrico, análisis comparativo mediante herramientas computacionales de simulación aplicadas," *ESPACIOS*, vol. 41, 14, 2020. [Online]. Available: <https://www.revistaespacios.com/a20v41n14/20411429.html>.
- [38] M. Al Takrouri *et al.*, "A Comparison Study of Hybrid Energy Storage System Topologies for Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 171675–171688, 2024.
- [39] Y. Kozhushko, T. Karbivska, D. Pavković, and O. Bondarenko, "Peak Current Control of Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage," *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, pp. 396–401, 2020.
- [40] S. Liu, X. Xie, and L. Yang, "Analysis, Modeling and Implementation of a Switching Bi-Directional Buck-Boost Converter Based on Electric Vehicle Hybrid Energy Storage for V2G System," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 65868–65879, 2020.
- [41] P. Bhattacharyya, A. Banerjee, S. Sen, S. K. Giri, and S. Sadhukhan, "A Modified Semi-Active Topology for Battery-Ultracapacitor Hybrid Energy Storage System for EV Applications," *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020)*, pp. 1–6, 2020.
- [42] J. Hatim, A. Rachid, and B. I. Badr, "Fuzzy controller hardware implementation for an EV's HESS energy management," *International journal of electrical and computer engineering systems*, 2023.
- [43] A. Alyakhni, L. Boulon, J.-M. Vinassa, and O. Briat, "A Comprehensive Review on Energy Management Strategies for Electric Vehicles Considering Degradation Using Aging Models," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 143922–143940, 2021.
- [44] N. P. Besekar, "DC-DC Converters Topology," *Journal of Image Processing and Intelligent Remote Sensing*, 2023.
- [45] W. Jiang, C. Zhu, S. Xue, K. Ren, and C. Yang, "DC-Side-Fault-Tolerant Control of a Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System Based on Cascaded Multilevel Converter and Auxiliary Power Loop," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 67, pp. 7451–7460, 2020.
- [46] A. K and V. U. Smiee, "Control of Zeta Converter and Hybrid Energy Storage System (HESS) using Small Signal Analysis with State Feedback," *2021 6th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, pp. 1–6, 2021.
- [47] J. R. Babu, M. R. Nayak, and B. Mangu, "Development and Application of an Energy Management System for Electric Vehicles Integrated with Multi-input DC-DC Bidirectional Buck-Boost Converter," *International Journal of Electrical and Electronics Research*, 2023.
- [48] L. Mamouri, T. Mesbahi, P. Bartholomeus, and T. Paul, "Design of a DC/DC Power Converter for Li-ion Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System in Electric Vehicles," *2020 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, pp. 1–5, 2020.
- [49] J. Diethorn, A. Nix, M. Perhinschi, and W. Wayne, "Implementation of Fuzzy Logic Control into an Equivalent Minimization Strategy for Adaptive Energy Management of A Parallel Hybrid Electric Vehicle," *Journal of Transportation Technologies*, vol. 14, pp. 88–118, 01/01 2024, doi: 10.4236/jtts.2024.141007.
- [50] Y. E. Altun and O. A. Kutlar, "Energy Management Systems' Modeling and Optimization in Hybrid Electric Vehicles," *Energies*, 2024.

- [51] H. Maghfiroh, O. Wahyunggoro, and A. I. Cahyadi, "Energy Management in Hybrid Electric and Hybrid Energy Storage System Vehicles: A Fuzzy Logic Controller Review," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 56097–56109, 2024.
- [52] H. Jbari, R. Askour, and B. B. Idrissi, "Fuzzy logic-based energy management strategy on dual-source hybridization for a pure electric vehicle," *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, 2022.
- [53] S. Chen, Q. Yang, J. Zhou, and X. Chen, "Hybrid energy storage system control method based on model predictive control," *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 2020.
- [54] P. S. Praveena Krishna, J. N. Sabhahit, V. S. Rao, A. Saraswat, H. C. Laugaland, and P. B. Nempu, "Optimizing EV Powertrain Performance and Sustainability through Constraint Prioritization in Nonlinear Model Predictive Control of Semi-Active Bidirectional DC-DC Converter with HESS," *Sustainability*, 2024.
- [55] M. A. Jawale, A. B. Pawar, S. K. Korde, D. S. Rakshe, P. William, and N. Deshpande, "Energy Management in Electric Vehicles Using Improved Swarm Optimized Deep Reinforcement Learning Algorithm," *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2023.
- [56] H. Zhang, B. Chen, N. Lei, B. Li, R. Li, and Z. Wang, "Integrated Thermal and Energy Management of Connected Hybrid Electric Vehicles Using Deep Reinforcement Learning," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 10, pp. 4594–4603, 2024.
- [57] A. P. Renold and N. S. Kathayat, "Comprehensive Review of Machine Learning, Deep Learning, and Digital Twin Data-Driven Approaches in Battery Health Prediction of Electric Vehicles," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 43984–43999, 2024.
- [58] J. Santhosh, A. K. Rajagiri, and P. Morri, "Battery, Ultra-capacitor based Hybrid Energy Storage System (HESS) for EV applications with PI and Fuzzy logic controllers," *E3S Web of Conferences*, 2021.
- [59] E. Vasta *et al.*, "Models for Battery Health Assessment: A Comparative Evaluation," *Energies*, 2023.
- [60] R. S. Sankarkumar and R. Natarajan, "Energy management techniques and topologies suitable for hybrid energy storage system powered electric vehicles: An overview," *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 2020.
- [61] E. A. Narvaez Cubillos, C. A. Cortés Guerrero, and C. L. Trujillo Rodríguez, "Topologies for Battery and Supercapacitor Interconnection in Residential Microgrids with Intermittent Generation," *Ingeniería*, vol. 25, no. 1, pp. 6–19, 03/12 2020, doi: 10.14483/23448393.15668.
- [62] B. Traoré, M. Doumiati, C. Morel, J.-C. Olivier, and O. Soumaoro, "Energy Management Strategy Based on a New Adaptive Filtering Algorithm for Battery-Ultracapacitor Electric Vehicles," *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp. 392–396, 2020.
- [63] I. Pielecha, "Energy management system of the hybrid ultracapacitor-battery electric drive vehicles," *Archives of Transport*, 2021.
- [64] A. Ranjan and S. B. Bodkhe, "Energy Management Strategy for Hybrid Energy Storage Systems in Electric Vehicle –A Review," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, 2022.
- [65] L. Zhang, X. Ye, X. Xia, and F. Barzegar, "A Real-Time Energy Management and Speed Controller for an Electric Vehicle Powered by a Hybrid Energy Storage System," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 16, pp. 6272–6280, 2020.
- [66] A. Katnapally, U. B. Manthathi, A. Raveendran, and S. Punna, "A predictive power management scheme for hybrid energy storage system in electric vehicle," *International Journal of Circuit Theory and Applications*, vol. 49, pp. 3864 – 3878, 2021.
- [67] T. Saravanakumar, D. Mohanraj, T. Girijaprasanna, S. Raju, D. Chittathuru, and S. M. Muyeen, "A Comprehensive Review on Electric Vehicle: Battery Management System, Charging Station, Traction Motors," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 20994–21019, 2023.

- [68] M. C. Juan Valladolid, Ángel Guiracocha, "Análisis de la eficiencia del freno regenerativo en un vehículo eléctrico mediante pruebas experimentales," *Ingenius, Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 29, pp. 24–31, 2023, doi: 10.17163/ings.n29.2023.02.
- [69] A. Ranjan and S. B. Bodkhe, "Energy management strategy for hybrid energy storage systems in electric vehicle—A review," *International Journal of Electrical and Electronic Engineering & Telecommunications*, vol. 11, no. 2, pp. 88–101, 2022.
- [70] P. K. Tarei, P. Chand, and H. Gupta, "Barriers to the adoption of electric vehicles: Evidence from India," *Journal of Cleaner Production*, vol. 291, p. 125847, 2021/04/01/ 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.125847>.
- [71] J. Lopes, J. A. Pomilio, and P. A. Ferreira, "Sizing of Autonomy Source Battery–Supercapacitor Vehicle with Power Required Analyses," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 15, no. 3, doi: 10.3390/wevj15030076.
- [72] Z. Sun, Z. Wen, X. Zhao, Y. Yang, and S. Li, "Real-World Driving Cycles Adaptability of Electric Vehicles," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 11, no. 1, doi: 10.3390/wevj11010019.
- [73] H. Maghfiroh, Wahyunggoro, O., Cahyadi, A.I., "Optimizing low pass filter cut-off frequency for energy management in electric vehicles with Hybrid Energy Storage Systems," *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, vol. 10, 5, pp. 1857–1865, 2023, doi: <https://doi.org/10.18280/mmep.100539>.
- [74] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach," *Energies*, vol. 4, no. 4, pp. 582–598doi: 10.3390/en4040582.
- [75] N. Campagna *et al.*, "Battery Models for Battery Powered Applications: A Comparative Study," *Energies*, vol. 13, no. 16, p. 4085doi: 10.3390/en13164085.
- [76] M. A. Hussein and A. A. Alsaffa, "Review on li-ion battery model used in electrical vehicle," *BIO Web Conf.*, 10.1051/bioconf/20249700092 vol. 97, // 2024. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/bioconf/20249700092>.
- [77] W. Zhou, Y. Zheng, Z. Pan, and Q. Lu, "Review on the Battery Model and SOC Estimation Method," *Processes*, vol. 9, no. 9, p. 1685doi: 10.3390/pr9091685.
- [78] P. Ningrum, N. A. Windarko, and S. Suhariningsih, "Estimation of State of Charge (SoC) Using Modified Coulomb Counting Method With Open Circuit Compensation For Battery Management System (BMS)," 2021.
- [79] K. Movassagh, A. Raihan, B. Balasingam, and K. Pattipati, "A Critical Look at Coulomb Counting Approach for State of Charge Estimation in Batteries," *Energies*, vol. 14, no. 14, p. 4074doi: 10.3390/en14144074.
- [80] B. Duangsrikaew, J. Mongkoltanatas, C.-n. Benyajati, P. Karin, and K. Hanamura, "Battery Sizing for Electric Vehicles Based on Real Driving Patterns in Thailand," *World Electric Vehicle Journal*, vol. 10, no. 2, doi: 10.3390/wevj10020043.
- [81] Z. Teimoori and A. Yassine, "A Review on Intelligent Energy Management Systems for Future Electric Vehicle Transportation," *Sustainability*, 2022.
- [82] T. Lei, S. Riaz, H. Raziq, M. Batool, F. Pan, and J. Wang, "A Comparison of Metaheuristic Techniques for Solving Optimal Sizing and Sizing Problems of Capacitor Banks to Reduce the Power Loss in Radial Distribution System," *Complexity*, vol. 2022, no. 1, p. 4547212, 2022/01/01 2022, doi: <https://doi.org/10.1155/2022/4547212>.
- [83] C. Chen and G. Ren, "Modeling and Simulation of a Battery/Supercapacitor Hybrid Power Source for Electric Vehicles," *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 11176 – 11190, %06/%20 2024, doi: 10.15282/ijame.21.2.2024.1.0864.
- [84] X. Zheng, W. Jiang, L. Yin, and Y. Fu, "Optimal Energy Allocation Algorithm of Li-Battery/Super capacitor Hybrid Energy Storage System Based on Dynamic Programming Algorithm," *E3S Web*

- Conf., 10.1051/e3sconf/202123101001 vol. 231, // 2021. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123101001>.
- [85] A. S. J. Khalid S. Mohammad, "Comparison of electric motors used in electric vehicle propulsion system," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 27, 1, pp. 11–19, 2022, doi: 10.11591/ijeecs.v27.i1.pp11-19.
 - [86] P. N. B. H. M. M. Sahajwani, "Electrical Motors for Electric Vehicle – A Comparative Study," *Proceedings of Recent Advances in Interdisciplinary Trends in Engineering & Applications (RAITEA) 2019*, p. 10, 2019, doi: 10.2139/ssrn.3364887.
 - [87] S. Bhandari, X. Luo, and F. Wang, "Understanding the effects of structural factors and traffic loading on flexible pavement performance," *International Journal of Transportation Science and Technology*, vol. 12, no. 1, pp. 258–272, 2023/03/01/ 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2022.02.004>.
 - [88] N.-g. Kim *et al.*, "Human exposure to harmful urban traffic noise pollution levels: a case study from seoul, South Korea," *Scientific Reports*, vol. 15, no. 1, p. 28610, 2025/08/05 2025, doi: 10.1038/s41598-025-14277-5.
 - [89] I. Aghabali, J. Bauman, P. J. Kollmeyer, Y. Wang, B. Bilgin, and A. Emadi, "800-V Electric Vehicle Powertrains: Review and Analysis of Benefits, Challenges, and Future Trends," *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, no. 3, pp. 927–948, 2021, doi: 10.1109/TTE.2020.3044938.
 - [90] S. Das, "Analysis of High Voltage Options (400V vs 800V) in Electric Vehicle Architecture," *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 2025.
 - [91] A. Lab., "Teorema de muestreo de Nyquist-Shannon.," ed, 2025.
 - [92] S. Kamthan and H. Singh, "Hierarchical fuzzy logic systems," *Journal of The Institution of Engineers (India): Series B*, vol. 103, no. 4, pp. 1167–1175, 2022.
 - [93] X. Zhang, Z. Lu, C. Tan, and Z. Wang, "Fuzzy Adaptive Filtering-Based Energy Management for Hybrid Energy Storage System," *Computer Systems Science and Engineering*, vol. 36, no. 1, 2021, doi: 10.32604/csse.2021.014081.
 - [94] K. Wiktorowicz and T. Krzeszowski, "Training High-Order Takagi-Sugeno Fuzzy Systems Using Batch Least Squares and Particle Swarm Optimization," *International Journal of Fuzzy Systems*, vol. 22, pp. 22 – 34, 2019.

Anexos

Anexo A - Código de dimensionamiento del HESS

SUPER_SCM3_3.m

```
%% =====  
% SCRIPT DE OPTIMIZACIÓN Y DIMENSIONAMIENTO DE HESS (EN DOS ETAPAS)  
% + OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO (BATERÍA VS MASA SC)  
% + EXPORTACIÓN PARA SIMULADOR JERÁRQUICO  
% + VISUALIZACIÓN GRÁFICA DE RESULTADOS  
% =====  
  
clc; clear; close all;  
  
%% 1. PARÁMETROS DE ENTRADA, REQUISITOS Y TECNOLOGÍA  
autonomia_deseada_km = 100;  
DoD_max = 0.60;  
factor_seguridad_bat = 1.15;  
factor_seguridad_sc = 1.10;  
  
M = 740; % Masa total de diseño (kg) - Fija según requerimiento  
A = 1.8; % Área frontal (m^2)  
Cd = 0.3; % Coeficiente de arrastre aerodinámico  
Cr = 0.015; % Coeficiente de resistencia a la rodadura  
g = 9.81; % Gravedad (m/s^2)  
rho = 1.225; % Densidad del aire (kg/m^3)  
  
V_bus_nominal = 400;  
eta_prop = 0.95 * 0.90; % Motor * Transmisión (Propulsión)  
eta_regen = 0.80 * 0.85; % Motor * Transmisión (Regeneración)  
V_sc_max_ratio = 1.0; % V_max SC = 400V  
V_sc_min_ratio = 0.5; % V_min SC = 200V  
  
% --- PARÁMETROS DE LAS CELDAS COMERCIALES ---  
Cell_SC.V_nom = 3.0; Cell_SC.C_nom = 3000; Cell_SC.I_peak = 2600; Cell_SC.Masa = 0.46; %  
Maxwell K2  
Cell_Bat.V_nom = 3.6; Cell_Bat.Ah = 5.0; % Celda Li-ion Genérica  
  
%% 2. CREACIÓN DEL CICLO DE MANEJO SUPERPUESTO  
disp('Selecciona los ciclos de manejo (.csv) para crear el perfil maestro...');  
[fileNames, pathName] = uigetfile('*.csv', 'Selecciona los archivos', 'MultiSelect',  
'on');  
if isequal(fileNames, 0), disp('Operación cancelada.');
```

return; end

if ~iscell(fileNames), fileNames = {fileNames}; end

datosCiclos = cell(1, length(fileNames)); validFiles = 0;
for i = 1:length(fileNames)
try
dataTable = readtable(fullfile(pathName, fileNames{i}));
v_kph = dataTable.speed_mph * 1.60934;
v_kph(v_kph < 0) = 0;
validFiles = validFiles + 1; datosCiclos{validFiles} = v_kph;
catch, warning('Error leyendo %s.', fileNames{i}); end
end
datosCiclos = datosCiclos(1:validFiles);
maxDuration = max(cellfun(@length, datosCiclos));

```

allSpeeds = NaN(maxDuration, validFiles);
for i = 1:validFiles, allSpeeds(1:length(datosCiclos{i}), i) = datosCiclos{i}; end

t = (0:maxDuration-1)';
v_kph = max(allSpeeds, [], 2, 'omitnan');
v_ms = v_kph * (1000 / 3600);
a = [0; diff(v_ms)];
distancia_km_ciclo = sum(v_ms) / 1000;

fprintf('Ciclo maestro creado: %.2f km, duración %d s.\n', distancia_km_ciclo,
maxDuration);

%% 3. ETAPA 1A: CÁLCULO DE DEMANDA DE POTENCIA (Dinámica Vehicular)
F_rodadura = Cr * M * g;
F_aire = 0.5 * rho * A * Cd * v_ms.^2;
F_inercia = M * a;
F_total = F_rodadura + F_aire + F_inercia;

P_ruedas_W = F_total .* v_ms;
P_bus_W = zeros(size(t));
idx_prop = P_ruedas_W >= 0; idx_regen = P_ruedas_W < 0;
P_bus_W(idx_prop) = P_ruedas_W(idx_prop) / eta_prop;
P_bus_W(idx_regen) = P_ruedas_W(idx_regen) * eta_regen;

%% 4. ETAPA 1B: OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO DE LA EMS
fprintf('Optimizando la frecuencia de corte (fc) con enfoque Multiobjetivo...\n');
fs = 1; Ts = 1/fs;
fc_range = 0.001:0.0001:0.49; % Paso ligeramente mayor para velocidad

I_bat_rms_results = zeros(size(fc_range));
Masa_sc_results = zeros(size(fc_range));

V_sc_max = V_bus_nominal * V_sc_max_ratio;
V_sc_min = V_bus_nominal * V_sc_min_ratio;
Ns_sc_est = ceil(V_sc_max / Cell_SC.V_nom); % Celdas en serie estimadas

for k = 1:length(fc_range)
    % Filtrado
    [b, a_filt] = butter(2, fc_range(k)/(fs/2), 'low');
    P_bat_temp = filter(b, a_filt, P_bus_W);
    P_sc_temp = P_bus_W - P_bat_temp;

    % Objetivo 1: Estrés Batería
    I_bat_rms_results(k) = rms(P_bat_temp / V_bus_nominal);

    % Objetivo 2: Tamaño del SC (Estimación de Masa)
    E_sc_temp = cumsum(P_sc_temp) * Ts;
    delta_E_temp = (max(E_sc_temp) - min(E_sc_temp)) * factor_seguridad_sc;
    C_req_temp = (2 * delta_E_temp) / (V_sc_max^2 - V_sc_min^2);

    Np_sc_est = ceil((C_req_temp * Ns_sc_est) / Cell_SC.C_nom);
    Np_sc_est = max(1, Np_sc_est); % Al menos 1 rama paralela
    Masa_sc_results(k) = (Ns_sc_est * Np_sc_est) * Cell_SC.Masa;
end

% Normalización y Función de Costo (Pesos 50/50)
I_bat_norm = I_bat_rms_results / max(I_bat_rms_results);
Masa_sc_norm = Masa_sc_results / max(Masa_sc_results);
W_bat = 0.5; W_sc = 0.5;
Costo_J = (W_bat .* I_bat_norm) + (W_sc .* Masa_sc_norm);

