

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTÍSIMA CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



UCSC

Sistema de arranque de vehículos basado en el uso
de supercapacitores.

Diego Sebastián Marín Moyano

Informe de Habilitación Profesional para optar al título de:
Ingeniero Civil Eléctrico

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Profesores Guía:
Dr. Guillermo E. Ramírez A.
Dr. Eduardo E. Espinosa N.

Concepción, octubre 2025

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE LA SANTISIMA CONCEPCION
Facultad de Ingeniería
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:
Dr. Ricardo A. Lizana F.

Sistema de arranque de vehículos basado en el uso de supercapacitores

Diego Sebastián Marín Moyano

Informe de Habilitación Profesional
Para optar al título de

Ingeniero Civil Eléctrico

Octubre 2025

Resumen

En la actualidad, la transición hacia una movilidad más limpia y la creciente demanda por sistemas vehiculares de mayor eficiencia están impulsando la búsqueda de soluciones que mitiguen el uso intensivo de las baterías de arranque convencionales. Entre las alternativas emergentes, los Supercapacitores (SCs) destacan por su capacidad de entregar peaks de corriente muy elevados en tiempos extremadamente breves, reduciendo así el estrés térmico y químico al que se somete la batería y alargando su vida útil. Esta tendencia se ve reforzada por los objetivos globales de descarbonización y por la necesidad de optimizar el aprovechamiento de la energía almacenada durante las múltiples maniobras de encendido a lo largo de la vida de un vehículo.

En este contexto, el presente proyecto de título propone diseñar, simular, ensamblar y validar experimentalmente un sistema híbrido de arranque vehicular basado en SCs. El enfoque abarca desde la caracterización de la demanda de corriente real durante el encendido, utilizando perfiles medidos en automóviles convencionales, hasta la implementación física de un circuito capaz de gestionar el uso de supercondensadores, garantizando una operación segura y eficiente.

La metodología se estructura en cuatro pilares complementarios: En primer lugar, modelado y simulación en MATLAB/Simulink de la interacción batería-SC, evaluando distintos escenarios de perfiles de corriente, distintas capacitancias y tamaño de banco. En segundo lugar, diseño del circuito de control y lógica de protección, empleando topologías de relés de alta corriente y supervisión por microcontrolador. Luego, en tercer lugar, ensamblaje físico del prototipo, que incluye la disposición optimizada de los componentes de potencia, la integración de la fuente electrónica Chroma 63700 para emular perfiles de carga y la instrumentación necesaria para registrar variables eléctricas críticas.

Finalmente, en cuarto lugar, validación experimental. En el caso con el SC de 165 [F], durante el peak principal ($I_{carga} = 4.69$ [A]) el SC aportó un 73 % de la corriente, de modo que la fuente sólo entregó 1.28 [A] en el máximo; además, el voltaje se mantuvo ≥ 11.0 [V] durante todo el transitorio. Con el banco electrolítico de 26.8 [mF] también se observó una mitigación significativa del peak y una recuperación de tensión más rápida respecto del caso sin almacenamiento. Estas evidencias, junto con la concordancia simulación-laboratorio en forma temporal, reparto de corrientes y evolución del voltaje, validan la viabilidad técnica del enfoque batería-SC y ofrecen lineamientos de dimensionamiento transferibles a plataformas de mayor potencia y operación intensiva (por ej., redes de 48 [V] en aplicaciones industriales).

A los alumnos del pasado, presente y futuro de la carrera de Ingeniería Civil Eléctrica de la U.C.S.C.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que han contribuido de manera invaluable a la realización de este trabajo.

A mi profesor y tutor, Ricardo Lizana, por su guía constante, paciencia y dedicación. Su experiencia y consejos fueron fundamentales para superar cada obstáculo y enriquecer este proyecto.

A todos mis amigos, Cinthia, Eduardo, Evelyn, Maverick, Mauricio, Diego, Esteban, Juan Pablo, Felipe, Rubén, Cristian, Ricardo, Matías y Boris por las innumerables horas de estudio compartidas, las discusiones constructivas y el apoyo mutuo. Sus ideas y colaboraciones han sido esenciales para mi desarrollo universitario.