```

```

[min_Costo, idx_optimo] = min(Costo_J);
fc_optima = fc_range(idx_optimo);

% Aplicar filtro con fc óptima definitiva
[b_opt, a_filt_opt] = butter(2, fc_optima/(fs/2), 'low');
P_bat_W_ref = filter(b_opt, a_filt_opt, P_bus_W);
P_sc_W_ref = P_bus_W - P_bat_W_ref;

%% 5. ETAPA 1C: DIMENSIONAMIENTO MACROSCÓPICO (TEÓRICO)
Energia_bat_Ws = sum(P_bat_W_ref(P_bat_W_ref > 0));
Energia_bat_Ah_ciclo = Energia_bat_Ws / (V_bus_nominal * 3600);
consumo_Ah_por_km = Energia_bat_Ah_ciclo / distancia_km_ciclo;
Cap_Bat_Req_Ah = (consumo_Ah_por_km * autonomia_deseada_km / DoD_max) *
factor_seguridad_bat;

Energia_SC_J = cumsum(P_sc_W_ref) * Ts;
delta_E_sc_max_J = (max(Energia_SC_J) - min(Energia_SC_J)) * factor_seguridad_sc;

Capacitancia_Req_F = (2 * delta_E_sc_max_J) / (V_sc_max^2 - V_sc_min^2);
P_sc_max_W = max(abs(P_sc_W_ref));
I_sc_peak_A = P_sc_max_W / V_sc_min;

%% 6. ETAPA 2: EVALUACIÓN DEFINITIVA DE CELDAS COMERCIALES
Ns_bat = ceil(V_bus_nominal / Cell_Bat.V_nom);
Np_bat = ceil(Cap_Bat_Req_Ah / Cell_Bat.Ah);
Cap_Bat_Instalada_Ah = Np_bat * Cell_Bat.Ah;

Ns_sc = ceil(V_sc_max / Cell_SC.V_nom);
Np_sc_por_Energia = ceil((Capacitancia_Req_F * Ns_sc) / Cell_SC.C_nom);
Np_sc_por_Corriente = ceil(I_sc_peak_A / Cell_SC.I_peak);
Np_sc_Final = max(Np_sc_por_Energia, Np_sc_por_Corriente);
Capacitancia_Instalada_F = (Cell_SC.C_nom / Ns_sc) * Np_sc_Final;
Masa_Final_SC = (Ns_sc * Np_sc_Final) * Cell_SC.Masa;

%% 7. ETAPA 3: EXPORTACIÓN PARA EL SIMULADOR JERÁRQUICO
T_export = table(t, P_bus_W, P_bat_W_ref, P_sc_W_ref, ...
    'VariableNames', {'Tiempo_s', 'Demanda_Total_W', 'Potencia_Bateria_W',
    'Potencia_SC_W'});
nombre_archivo_salida = 'Perfil_Para_Simulador.csv';
writetable(T_export, nombre_archivo_salida);
fprintf('\n>>> EXPORTACIÓN EXITOSA <<<\n');
fprintf('Archivo "%s" generado.\n', nombre_archivo_salida);

%% 8. VISUALIZACIÓN DE RESULTADOS DEL DIMENSIONAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN
figure('Name', 'Resultados de Optimización Multiobjetivo HESS', 'NumberTitle', 'off',
    'Position', [50, 50, 1200, 900], 'Color', 'w');

% 8.1 Curva de Optimización (Doble Eje Y)
subplot(3, 2, 1);
yyaxis left
plot(fc_range, I_bat_rms_results, 'b-', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Corriente RMS Batería (A)', 'Color', 'b', 'FontWeight', 'bold');
set(gca, 'YColor', 'b');
yyaxis right
plot(fc_range, Masa_sc_results, 'r-', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Masa Banco SC (kg)', 'Color', 'r', 'FontWeight', 'bold');
set(gca, 'YColor', 'r');
title('Trade-off Multiobjetivo: Batería vs Masa SC');
xlabel('Frecuencia de Corte (Hz)');

```

```

xline(fc_optima, 'k--', sprintf('fc Óptima = %.3f Hz', fc_optima),
'LabelVerticalAlignment', 'bottom', 'LineWidth', 1.5);
grid on; axis tight;

% 8.2 Reparto de Potencias
subplot(3, 2, 2);
plot(t/60, P_bus_W/1000, 'k:', 'DisplayName', 'Demanda Total'); hold on;
plot(t/60, P_bat_W_ref/1000, 'r-', 'DisplayName', 'Potencia Batería', 'LineWidth', 1.2);
plot(t/60, P_sc_W_ref/1000, 'b-', 'DisplayName', 'Potencia SC');
title(['Reparto de Potencia con fc = ', num2str(fc_optima), ' Hz']);
xlabel('Tiempo (minutos)'); ylabel('Potencia (kW)'); grid on; axis tight; legend;

% 8.3 Ciclo de Manejo
subplot(3, 2, 3);
plot(t/60, v_kph, 'b', 'LineWidth', 1.2);
title('Ciclo de Manejo Superpuesto');
xlabel('Tiempo (minutos)'); ylabel('Velocidad (km/h)'); grid on; axis tight;

% 8.4 Fluctuación de Energía en SC
subplot(3, 2, 4);
plot(t/60, Energia_SC_J / 1000, 'c-', 'LineWidth', 1.5);
title('Energía Acumulada en el Supercapacitor');
xlabel('Tiempo (minutos)'); ylabel('Energía (kJ)'); grid on; axis tight;
text(0.05, 0.9, sprintf('Fluctuación Máx: %.2f kJ', delta_E_sc_max_J/1000), 'Units',
'normalized', 'FontSize', 10, 'BackgroundColor', 'w');

% 8.5 Tabla Resumen
ax_tabla = subplot(3, 2, 5:6);
axis(ax_tabla, 'off');
title(ax_tabla, 'Resumen de Dimensionamiento del Hardware', 'Visible', 'on');
% Cargar los datos calculados reales
datos_tabla = {autonomia_deseada_km; Cap_Bat_Instalada_Ah; V_bus_nominal ;
Capacitancia_Instalada_F; (P_sc_max_W/1000); Masa_Final_SC};
uitable('Data', datos_tabla, ...
'RowName', {'Autonomía Objetivo (km)', 'Capacidad Batería (Ah)', 'Voltaje del BUS
Nominal (V)', 'Capacitancia SC (F)', 'Pico Potencia SC (kW)', 'Masa Banco SC (kg)'}, ...
'ColumnName', {'Valor Calculado'}, ...
'Units', 'normalized', 'Position', [0.3, 0.05, 0.4, 0.22]);

%% 9. IMPRESIÓN DE RESULTADOS EN CONSOLA
fprintf('\n===== \n');
fprintf(' DATOS PARA ACTUALIZAR EN TU SCRIPT "Simulador_HESS_..." \n');
fprintf('===== \n');
fprintf('Copia estos valores en la sección "2. PARÁMETROS DE HARDWARE": \n');
fprintf('HW.V_sc_nom = %.1f; \n', V_sc_max);
fprintf('HW.C_sc = %.4f; \n', Capacitancia_Instalada_F);
fprintf('HW.P_sc_max_kW = %.2f; \n', (Np_sc_Final * Cell_SC.I_peak * V_sc_min)/1000);
fprintf('HW.V_bat = %.1f; \n', Ns_bat * Cell_Bat.V_nom);
fprintf('HW.C_bat = %.4f; \n', Cap_Bat_Instalada_Ah);

fprintf('Ns_sc_est = %.4f; \n', Ns_sc_est);
fprintf('Np_sc_est = %.4f; \n', Np_sc_Final);
fprintf('===== \n');

```

Anexo B - Código de simulación completa

COMPL_SIM_13_B1.m

```
function Simulador_HESS_v5()
% =====
% SIMULADOR HESS JERÁRQUICO – VERSIÓN 5
% =====
%
% HISTORIAL DE CAMBIOS:
%   v2: C1. DoD real BAT[20-80%], SC[25-98%] + corte del vehículo.
%       C2. Frenado regenerativo con redirección bat↔SC.
%       C3. SOC sin deriva: Rint+Coulomb (bat), energía+Rint (SC).
%   v3: M1. Línea de corte en TODAS las gráficas.
%       M2. Diagnóstico con distancia recorrida.
%       M3. Gráfica ciclo de manejo + reparto de potencia.
%       M4. Unidades explícitas en todos los ejes.
%   v4: R1. Reconstrucción redundante del ciclo superpuesto (CMM_2).
%       R2. Verificación de integridad dimensionador ↔ ciclos.
%       R3. Ciclos individuales en visualización.
%   v5: G1. Gráficas en 3 ventanas separadas (exportables como imagen).
%       G2. Desviación truncada visualmente en idx_stop.
%       G3. V_ocv por tabla interpolada (reemplaza modelo lineal).
%       F1. Límite de P_bat_max_kW en saturación (protección HW).
%       F2. Energía regenerada calculada solo hasta idx_stop.
%       Nota: P_bat_filt NO se reinicia entre cambios de modo del
%             supervisor. Esto se abordará al rediseñar las reglas.
%       Nota: El convertidor DC/DC bidireccional no está modelado.
%             Se incluirá en un simulador secundario posterior.
%
% FLUJO DE ENTRADA:
%   1. CSV exportado por el Dimensionador (potencias).
%   2. CSVs originales de ciclos de manejo (speed_mph).
%
% =====

clear; clc; close all;

% =====
%% 1. SELECCIÓN DE ARCHIVOS
% =====
[archivo, ruta] = uigetfile('*.csv', ...
    '1/2 – Selecciona el Perfil del Dimensionador');
if isequal(archivo, 0), disp('Operación cancelada.');
```

```
return; end

[fileNames, pathCiclos] = uigetfile('*.csv', ...
    '2/2 – Selecciona los CSVs de ciclos de manejo', 'MultiSelect', 'on');
if isequal(fileNames, 0), disp('Operación cancelada.');
```

```
return; end
if ~iscell(fileNames), fileNames = {fileNames}; end

% =====
%% 2. PARÁMETROS DE HARDWARE
% =====
HW.V_sc_nom      = 402;      % V   – Voltaje nominal del banco SC
HW.C_sc          = 22.3881; % F   – Capacitancia instalada
HW.P_sc_max_kW   = 35;      % kW  – Potencia pico real del SC
HW.V_bat_nom     = 403.2;   % V   – Voltaje nominal del banco de baterías
HW.C_bat         = 50;      % Ah  – Capacidad instalada [DoD=0.60]
HW.P_bat_max_kW  = 35;      % kW  – Potencia máxima de la batería
```

```

HW.I_bat_max    = 200;          % A    - Corriente máxima (protección Rint)
HW.R_bat        = 0.05;         % Ohm   - Resistencia interna batería
HW.R_sc         = 0.02;         % Ohm   - Resistencia interna SC
HW.Ns_bat       = 112;          %      - Celdas en serie (ceil(400/3.6))

% [G3] Modelo V_ocv por tabla interpolada (celda Li-ion genérica)
% -----
% Reemplaza el modelo lineal V_ocv = 320 + 0.832*SOC que subestimaba
% el voltaje real en todo el rango operativo.
%
% La tabla define V_ocv POR CELDA a distintos niveles de SOC.
% V_ocv del banco = Ns_bat × V_celda(SOC).
%
% Datos representativos de celda Li-ion NMC (3.6V nominal):
%   SOC   0%→3.00V | 10%→3.30V | 20%→3.45V | 30%→3.52V | 40%→3.55V
%   50%→3.58V | 60%→3.62V | 70%→3.67V | 80%→3.75V | 90%→3.90V
%  100%→4.20V
%
% Estos valores pueden ajustarse al datasheet de la celda utilizada.
% -----
HW.V_ocv_SOC    = [0  10  20  30  40  50  60  70  80  90 100]; % %
HW.V_ocv_celda  = [3.00 3.30 3.45 3.52 3.55 3.58 3.62 3.67 3.75 3.90 4.20]; % V/celda

% =====
%% 3. LÍMITES DE SEGURIDAD - DoD
% =====
PROT.SOC_bat_min = 20; % %
PROT.SOC_bat_max = 80; % %
PROT.SOC_sc_min  = 25; % %
PROT.SOC_sc_max  = 98; % %

SOC_bat_init = PROT.SOC_bat_max;
SOC_sc_init  = PROT.SOC_sc_max;

% =====
%% 4. AUTO-CALIBRACIÓN DE TAU
% =====
PARAMS.Fs = 1; % Hz
PARAMS.Ts = 1 / PARAMS.Fs; % s

E_total_J = 0.5 * HW.C_sc * HW.V_sc_nom^2; % J
Porc_Util  = (PROT.SOC_sc_max - PROT.SOC_sc_min) / 100;
PARAMS.Tau_Max = (E_total_J * Porc_Util) / ...
                (HW.P_sc_max_kW * 1000); % s
PARAMS.Tau_Min = 1.0; % s

fprintf('--- Auto-calibración ---\n');
fprintf('E_util SC = %.2f kJ\n', E_total_J * Porc_Util / 1000);
fprintf('Tau_Max = %.2f s\n', PARAMS.Tau_Max);
fprintf('Tau_Min = %.2f s\n', PARAMS.Tau_Min);

% [G3] Mostrar V_ocv en puntos clave del rango operativo
V_ocv_20 = interp1(HW.V_ocv_SOC, HW.V_ocv_celda, 20, 'linear') * HW.Ns_bat;
V_ocv_80 = interp1(HW.V_ocv_SOC, HW.V_ocv_celda, 80, 'linear') * HW.Ns_bat;
fprintf('V_ocv(20%) = %.1f V | V_ocv(80%) = %.1f V\n', V_ocv_20, V_ocv_80);
fprintf('-----\n');

% =====
%% 5. CARGA DE DATOS DEL DIMENSIONADOR
% =====

```

```

has_ref = false;
try
    T = readtable(fullfile(ruta, archivo));
    campos = T.Properties.VariableNames;

    if ismember('Demanda_Total_W', campos)
        Pd = T.Demanda_Total_W / 1000; % kW
    elseif ismember('Demanda_Total_kW', campos)
        Pd = T.Demanda_Total_kW; % kW
    else
        Pd = T{:,1};
        if mean(abs(Pd)) > 500
            Pd = Pd / 1000;
            warning('Conversión automática W→kW aplicada.');
        end
    end

    N = length(Pd);
    t = (0:N-1)' * PARAMS.Ts; % s

    if ismember('Potencia_Bateria_W', campos)
        P_bat_ref = T.Potencia_Bateria_W / 1000; % kW
        P_sc_ref = T.Potencia_SC_W / 1000; % kW
        has_ref = true;
        fprintf('Referencias teóricas encontradas.\n');
    end
catch ME
    error('Error leyendo perfil del dimensionador: %s', ME.message);
end

% =====
%% 6. RECONSTRUCCIÓN DEL CICLO SUPERPUESTO [R1]
% =====
[v_kph, dist_km, ciclos_ind, nombres_ciclos] = ...
    reconstruir_ciclo_superpuesto(fileNames, pathCiclos, PARAMS.Ts);

% =====
%% 7. VERIFICACIÓN DE INTEGRIDAD [R2]
% =====
N_ciclo = length(v_kph);
fprintf('\n--- Verificación de Integridad [R2] ---\n');
fprintf('Dimensionador: N = %d | Ciclo reconstruido: N = %d\n', N, N_ciclo);
fprintf('Distancia reconstruida: %.2f km\n', dist_km(end));

if N_ciclo ~= N
    warning('INCONSISTENCIA: %d vs %d muestras.', N_ciclo, N);
    N_min = min(N, N_ciclo);
    Pd = Pd(1:N_min); v_kph = v_kph(1:N_min);
    dist_km = dist_km(1:N_min); t = t(1:N_min); N = N_min;
    if has_ref
        P_bat_ref = P_bat_ref(1:N_min);
        P_sc_ref = P_sc_ref(1:N_min);
    end
    fprintf('Truncado a %d muestras.\n', N_min);
else
    fprintf('Estado: [CONSISTENTE]\n');
end
fprintf('-----\n');

% =====

```

```

%% 8. CARGA DEL BANCO DE CONTROLADORES DIFUSOS
% =====
warning('off', 'fuzzy:general:warnUpdateFIS');
fprintf('\nCargando FIS...\n');

try, FIS.Nominal = readfis('fis_nominal.fis');
catch, error('ERROR: fis_nominal.fis no encontrado.');
```

end

```

try, FIS.Supervisor = readfis('fis_supervisor.fis');
catch, error('ERROR: fis_supervisor.fis no encontrado.');
```

end

```

FIS.Bat_Low = cargar_o_default('fis_bat_low.fis', FIS.Nominal);
FIS.Bat_High = cargar_o_default('fis_bat_high.fis', FIS.Nominal);
FIS.SC_Low = cargar_o_default('fis_sc_low.fis', FIS.Nominal);
FIS.SC_High = cargar_o_default('fis_sc_high.fis', FIS.Nominal);

% =====
%% 9. SIMULACIÓN PRINCIPAL
% =====
SOC_bat = zeros(N, 1, 'single'); % %
SOC_sc = zeros(N, 1, 'single'); % %
P_bat = zeros(N, 1, 'single'); % kW
P_sc = zeros(N, 1, 'single'); % kW
Tau_hist = zeros(N, 1, 'single'); % s
Modo_hist = zeros(N, 1, 'uint8'); % 1-5
Regen_hist = false(N, 1);

SOC_bat(1) = SOC_bat_init;
SOC_sc(1) = SOC_sc_init;
P_bat(1) = Pd(1);

P_bat_filt = Pd(1); % kW
idx_stop = N;

hWait = waitbar(0, 'Simulando HESS con Control Jerárquico...');

for k = 2:N

    % 9.1 Actualización de SOC [C3][G3]
    [SOC_bat(k), SOC_sc(k)] = update_soc_phys(...
        P_bat(k-1), P_sc(k-1), ...
        SOC_bat(k-1), SOC_sc(k-1), ...
        HW, PARAMS.Ts, PROT);

    % 9.2 CORTE REAL DEL VEHÍCULO [C1]
    if SOC_bat(k) <= PROT.SOC_bat_min
        idx_stop = k;
        SOC_bat(k+1:end) = SOC_bat(k);
        SOC_sc(k+1:end) = SOC_sc(k);
        fprintf('\n[CORTE] t = %.1f s | SOC_bat = %.2f%%\n', ...
            t(k), SOC_bat(k));
        break;
    end

    % 9.3 Entradas del FIS — derivada DIRECTA de la demanda (Ec. 23),
    % sin pre-filtrado: el sistema difuso recibe el transitorio real.
    dPd = (Pd(k) - Pd(k-1)) / PARAMS.Ts; % kW/s
    in1 = max(-35, min(35, Pd(k))); % kW
    in2 = max(-70, min(70, dPd)); % kW/s

    % 9.4 Supervisor difuso

```

```

try
    Modo_val = evalfis(FIS.Supervisor, [SOC_bat(k), SOC_sc(k)]);
catch
    Modo_val = evalfis([SOC_bat(k), SOC_sc(k)], FIS.Supervisor);
end
Modo_idx      = round(Modo_val);
Modo_hist(k) = uint8(Modo_idx);

switch Modo_idx
    case 1, fis_act = FIS.Nominal;
    case 2, fis_act = FIS.Bat_Low;
    case 3, fis_act = FIS.Bat_High;
    case 4, fis_act = FIS.SC_Low;
    case 5, fis_act = FIS.SC_High;
    otherwise, fis_act = FIS.Nominal;
end

% 9.5 FIS activo → K → Tau → Filtro
try
    K_fuzzy = evalfis(fis_act, [in1, in2]);
catch
    K_fuzzy = evalfis([in1, in2], fis_act);
end
K_fuzzy = max(0, min(1, K_fuzzy));

Tau      = PARAMS.Tau_Min + K_fuzzy * ...
           (PARAMS.Tau_Max - PARAMS.Tau_Min); % s
Tau_hist(k) = single(Tau);

alpha      = 1 - exp(-PARAMS.Ts / Tau);
P_bat_ideal = alpha * Pd(k) + (1-alpha) * P_bat_filt; % kW
P_bat_filt  = P_bat_ideal;
p_sc_req    = Pd(k) - P_bat_ideal; % kW

% 9.6 Saturación bidireccional [C2]
if SOC_sc(k) >= PROT.SOC_sc_max && p_sc_req < 0
    p_sc_req = 0;
end
if SOC_sc(k) <= PROT.SOC_sc_min && p_sc_req > 0
    p_sc_req = 0;
end
p_sc_req = max(-HW.P_sc_max_kW, min(HW.P_sc_max_kW, p_sc_req));

p_bat_req = Pd(k) - p_sc_req;

if SOC_bat(k) >= PROT.SOC_bat_max && p_bat_req < 0
    excedente = p_bat_req;
    p_bat_req = 0;
    p_sc_req = p_sc_req + excedente;
    if SOC_sc(k) >= PROT.SOC_sc_max
        p_sc_req = max(0, p_sc_req);
    end
end

P_sc(k) = single(p_sc_req);
p_bat_final = Pd(k) - P_sc(k); % kW

% Limitar potencia de la batería al máximo del hardware
p_bat_final = max(-HW.P_bat_max_kW, ...
                  min(HW.P_bat_max_kW, p_bat_final)); % kW

```

```

P_bat(k) = single(p_bat_final);

Regen_hist(k) = (Pd(k) < 0);

if mod(k, 5000) == 0, waitbar(k/N, hWait); end
end
close(hWait);

% =====
%% 10. DIAGNÓSTICO DE AUTONOMÍA
% =====
fprintf('\n===== \n');
fprintf('          DIAGNÓSTICO DE AUTONOMÍA \n');
fprintf('===== \n');
if idx_stop < N
    fprintf('Estado:          [AUTONOMÍA AGOTADA] \n');
    fprintf('Tiempo de corte:    %.1f s de %.1f s (%.1f%%) \n', ...
        t(idx_stop), t(end), 100 * idx_stop / N);
    fprintf('Distancia recorrida: %.2f km de %.2f km \n', ...
        dist_km(idx_stop), dist_km(end));
else
    fprintf('Estado:          [CICLO COMPLETADO] \n');
    fprintf('SOC bat final:     %.2f%% \n', min(SOC_bat));
    fprintf('Distancia total:   %.2f km \n', dist_km(end));
end
fprintf('SOC SC final:      %.2f%% \n', min(SOC_sc(1:idx_stop)));
Regen_valido = Regen_hist(1:idx_stop);
Pd_valido    = Pd(1:idx_stop);
fprintf('Regeneración:      %d instantes (%.1f%%) \n', ...
    sum(Regen_valido), 100 * sum(Regen_valido) / idx_stop);
E_regen_kWh = abs(sum(Pd_valido(Pd_valido < 0))) * PARAMS.Ts / 3600;
fprintf('Energía regenerada: %.3f kWh \n', E_regen_kWh);
fprintf('===== \n');

% =====
%% 11. VISUALIZACIÓN [G1] – 3 ventanas separadas
% =====
graficar_ciclo(t, v_kph, dist_km, ciclos_ind, nombres_ciclos, ...
    idx_stop, PARAMS.Ts);

graficar_potencia_y_supervisor(t, Pd, P_bat, P_sc, Modo_hist, ...
    Regen_hist, idx_stop);

graficar_soc(t, SOC_bat, SOC_sc, PROT, idx_stop);

% =====
%% 12. ANÁLISIS DE DESVIACIÓN [G2]
% =====
if has_ref
    analizar_desviacion(t, P_bat, P_bat_ref, P_sc, P_sc_ref, idx_stop);
else
    fprintf('\nNota: archivo sin columnas de referencia. \n');
end

fprintf('\nSimulación finalizada. \n');
end

% =====
%% FUNCIONES AUXILIARES