A mi novia, Yanara, por acompañarme con amor y paciencia en cada etapa de este proceso. Su apoyo constante y sus palabras de aliento han sido importantes para seguir adelante incluso en los momentos más difíciles.

Finalmente, a mi familia, por su amor incondicional y por ser mi soporte en todo momento. Su confianza en mí me ha dado la fuerza necesaria para perseverar y alcanzar mis metas.

Índice

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	12
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL	12
1.2. DIRECTRIZ DE BÚSQUEDA.....	13
1.3. TRABAJOS PREVIOS	13
1.3.1 <i>Characterization of Supercapacitor based on using conditions impacts evaluation on cell resistance and capacitance.....</i>	<i>13</i>
1.3.2 <i>Combination of Parallel Connected Supercapacitor & Battery for Enhancing Battery Life</i>	<i>14</i>
1.3.3 <i>Battery Management for Hybrid Electric Vehicles using Supercapacitors as a Supplementary Energy Storage System.....</i>	<i>14</i>
1.3.4 <i>Improvement of engine cold start capability using supercapacitor and lead-acid battery hybrid</i>	<i>15</i>
1.3.5 <i>Modeling the Performance of the Supercapacitor Battery for Car Start-up</i>	<i>15</i>
1.3.6 <i>Simulation and Modeling of Charging and Discharging of Supercapacitors.....</i>	<i>16</i>
1.3.7 <i>Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art.....</i>	<i>16</i>
1.3.8 <i>Modeling, Identification and Simulation of Hybrid Battery/Supercapacitor Storage System Used in Vehicular Applications</i>	<i>17</i>
1.3.9 <i>Descripción de sistema de carga de baterías de automóvil.....</i>	<i>17</i>
1.3.10 <i>Application of a Bidirectional DC/DC Converter to Control the Power Distribution in the Battery–Ultracapacitor System</i>	<i>18</i>
1.3.11 <i>Integration of Battery and Super-Capacitor banks into a Single-Power System for a Hybrid Electric Vehicle</i>	<i>18</i>
1.3.12 <i>Influence of Battery/Ultracapacitor Energy-Storage Sizing on Battery Lifetime in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle.....</i>	<i>19</i>
1.3.13 <i>Sizing of Lithium-Ion Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Forklift Vehicle</i>	<i>20</i>
1.3.14 <i>Hybrid battery–supercapacitor system for full electric forklifts.....</i>	<i>21</i>
1.3.15 <i>Merging Control of a Hybrid Energy Storage System using Battery/Supercapacitor for Electric Vehicle Application.....</i>	<i>22</i>
1.3.16 <i>Discusión</i>	<i>23</i>
1.4. HIPÓTESIS DE TRABAJO	25
1.5. OBJETIVOS	25
1.5.1 <i>Objetivo General</i>	<i>25</i>
1.5.2 <i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>25</i>
1.6. ALCANCES Y LIMITACIONES	25
1.7. TEMARIO Y METODOLOGÍA	26
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	28
2.1. INTRODUCCIÓN	28
2.2. SISTEMAS DE ARRANQUE DE VEHÍCULOS	28
2.3. BATERÍAS DE ARRANQUE	29
2.4. FUNDAMENTOS DE LOS SUPERCAPACITORES	30
2.5. COMPARACIÓN CON CAPACITORES TRADICIONALES Y BATERÍAS	32
2.6. MECANISMOS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA.....	33
2.7. PARÁMETROS CLAVE DE LOS SUPERCAPACITORES	34
2.7.1 <i>Capacitancia (C)</i>	<i>34</i>
2.7.2 <i>Voltaje Nominal (V).....</i>	<i>35</i>
2.7.3 <i>Resistencia Interna (ESR).....</i>	<i>35</i>
2.7.4 <i>Densidad de Energía y Potencia</i>	<i>35</i>
2.7.5 <i>Ciclos de Vida y Temperatura de Operación</i>	<i>36</i>
2.8. ECUACIONES FUNDAMENTALES.....	36
2.9. DIMENSIONAMIENTO DE CAPACITANCIA PARA APLICACIÓN DE AUTOMÓVIL.....	37
2.10. DISCUSIÓN	41
CAPÍTULO 3. SIMULACIÓN DEL SISTEMA DE ARRANQUE VEHICULAR	43
3.1. INTRODUCCIÓN	43