```

```

% =====

function fis_obj = cargar_o_default(nombre, fis_default)
% Carga un FIS. Si no existe, usa el nominal y avisa.
    if exist(nombre, 'file') == 2
        fis_obj = readfis(nombre);
        fprintf(' [OK] %s\n', nombre);
    else
        fprintf(' [AVISO] %s → usando Nominal.\n', nombre);
        fis_obj = fis_default;
    end
end

function [v_kph_sup, dist_km, ciclos_ind, nombres] = ...
    reconstruir_ciclo_superpuesto(fileName, pathName, Ts)
% =====
% RECONSTRUCCIÓN DEL CICLO SUPERPUESTO [R1]
% Lógica de CMM_2.m: lee CSVs → mph→kph → max elemento a elemento.
%
% ENTRADA:  fileName (cell), pathName (char), Ts (s)
% SALIDA:   v_kph_sup (km/h), dist_km (km), ciclos_ind (cell), nombres (cell)
% =====
    conversion = 1.60934; % mph → km/h
    numFiles = length(fileName);
    ciclos_ind = cell(1, numFiles);
    nombres = cell(1, numFiles);
    validFiles = 0;

    for i = 1:numFiles
        try
            dataTable = readtable(fullfile(pathName, fileName{i}));
            v_temp = dataTable.speed_mph * conversion; % km/h
            v_temp(v_temp < 0) = 0;
            validFiles = validFiles + 1;
            ciclos_ind{validFiles} = v_temp;
            nombres{validFiles} = strrep(fileName{i}, '_', ' ');
            fprintf(' Ciclo %d: %s - %d s, vmax=%.1f km/h\n', ...
                validFiles, fileName{i}, length(v_temp), max(v_temp));
        catch
            warning('Error leyendo %s.', fileName{i});
        end
    end
    ciclos_ind = ciclos_ind(1:validFiles);
    nombres = nombres(1:validFiles);
    if validFiles == 0, error('Sin ciclos válidos.');
```

```

function [sb, ssc] = update_soc_phys(Pb_kW, Psc_kW, sb_o, ssc_o, hw, Ts, PROT)
% =====
% ACTUALIZACIÓN DE SOC – MODELO FÍSICO [C3][G3]
% =====
%
% BATERÍA – Modelo Rint + Coulomb Counting + V_ocv por tabla:<-----
% V_ocv(SOC) = Ns_bat * interp1(tabla_SOC, tabla_V_celda, SOC)
% Circuito:  $P = (\bar{V}_{ocv} - I \cdot R) \cdot I \rightarrow R \cdot I^2 - \bar{V}_{ocv} \cdot I + P = 0$ 
% Convención:  $P > 0 \rightarrow$  descarga |  $P < 0 \rightarrow$  carga (regeneración)
%
% SC – Seguimiento de estado de energía:
% E_nueva = E_old - P_sc*Ts - I^2*R_sc*Ts
%
% UNIDADES: Pb_kW, Psc_kW (kW) | sb_o, ssc_o (%) | Ts (s)
% =====

% --- BATERÍA ---
% [G3] V_ocv por interpolación de tabla (reemplaza modelo lineal)
soc_clamped = max(0, min(100, sb_o)); % % – Proteger interp1
V_celda = interp1(hw.V_ocv_SOC, hw.V_ocv_celda, ... % V/celda
    soc_clamped, 'linear', 'extrap'); % V – Banco completo
V_ocv = hw.Ns_bat * V_celda;

P_bat_W = Pb_kW * 1000; % W
discr = V_ocv^2 - 4 * hw.R_bat * P_bat_W; % V^2

if discr < 0
    I_bat = V_ocv / (2 * hw.R_bat); % A – Límite Rint
else
    I_bat = (V_ocv - sqrt(discr)) / (2 * hw.R_bat); % A
end
I_bat = max(-hw.I_bat_max, min(hw.I_bat_max, I_bat)); % A – Protección HW

% Coulomb Counting
delta_soc_bat = (I_bat * Ts) / (hw.C_bat * 3600) * 100; % %
sb = sb_o - delta_soc_bat; % %
sb = max(PROT.SOC_bat_min, min(PROT.SOC_bat_max, sb)); % %

% --- SC ---
E_max_J = 0.5 * hw.C_sc * hw.V_sc_nom^2; % J
E_min_J = (PROT.SOC_sc_min / 100) * E_max_J; % J
E_maxU_J = (PROT.SOC_sc_max / 100) * E_max_J; % J
E_act_J = (ssc_o / 100) * E_max_J; % J
P_sc_W = Psc_kW * 1000; % W

V_sc = hw.V_sc_nom * sqrt(max(0.01, ssc_o / 100)); % V
I_sc = P_sc_W / max(V_sc, 1); % A
P_loss = (I_sc^2) * hw.R_sc; % W

E_nueva_J = E_act_J - P_sc_W * Ts - P_loss * Ts; % J
E_nueva_J = max(E_min_J, min(E_maxU_J, E_nueva_J)); % J
ssc = (E_nueva_J / E_max_J) * 100; % %

end

% =====
%% FUNCIONES DE VISUALIZACIÓN [G1]
% =====

```

```

function [t, v_out, d_out, idx_sp] = reducir_para_plot(t, v_kph, dist_km, idx_stop)
% Reduce vectores a 50000 puntos para plotting fluido.
% Devuelve idx_stop recalculado para el vector reducido.
N = length(t);
if N > 50000
    idx = round(linspace(1, N, 50000));
    t = t(idx);
    v_out = v_kph(idx); d_out = dist_km(idx);
    idx_sp = find(idx >= idx_stop, 1, 'first');
    if isempty(idx_sp), idx_sp = length(idx); end
else
    v_out = v_kph; d_out = dist_km; idx_sp = idx_stop;
end
end

```

```

function graficar_ciclo(t, v_kph, dist_km, ciclos_ind, nombres, idx_stop, Ts_orig)
% =====
% VENTANA 1 [G1]: Ciclo de manejo (ventana completa, grande)
% Muestra ciclo superpuesto + individuales + distancia acumulada.
% =====
N = length(t);
[t, v_kph, dist_km, idx_sp] = reducir_para_plot(t, v_kph, dist_km, idx_stop);
t_stop = t(min(idx_sp, length(t)));

figure('Name', 'Ventana 1 - Ciclo de Manejo', ...
    'Color', 'w', 'Position', [50, 300, 1100, 450]);
hold on;

% Ciclos individuales (fondo, colores claros)
colores = lines(length(ciclos_ind));
for ci = 1:length(ciclos_ind)
    t_ci = (0:length(ciclos_ind{ci})-1)' * Ts_orig; % s - Paso original
    color_claro = colores(ci,:) * 0.3 + [1 1 1] * 0.7;
    plot(t_ci, ciclos_ind{ci}, 'Color', color_claro, ...
        'LineWidth', 0.8, 'DisplayName', nombres{ci});
end

% Eje izquierdo: velocidad superpuesta
yyaxis left;
plot(t, v_kph, 'k-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Superpuesto');
ylabel('Velocidad (km/h)');
set(gca, 'YColor', 'k');

% Eje derecho: distancia
yyaxis right;
plot(t, dist_km, 'Color', [0.2 0.7 0.2], 'LineWidth', 1.2, ...
    'DisplayName', 'Distancia');
ylabel('Distancia acumulada (km)');
set(gca, 'YColor', [0.2 0.7 0.2]);

if idx_stop < N
    xline(t_stop, 'm--', sprintf('Corte: %.0fs | %.1f km', ...
        t_stop, dist_km(idx_sp)), ...
        'LineWidth', 1.5, 'LabelVerticalAlignment', 'top');
end

xlabel('Tiempo (s)');
title('Ciclo de Manejo - superpuesto (negro) + individuales (color)');
legend('Location', 'northwest', 'FontSize', 8);

```

```

    grid on; axis tight;
end

function graficar_potencia_y_supervisor(t, Pd, Pb, Psc, Modos, Regen, idx_stop)
% =====
% VENTANA 2 [G1]: Reparto de potencia + Estrategia del supervisor
% =====
    N = length(t);
    if N > 50000
        idx = round(linspace(1, N, 50000));
        t=t(idx); Pd=Pd(idx); Pb=Pb(idx); Psc=Psc(idx);
        Modos=Modos(idx); Regen=Regen(idx);
        idx_sp = find(idx >= idx_stop, 1, 'first');
        if isempty(idx_sp), idx_sp = length(idx); end
    else
        idx_sp = idx_stop;
    end
    t_stop = t(min(idx_sp, length(t)));

    figure('Name', 'Ventana 2 - Potencia y Supervisor', ...
        'Color', 'w', 'Position', [50, 50, 1100, 600]);

    % --- Subplot 1: Reparto de potencia ---
    subplot(2, 1, 1);
    hold on;
    P_regen_zona = min(double(Pd), 0);
    area(t, P_regen_zona, 'FaceColor', [0.7 1 0.7], 'EdgeColor', 'none', ...
        'DisplayName', 'Zona regeneración');
    plot(t, Pd, 'k--', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', 'Demanda Total');
    plot(t, Pb, 'b', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', 'Batería');
    plot(t, Psc, 'r', 'LineWidth', 1.0, 'DisplayName', 'SC');
    plot([t(1) t(end)], [0 0], 'k:', 'LineWidth', 0.8);
    if idx_stop < N
        xline(t_stop, 'm--', sprintf('Corte: %.0fs', t_stop), ...
            'LineWidth', 1.5, 'LabelVerticalAlignment', 'top');
    end
    ylabel('Potencia (kW)');
    xlabel('Tiempo (s)');
    title('Reparto de Potencia | verde = frenado regenerativo');
    legend('Location', 'northwest', 'FontSize', 8);
    grid on; axis tight;

    % --- Subplot 2: Supervisor ---
    subplot(2, 1, 2);
    plot(t, double(Modos), 'm', 'LineWidth', 1.5);
    ylim([0.5 5.5]); yticks(1:5);
    yticklabels({'Nominal', 'Bat\_Low', 'Bat\_High', 'SC\_Low', 'SC\_High'});
    ylabel('Modo activo');
    xlabel('Tiempo (s)');
    title('Estrategia Activa (Supervisor Difuso)');
    if idx_stop < N
        hold on;
        xline(t_stop, 'm--', 'LineWidth', 1.5);
    end
    grid on; axis tight;
end

function graficar_soc(t, Sb, Ssc, P, idx_stop)

```

```

% =====
% VENTANA 3 [G1]: SOC Batería + SOC Supercondensador
% =====

N = length(t);
if N > 50000
    idx = round(linspace(1, N, 50000));
    t=t(idx); Sb=Sb(idx); Ssc=Ssc(idx);
    idx_sp = find(idx >= idx_stop, 1, 'first');
    if isempty(idx_sp), idx_sp = length(idx); end
else
    idx_sp = idx_stop;
end
t_stop = t(min(idx_sp, length(t)));

figure('Name', 'Ventana 3 - Estado de Carga (SOC)', ...
    'Color', 'w', 'Position', [50, 50, 1100, 600]);

% --- Subplot 1: SOC Batería ---
subplot(2, 1, 1);
hold on;
patch([t(1) t(end) t(end) t(1)], ...
    [P.SOC_bat_min P.SOC_bat_min P.SOC_bat_max P.SOC_bat_max], ...
    [0.85 1 0.85], 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.4);
plot(t, double(Sb), 'b', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'SOC Batería');
plot([t(1) t(end)], [P.SOC_bat_max P.SOC_bat_max], 'g--', 'LineWidth', 1, ...
    'DisplayName', sprintf('Máx: %d%%', P.SOC_bat_max));
plot([t(1) t(end)], [P.SOC_bat_min P.SOC_bat_min], 'r--', 'LineWidth', 1, ...
    'DisplayName', sprintf('Mín: %d%%', P.SOC_bat_min));
if idx_stop < N
    xline(t_stop, 'm--', 'LineWidth', 1.5);
end
ylabel('SOC Batería (%)');
xlabel('Tiempo (s)');
ylim([0 105]);
title(sprintf('SOC Batería | DoD efectivo: %d%%-%d%%', ...
    P.SOC_bat_min, P.SOC_bat_max));
legend('Location', 'southwest', 'FontSize', 8);
grid on; axis tight;

% --- Subplot 2: SOC SC ---
subplot(2, 1, 2);
hold on;
patch([t(1) t(end) t(end) t(1)], ...
    [P.SOC_sc_min P.SOC_sc_min P.SOC_sc_max P.SOC_sc_max], ...
    [1 0.92 0.8], 'EdgeColor', 'none', 'FaceAlpha', 0.4);
plot(t, double(Ssc), 'r', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'SOC SC');
plot([t(1) t(end)], [P.SOC_sc_max P.SOC_sc_max], 'g--', 'LineWidth', 1, ...
    'DisplayName', sprintf('Máx: %d%%', P.SOC_sc_max));
plot([t(1) t(end)], [P.SOC_sc_min P.SOC_sc_min], 'r--', 'LineWidth', 1, ...
    'DisplayName', sprintf('Mín: %d%%', P.SOC_sc_min));
if idx_stop < N
    xline(t_stop, 'm--', 'LineWidth', 1.5);
end
ylabel('SOC Supercondensador (%)');
xlabel('Tiempo (s)');
ylim([0 105]);
title(sprintf('SOC Supercondensador | rango útil: %d%%-%d%%', ...
    P.SOC_sc_min, P.SOC_sc_max));
legend('Location', 'southwest', 'FontSize', 8);
grid on; axis tight;

```

end

```
function analizar_desviacion(t, Pb, Pb_ref, Psc, Psc_ref, idx_stop)
% =====
% ANÁLISIS DE DESVIACIÓN [G2] – Truncado en idx_stop
%
% Tanto las métricas como las gráficas se calculan y muestran SOLO
% hasta el punto de corte. Datos post-corte no tienen sentido físico.
% =====
% [G2] Truncar al rango válido ANTES de cualquier cálculo
rng = 1:min(idx_stop, length(t));
t      = t(rng);
Pb     = Pb(rng);
Pb_ref = Pb_ref(rng);
Psc    = Psc(rng);
Psc_ref = Psc_ref(rng);

Diff_Bat = double(Pb) - double(Pb_ref);      % kW
Diff_SC  = double(Psc) - double(Psc_ref);    % kW

fprintf('\n===== \n');
fprintf('      ANÁLISIS DE DESVIACIÓN (Fuzzy vs. Ideal) – hasta corte \n');
fprintf('===== \n');
fprintf('Batería – Bias: %.3f kW | MAE: %.3f kW | Máx: %.3f kW \n', ...
    mean(Diff_Bat), mean(abs(Diff_Bat)), max(abs(Diff_Bat)));
if mean(Diff_Bat) > 0
    fprintf('      → El controlador exigió MÁS potencia a la batería. \n');
else
    fprintf('      → El controlador exigió MENOS potencia a la batería. \n');
end
fprintf('SC – Bias: %.3f kW | MAE: %.3f kW | Máx: %.3f kW \n', ...
    mean(Diff_SC), mean(abs(Diff_SC)), max(abs(Diff_SC)));
fprintf('===== \n');

% Reducción para plotting
N = length(t);
if N > 50000
    idx = round(linspace(1, N, 50000));
    t=t(idx); Diff_Bat=Diff_Bat(idx); Diff_SC=Diff_SC(idx);
end

figure('Name', 'Desviación Fuzzy vs. Ideal (hasta corte)', ...
    'Color', 'w', 'Position', [100, 100, 1000, 520]);

subplot(2, 1, 1);
area(t, Diff_Bat, 'FaceColor', [0.6 0.8 1], 'EdgeColor', 'b');
hold on;
plot([t(1) t(end)], [0 0], 'k-', 'LineWidth', 1.5);
title('Desviación Batería (Fuzzy – Ideal)');
ylabel('Diferencia (kW)');
xlabel('Tiempo (s)');
grid on;
legend('Exceso(+) / Ahorro(-)', 'Referencia Ideal');

subplot(2, 1, 2);
area(t, Diff_SC, 'FaceColor', [1 0.6 0.6], 'EdgeColor', 'r');
hold on;
plot([t(1) t(end)], [0 0], 'k-', 'LineWidth', 1.5);
title('Desviación SC (Fuzzy – Ideal)');
```

```

ylabel('Diferencia (kW)');
xlabel('Tiempo (s)');
grid on;
legend('Exceso(+) / Ahorro(-)', 'Referencia Ideal');

% Exportar CSV (solo datos válidos)
T_out = table(t, Diff_Bat, Diff_SC, ...
    'VariableNames', {'Tiempo_s', 'Diff_Bat_kW', 'Diff_SC_kW'});
writetable(T_out, 'Reporte_Desviaciones.csv');
fprintf('Reporte guardado: Reporte_Desviaciones.csv\n');

end

```

Anexo C - Sistema de inferencia difusa (EMS)

C_FIS_N_A2.m

```

% =====
% GENERADOR DE FIS Nominal – Estrategia Base (SOC Normal)
% =====
% Archivo de salida: fis_nominal.fis
% PRINCIPIO: Reparto equilibrado según escenario de manejo.
% E1 Accel gradual → KMB(0.3) → Batería dominante
% E2 Accel súbita → KA (0.9) → SC absorbe pico
% E3 Frenado gradual → KMA(0.7) → SC absorbe regen
% E4 Frenado súbito → KA (0.9) → SC captura todo
% E5 Crucero → KMB(0.2) → Batería principal, SC suaviza
% K bajo → Tau pequeño → Bateria rapida → SC pasivo
% K alto → Tau grande → Bateria lenta → SC activo
% =====

clear; clc; close all;

disp('=== Generando fis_nominal.fis ===');

fis = sugfis;
fis.Name = 'fis_nominal';

%% ENTRADAS
fis = addInput(fis, [-35 35], 'Name', 'Pd');
fis = addMF(fis, 'Pd', 'trapmf', [-1e6 -30 -20 -10], 'Name', 'B');
fis = addMF(fis, 'Pd', 'trimf', [-20 -10 0], 'Name', 'MB');
fis = addMF(fis, 'Pd', 'trimf', [-10 0 10], 'Name', 'M');
fis = addMF(fis, 'Pd', 'trimf', [0 10 20], 'Name', 'MA');
fis = addMF(fis, 'Pd', 'trapmf', [10 20 30 1e6], 'Name', 'A');

fis = addInput(fis, [-70 70], 'Name', 'dPd');
fis = addMF(fis, 'dPd', 'trapmf', [-1e6 -60 -40 -20], 'Name', 'B');
fis = addMF(fis, 'dPd', 'trimf', [-40 -20 0], 'Name', 'MB');
fis = addMF(fis, 'dPd', 'trimf', [-20 0 20], 'Name', 'M');
fis = addMF(fis, 'dPd', 'trimf', [0 20 40], 'Name', 'MA');
fis = addMF(fis, 'dPd', 'trapmf', [20 40 60 1e6], 'Name', 'A');

%% SALIDA
fis = addOutput(fis, [0 1], 'Name', 'K_factor');
fis = addMF(fis, 'K_factor', 'constant', 0.1, 'Name', 'KB');
fis = addMF(fis, 'K_factor', 'constant', 0.3, 'Name', 'KMB');
fis = addMF(fis, 'K_factor', 'constant', 0.5, 'Name', 'KM');
fis = addMF(fis, 'K_factor', 'constant', 0.7, 'Name', 'KMA');
fis = addMF(fis, 'K_factor', 'constant', 0.9, 'Name', 'KA');

```

```

%% REGLAS
ruleMatrix =      [5 5 4 3 2;
                   5 4 3 2 1;
                   4 3 2 2 3;
                   2 2 2 3 4;
                   2 2 3 4 5];

ruleList = [];
for i = 1:5, for j = 1:5
    ruleList = [ruleList; j, i, ruleMatrix(i,j), 1, 1];
end, end
fis = addRule(fis, ruleList);

writeFIS(fis, 'fis_nominal');
fprintf('  fis_nominal.fis generado.\n');

generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, 'Nominal', ...
    'Estrategia Base (SOC Normal)');

disp('=== fis_nominal.fis completado ===');

function generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, nombre_corto, titulo_largo)
    K_labels = {'KB','KMB','KM','KMA','KA'};
    pd_labels = {'B(regen)','MB','M(bajo)','MA','A(alto)'};
    dpd_labels = {'B(fren.)','MB','M(est.)','MA','A(acc.)'};
    figure('Name',sprintf('FIS %s - Superficie',nombre_corto),'Color','w','Position',[50
50 650 500]);
    gensurf(fis); colormap(jet); caxis([0 1]);
    title(sprintf('FIS %s - %s',nombre_corto,titulo_largo));
    xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)'); zlabel('K_{factor}');
    cb=colorbar; cb.Label.String='K: 0=Bateria, 1=SC'; view([-35 30]);
    figure('Name',sprintf('FIS %s - Mapa',nombre_corto),'Color','w','Position',[730 50
550 450]);
    imagesc(ruleMatrix); colormap(jet); caxis([1 5]);
    cb=colorbar; cb.Ticks=1:5;
    cb.TickLabels={'KB(0.1)','KMB(0.3)','KM(0.5)','KMA(0.7)','KA(0.9)'};
    cb.Label.String='K_{factor}';
    set(gca,'XTick',1:5,'XTickLabel',pd_labels,'YTick',1:5,'YTickLabel',dpd_labels);
    xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)');
    title(sprintf('Matriz de Reglas - %s',nombre_corto));
    for i=1:5, for j=1:5, v=ruleMatrix(i,j);
        if v<=2, c=[1 1 1]; else, c=[0 0 0]; end
    end
    text(j,i,K_labels{v},'HorizontalAlignment','center','FontSize',10,'FontWeight','bold','Co
lor',c);
    end, end
end

```

C_FIS_V_A2.m

```
% =====
% GENERADOR DE FIS SUPERVISOR – Seleccin jerarquica de estrategia
% =====
% Archivo de salida: fis_supervisor.fis
% Dependencias: Ninguna
%
% FUNCION: Observa SOC_bat y SOC_sc, selecciona el FIS obrero activo.
%   Modo 1 = Nominal      | Modo 2 = Bat_Low   | Modo 3 = Bat_High
%   Modo 4 = SC_Low       | Modo 5 = SC_High
%
% El supervisor observa SOC_bat y SOC_sc, y decide cuál de los 5
%   FIS obreros debe actuar en cada instante:
%   Modo 1 = Nominal      → SOC de ambos en zona normal
%   Modo 2 = Bat_Low      → Proteger batería (SOC bajo)
%   Modo 3 = Bat_High     → Descargar batería (SOC alto)
%   Modo 4 = SC_Low       → Proteger SC (SOC bajo)
%   Modo 5 = SC_High      → Descargar SC (SOC alto)
%
% LIMITES (sincronizados con simulador v5):
%   Bateria: DoD [20% - 80%] | SC: DoD [25% - 98%]
%
% MEJORAS:
%   - Caso dual-bajo (VL,VL) → Nominal (emergencia)
%   - MFs sincronizadas con DoD real
%   - Visualizacion homogenea (misma paleta en superficie y mapa)
% =====
clear; clc; close all;

disp('=== Generando fis_supervisor.fis ===');

%% 1. CREAR OBJETO
fis = sugfis;
fis.Name = 'fis_supervisor';

%% 2. ENTRADA: SOC_bat (%) – Sincronizado con DoD [20-80%]
fis = addInput(fis, [0 100], 'Name', 'SOC_bat');
fis = addMF(fis, 'SOC_bat', 'trapmf', [-1e6 0 20 25], 'Name', 'VL');
fis = addMF(fis, 'SOC_bat', 'trimf', [20 28 36], 'Name', 'L');
fis = addMF(fis, 'SOC_bat', 'trapmf', [30 38 68 75], 'Name', 'N');
fis = addMF(fis, 'SOC_bat', 'trimf', [68 74 80], 'Name', 'H');
fis = addMF(fis, 'SOC_bat', 'trapmf', [76 80 100 1e6], 'Name', 'VH');

%% 3. ENTRADA: SOC_sc (%) – Sincronizado con DoD [25-98%]
fis = addInput(fis, [0 100], 'Name', 'SOC_sc');
fis = addMF(fis, 'SOC_sc', 'trapmf', [-1e6 0 25 32], 'Name', 'VL');
fis = addMF(fis, 'SOC_sc', 'trimf', [25 34 44], 'Name', 'L');
fis = addMF(fis, 'SOC_sc', 'trapmf', [38 46 84 90], 'Name', 'N');
fis = addMF(fis, 'SOC_sc', 'trimf', [84 92 98], 'Name', 'H');
fis = addMF(fis, 'SOC_sc', 'trapmf', [95 98 100 1e6], 'Name', 'VH');

%% 4. SALIDA: Modo [1-5]
fis = addOutput(fis, [1 5], 'Name', 'Modo');
fis = addMF(fis, 'Modo', 'constant', 1, 'Name', 'Nominal');
fis = addMF(fis, 'Modo', 'constant', 2, 'Name', 'Bat_Low');
fis = addMF(fis, 'Modo', 'constant', 3, 'Name', 'Bat_High');
fis = addMF(fis, 'Modo', 'constant', 4, 'Name', 'SC_Low');
fis = addMF(fis, 'Modo', 'constant', 5, 'Name', 'SC_High');
```

```

%% 5. REGLAS
%
% SOC_sc -> VL      L      N      H      VH
% SOC_bat VL      [Nominal Bat_Low Bat_Low Bat_Low Bat_Low ]
% SOC_bat L        [Bat_Low Bat_Low Bat_Low Bat_Low Bat_Low ]
% SOC_bat N        [SC_Low  SC_Low  Nominal SC_High SC_High ]
% SOC_bat H        [SC_Low  SC_Low  Bat_High SC_High SC_High ]
% SOC_bat VH       [SC_Low  SC_Low  Bat_High Bat_High SC_High ]

M_Reglas = [
    1 2 2 2 2;
    2 2 2 2 2;
    4 4 1 5 5;
    4 4 3 5 5;
    4 4 3 3 5
];

ruleList = [];
for i = 1:5
    for j = 1:5
        ruleList = [ruleList; i, j, M_Reglas(i,j), 1, 1];
    end
end
fis = addRule(fis, ruleList);

%% 6. GUARDAR
writeFIS(fis, 'fis_supervisor');
fprintf(' fis_supervisor.fis generado.\n');

%% 7. VISUALIZACION HOMOGENEA
% Paleta de 5 colores, usada en AMBAS figuras para correspondencia visual.

modo_labels = {'Nominal', 'Bat\Low', 'Bat\High', 'SC\Low', 'SC\High'};
bat_labels = {'VL(<=20)', 'L(20-36)', 'N(30-75)', 'H(68-80)', 'VH(>=80)'};
sc_labels = {'VL(<=25)', 'L(25-44)', 'N(38-90)', 'H(84-98)', 'VH(>=98)'};

cmap_modos = [0.5 0.5 0.5; % 1=Nominal (gris)
              0.2 0.4 0.9; % 2=Bat_Low (azul)
              0.1 0.7 0.3; % 3=Bat_High (verde)
              0.9 0.6 0.1; % 4=SC_Low (naranja)
              0.8 0.1 0.2]; % 5=SC_High (rojo)

% Interpolada para superficie continua
cmap_interp = interp1(1:5, cmap_modos, linspace(1, 5, 256));

% --- Superficie 3D ---
figure('Name', 'Supervisor - Superficie', ...
       'Color', 'w', 'Position', [50 50 650 500]);
gensurf(fis);
colormap(cmap_interp); caxis([1 5]);
title('Supervisor - Seleccion de Estrategia');
xlabel('SOC Bateria (%)'); ylabel('SOC SC (%)'); zlabel('Modo');
cb = colorbar; cb.Ticks = 1:5; cb.TickLabels = modo_labels;
cb.Label.String = 'Modo Activo';
view([-35 30]);

% --- Mapa de calor 2D ---
figure('Name', 'Supervisor - Mapa', ...
       'Color', 'w', 'Position', [730 50 580 480]);
imagesc(M_Reglas);

```

```

colormap(cmap_modos); caxis([0.5 5.5]);
cb = colorbar; cb.Ticks = 1:5; cb.TickLabels = modo_labels;
cb.Label.String = 'Modo Activo';
set(gca, 'XTick', 1:5, 'XTickLabel', sc_labels);
set(gca, 'YTick', 1:5, 'YTickLabel', bat_labels);
xlabel('SOC Supercondensador (%)');
ylabel('SOC Bateria (%)');
title('Supervisor - Mapa de Decision');
for i = 1:5
    for j = 1:5
        val = M_Reglas(i,j);
        if val == 2 || val == 5, c = [1 1 1]; else, c = [0 0 0]; end
        text(j, i, modo_labels{val}, 'HorizontalAlignment', 'center', ...
            'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold', 'Color', c);
    end
end
disp('== fis_supervisor.fis completado ==');

```

C_FIS_BH_A2.m

```
% =====
% GENERADOR DE FIS Bat_High – Descargar Bateria (SOC Alto)
% =====
% Archivo de salida: fis_bat_high.fis
% Dependencias: fis_nominal.fis
% PRINCIPIO: "Bateria llena, que trabaje ella."
%   Propulsion → K bajo (bateria se descarga)
%   Regeneracion → K alto (SC absorbe, evita sobrecarga bateria)
%   Crucero → K minimo (bateria al 100%)
% =====
clear; clc; close all;

disp('=== Generando fis_bat_high.fis ===');

if exist('fis_nominal.fis','file')~=2
    error('fis_nominal.fis no encontrado. Ejecuta C_FIS_E1_Nominal.m primero.');
```

end

```
fis = readfis('fis_nominal');
fis.Name = 'fis_bat_high';

%% REGLAS
ruleMatrix =      [5 5 4 2 1;
                   5 4 3 1 1;
                   4 3 1 1 2;
                   2 1 1 2 3;
                   2 2 2 3 3];

ruleList = [];
for i = 1:5, for j = 1:5
    ruleList = [ruleList; j, i, ruleMatrix(i,j), 1, 1];
end, end
fis.Rules = [];
fis = addRule(fis, ruleList);

writeFIS(fis, 'fis_bat_high');
fprintf('  fis_bat_high.fis generado.\n');

generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, 'Bat\_High', ...
    'Descargar Bateria (SOC Alto)');
```

disp('=== fis_bat_high.fis completado ===');


```
function generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, nombre_corto, titulo_largo)
    K_labels = {'KB','KMB','KM','KMA','KA'};
    pd_labels = {'B(regen)','MB','M(bajo)','MA','A(alto)'};
    dpd_labels = {'B(fren.)','MB','M(est.)','MA','A(acc.)'};
    figure('Name',sprintf('FIS %s – Superficie',nombre_corto),'Color','w','Position',[50
50 650 500]);
    gensurf(fis); colormap(jet); caxis([0 1]);
    title(sprintf('FIS %s – %s',nombre_corto,titulo_largo));
    xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)'); zlabel('K_{factor}');
    cb=colorbar; cb.Label.String='K: 0=Bateria, 1=SC'; view([-35 30]);
    figure('Name',sprintf('FIS %s – Mapa',nombre_corto),'Color','w','Position',[730 50
550 450]);
    imagesc(ruleMatrix); colormap(jet); caxis([1 5]);
    cb=colorbar; cb.Ticks=1:5;
```

```

cb.TickLabels={'KB(0.1) ','KMB(0.3) ','KM(0.5) ','KMA(0.7) ','KA(0.9) '};
cb.Label.String='K_{factor}';
set(gca,'XTick',1:5,'XTickLabel',pd_labels,'YTick',1:5,'YTickLabel',dpd_labels);
xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)');
title(sprintf('Matriz de Reglas - %s',nombre_corto));
for i=1:5, for j=1:5, v=ruleMatrix(i,j);
    if v<=2, c=[1 1 1]; else, c=[0 0 0]; end
text(j,i,K_labels{v},'HorizontalAlignment','center','FontSize',10,'FontWeight','bold','Color',c);
    end, end
end

```

C_FIS_BL_A2.m

```
% =====
% GENERADOR DE FIS Bat_Low – Proteger Bateria (SOC Bajo)
% =====
% Archivo de salida: fis_bat_low.fis
% Dependencias: fis_nominal.fis
% PRINCIPIO: "Bateria preciosa, SC compensa."
%   Propulsion → K alto (SC protege bateria de descarga)
%   Regeneracion → K moderado-alto (SC absorbe, bateria recarga lento)
%   Crucero → K moderado (SC comparte carga)
% =====
clear; clc; close all;

disp('=== Generando fis_bat_low.fis ===');

if exist('fis_nominal.fis','file')~=2
    error('fis_nominal.fis no encontrado. Ejecuta C_FIS_E1_Nominal.m primero.');
```

end

```
fis = readfis('fis_nominal');
fis.Name = 'fis_bat_low';

%% REGLAS
ruleMatrix =      [5 5 4 3 3;
                   5 4 3 3 4;
                   4 3 3 4 5;
                   3 3 3 5 5;
                   3 3 4 5 5];

ruleList = [];
for i = 1:5, for j = 1:5
    ruleList = [ruleList; j, i, ruleMatrix(i,j), 1, 1];
end, end
fis.Rules = [];
fis = addRule(fis, ruleList);

writeFIS(fis, 'fis_bat_low');
fprintf('  fis_bat_low.fis generado.\n');

generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, 'Bat\_Low', ...
    'Proteger Bateria (SOC Bajo)');

disp('=== fis_bat_low.fis completado ===');
```

function generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, nombre_corto, titulo_largo)

```
    K_labels = {'KB', 'KMB', 'KM', 'KMA', 'KA'};
    pd_labels = {'B(regen)', 'MB', 'M(bajo)', 'MA', 'A(alto)'};
    dpd_labels = {'B(fren.)', 'MB', 'M(est.)', 'MA', 'A(acc.)'};
    figure('Name', sprintf('FIS %s – Superficie', nombre_corto), 'Color', 'w', 'Position', [50
50 650 500]);
    gensurf(fis); colormap(jet); caxis([0 1]);
    title(sprintf('FIS %s – %s', nombre_corto, titulo_largo));
    xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)'); zlabel('K_{factor}');
    cb=colorbar; cb.Label.String='K: 0=Bateria, 1=SC'; view([-35 30]);
    figure('Name', sprintf('FIS %s – Mapa', nombre_corto), 'Color', 'w', 'Position', [730 50
550 450]);
    imagesc(ruleMatrix); colormap(jet); caxis([1 5]);
    cb=colorbar; cb.Ticks=1:5;
```

```

cb.TickLabels={'KB(0.1) ','KMB(0.3) ','KM(0.5) ','KMA(0.7) ','KA(0.9) '};
cb.Label.String='K_{factor}';
set(gca,'XTick',1:5,'XTickLabel',pd_labels,'YTick',1:5,'YTickLabel',dpd_labels);
xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)');
title(sprintf('Matriz de Reglas - %s',nombre_corto));
for i=1:5, for j=1:5, v=ruleMatrix(i,j);
    if v<=2, c=[1 1 1]; else, c=[0 0 0]; end
end
text(j,i,K_labels{v},'HorizontalAlignment','center','FontSize',10,'FontWeight','bold','Color',c);
end, end
end

```

C_FIS_SCH_A2.m

```
% =====
% GENERADOR DE FIS SC_High – Descargar SC (SOC Alto)
% =====
% Archivo de salida: fis_sc_high.fis
% Dependencias: fis_nominal.fis
% PRINCIPIO: "SC lleno: usarlo para propulsion, no cargarlo mas."
%   Propulsion → K alto (SC descarga ayudando a bateria)
%   Regeneracion → K bajo (bateria absorbe, SC no se sobrecarga)
%   ASIMETRIA: izquierda(regen)=K bajo | derecha(prop)=K alto
% =====
clear; clc; close all;

disp('=== Generando fis_sc_high.fis ===');

if exist('fis_nominal.fis','file')~=2
    error('fis_nominal.fis no encontrado. Ejecuta C_FIS_E1_Nominal.m primero.');
```

end

```
fis = readfis('fis_nominal');
fis.Name = 'fis_sc_high';

%% REGLAS
ruleMatrix =     [2 2 1 2 2;
                  1 1 2 3 3;
                  2 2 3 4 5;
                  2 3 4 5 5;
                  4 4 5 5 5];

ruleList = [];
for i = 1:5, for j = 1:5
    ruleList = [ruleList; j, i, ruleMatrix(i,j), 1, 1];
end, end
fis.Rules = [];
fis = addRule(fis, ruleList);

writeFIS(fis, 'fis_sc_high');
fprintf('  fis_sc_high.fis generado.\n');

generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, 'SC\High', ...
    'Descargar SC (SOC Alto)');

disp('=== fis_sc_high.fis completado ===');
```

function generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, nombre_corto, titulo_largo)

```
    K_labels = {'KB', 'KMB', 'KM', 'KMA', 'KA'};
    pd_labels = {'B(regen)', 'MB', 'M(bajo)', 'MA', 'A(alto)'};
    dpd_labels = {'B(fren.)', 'MB', 'M(est.)', 'MA', 'A(acc.)'};
    figure('Name', sprintf('FIS %s – Superficie', nombre_corto), 'Color', 'w', 'Position', [50
50 650 500]);
    gensurf(fis); colormap(jet); caxis([0 1]);
    title(sprintf('FIS %s – %s', nombre_corto, titulo_largo));
    xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)'); zlabel('K_{factor}');
    cb=colorbar; cb.Label.String='K: 0=Bateria, 1=SC'; view([-35 30]);
    figure('Name', sprintf('FIS %s – Mapa', nombre_corto), 'Color', 'w', 'Position', [730 50
550 450]);
    imagesc(ruleMatrix); colormap(jet); caxis([1 5]);
    cb=colorbar; cb.Ticks=1:5;
```

```

cb.TickLabels={'KB(0.1) ','KMB(0.3) ','KM(0.5) ','KMA(0.7) ','KA(0.9) '};
cb.Label.String='K_{factor}';
set(gca,'XTick',1:5,'XTickLabel',pd_labels,'YTick',1:5,'YTickLabel',dpd_labels);
xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)');
title(sprintf('Matriz de Reglas - %s',nombre_corto));
for i=1:5, for j=1:5, v=ruleMatrix(i,j);
    if v<=2, c=[1 1 1]; else, c=[0 0 0]; end
text(j,i,K_labels{v},'HorizontalAlignment','center','FontSize',10,'FontWeight','bold','Color',c);
    end, end
end

```

C_FIS_SCL_A2.m

```
% =====
% GENERADOR DE FIS SC_Low – Proteger SC (SOC Bajo) – Recargar por Regen
% =====
% Archivo de salida: fis_sc_low.fis
% Dependencias: fis_nominal.fis
% PRINCIPIO: "SC vacío: no descargarlo, pero si recargarlo."
%   Propulsion → K bajo (bateria sola, SC no puede aportar)
%   Regeneracion → K alto (SC absorbe regen para recargarse)
%   ASIMETRIA: izquierda(regen)=K alto | derecha(prop)=K bajo
% =====
clear; clc; close all;

disp('=== Generando fis_sc_low.fis ===');

if exist('fis_nominal.fis','file')~=2
    error('fis_nominal.fis no encontrado. Ejecuta C_FIS_E1_Nominal.m primero.');
```

end

```
fis = readfis('fis_nominal');
fis.Name = 'fis_sc_low';

%% REGLAS
ruleMatrix =      [5 5 4 2 2;
                   5 5 3 1 1;
                   5 3 2 1 1;
                   4 2 1 1 2;
                   3 2 1 2 2];

ruleList = [];
for i = 1:5, for j = 1:5
    ruleList = [ruleList; j, i, ruleMatrix(i,j), 1, 1];
end, end
fis.Rules = [];
fis = addRule(fis, ruleList);

writeFIS(fis, 'fis_sc_low');
fprintf('  fis_sc_low.fis generado.\n');
```

generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, 'SC\ Low', ...
 'Proteger SC (SOC Bajo) – Recargar por Regen');

```
disp('=== fis_sc_low.fis completado ===');
```

function generar_mapa_comportamiento(fis, ruleMatrix, nombre_corto, titulo_largo)

```
    K_labels = {'KB', 'KMB', 'KM', 'KMA', 'KA'};
    pd_labels = {'B(regen)', 'MB', 'M(bajo)', 'MA', 'A(alto)'};
    dpd_labels = {'B(fren.)', 'MB', 'M(est.)', 'MA', 'A(acc.)'};
    figure('Name', sprintf('FIS %s – Superficie', nombre_corto), 'Color', 'w', 'Position', [50
50 650 500]);
    gensurf(fis); colormap(jet); caxis([0 1]);
    title(sprintf('FIS %s – %s', nombre_corto, titulo_largo));
    xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)'); zlabel('K_{factor}');
    cb=colorbar; cb.Label.String='K: 0=Bateria, 1=SC'; view([-35 30]);
    figure('Name', sprintf('FIS %s – Mapa', nombre_corto), 'Color', 'w', 'Position', [730 50
550 450]);
    imagesc(ruleMatrix); colormap(jet); caxis([1 5]);
    cb=colorbar; cb.Ticks=1:5;
```

```

cb.TickLabels={'KB(0.1) ','KMB(0.3) ','KM(0.5) ','KMA(0.7) ','KA(0.9) '};
cb.Label.String='K_{factor}';
set(gca,'XTick',1:5,'XTickLabel',pd_labels,'YTick',1:5,'YTickLabel',dpd_labels);
xlabel('Pd (kW)'); ylabel('dPd (kW/s)');
title(sprintf('Matriz de Reglas - %s',nombre_corto));
for i=1:5, for j=1:5, v=ruleMatrix(i,j);
    if v<=2, c=[1 1 1]; else, c=[0 0 0]; end
end
text(j,i,K_labels{v},'HorizontalAlignment','center','FontSize',10,'FontWeight','bold','Color',c);
end, end
end