3.2.	OBTENCIÓN DE CURVAS DE CORRIENTE Y VOLTAJE	43
3.3.	PROCESAMIENTO DE DATOS EN MATLAB	43
3.4.	SIMULACIÓN DEL SISTEMA CON SUPERCAPACITOR Y BATERÍA EN PARALELO.....	44
3.4.1	<i>Resultados Simulaciones</i>	48
3.4.2	<i>Discusión</i>	50
CAPÍTULO 4. ELEMENTOS DEL CIRCUITO DE CONTROL Y POTENCIA		51
4.1.	INTRODUCCIÓN	51
4.2.	DISEÑO DEL CIRCUITO DE CONTROL.....	51
4.3.	FUNCIONAMIENTO DEL CIRCUITO	56
4.4.	COSTOS ASOCIADOS	58
4.5.	COMPONENTES CLAVE Y SUS FUNCIONES	59
4.6.	COSTOS ASOCIADOS Y COMPARACIÓN ECONÓMICA DEL SISTEMA DE ENCENDIDO	62
4.7.	DISCUSIÓN	64
CAPÍTULO 5. IMPLEMENTACIÓN FÍSICA DEL SISTEMA Y VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.		66
5.1.	OBJETIVO Y ALCANCE DE LOS ENSAYOS DE VALIDACIÓN EXPERIMENTAL	66
5.1.1	<i>Objetivos</i>	66
5.1.2	<i>Alcance operativo y condiciones de contorno</i>	67
5.1.3	<i>Recursos de potencia y medición</i>	67
5.1.4	<i>Elementos de almacenamiento energético</i>	68
5.2.	ESTRATEGIA EXPERIMENTAL Y SECUENCIA DE PRUEBAS	70
5.3.	PROGRAMACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS	71
5.3.1	<i>Arquitectura general de programación</i>	72
5.3.2	<i>Conexión Ethernet y ejecución de comandos SCPI</i>	73
5.3.3	<i>Perfil SCPI</i>	73
5.3.4	<i>Post-procesado y filtrado de señales</i>	75
5.4.	SIMULACIONES DE INTEGRACIÓN PROGRESIVA	76
5.4.1	<i>Etapas 1 – Fuente + Banco de capacitores → Carga (simulada)</i>	76
5.4.2	<i>Etapas 2 – Fuente + Supercapacitor → Carga (simulada)</i>	77
5.4.3	<i>Comparación de resultados simulados en las etapas de integración</i>	78
5.5.	PRUEBAS EXPERIMENTALES Y VALIDACIÓN	79
5.5.1	<i>Metodología de ensayo</i>	79
5.5.2	<i>Etapas 0 - Fuente → carga (experimental)</i>	82
5.5.3	<i>Etapas 1 – Fuente y banco capacitores → carga (experimental)</i>	85
5.5.4	<i>Etapas 2 – Fuente y SC → carga (experimental)</i>	90
5.5.5	<i>Comparación de banco de capacitores simulación-experimental</i>	97
5.5.6	<i>Comparación de SC simulación-experimental</i>	99
5.6.	DISCUSIÓN	100
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES		102
6.1.	TRABAJOS FUTUROS	104
CAPÍTULO 7. ANEXOS.....		109
7.1.	CÓDIGOS UTILIZADOS.....	109
7.1.1	<i>Script para Graficas SC</i>	109
7.1.2	<i>Script para gráficas de banco de capacitores</i>	113
7.1.3	<i>Script para gráficas energía de banco de capacitores</i>	116
7.1.4	<i>Script SCPI</i>	121