```

Anexo D - Simulador destilado para prueba de ciclos individuales

COMPL_SIM_CICLOS_C2.m

```
function COMPL_SIM_CICLOS_C2()
% =====
% SIMULADOR HESS DESTILADO – ANÁLISIS DE COMPORTAMIENTO POR CICLO
% Revisión C2: derivada DIRECTA (sin pre-filtro) · sin datos comparativos
% =====
%
% PROPÓSITO
% Observar el COMPORTAMIENTO del HESS y del EMS difuso jerárquico bajo
% distintos ciclos de manejo individuales. Para CADA ciclo se generan
% únicamente:
%     (1) Reparto de potencia (demanda, batería, SC)
%     (2) Estrategia activa del supervisor difuso
%     (3) Seguimiento del SOC de los bancos de batería y SC
%
% DIFERENCIA CON EL MAESTRO
% El maestro lee la demanda del CSV del dimensionador (ciclo SUPERPUESTO).
% Aquí la demanda se RECONSTRUYE desde el perfil de velocidad de cada
% ciclo individual.
%
% REQUISITOS
% .fis generados por los scripts C_FIS_*.m en la carpeta de trabajo.
% Toolbox de lógica difusa.
% =====

clear; clc; close all;

%% 1. SELECCIÓN DE CICLOS INDIVIDUALES
[fileNames, pathName] = uigetfile('*.csv', ...
    'Selecciona los CSV de ciclos individuales (multi-selección)', ...
    'MultiSelect', 'on');
if isequal(fileNames, 0), disp('Operación cancelada.'); return; end
if ~iscell(fileNames), fileNames = {fileNames}; end

%% 2. PARÁMETROS (idénticos al maestro y al dimensionador)
VEH = parametros_vehiculo();
[HW, PROT, PARAMS] = parametros_hardware();

%% 3. CARGA DE FIS
FIS = cargar_fis();

%% 4. BUCLE POR CICLO (cada ciclo se analiza por separado)
for i = 1:numel(fileNames)
    fprintf('=== Ciclo %d/%d: %s ===\n', i, numel(fileNames), fileNames{i});

    [v_kph, v_ms, a] = leer_ciclo(fullfile(pathName, fileNames{i}));
    [Pd, dist_km] = demanda_vehiculo(v_ms, a, VEH, PARAMS.Ts);
    S = simular_ciclo(Pd, HW, PROT, PARAMS, FIS);

    % Estado descriptivo del ciclo (NO comparativo)
    if S.idx_stop < S.N
        fprintf(' Autonomía agotada: %.2f de %.2f km | corte %.0f s | SOC_sc mín
%.2f%%\n\n', ...
            dist_km(S.idx_stop), dist_km(end), S.t(S.idx_stop), ...
            min(double(S.SOC_sc(1:S.idx_stop))));
    else
```

```

        fprintf(' Ciclo completado: %.2f km | SOC_bat final %.2f%% | SOC_sc mín
%.2f%%\n\n', ...
            dist_km(end), double(S.SOC_bat(end)), min(double(S.SOC_sc)));
    end

    graficar_comportamiento(S, Pd, dist_km, v_kph, PROT, fileNames{i});
end

fprintf('Análisis finalizado.\n');
end

% #####
% ### PARÁMETROS #####
% #####

function VEH = parametros_vehiculo()
% Dinámica vehicular – IDÉNTICA a SUPER_SCM3_3.m
    VEH.M=740; VEH.A=1.8; VEH.Cd=0.3; VEH.Cr=0.015; VEH.g=9.81; VEH.rho=1.225;
    VEH.V_bus=400;
    VEH.eta_prop=0.95*0.90; % 0.855
    VEH.eta_regen=0.80*0.85; % 0.680
end

function [HW, PROT, PARAMS] = parametros_hardware()
% Hardware/protección/filtro – COPIA TEXTUAL de COMPL_SIM_13_B1.m
    HW.V_sc_nom=402; HW.C_sc=22.3881; HW.P_sc_max_kW=35;
    HW.V_bat_nom=403.2; HW.C_bat=50; HW.P_bat_max_kW=35; HW.I_bat_max=200;
    HW.R_bat=0.05; HW.R_sc=0.02; HW.Ns_bat=112;
    HW.V_ocv_SOC = [0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100];
    HW.V_ocv_celda = [3.00 3.30 3.45 3.52 3.55 3.58 3.62 3.67 3.75 3.90 4.20];

    PROT.SOC_bat_min=20; PROT.SOC_bat_max=80;
    PROT.SOC_sc_min=25; PROT.SOC_sc_max=98;

    PARAMS.Fs=1; PARAMS.Ts=1/PARAMS.Fs;
    E_total_J = 0.5*HW.C_sc*HW.V_sc_nom^2;
    Porc_Util = (PROT.SOC_sc_max - PROT.SOC_sc_min)/100; % 0.73
    PARAMS.Tau_Max = (E_total_J*Porc_Util)/(HW.P_sc_max_kW*1000);
    PARAMS.Tau_Min = 1.0; % = Ts
end

% #####
% ### CARGA / LECTURA / DEMANDA #####
% #####

function FIS = cargar_fis()
    warning('off','fuzzy:general:warnUpdateFIS');
    fprintf('Cargando FIS...\n');
    try, FIS.Nominal = readfis('fis_nominal.fis');
    catch, error('ERROR: fis_nominal.fis no encontrado.');
```

```

function fis_obj = cargar_o_default(nombre, fis_default)
    if exist(nombre,'file')==2
        fis_obj = readfis(nombre); fprintf(' [OK] %s\n', nombre);
    else
        fprintf(' [AVISO] %s -> usando Nominal.\n', nombre); fis_obj = fis_default;
    end
end

function [v_kph, v_ms, a] = leer_ciclo(rutaArchivo)
% speed_mph -> km/h -> m/s, y a = [0; diff(v_ms)] (convención del dimensionador)
conversion = 1.60934;
T = readtable(rutaArchivo);
v_kph = T.speed_mph * conversion; v_kph(v_kph<0) = 0;
v_ms = v_kph * (1000/3600);
a = [0; diff(v_ms)];
end

function [Pd_kW, dist_km] = demanda_vehiculo(v_ms, a, VEH, Ts)
% Dinámica longitudinal - IDÉNTICA a SUPER_SCM3_3.m (camino plano).
F_rodadura = VEH.Cr*VEH.M*VEH.g;
F_aire = 0.5*VEH.rho*VEH.A*VEH.Cd*v_ms.^2;
F_inercia = VEH.M*a;
F_total = F_rodadura + F_aire + F_inercia;
P_ruedas_W = F_total .* v_ms;
P_bus_W = zeros(size(v_ms));
ip = P_ruedas_W>=0; ir = P_ruedas_W<0;
P_bus_W(ip) = P_ruedas_W(ip)/VEH.eta_prop;
P_bus_W(ir) = P_ruedas_W(ir)*VEH.eta_regen;
Pd_kW = P_bus_W/1000;
dist_km = cumsum(v_ms)*Ts/1000;
end

% #####
% ### NÚCLEO DE SIMULACIÓN (idéntico al maestro, con corrección C2) #####
% #####

function S = simular_ciclo(Pd, HW, PROT, PARAMS, FIS)
N = numel(Pd);
t = (0:N-1)' * PARAMS.Ts;

SOC_bat = zeros(N,1,'single'); SOC_sc = zeros(N,1,'single');
P_bat = zeros(N,1,'single'); P_sc = zeros(N,1,'single');
Tau_hist = zeros(N,1,'single'); Modo_hist= zeros(N,1,'uint8');
Regen_hist=false(N,1);

SOC_bat(1) = PROT.SOC_bat_max; % 80 %
SOC_sc(1) = PROT.SOC_sc_max; % 98 %
P_bat(1) = Pd(1);
P_bat_filt = Pd(1);
idx_stop = N;

for k = 2:N
    % SOC físico (potencias del paso anterior)
    [SOC_bat(k), SOC_sc(k)] = update_soc_phys( ...
        P_bat(k-1), P_sc(k-1), SOC_bat(k-1), SOC_sc(k-1), HW, PARAMS.Ts, PROT);

    % Corte real del vehículo
    if SOC_bat(k) <= PROT.SOC_bat_min

```

```

        idx_stop = k;
        SOC_bat(k+1:end) = SOC_bat(k); SOC_sc(k+1:end) = SOC_sc(k);
        break;
    end

    % Entradas FIS - DERIVADA DIRECTA (Ec. 23), sin pre-filtro [C2]
    dPd = (Pd(k) - Pd(k-1)) / PARAMS.Ts; % kW/s
    in1 = max(-35, min(35, Pd(k))); % kW
    in2 = max(-70, min(70, dPd)); % kW/s

    % Supervisor (Sugeno): SOC_bat, SOC_sc -> modo 1..5
    try, Modo_val = evalfis(FIS.Supervisor, [SOC_bat(k), SOC_sc(k)]);
    catch, Modo_val = evalfis([SOC_bat(k), SOC_sc(k)], FIS.Supervisor); end
    Modo_idx = round(Modo_val); Modo_hist(k) = uint8(Modo_idx);

    switch Modo_idx
        case 1, fis_act = FIS.Nominal;
        case 2, fis_act = FIS.Bat_Low;
        case 3, fis_act = FIS.Bat_High;
        case 4, fis_act = FIS.SC_Low;
        case 5, fis_act = FIS.SC_High;
        otherwise, fis_act = FIS.Nominal;
    end

    % Obrero (Sugeno): Pd, dPd -> K -> Tau -> filtro exponencial
    try, K_fuzzy = evalfis(fis_act, [in1, in2]);
    catch, K_fuzzy = evalfis([in1, in2], fis_act); end
    K_fuzzy = max(0, min(1, K_fuzzy));

    Tau = PARAMS.Tau_Min + K_fuzzy*(PARAMS.Tau_Max - PARAMS.Tau_Min);
    Tau_hist(k) = single(Tau);
    alpha = 1 - exp(-PARAMS.Ts / Tau);
    P_bat_ideal = alpha*Pd(k) + (1-alpha)*P_bat_filt;
    P_bat_filt = P_bat_ideal; % no se reinicia entre modos
    p_sc_req = Pd(k) - P_bat_ideal;

    % Saturación bidireccional (protección)
    if SOC_sc(k) >= PROT.SOC_sc_max && p_sc_req < 0, p_sc_req = 0; end
    if SOC_sc(k) <= PROT.SOC_sc_min && p_sc_req > 0, p_sc_req = 0; end
    p_sc_req = max(-HW.P_sc_max_kW, min(HW.P_sc_max_kW, p_sc_req));

    p_bat_req = Pd(k) - p_sc_req;
    if SOC_bat(k) >= PROT.SOC_bat_max && p_bat_req < 0
        exced = p_bat_req; p_bat_req = 0; p_sc_req = p_sc_req + exced;
        if SOC_sc(k) >= PROT.SOC_sc_max, p_sc_req = max(0, p_sc_req); end
    end

    P_sc(k) = single(p_sc_req);
    p_bat_final = Pd(k) - P_sc(k);
    p_bat_final = max(-HW.P_bat_max_kW, min(HW.P_bat_max_kW, p_bat_final));
    P_bat(k) = single(p_bat_final);
    Regen_hist(k) = (Pd(k) < 0);
end

S.N=N; S.t=t; S.SOC_bat=SOC_bat; S.SOC_sc=SOC_sc;
S.P_bat=P_bat; S.P_sc=P_sc; S.Tau=Tau_hist; S.Modo=Modo_hist;
S.Regen=Regen_hist; S.idx_stop=idx_stop;
end

function [sb, ssc] = update_soc_phys(Pb_kW, Psc_kW, sb_o, ssc_o, hw, Ts, PROT)

```

```

% COPIA TEXTUAL de update_soc_phys de COMPL_SIM_13_B1.m
% BATERÍA: Rint + Coulomb + V_ocv por tabla
soc_clamped = max(0, min(100, sb_o));
V_celda = interp1(hw.V_ocv_SOC, hw.V_ocv_celda, soc_clamped, 'linear', 'extrap');
V_ocv = hw.Ns_bat * V_celda;
P_bat_W = Pb_kW*1000;
discr = V_ocv^2 - 4*hw.R_bat*P_bat_W;
if discr < 0, I_bat = V_ocv/(2*hw.R_bat);
else, I_bat = (V_ocv - sqrt(discr))/(2*hw.R_bat); end
I_bat = max(-hw.I_bat_max, min(hw.I_bat_max, I_bat));
delta_soc_bat = (I_bat*Ts)/(hw.C_bat*3600)*100;
sb = sb_o - delta_soc_bat;
sb = max(PROT.SOC_bat_min, min(PROT.SOC_bat_max, sb));

% SC: balance de energía
E_max_J=0.5*hw.C_sc*hw.V_sc_nom^2;
E_min_J=(PROT.SOC_sc_min/100)*E_max_J;
E_maxU_J=(PROT.SOC_sc_max/100)*E_max_J;
E_act_J=(ssc_o/100)*E_max_J;
P_sc_W=Psc_kW*1000;
V_sc=hw.V_sc_nom*sqrt(max(0.01, ssc_o/100));
I_sc=P_sc_W/max(V_sc,1);
P_loss=(I_sc^2)*hw.R_sc;
E_nueva_J=E_act_J - P_sc_W*Ts - P_loss*Ts;
E_nueva_J=max(E_min_J, min(E_maxU_J, E_nueva_J));
ssc=(E_nueva_J/E_max_J)*100;
end

% #####
% ### VISUALIZACIÓN (solo comportamiento) #####
% #####

function graficar_comportamiento(S, Pd, dist_km, v_kph, PROT, nombreArchivo)
% Una figura por ciclo: (1) reparto de potencia, (2) supervisor, (3) SOC.
t = S.t; is = S.idx_stop; N = S.N;
nombre = strrep(nombreArchivo, '_', '\_');
t_stop = t(min(is, numel(t)));

figure('Name', ['Comportamiento - ' nombre], 'Color','w', ...
'Position', [60 50 1100 840]);

% (1) Ciclo de manejo y recorrido (velocidad + distancia acumulada)
subplot(4,1,1);
yyaxis left;
plot(t, v_kph, 'k', 'LineWidth', 1.0);
ylabel('Velocidad (km/h)'); set(gca,'YColor','k');
yyaxis right;
plot(t, dist_km, 'Color',[0.10 0.60 0.20], 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Distancia (km)'); set(gca,'YColor',[0.10 0.60 0.20]);
title(sprintf('Ciclo de manejo y recorrido | total: %.2f km', dist_km(end)));
grid on; xlim([t(1) t(end)]);
marcar_corte(t_stop, is, N);

% (2) Reparto de potencia
subplot(4,1,2); hold on;
area(t, min(double(Pd),0), 'FaceColor',[0.75 1 0.75], 'EdgeColor','none', ...
'HandleVisibility','off');
plot(t, double(Pd), 'k--', 'LineWidth',1.1, 'DisplayName','Demanda total');
plot(t, double(S.P_bat), 'b', 'LineWidth',1.1, 'DisplayName','Batería');

```

```

plot(t, double(S.P_sc), 'r', 'LineWidth',0.9, 'DisplayName','Supercondensador');
plot([t(1) t(end)],[0 0], 'k:', 'LineWidth',0.6, 'HandleVisibility','off');
ylabel('Potencia (kW)');
title('Reparto de potencia | verde = frenado regenerativo');
legend('Location','northwest','FontSize',8); grid on; axis tight;
marcar_corte(t_stop, is, N);

% (3) Supervisor difuso
subplot(4,1,3);
plot(t, double(S.Modos), 'm', 'LineWidth',1.4);
ylim([0.5 5.5]); yticks(1:5);
yticklabels({'Nominal','Bat\_Low','Bat\_High','SC\_Low','SC\_High'});
ylabel('Modo activo');
title('Estrategia activa del supervisor difuso'); grid on; axis tight;
marcar_corte(t_stop, is, N);

% (4) SOC de ambos bancos
subplot(4,1,4); hold on;
plot(t, double(S.SOC_bat), 'b', 'LineWidth',1.4, 'DisplayName','SOC batería');
plot(t, double(S.SOC_sc), 'r', 'LineWidth',1.0, 'DisplayName','SOC SC');
yline(PROT.SOC_bat_min,'b:', 'HandleVisibility','off');
yline(PROT.SOC_bat_max,'b:', 'HandleVisibility','off');
yline(PROT.SOC_sc_min, 'r:', 'HandleVisibility','off');
yline(PROT.SOC_sc_max, 'r:', 'HandleVisibility','off');
ylabel('SOC (%)'); xlabel('Tiempo (s)'); ylim([0 105]);
title('Seguimiento del estado de carga (batería y SC)');
legend('Location','southwest','FontSize',8); grid on; axis tight;
marcar_corte(t_stop, is, N);

end

function marcar_corte(t_stop, idx_stop, N)
if idx_stop < N
    hold on;
    xline(t_stop, 'm--', sprintf('Corte: %.0fs', t_stop), ...
        'LineWidth',1.2, 'LabelVerticalAlignment','top', 'HandleVisibility','off');
end
end

```

Anexo E - Código para la comprobación del dimensionamiento del HESS

BAR_4.m

```
%% BARRIDO_4.m - ESTUDIO PARAMETRICO DEL BANCO DE SC (VERSION CORREGIDA)
clc; clear; close all;
EJECUTAR_BARRIDO = true;

%% -----
%% 1. PARAMETROS DE ENTRADA
%% -----
factor_seguridad_sc = 1.10;
M = 740; % Masa total de diseno (kg)
A = 1.8; % Area frontal (m^2)
Cd = 0.3; % Coeficiente de arrastre aerodinamico
Cr = 0.015; % Coeficiente de resistencia a la rodadura
g = 9.81; % Gravedad (m/s^2)
rho = 1.225; % Densidad del aire (kg/m^3)
V_bus_nominal = 400; % Voltaje del bus DC (V)
eta_prop = 0.95 * 0.90; % Motor * Transmision (Propulsion)
eta_regen = 0.80 * 0.85; % Motor * Transmision (Regeneracion)
V_sc_max_ratio = 1.0; % V_max SC = 400 V
V_sc_min_ratio = 0.5; % V_min SC = 200 V
V_sc_max = V_bus_nominal * V_sc_max_ratio;
V_sc_min = V_bus_nominal * V_sc_min_ratio;

%% -----
%% 1B. RESULTADOS DEL DIMENSIONAMIENTO NOMINAL
%% -----
Capacitancia_Instalada_F = 22.3881; % F - banco de SC instalado
Masa_Final_SC = 61.6; % kg - masa del banco instalado

%% -----
%% 2. CREACION DEL CICLO DE MANEJO SUPERPUESTO
%% -----
disp('Selecciona los ciclos de manejo (.csv) para crear el perfil maestro...');
[fileNames, pathName] = uigetfile('*.csv', 'Selecciona los archivos', 'MultiSelect', 'on');
if isequal(fileNames, 0), disp('Operacion cancelada.');
```

return; end

if ~iscell(fileNames), fileNames = {fileNames}; end

datosCiclos = cell(1, length(fileNames)); validFiles = 0;

for i = 1:length(fileNames)

try

dataTable = readtable(fullfile(pathName, fileNames{i}));

v_kph_i = dataTable.speed_mph * 1.60934;

v_kph_i(v_kph_i < 0) = 0;

validFiles = validFiles + 1; datosCiclos{validFiles} = v_kph_i;

catch, warning('Error leyendo %s.', fileNames{i}); end

end

datosCiclos = datosCiclos(1:validFiles);

maxDuration = max(cellfun(@length, datosCiclos));

allSpeeds = NaN(maxDuration, validFiles);

for i = 1:validFiles, allSpeeds(1:length(datosCiclos{i}), i) = datosCiclos{i}; end

t = (0:maxDuration-1)';

v_kph = max(allSpeeds, [], 2, 'omitnan');

v_ms = v_kph * (1000 / 3600);

a = [0; diff(v_ms)];

```

distancia_km_ciclo = sum(v_ms) / 1000;
fprintf('Ciclo maestro creado: %.2f km, duracion %d s.\n', distancia_km_ciclo,
maxDuration);

%% -----
%% 3. DEMANDA DE POTENCIA DEL BUS
%% -----
F_rodadura = Cr * M * g;
F_aire      = 0.5 * rho * A * Cd * v_ms.^2;
F_inercia   = M * a;
F_total     = F_rodadura + F_aire + F_inercia;
P_ruedas_W = F_total .* v_ms;
P_bus_W = zeros(size(t));
idx_prop = P_ruedas_W >= 0; idx_regen = P_ruedas_W < 0;
P_bus_W(idx_prop) = P_ruedas_W(idx_prop) / eta_prop;
P_bus_W(idx_regen) = P_ruedas_W(idx_regen) * eta_regen;

%% -----
%% 4. BARRIDO PARAMETRICO DEL BANCO DE SC
%% -----
if EJECUTAR_BARRIDO
    % ----- 4.1 Minimo analitico: transitorio 0 -> Vmax (ec. 16) -----
    Vmax_ms = max(v_ms);
    dE_transitorio_J = 0.5 * M * Vmax_ms^2 / eta_prop;
    C_min_F = (2 * dE_transitorio_J * factor_seguridad_sc) / (V_sc_max^2 - V_sc_min^2);
    fprintf('\n===== BARRIDO PARAMETRICO DEL BANCO DE SC =====\n');
    fprintf('Vmax del ciclo: %.1f km/h | dE(0->Vmax): %.1f kJ\n', Vmax_ms*3.6,
dE_transitorio_J/1000);
    fprintf('C_min = %.2f F (%.0f Wh utiles, %.0f%% del diseno)\n\n', C_min_F, ...
0.73*0.5*C_min_F*402^2/3600, 100*C_min_F/Capacitancia_Instalada_F);

    % ----- 4.2 Carga de controladores difusos -----
    FIS_B = cargar_fis_barrido();

    % ----- 4.3 Configuracion del barrido -----
    umbral_pico = 15; % kW - umbral que define un "pico" de potencia
    C0_F = Capacitancia_Instalada_F;
    C_barrido = [5.0, C_min_F, 11.0, 15.0, C0_F, 1.5*C0_F, 2*C0_F, 3*C0_F, 4*C0_F];
    idx_C0 = find(abs(C_barrido - C0_F) < 1e-9, 1);
    dist_km_v = cumsum(v_ms) / 1000;
    nB = numel(C_barrido);

    % Vectores de resultados
    v_kmF = zeros(1,nB); v_kmM = zeros(1,nB); v_ir = zeros(1,nB);
    v_pk = zeros(1,nB); v_uso = zeros(1,nB); v_K = zeros(1,nB);
    v_socmin = zeros(1,nB); v_dm = zeros(1,nB); v_masa = zeros(1,nB);
    v_tau = zeros(1,nB); v_taumax = zeros(1,nB); v_ssoc = zeros(1,nB);
    v_spot = zeros(1,nB); v_maxPsc = zeros(1,nB); v_stop = zeros(1,nB);
    v_ndem = zeros(1,nB); v_nbat = zeros(1,nB); v_nsup = zeros(1,nB);
    v_sdem = zeros(1,nB); v_sbat = zeros(1,nB); v_uene = zeros(1,nB);
    v_upot = zeros(1,nB); v_Dmax = zeros(1,nB); v_IscRMS = zeros(1,nB);
    v_ElossSC = zeros(1,nB);

    celPb = cell(1,nB);
    Pd_kW = P_bus_W / 1000;
    rf_C0 = [];

    fprintf('%8s %9s %10s %12s %12s %8s %9s %10s %8s %8s %8s %8s %8s\n', 'C (F)', ...
'E_ut (Wh)', 'dMasa(kg)', 'km(M fija)', 'km(c/masa)', 'Irms (A)', ...

```

```

        'pico(kW)', 'SOCmin(%)', 'tau(s)', 'usoEne%', 'Isc_RMS(A)', 'Loss_SC(kWh)',
        'picoBat');

for iB = 1:nB
    C_val = C_barrido(iB);
    % Variante 1: masa de diseno fija (740 kg)
    rf = simular_hess_ems(P_bus_W/1000, C_val, FIS_B, dist_km_v, umbral_pico);
    % Variante 2: con penalizacion de masa del banco
    masa_C = Masa_Final_SC * C_val / C0_F;
    M_pen = M + (masa_C - Masa_Final_SC);
    F_tot_p = Cr*M_pen*g + 0.5*rho*A*Cd*v_ms.^2 + M_pen*a;
    P_rue_p = F_tot_p .* v_ms;
    P_bus_p = zeros(size(P_rue_p));
    P_bus_p(P_rue_p >= 0) = P_rue_p(P_rue_p >= 0) / eta_prop;
    P_bus_p(P_rue_p < 0) = P_rue_p(P_rue_p < 0) * eta_regen;
    rm = simular_hess_ems(P_bus_p/1000, C_val, FIS_B, dist_km_v, umbral_pico);

    v_kmF(iB) = rf.km;    v_kmM(iB) = rm.km;    v_ir(iB) = rf.Irms;
    v_pk(iB) = rf.pico;    v_socmin(iB) = rf.soc_sc_min;
    v_uso(iB) = (98 - rf.soc_sc_min)/73*100;
    v_K(iB) = rf.Kmed;    v_tau(iB) = rf.TauMed;    v_taumax(iB) = rf.TauMax;
    v_ssoc(iB) = rf.pct_sat_soc;    v_spot(iB) = rf.pct_sat_pot;
    v_maxPsc(iB) = rf.maxPsc;    v_stop(iB) = rf.stop;
    v_ndem(iB) = rf.n_dem_nat;    v_nbat(iB) = rf.n_bat_nat;
    v_nsup(iB) = rf.n_sup_nat;
    v_sdem(iB) = rf.s_dem_nat;    v_sbat(iB) = rf.s_bat_nat;
    v_uene(iB) = rf.util_ene;    v_upot(iB) = rf.util_pot;
    v_masa(iB) = masa_C;    v_dm(iB) = masa_C - Masa_Final_SC;
    v_Dmax(iB) = rf.D_max;    v_IscRMS(iB) = rf.Isc_rms;
    v_ElossSC(iB) = rf.E_loss_sc_kWh;
    celPb{iB} = rf.Pb;
    if iB == idx_C0, rf_C0 = rf; end

    fprintf('%8.2f %9.0f %+10.1f %12.2f %12.2f %8.2f %9.2f %10.2f %8.1f %8.1f %10.1f
    %11.3f %8d\n', ...
        C_val, 0.73*0.5*C_val*402^2/3600, v_dm(iB), rf.km, rm.km, rf.Irms, ...
        rf.pico, rf.soc_sc_min, rf.TauMed, rf.util_ene, rf.Isc_rms, rf.E_loss_sc_kWh,
        rf.n_bat_nat);
end

% ----- 4.4 Conteo de picos en VENTANA COMUN -----
N_com = min(v_stop);
n_dem_com = sum(Pd_kW(1:N_com) > umbral_pico);
n_bat_com = zeros(1,nB);
for iB = 1:nB, n_bat_com(iB) = sum(celPb{iB}(1:N_com) > umbral_pico); end
n_sup_com = n_dem_com - n_bat_com;

%% =====
%% GENERACION DE FIGURAS
%% =====

% --- Figura 1: Autonomia con doble eje de masa ---
figure('Name', 'Barrido UC - 1. Autonomia', 'Color', 'w', 'Position', [100 100 800
500]);
plot(C_barrido, v_kmF, 'bo-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Masa de diseo fija
(740 kg)'); hold on;
plot(C_barrido, v_kmM, 'rs--', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'Con penalizacion de
masa del banco');
yline(100, 'k:', 'LineWidth', 1.0, 'DisplayName', 'Meta de diseo (100 km)');
marcar_lineas(C_min_F, C0_F); grid on;

```

```

xlabel('Capacitancia del banco, C_{SC} [F]', 'FontSize', 11);
ylabel('Autonomia del vehiculo [km]', 'FontSize', 11);
%title('Autonomia vs Tamaño del Banco de Supercondensadores', 'FontSize', 12);
legend('Location', 'southeast'); set(gca, 'FontSize', 10);
try
    ax1 = gca;
    ax2 = axes('Position', get(ax1, 'Position'), 'XAxisLocation', 'top', ...
        'Color', 'none', 'YTick', [], 'XLim', get(ax1, 'XLim'), ...
        'YLim', get(ax1, 'YLim'), 'FontSize', 10, 'XColor', [0.3 0.3 0.3]);
    set(ax2, 'YColor', 'none');
    Ct = [5, C0_F, 2*C0_F, 3*C0_F, 4*C0_F];
    lab_m = cell(1, numel(Ct));
    for q = 1:numel(Ct), lab_m{q} = sprintf('%+.0f kg', Masa_Final_SC*(Ct(q)/C0_F -
1)); end
    set(ax2, 'XTick', Ct, 'XTickLabel', lab_m);
    xlabel(ax2, 'Diferencia de masa respecto al diseño, \Delta M [kg]'); axes(ax1);
catch, end

% --- Figura 2: Corriente eficaz I_RMS ---
figure('Name', 'Barrido UC - 2. Corriente eficaz', 'Color', 'w', 'Position', [120 120
800 500]);
plot(C_barrido, v_ir, 'bo-', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', 'I_{RMS} batería con
HESS'); hold on;
yline(rf_C0.Irms_dem, 'k:', 'LineWidth', 1.0, 'DisplayName', sprintf('Demanda directa
(%.2f A)', rf_C0.Irms_dem));
marcar_lineas(C_min_F, C0_F); grid on;
xlabel('Capacitancia del banco, C_{SC} [F]', 'FontSize', 11);
ylabel('Corriente eficaz de la batería, I_{bat,RMS} [A]', 'FontSize', 11);
title('Corriente eficaz de la batería vs Tamaño del banco de supercondensadores',
'FontSize', 12);
legend('Location', 'northeast'); set(gca, 'FontSize', 10);

% --- Figura 3: Potencia pico de la batería ---
figure('Name', 'Barrido UC - 3. Potencia pico', 'Color', 'w', 'Position', [140 140
800 500]);
plot(C_barrido, v_pk, 'o-', 'Color', [0.85 0.4 0], 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName',
'Pico batería con HESS'); hold on;
yline(rf_C0.pico_dem, 'k:', 'LineWidth', 1.0, 'DisplayName', sprintf('Pico de demanda
(%.1f kW)', rf_C0.pico_dem));
marcar_lineas(C_min_F, C0_F); grid on;
xlabel('Capacitancia del banco, C_{SC} [F]', 'FontSize', 11);
ylabel('Potencia pico solicitada a la batería [kW]', 'FontSize', 11);
title('Potencia pico de la batería vs Tamaño del banco de supercondensadores',
'FontSize', 12);
legend('Location', 'northeast'); set(gca, 'FontSize', 10);

% --- Figura 4: Conteo de picos > 15 kW ---
figure('Name', 'Barrido UC - 4. Picos > 15 kW', 'Color', 'w', 'Position', [160 160
850 500]);
xi = 1:nB;
fill([xi, fliplr(xi)], [v_ndem, fliplr(v_nbat)], [0.72 0.90 0.72], 'EdgeColor',
'none', 'DisplayName', 'Picos absorbidos por el SC'); hold on;
plot(xi, v_ndem, 'ko-', 'LineWidth', 2.0, 'MarkerSize', 7, 'MarkerFaceColor', 'k',
'DisplayName', 'Picos del ciclo (referencia)');
plot(xi, v_nbat, 'o-', 'Color', [0.75 0.10 0.10], 'LineWidth', 2.0, 'MarkerSize', 7,
'MarkerFaceColor', [0.75 0.10 0.10], 'DisplayName', 'Picos transferidos a la batería');
for q = 1:nB
    text(xi(q), (v_ndem(q) + v_nbat(q))/2, sprintf('%d', v_nsup(q)), ...
        'HorizontalAlignment', 'center', 'FontSize', 10, 'FontWeight', 'bold',
'Color', [0 0.35 0]);

```

```

end
plot([idx_C0 idx_C0], [0 max(v_ndem)*1.12], 'g--', 'LineWidth', 1.2,
'HandleVisibility', 'off');
text(idx_C0, max(v_ndem)*1.14, 'C diseño', 'Color', [0 0.5 0], 'HorizontalAlignment',
'center', 'FontSize', 9);
etqC = cell(1, nB); for q = 1:nB, etqC{q} = sprintf('%.1f', C_barrido(q)); end
set(gca, 'XTick', xi, 'XTickLabel', etqC, 'FontSize', 10); xlim([0.7 nB+0.3]);
ylim([0 max(v_ndem)*1.25]);
grid on; xlabel('Capacitancia del banco, C_{SC} [F]', 'FontSize', 11);
ylabel(sprintf('Número de picos (> %d kW) [eventos]', umbral_pico), 'FontSize', 11);
title('Absorción de picos de potencia por el banco de supercondensadores',
'FontSize', 12);
legend('Location', 'northeast');

% --- Figura 5: Utilizacion de limites fisicos (PORCENTAJES VISIBLES) ---
figure('Name', 'Barrido UC - 5. Utilizacion de Limites', 'Color', 'w', 'Position',
[180 180 850 520]);
hu = bar(xi, [v_uene(:), v_upot(:)], 'grouped');
set(hu(1), 'FaceColor', [0.90 0.60 0.10], 'EdgeColor', [0.4 0.25 0]); % Bar 1:
Energia
set(hu(2), 'FaceColor', [0.20 0.40 0.75], 'EdgeColor', [0.1 0.2 0.4]); % Bar 2:
Potencia
hold on;
plot([0.3 nB+0.7], [100 100], 'r--', 'LineWidth', 1.8, 'DisplayName', 'Limite fisico
de saturacion (100%)');

% Colocacion precisa de etiquetas sobre ambas barras
for q = 1:nB
    if isprop(hu(1), 'XEndPoints')
        x_bar1 = hu(1).XEndPoints(q);
        x_bar2 = hu(2).XEndPoints(q);
    else
        x_bar1 = xi(q) - 0.15;
        x_bar2 = xi(q) + 0.15;
    end

    % Barra 1: Energia (SOC)
    val_e = v_uene(q);
    if val_e >= 99.9
        text(x_bar1, val_e + 3, '100%', 'HorizontalAlignment', 'center', ...
'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold', 'Color', [0.75 0 0]);
        text(x_bar1, val_e + 11, 'SATURA', 'HorizontalAlignment', 'center', ...
'FontSize', 7, 'FontWeight', 'bold', 'Color', [0.75 0 0]);
    else
        text(x_bar1, val_e + 3, sprintf('%.0f%%', val_e), 'HorizontalAlignment',
'center', ...
'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold', 'Color', [0.5 0.3 0]);
    end

    % Barra 2: Potencia (Convertidor)
    val_p = v_upot(q);
    text(x_bar2, val_p + 3, sprintf('%.0f%%', val_p), 'HorizontalAlignment',
'center', ...
'FontSize', 8, 'FontWeight', 'bold', 'Color', [0.1 0.2 0.5]);
end

plot([idx_C0 idx_C0], [0 100], 'g--', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', 'Diseño
nominal (C_0)');
etqC2 = cell(1, nB); for q = 1:nB, etqC2{q} = sprintf('%.1f', C_barrido(q)); end
set(gca, 'XTick', xi, 'XTickLabel', etqC2, 'FontSize', 10);

```

```

xlim([0.3 nB+0.7]); ylim([0 135]); grid on;
xlabel('Capacitancia del banco, C_{SC} [F]', 'FontSize', 11);
ylabel('Utilización del limite fisico [%]', 'FontSize', 11);
title('Operación del SC respecto a sus fronteras fisicas (100% = Saturacion)',
'FontSize', 12);
legend({'Energia: ventana util SOC (25-98%)', sprintf('Potencia: convertidor (%.0f
kW)', 35), ...
'Limite saturacion (100%)', 'Diseño nominal (C_0)'}, 'Location',
'northeast');

% --- Figura 6: Constante de tiempo tau y K_media ---
figure('Name', 'Barrido UC - 6. Constantes de tiempo', 'Color', 'w', 'Position', [200
200 800 500]);
yyaxis left;
plot(C_barrido, v_taumax, 's--', 'LineWidth', 1.5, 'DisplayName', '\tau_{max}
disponible (E_{util}/P_{SC,max})'); hold on;
plot(C_barrido, v_tau, 'o-', 'LineWidth', 1.8, 'DisplayName', '\tau media
efectivamente aplicada');
ylabel('Constante de tiempo, \tau [s]', 'FontSize', 11); set(gca, 'YColor', [0 0.4
0.8]);
yyaxis right;
plot(C_barrido, v_K, 'd-.', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', 'K media (fraccion de
\tau_{max} usada)');
ylabel('Factor medio de filtrado, K_{medio} [-]', 'FontSize', 11); ylim([0 1]);
set(gca, 'YColor', [0.8 0.4 0]);
yyaxis left; marcar_lineas(C_min_F, C0_F);
grid on; xlabel('Capacitancia del banco, C_{SC} [F]', 'FontSize', 11);
title('Respuesta dinamica del control difuso vs Tamaño del banco de
supercondensadores', 'FontSize', 12);
legend('Location', 'southeast'); set(gca, 'FontSize', 10);

%% =====
%% FIGURAS SEPARADAS Y EN CICLO COMPLETO (FIGURAS 7 A 11)
%% =====
t_v = (0:rf_C0.stop-1)' / 60; % Tiempo en minutos

% --- FIGURA 7: Voltaje del Banco SC en Ciclo Completo ---
figure('Name', 'Barrido UC - 7. Voltaje del banco de SC (Ciclo Completo)', 'Color',
'w', 'Position', [220 220 850 480]);
plot(t_v, rf_C0.Vsc_oc, 'b-', 'LineWidth', 1.3, 'DisplayName', 'Voltaje circuito
abierto, V_{sc,oc} [V]'); hold on;
plot(t_v, rf_C0.Vsc_term, 'r--', 'LineWidth', 1.0, 'DisplayName', 'Voltaje terminal
con ESR, V_{sc,term} [V]');
yline(V_sc_max, 'k--', 'V_{max} (400 V)', 'LineWidth', 0.9, 'HandleVisibility',
'off');
yline(V_sc_min, 'k--', 'V_{min} (200 V)', 'LineWidth', 0.9, 'HandleVisibility',
'off');
ylabel('Voltaje del banco de SC, V_{SC} [V]', 'FontSize', 11);
xlabel('Tiempo transcurrido en el ciclo completo [min]', 'FontSize', 11);
title(sprintf('Evolución de voltaje en el banco de supercondensadores(C = %.2f F)',
C0_F), 'FontSize', 12);
grid on; legend('Location', 'southwest'); set(gca, 'FontSize', 10); ylim([180 430]);

% --- FIGURA 8: Corriente Instantánea del SC en Ciclo Completo ---
figure('Name', 'Barrido UC - 8A. Corriente Instantanea SC', 'Color', 'w', 'Position',
[240 240 850 480]);
plot(t_v, rf_C0.Isc, 'b-', 'LineWidth', 1.1);
ylabel('Corriente del SC, I_{SC} [A]', 'FontSize', 11);
xlabel('Tiempo transcurrido en el ciclo completo [min]', 'FontSize', 11);
grid on;

```

```

title('Corriente Instantánea del supercondensador ( $I_{SC}$ )', 'FontSize', 12);
set(gca, 'FontSize', 10);

% --- FIGURA 9: Convertidor Buck-Boost en Ciclo Completo ---
figure('Name', 'Barrido UC - 9. Convertidor Buck-Boost (Ciclo Completo)', 'Color',
'w', 'Position', [260 260 850 550]);
subplot(2, 1, 1);
plot(t_v, rf_C0.D, 'm-', 'LineWidth', 1.2);
ylabel('Ciclo de trabajo, D [-]', 'FontSize', 10); ylim([0 1]);
grid on; title('Ciclo de trabajo dinámico D(t) del convertidor Buck-Boost',
'FontSize', 11);
set(gca, 'FontSize', 10);

subplot(2, 1, 2);
plot(t_v, rf_C0.modos_conv, 'k-', 'LineWidth', 1.1);
ylabel('Modo de Operación [-]', 'FontSize', 10);
xlabel('Tiempo transcurrido en el ciclo completo [min]', 'FontSize', 10);
ylim([-0.2 1.2]); yticks([0 1]); yticklabels({'Buck (Carga / Regen)', 'Boost
(Descarga / Prop)'});
grid on; title('Modo de Operación del convertidor Buck-Boost', 'FontSize', 11);
set(gca, 'FontSize', 10);

% --- FIGURA 10: Reparto Dinámico de Potencias en Ciclo Completo ---
figure('Name', 'Barrido UC - 10. Reparto de potencia HESS (Ciclo Completo)', 'Color',
'w', 'Position', [280 280 850 480]);
plot(t_v, Pd_kW(1:rf_C0.stop), 'k:', 'LineWidth', 1.0, 'DisplayName', 'Demanda en bus
DC, P_{bus} [kW]'); hold on;
plot(t_v, rf_C0.Pb, 'b-', 'LineWidth', 1.1, 'DisplayName', 'Potencia de batería,
P_{bat} [kW]');
plot(t_v, rf_C0.Psc, 'c-', 'LineWidth', 1.2, 'DisplayName', 'Potencia de
supercondensador, P_{sc} [kW]');
ylabel('Potencia [kW]', 'FontSize', 11);
xlabel('Tiempo transcurrido en el ciclo completo [min]', 'FontSize', 11);
title('Reparto potencia (EMS difusa)', 'FontSize', 12);
grid on; legend('Location', 'northeast'); set(gca, 'FontSize', 10);

% --- FIGURA 11: Estrés Eléctrico y Térmico vs Capacitancia ---
figure('Name', 'Barrido UC - 11. Estrés eléctrico y térmico vs Tamaño del banco de
supercondensadores', 'Color', 'w', 'Position', [300 300 850 480]);
yyaxis left;
plot(C_barrido, v_IscRMS, 'bo-', 'LineWidth', 1.6, 'DisplayName', 'Corriente eficaz
SC,  $I_{sc,RMS}$  [A]');
ylabel('Corriente eficaz del SC,  $I_{sc,RMS}$  [A]', 'FontSize', 11); set(gca, 'YColor',
'b');
yyaxis right;
plot(C_barrido, v_ElossSC, 'rd--', 'LineWidth', 1.6, 'DisplayName', 'Energía disipada
en ESR,  $E_{loss,SC}$  [kWh]');
ylabel('Energía total disipada en ESR [kWh]', 'FontSize', 11); set(gca, 'YColor',
'r');
yyaxis left; marcar_lineas(C_min_F, C0_F);
grid on; xlabel('Capacitancia del banco,  $C_{SC}$  [F]', 'FontSize', 11);
title('Reducción del estrés eléctrico y térmico al aumentar el tamaño del banco de
supercondensadores', 'FontSize', 12);
legend('Location', 'northeast'); set(gca, 'FontSize', 10);

% ----- Exportación de Datos Guardados -----
T_bar = table(C_barrido(:), v_masa(:), v_dm(:), v_kmF(:), v_kmM(:), ...
v_ir(:), v_pk(:), repmat(n_dem_com, nB, 1), n_bat_com(:), n_sup_com(:), ...
v_ssoc(:), v_spot(:), v_maxPsc(:), v_socmin(:), v_uso(:), ...

```

```

v_tau(:, v_taumax(:, v_K(:, v_IscRMS(:, v_ElossSC(:, ...
v_ndem(:, v_nbat(:, v_nsup(:, v_sdem(:, v_sbat(:, ...
v_uene(:, v_upot(:, 'VariableNames', ...
{'C_F', 'masa_banco_kg', 'delta_masa_kg', 'km_masa_fija', 'km_con_masa', ...
'Irms_A', 'pico_kW', 'picosDem_comun', 'picosBat_comun', 'picosSup_comun', ...
'sat_energia_pct', 'sat_convertidor_pct', 'maxPsc_kW', 'SOC_sc_min_pct', ...
'uso_ventana_pct', 'tau_media_s', 'tau_max_s', 'K_medio', 'Isc_RMS_A',
'Perdidas_ESR_kWh', ...
'eventosDem', 'eventosBat', 'eventosSup', 'instDem', 'instBat', ...
'util_energia_pct', 'util_convertidor_pct'}));
writetable(T_bar, 'Reporte_Barrido_UC.csv');
fprintf('\nReporte guardado exitosamente: Reporte_Barrido_UC.csv\n');
end

```

```

% =====
%% FUNCIONES LOCALES
% =====

```

```

function marcar_lineas(Cmin, Cd_)
xline(Cmin, 'm--', 'C minimo', 'LineWidth', 1.2, ...
'LabelVerticalAlignment', 'bottom', 'HandleVisibility', 'off');
xline(Cd_, 'g--', 'C disenio', 'LineWidth', 1.2, ...
'LabelVerticalAlignment', 'bottom', 'HandleVisibility', 'off');
end

```

```

function FIS = cargar_fis_barrido()
if exist('fis_nominal.fis', 'file') ~= 2 || exist('fis_supervisor.fis', 'file') ~= 2
error('Faltan archivos .fis en la carpeta de trabajo.');
```

```

end
FIS.Nominal = readfis('fis_nominal.fis');
FIS.Supervisor = readfis('fis_supervisor.fis');
FIS.Bat_Low = fis_o_nominal('fis_bat_low.fis', FIS.Nominal);
FIS.Bat_High = fis_o_nominal('fis_bat_high.fis', FIS.Nominal);
FIS.SC_Low = fis_o_nominal('fis_sc_low.fis', FIS.Nominal);
FIS.SC_High = fis_o_nominal('fis_sc_high.fis', FIS.Nominal);
end

```

```

function f = fis_o_nominal(nombre, fdef)
if exist(nombre, 'file') == 2
f = readfis(nombre);
else
f = fdef;
end
end

```

```

function R = simular_hess_ems(Pd, C_sc, FIS, dist_km_v, umbral)
HW.V_sc_nom = 402;
HW.P_sc_max_kW = 35;
HW.V_bat_nom = 403.2;
HW.V_bus_nom = 400; % Voltaje del bus DC regulado (V)
HW.C_bat = 50;
HW.P_bat_max_kW = 35;
HW.I_bat_max = 200;
HW.R_bat = 0.05; %<-----
HW.R_sc = 0.02; %<-----
HW.Ns_bat = 112;
HW.C_sc = C_sc;
HW.V_ocv_SOC = [0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100];
HW.V_ocv_celda = [3.00 3.30 3.45 3.52 3.55 3.58 3.62 3.67 3.75 3.90 4.20];
PROT.SOC_bat_min = 20; PROT.SOC_bat_max = 80;
PROT.SOC_sc_min = 25; PROT.SOC_sc_max = 98;

```

```

Ts = 1;

E_total_J = 0.5 * HW.C_sc * HW.V_sc_nom^2;
Porc_Util = (PROT.SOC_sc_max - PROT.SOC_sc_min) / 100;
Tau_Max = (E_total_J * Porc_Util) / (HW.P_sc_max_kW * 1000);
Tau_Min = 1.0;

Pd = Pd(:); N = length(Pd);
SOC_bat = zeros(N, 1, 'single'); SOC_sc = zeros(N, 1, 'single');
P_bat = zeros(N, 1, 'single'); P_sc = zeros(N, 1, 'single');
Vsc_oc = zeros(N, 1, 'single'); Vsc_term = zeros(N, 1, 'single');
I_sc_hist = zeros(N, 1, 'single'); Ploss_sc_hist = zeros(N, 1, 'single');
D_hist = zeros(N, 1, 'single'); modo_hist = zeros(N, 1, 'single');
K_hist = zeros(N, 1); Tau_hist = zeros(N, 1);
n_sat_soc = 0; n_sat_pot = 0;

SOC_bat(1) = PROT.SOC_bat_max; SOC_sc(1) = PROT.SOC_sc_max;
P_bat(1) = Pd(1); P_bat_filt = Pd(1); idx_stop = N;

Vsc_oc(1) = HW.V_sc_nom * sqrt(max(0.01, double(SOC_sc(1)) / 100));
Vsc_term(1) = Vsc_oc(1);
D_hist(1) = 1 - (Vsc_term(1) / HW.V_bus_nom);
modo_hist(1) = 1;

for k = 2:N
    [SOC_bat(k), SOC_sc(k)] = soc_fisico(P_bat(k-1), P_sc(k-1), ...
        SOC_bat(k-1), SOC_sc(k-1), HW, Ts, PROT);
    if SOC_bat(k) <= PROT.SOC_bat_min
        idx_stop = k; break;
    end
    dPd = (Pd(k) - Pd(k-1)) / Ts;
    in1 = max(-35, min(35, Pd(k)));
    in2 = max(-70, min(70, dPd));
    try
        Modo_val = evalfis(FIS.Supervisor, [SOC_bat(k), SOC_sc(k)]);
    catch
        Modo_val = evalfis([SOC_bat(k), SOC_sc(k)], FIS.Supervisor);
    end
    Modo_idx = round(Modo_val);
    switch Modo_idx
        case 1, fis_act = FIS.Nominal;
        case 2, fis_act = FIS.Bat_Low;
        case 3, fis_act = FIS.Bat_High;
        case 4, fis_act = FIS.SC_Low;
        case 5, fis_act = FIS.SC_High;
        otherwise, fis_act = FIS.Nominal;
    end
    try
        K_fuzzy = evalfis(fis_act, [in1, in2]);
    catch
        K_fuzzy = evalfis([in1, in2], fis_act);
    end
    K_fuzzy = max(0, min(1, K_fuzzy));
    K_hist(k) = K_fuzzy;
    Tau = Tau_Min + K_fuzzy * (Tau_Max - Tau_Min);
    Tau_hist(k) = Tau;
    alpha = 1 - exp(-Ts / Tau);
    P_bat_ideal = alpha * Pd(k) + (1 - alpha) * P_bat_filt;
    P_bat_filt = P_bat_ideal;
    p_sc_req = Pd(k) - P_bat_ideal;
end

```

```

    sat_soc_k = false;
    if SOC_sc(k) >= PROT.SOC_sc_max && p_sc_req < 0, p_sc_req = 0; sat_soc_k = true;
end
    if SOC_sc(k) <= PROT.SOC_sc_min && p_sc_req > 0, p_sc_req = 0; sat_soc_k = true;
end

    if sat_soc_k, n_sat_soc = n_sat_soc + 1; end
    if abs(p_sc_req) > HW.P_sc_max_kW, n_sat_pot = n_sat_pot + 1; end
    p_sc_req = max(-HW.P_sc_max_kW, min(HW.P_sc_max_kW, p_sc_req));
    p_bat_req = Pd(k) - p_sc_req;
    if SOC_bat(k) >= PROT.SOC_bat_max && p_bat_req < 0
        excedente = p_bat_req; p_bat_req = 0; p_sc_req = p_sc_req + excedente;
        if SOC_sc(k) >= PROT.SOC_sc_max, p_sc_req = max(0, p_sc_req); end
    end
    P_sc(k) = single(p_sc_req);
    p_bat_final = Pd(k) - P_sc(k);
    p_bat_final = max(-HW.P_bat_max_kW, min(HW.P_bat_max_kW, p_bat_final));
    P_bat(k) = single(p_bat_final);

    % --- MODELO FISICO Y CONVERTIDOR BUCK-BOOST BIDIRECCIONAL ---
    Vsc_oc(k) = HW.V_sc_nom * sqrt(max(0.01, double(SOC_sc(k)) / 100));
    I_sc_k = (double(P_sc(k)) * 1000) / max(double(Vsc_oc(k)), 1);
    I_sc_hist(k) = I_sc_k;
    Ploss_sc_hist(k) = (I_sc_k^2 * HW.R_sc) / 1000;
    Vsc_term(k) = Vsc_oc(k) - I_sc_k * HW.R_sc;

    if P_sc(k) >= 0
        D_k = 1 - (Vsc_term(k) / HW.V_bus_nom); % Modo Boost
        modo_hist(k) = 1;
    else
        D_k = Vsc_term(k) / HW.V_bus_nom; % Modo Buck
        modo_hist(k) = 0;
    end
    D_hist(k) = max(0, min(0.98, D_k));
end

rng_v = 1:idx_stop;
Pd_v = double(Pd(rng_v)); Pb_v = double(P_bat(rng_v)); Psc_v = double(P_sc(rng_v));
Isc_v = double(I_sc_hist(rng_v)); Ploss_v = double(Ploss_sc_hist(rng_v));

rms_l = @(x) sqrt(mean(x.^2));
R.stop = idx_stop;
R.km = dist_km_v(idx_stop);
R.soc_sc_min = double(min(SOC_sc(rng_v)));
R.Irms = rms_l(Pb_v * 1000 / 400);
R.Irms_dem = rms_l(Pd_v * 1000 / 400);
R.pico = max(Pb_v); R.pico_dem = max(Pd_v);

cuenta_eventos = @(x, th) sum(diff([0; double(x(:) > th)]) == 1);
R.n_dem_nat = cuenta_eventos(Pd_v, umbral);
R.n_bat_nat = cuenta_eventos(Pb_v, umbral);
R.n_sup_nat = R.n_dem_nat - R.n_bat_nat;
R.s_dem_nat = sum(Pd_v > umbral); R.s_bat_nat = sum(Pb_v > umbral);
R.sup15 = 100 * (1 - R.n_bat_nat / max(R.n_dem_nat, 1));
R.Kmed = mean(K_hist(2:idx_stop));
R.TauMed = mean(Tau_hist(2:idx_stop));
R.TauMax = Tau_Max;
R.n_sat_soc = n_sat_soc; R.n_sat_pot = n_sat_pot;
R.pct_sat_soc = 100 * n_sat_soc / idx_stop;
R.pct_sat_pot = 100 * n_sat_pot / idx_stop;
R.maxPsc = max(abs(Psc_v));

```

```

R.util_ene = (PROT.SOC_sc_max - R.soc_sc_min) / (PROT.SOC_sc_max - PROT.SOC_sc_min) *
100;
R.util_pot = R.maxPsc / HW.P_sc_max_kW * 100;
R.Pb = Pb_v;

R.Vsc_oc = double(Vsc_oc(rng_v));
R.Vsc_term = double(Vsc_term(rng_v));
R.D = double(D_hist(rng_v));
R.K = K_hist(rng_v);
R.Psc = Psc_v;
R.Isc = Isc_v;
R.Ploss_sc = Ploss_v;
R.modos_conv = modos_hist(rng_v);
R.D_max = max(R.D);
R.Isc_rms = rms_l(Isc_v);
R.E_loss_sc_kWh = sum(Ploss_v * Ts) / 3600;
end

function [sb, ssc] = soc_fisico(Pb_kW, Psc_kW, sb_o, ssc_o, hw, Ts, PROT)
soc_clamped = max(0, min(100, sb_o));
V_celda = interp1(hw.V_ocv_SOC, hw.V_ocv_celda, soc_clamped, 'linear', 'extrap');
V_ocv = hw.Ns_bat * V_celda;
P_bat_W = Pb_kW * 1000;
discr = V_ocv^2 - 4 * hw.R_bat * P_bat_W;
if discr < 0, I_bat = V_ocv / (2 * hw.R_bat); else, I_bat = (V_ocv - sqrt(discr)) /
(2 * hw.R_bat); end
I_bat = max(-hw.I_bat_max, min(hw.I_bat_max, I_bat));
sb = sb_o - (I_bat * Ts) / (hw.C_bat * 3600) * 100;
sb = max(PROT.SOC_bat_min, min(PROT.SOC_bat_max, sb));

E_max_J = 0.5 * hw.C_sc * hw.V_sc_nom^2;
E_min_J = (PROT.SOC_sc_min / 100) * E_max_J;
E_maxU_J = (PROT.SOC_sc_max / 100) * E_max_J;
E_act_J = (ssc_o / 100) * E_max_J;
P_sc_W = Psc_kW * 1000;
V_sc = hw.V_sc_nom * sqrt(max(0.01, ssc_o / 100));
I_sc = P_sc_W / max(V_sc, 1);
P_loss = (I_sc^2) * hw.R_sc;
E_nueva_J = E_act_J - P_sc_W * Ts - P_loss * Ts;
E_nueva_J = max(E_min_J, min(E_maxU_J, E_nueva_J));
ssc = (E_nueva_J / E_max_J) * 100;
end

```

Anexo F - Hojas de datos



An
UP
Company

DATASHEET

3.0V 3000F ULTRACAPACITOR CELLBCAP3000 P300 K04/05

Maxwell's High Power and Energy Cell



Maxwell Technologies' 3.0V 3000F ultracapacitor cell is designed to support the latest trends in renewable energy, industrial electrification, and transportation. Designed from the ground up, Maxwell developed the 3.0V 3000F cell to be one of the highest energy, highest power workhorses of its ultracapacitor portfolio. Whether used alone, integrated into a module assembly, or in a hybrid configuration, Maxwell's 3.0V 3000F product will help reduce the overall cost and weight of the system while improving the customer's return on investment.

Ultracapacitors are the technology of choice for long life and high power applications because of their long operating lifetime, low maintenance requirements, and superior cold weather performance compared to batteries.

FEATURES AND BENEFITS

- Rated at 3.0V, 3000F
- High power & energy cell with ultra low ESR
- Improved overall performance to previous generation of 3.0V products
- DuraBlue™ Shock and Vibration Technology
- 1,500 hour DC life at maximum operating temperature and voltage*
- Designed for up to 1,000,000 duty cycles*
- Laser weldable or screw post terminals
- Compliant with UL, RoHS, and REACH requirements

TYPICAL APPLICATIONS

- Heavy transportation
 - Hybrid buses
 - Rail
 - Truck
 - Construction vehicles
- Heavy industrial and stationary solutions
 - Backup and UPS systems
 - STATCOM systems
- Grid, microgrid, and microturbines
- Automotive
 - VSS
 - EPAS
 - EPAB
 - Liftgate & Plow
 - Backup power
 - X-by-wire

ORDERING INFORMATION

Model Number	Part Number	Package Quantity
BCAP3000 P300 K04/05	135961 / 135962	15

* Typical results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details for applicable operating use and requirements.

Datasheet : 3.0V 3000F ULTRACAPACITOR CELL

PRODUCT SPECIFICATIONS & CHARACTERISTICS

Values are referenced at T_A = room temperature and V_R = 3.0V rated voltage (unless otherwise noted). Min and Max values indicate product specifications. Typical results will vary and are provided for reference only. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details for applicable operating and use requirements.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typical	Max	Unit
ELECTRICAL						
V_R	Rated Voltage		—	—	3.0	V
V_{SURGE}	Surge Voltage	Note 1	—	—	3.1	V
C_R	Rated Capacitance	BOL, Note 2,8	3,000	3,140	3,600	F
R_S	Equivalent Series Resistance (ESR_{DC})	BOL, Note 2,8	—	0.13	0.23	mΩ
I_{LEAK}	Leakage Current	Note 3	—	8	12	mA
I_{PEAK}	Peak Current	BOL, Note 4,8	—	—	2,600	A
I_{MAX}	Continuous Current	BOL, Note 7,8 - $\Delta T = 15^\circ C$ - $\Delta T = 40^\circ C$	— —	— —	170 280	A_{RMS}
LIFE						
t_{65C}	High Temperature Life	$V_R = 3.0V$ and $T_A = 65^\circ C$, EOL, Note 8 - Capacitance change ΔC from min C_R - Resistance change ΔR from max R_S	— — —	1,500 -20 +100	— — —	hours % %
t_{25C}	Projected Life Time	$V_R = 3.0V$ and $T_A = 25^\circ C$, EOL, Note 8 - Capacitance change ΔC from min C_R - Resistance change ΔR from max R_S	— — —	10 -20 +100	— — —	years % %
n_{CYCLE}	Projected Cycle Life	$T_A = 25^\circ C$, EOL, Note 6,8 - Capacitance change ΔC from min C_R - Resistance change ΔR from max R_S	— — —	1,000,000 -20 +100	— — —	cycles % %
t_{SHELF}	Shelf Life	Stored uncharged, $T_A \leq 25^\circ C$ and $RH \leq 50\%$ - Capacitance $\geq$ min. BOL C_R - Resistance $\leq$ max. BOL R_S	—	4	—	years

Datasheet : 3.0V 3000F ULTRACAPACITOR CELL

PRODUCT SPECIFICATIONS & CHARACTERISTICS

Values are referenced at T_A = room temperature and V_A = 3.0V rated voltage (unless otherwise noted). Min and Max values indicate product specifications. Typical results will vary and are provided for reference only. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details for applicable operating and use requirements.

Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typical	Max	Unit
POWER & ENERGY						
P _d	Usable Specific Power	BOL, Note 5,8	10.2	18.1	–	kW/kg
P _{MAX}	Impedance Match Specific Power	BOL, Note 5,8	21.3	37.6	–	kW/kg
E _d	Gravimetric Specific Energy	BOL, Note 5,8	8.2	8.5	–	Wh/kg
E _{MAX}	Stored Energy	BOL, Note 5,8,9	3.8	3.9	–	Wh
TEMPERATURE & THERMAL						
T _A	Operating Temperature	Cell case temperature	-40	25	65	°C
T _{STG}	Storage Temperature	Stored uncharged @ RH ≤ 50%	-40	–	70	°C
R _{th}	Thermal Resistance	Case to ambient, Note 7	–	2.3	–	°C/W
C _{th}	Thermal Capacitance		–	430	–	J/°C
PHYSICAL						
m	Mass		–	460	–	g
–	Recommended Torque on Threaded connector (K04)	M12 Thread	10	12	14	Nm
–	Recommended Welding on Jove Terminal (K05)	Negative: 1100-F aluminum Positive: 1070-F aluminum Refer to Maxwell K2 Cell Family Welding Guidelines (maxwell.com)	–	–	–	–
–	Vibration		ISO 16750-3 (Table 12)			–
–	Shock		IEC 60068-2-27			–
SAFETY						
–	Certifications		UL810A, RoHS, REACH			

NOTES

1. Surge Voltage

- > Absolute maximum voltage, non-repetitive. Duration not to exceed 1 second.

2. Rated Capacitance and ESR_{DC}

- > Measured at 25°C per document number 1013823 available at www.maxwell.com.

3. Leakage Current

- > Current measured after 72 hours of constant voltage hold at V_R and 25°C. Initial leakage current can be higher.
- > If applicable, module leakage current is the sum of cell leakage current and bypass current created by balancing circuit.

4. Peak Current

- > Current needed to discharge cell or module from V_R to 1/2V_R in 1 second.

$$I_{PEAK} = \frac{\frac{1}{2}V_R}{\Delta t / C_R + R_S}$$

where I_{PEAK} is the maximum peak current (A);
V_R is the rated voltage (V);
Δt is the discharge time (sec); Δt = 1 sec in this case;
C_R is the rated BOL capacitance (F);
R_S is the maximum BOL ESR_{DC} (Ω).

- > The stated peak current should not be used in normal operation and is only provided as a reference value.

5. Energy & Power (Based on IEC 62576)

- > Usable Specific Power, P_U (W/kg) = $\frac{0.12V_R^2}{R_S \times m}$
- > Impedance Match Specific Power, P_{MAX} (W/kg) = $\frac{0.25V_R^2}{R_S \times m}$
- > Gravimetric Specific Energy, E_g (Wh/kg) = $\frac{E_{MAX}}{m}$
- > Maximum Stored Energy, E_{MAX} (Wh) = $\frac{\frac{1}{2}C_R \times V_R^2}{3600}$

where V_R is the rated voltage (V);
R_S is the BOL ESR_{DC} (Ω);
m is the typical mass (kg);
C_R is the BOL capacitance (F).

6. Projected Cycle Life

- > Constant current charge-discharge cycle from V_R to 1/2V_R at 25°C.
- > Cycle life is dependent upon application-specific characteristics. Actual results will vary.

7. Continuous Current & Thermal Resistance

- > Maximum current which can be used continuously within the allowed temperature range.

$$I_{MAX} = \sqrt{\frac{\Delta T}{R_{th} \times R_S}}$$

where I_{MAX} is the maximum continuous current (A);
ΔT is the change in temperature (°C);
R_{th} is the thermal resistance (°C/W);
R_S is the maximum BOL ESR_{DC} (Ω).

8. BOL & EOL Conditions

- > BOL (Beginning of Life): Rated/Initial product performance
- > EOL (End of Life)
 - Capacitance: 80% of min. BOL rating (0.8 x min. C_R)
 - ESR_{DC}: 200% of max. BOL rating (2 x max. R_S)

9. Transportation Regulation Regarding Stored Energy

- > Per United Nations material classification UN3499, all Maxwell ultracapacitor cells have less than 10Wh stored energy to meet the requirements of Special Provisions 361. Both individual ultracapacitors and modules composed of ultracapacitors shipped by Maxwell can be transported without being treated as dangerous goods (hazardous materials) under transportation regulations.

DETAILED PRODUCT DESCRIPTION

Introduction

The BCAP3000 P300 K04/K05 energy storage cell is a high power and energy design in the Maxwell driven industry-standard 60mm cylindrical form factor. The 3.0V 3000F cell design uses Maxwell's proprietary DuraBlue® Advanced technology to provide maximum level of resistance against shock and vibration.

Technology Overview

Ultracapacitor, also known as supercapacitor or electric double layer capacitor (EDLC), delivers energy at relatively high rates (beyond those accessible with batteries). Ultracapacitors store charge electrostatically (non-Faradaic) by reversible adsorption of the electrolyte onto electrochemically stable high surface area carbon electrodes. Charge separation occurs on polarization at the electrode/electrolyte interface, producing a double layer. This mechanism is highly reversible, allowing the ultracapacitor to be charged and discharged hundreds of thousands to even millions of times.

Ultracapacitor Construction

An ultracapacitor is constructed with symmetric carbon positive and negative electrodes separated by an insulating ion-permeable separator and packaged into a container filled with organic electrolyte (salt/solvent) designed to provide maximum ionic conductivity and electrode wetting. It is the combination of high surface-area activated carbon electrodes (typically > 1500m²/g) with extremely small charge separation (Angstroms) that results in high capacitance.

$$\text{Ultracapacitor Energy} = \frac{1}{2} CV^2$$

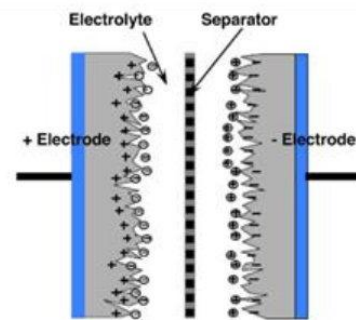
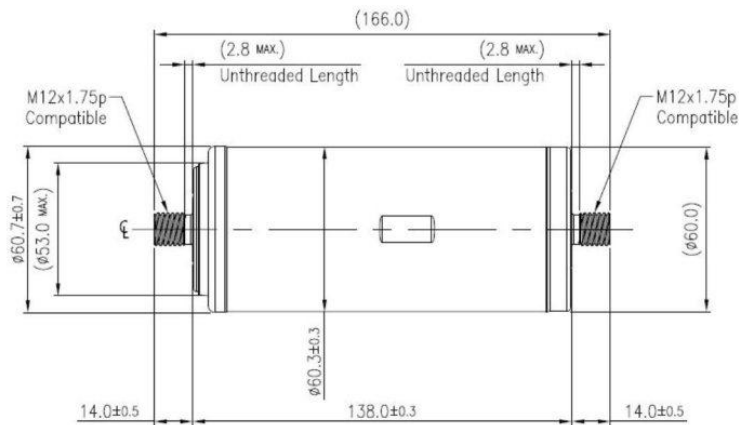


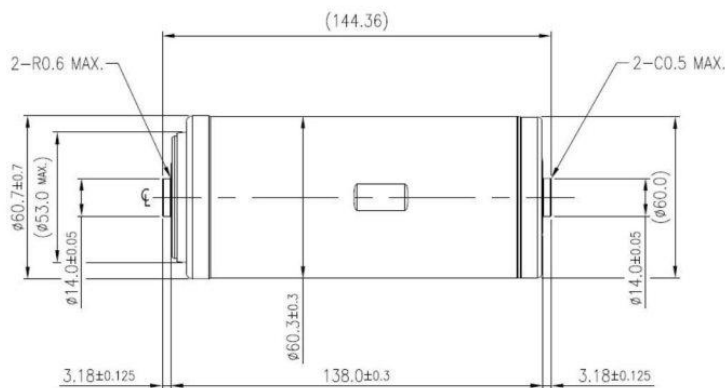
Figure 1: Ultracapacitor Structure Diagram

MECHANICAL DRAWINGS

BCAP3000 P300 K04



BCAP3000 P3000 K05



Products and related processes may be covered by one or more U.S. or international patents and pending applications. Product dimensions are for reference only unless otherwise identified. Maxwell Technologies reserves the right to make changes without further notice to any products herein. "Typical" parameters which may be provided in Maxwell Technologies datasheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Please contact Maxwell Technologies directly for any technical specifications critical to application.

UCAP Power, Inc.
Global Headquarters
6155 Cornerstone Court East,
Suite 210
San Diego, CA 92121
USA
Tel: +1 (858) UPOWER 1
Info@ucappower.com

Maxwell Technologies Korea
Co., Ltd.
17, Dongtangiheung-ro
881 Beon-gil, Gilheung-gu,
Yongin-si, Gyeonggi-do
17102
Republic of Korea
Tel: +82 31 289 0700
Fax: +82 31 286 6767

MAXWELL TECHNOLOGIES, MAXWELL, MAXWELL CERTIFIED INTEGRATOR, ENABLING ENERGY'S FUTURE, DURABLU, NESSCAP, XP, BOOSTCAP, D CELL, and their respective designs and/or logos are either trademarks or registered trademarks of UCAP POWER, Inc., and/or its affiliates, and may not be copied, imitated, or used, in whole or in part, without the prior written permission of UCAP Power, Inc. All contents copyright © 2021 UCAP Power, Inc. All rights reserved. No portion of these materials may be reproduced in any form, or by any means, without prior written permission from UCAP Power, Inc.

Specifications for NCR21700

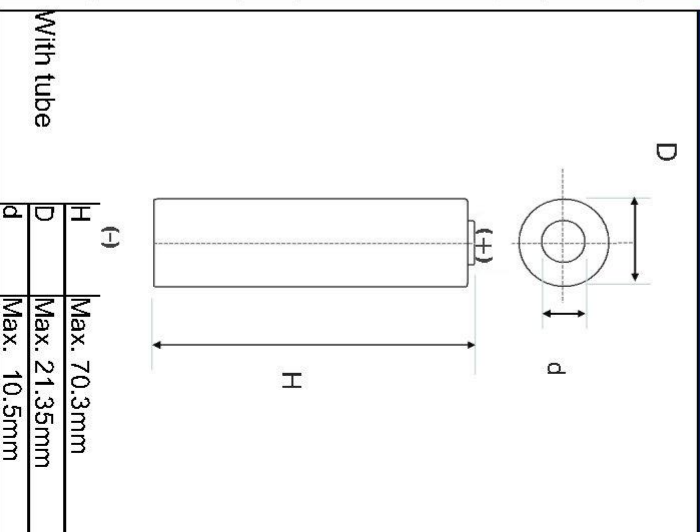
Specifications

Rated capacity ⁽¹⁾	4800mAh	
Capacity ⁽²⁾	Minimum	4900mAh
	Typical	5000mAh
Nominal voltage	3.6V	
Charging	Method	CC-CV
	Voltage	4.20V
	Current	Std. 2500mA
	Time	Std. 180min.
Weight (max.)	65.0g	
Temperature	Charge	10 to +45° C
	Discharge	-20 to +60° C
	Storage	-20 to +50° C
Energy density ⁽³⁾	Volumetric	775 Wh/l
	Gravimetric	263 Wh/kg

⁽¹⁾At 20° C ⁽²⁾ At 25° C

⁽³⁾Energy density is calculated using bare cell dimensions (without tube).

Dimensions

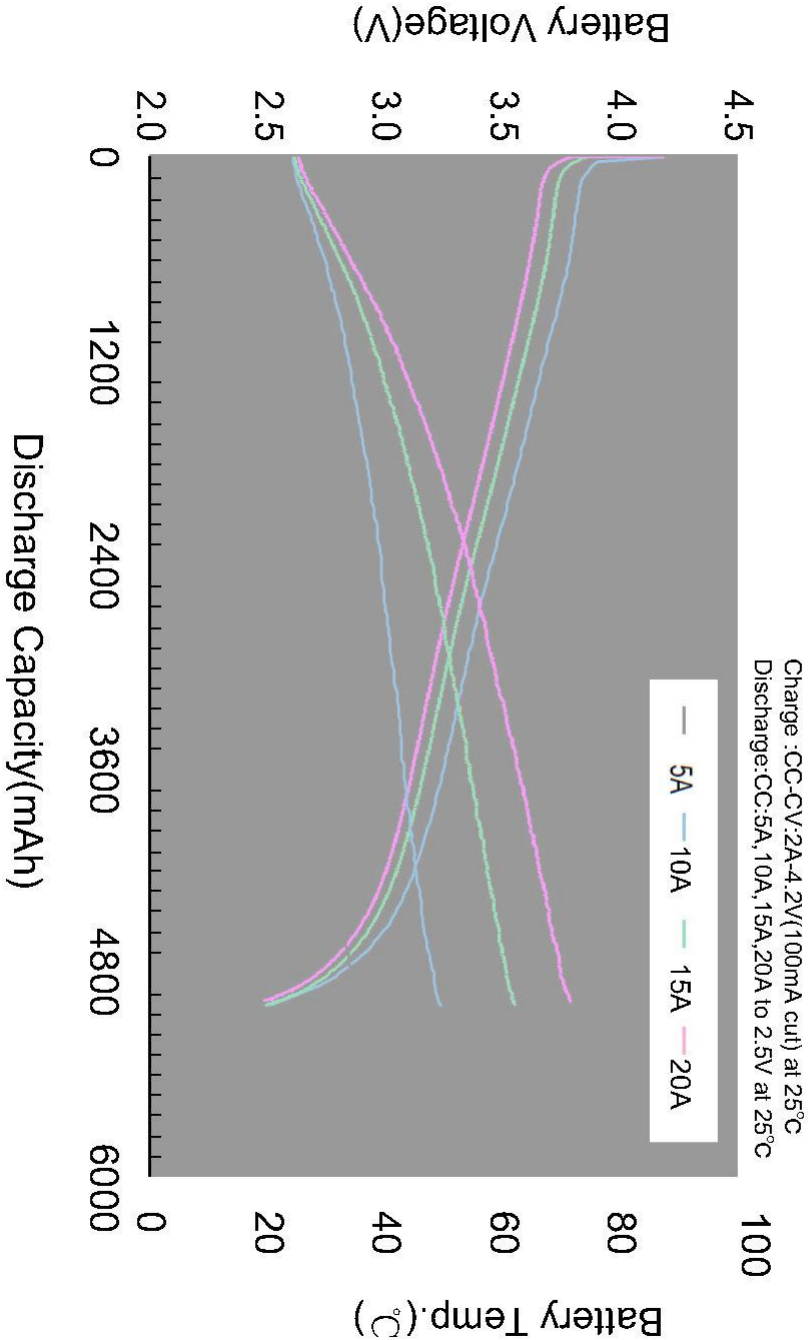


When designing a pack, refer to the cell's mechanical drawing for precise dimensions.

<Remark> These values are not guaranteed values.

Panasonic

Discharge rate Characteristics for NCR21700



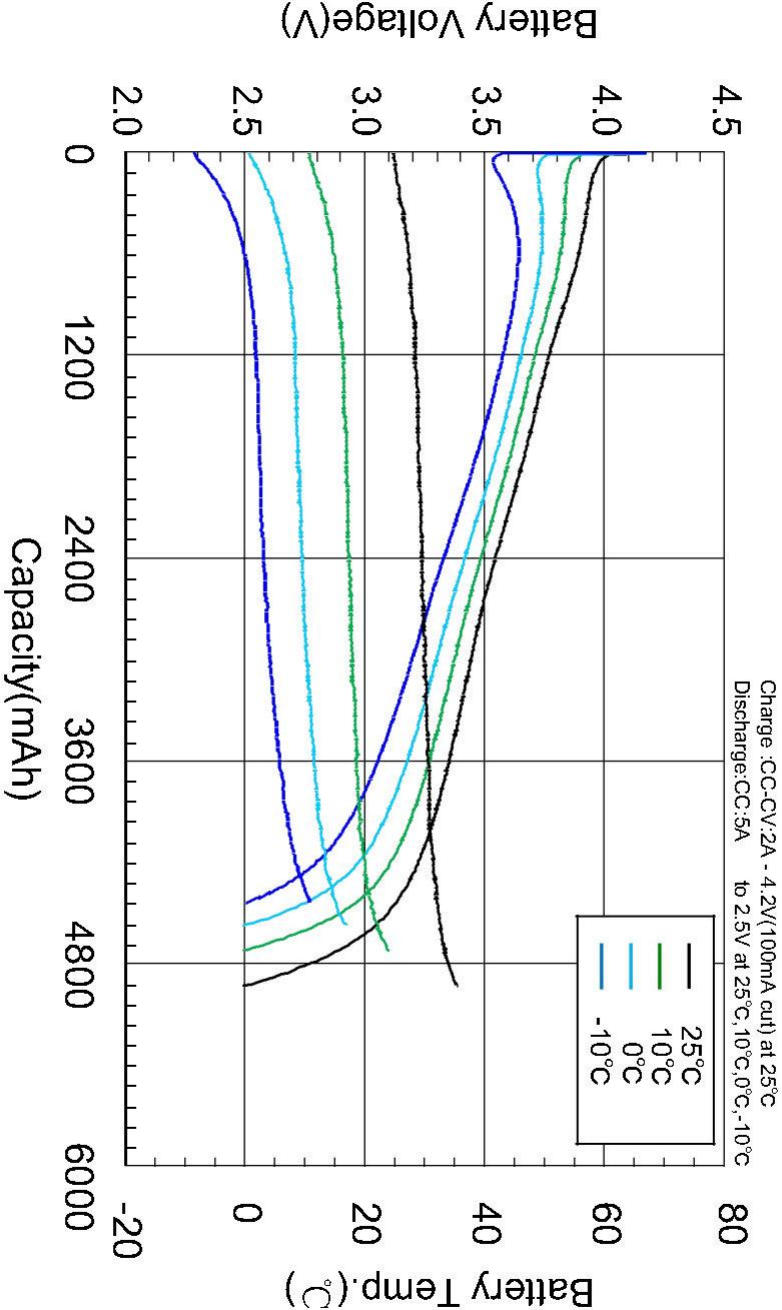
<Remark> These values are not guaranteed values.



Low Temp. Characteristics for NCR21700

4

[5A discharge]



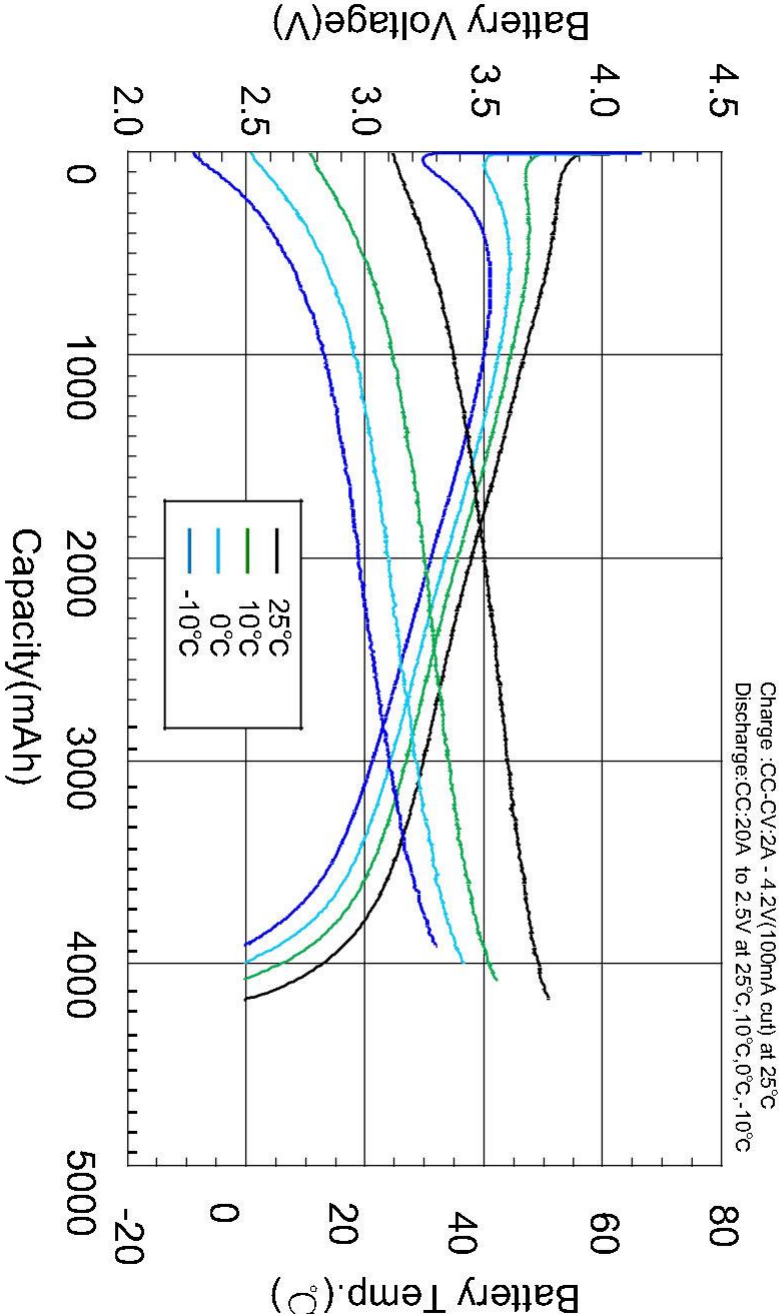
<Remark> These values are not guaranteed values.



Low Temp. Characteristics for NCR21700

5

[20A discharge]



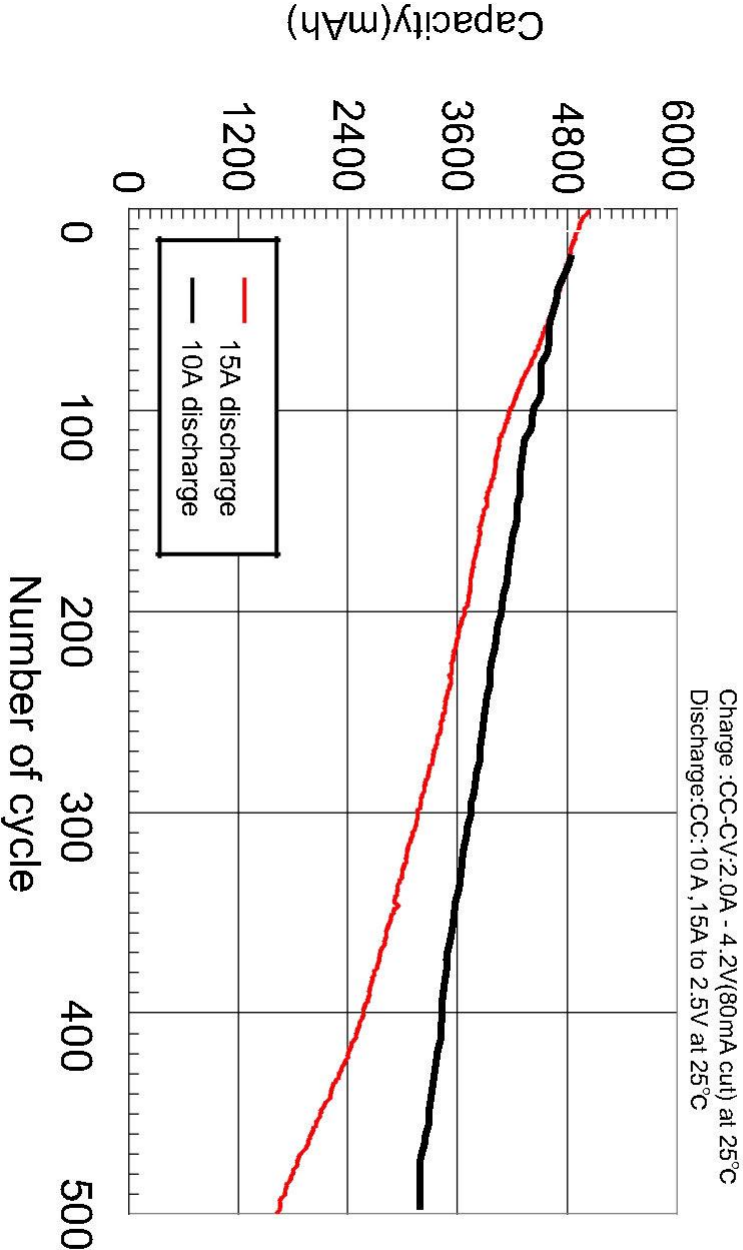
<Remark> These values are not guaranteed values.



Cycle Characteristics for NCR21700

6

< Without Temp. cut cycle performance of single cell >



<Remark> These values are not guaranteed values.



Anexo G - Tutorial de uso de la plataforma de simulación

La plataforma consta de tres bloques de scripts de MATLAB: seis generadores de controladores difusos, el dimensionador **SUPER_SCM3_3.m** y el simulador jerárquico **COMPL_SIM_13_B1.m**. Los controladores emiten un factor adimensional **K_factor** $\in [0, 1]$ —0 $\Rightarrow$ batería rápida y supercondensador pasivo; 1 $\Rightarrow$ batería lenta y supercondensador activo— que el simulador traduce a una constante de tiempo física. Se requiere MATLAB con las toolboxes Fuzzy Logic y Signal Processing, todos los archivos en una carpeta de trabajo y los ciclos en **.csv** con la columna **speed_mph** muestreada a 1 Hz.

Tabla 15 – Secuencia de ejecución

Paso	Programa(s)	Entradas	Salidas
1	C_FIS_N_A2.m	—	fis_nominal.fis (base; debe ir primero)
2	C_FIS_V_A2.m	—	fis_supervisor.fis
3	C_FIS_BL_A2.m , C_FIS_BH_A2.m , C_FIS_SCL_A2.m , C_FIS_SCH_A2.m	fis_nominal.fis	fis_bat_low.fis , fis_bat_high.fis , fis_sc_low.fis , fis_sc_high.fis
4	SUPER_SCM3_3.m (dimensionador)	Ciclos .csv	Perfil_Para_Simulador.csv + valores HW.* (consola)
5	Edición manual	Valores HW.*	Sección 2 del simulador parametrizada
6	COMPL_SIM_13_B1.m (simulador)	Perfil_Para_Simulador.csv + los mismos .csv + los seis .fis	3 figuras + diagnóstico + Reporte_Desviaciones.csv
7	BAR_4.m (inspector)	Ciclos .csv + valores HW.* + los seis .fis	Reporte_Barrido_UC.csv + graficas

Notas esenciales:

- Genere **fis_nominal.fis** antes que los cuatro obreros (lo usan como plantilla); el simulador exige además **fis_supervisor.fis**.
- El supervisor selecciona uno de cinco modos según **SOC_bat** y **SOC_sc**: Nominal, *Bat_Low*, *Bat_High*, *SC_Low* y *SC_High*; el dimensionador optimiza la frecuencia de corte (batería $\leftrightarrow$ SC).
- Transcriba los valores **HW.*** que imprime el dimensionador a la sección 2 del simulador, reemplazando los de ejemplo; nótese que **HW.V_bat** corresponde a **HW.V_bat_nom**.
- Seleccione los mismos ciclos **.csv** en el dimensionador y en el simulador; si difieren, la verificación de integridad trunca la simulación al menor número de muestras.
- Si modifica los límites de profundidad de descarga, manténgalos sincronizados entre **PROT.*** (simulador) y las funciones de pertenencia de **SOC_bat/SOC_sc** del supervisor (**C_FIS_V_A2.m**).

Parámetros base: en **SUPER_SCM3_3.m** (sección 1) el vehículo, la autonomía y las celdas; en **COMPL_SIM_13_B1.m** (secciones 2–3) el hardware y el SOC inicial; las reglas en la **ruleMatrix** de los **C_FIS_*.m**.