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Elementos principales en el arranque de vehículo	28
Tabla 2.2 Parámetros de batería por tecnología	30
Tabla 2.3 Ventajas, limitaciones y usos	30
Tabla 2.4 Desglose del arranque por etapas	39
Tabla 4.1 Especificaciones Relevantes	53
Tabla 4.2 Especificaciones Relevantes	55
Tabla 4.3 Especificaciones del banco de capacitores y SC	56
Tabla 4.4 Componentes del circuito de control.....	59
Tabla 4.5 Especificaciones de la batería	60
Tabla 4.6 Especificaciones del diodo	61
Tabla 4.7 Especificaciones de los cables.	61
Tabla 4.8 Especificaciones de los cables.	62
Tabla 4.9 Componentes del sistema.	62
Tabla 4.10 Comparación Sistema Actual y Propuesto	63
Tabla 5.1 Descripción de parámetros en la dinámica de corriente.....	67
Tabla 5.2 Elementos a utilizar en el sistema híbrido.....	68
Tabla 5.3 Parámetros seteados hacia el emulador de carga	74
Tabla 5.4 Instrucciones para la dinámica de corriente propuesta	75
Tabla 5.5 Comparativa de resultados simulados	78

Lista de Figuras

Fig. 2.1 Diagrama de Ragone. Tomado de [21].	36
Fig. 2.2 Curvas de corriente y voltaje en la batería (Nissan Qashqai 2011).	38
Fig. 2.3 Curva de corriente seleccionada para la integración numérica (Trapz) en la batería.	39
Fig. 2.4 Potencia instantánea en la ventana de tiempo de la batería.	40
Fig. 3.1 Simulación de sistema de arranque.	45
Fig. 3.2 Código del bloque fnc	45
Fig. 3.3 Simulación parte de control (Flag).	46
Fig. 3.4 Código del Flag.	47
Fig. 3.5 Curvas de corriente de la batería (I_{bat}), del supercapacitor (I_{cap}) y de la combinación batería con supercapacitor ($I_{bat}+I_{cap}$).	49
Fig. 4.1 Diagrama circuito de control	51
Fig. 4.2 Transistor TIP120. Tomado de [25].	52
Fig. 4.3 Diodo 1N4007. Tomado de [26].	54
Fig. 4.4 Relé GIGAVAC GX26AB	54
Fig. 4.5 Batería Auxiliar de 12[V]	60
Fig. 5.1 Condensador DC de 2200 [μF].	69
Fig. 5.2 Condensador DC de 1000 [μF].	69
Fig. 5.3 Banco de condensadores DC de 26.800 [μF].	69
Fig. 5.4 Supercapacitor DC de 165 [F].	70
Fig. 5.5 Diagrama de flujo del sistema.	72
Fig. 5.6 Código implementado para ejecutar dinámica en la carga.	73
Fig. 5.7 Curvas de corriente en la carga, fuente y capacitor en la simulación.	76
Fig. 5.8 Curvas de corriente en la carga, fuente y capacitor en la simulación.	77
Fig. 5.9 a) Fuente de Carga 63706 b) Fuente DC 62120D.	79
Fig. 5.10 Computador para procesar los datos e imperix.	80
Fig. 5.11 Setup híbrido SC, batería y carga.	81
Fig. 5.12 Perfil de corriente.	82
Fig. 5.13 Perfil de corriente, voltaje y potencia instantánea de la fuente DC.	83
Fig. 5.14 Grafica de la energía acumulada en la fuente DC.	84
Fig. 5.15 Grafica de las corrientes en la fuente, carga y capacitor.	85
Fig. 5.16 Grafica de los voltajes en la fuente, carga y capacitor.	86
Fig. 5.17 Grafica de corriente, voltaje y potencia en el capacitor.	88
Fig. 5.18 Gráfica de energía acumulada.	89
Fig. 5.19 Curvas de corriente en la fuente, carga y capacitor.	90
Fig. 5.20 Curvas de Voltaje en la fuente, carga y capacitor.	91
Fig. 5.21 Grafica de corriente, voltaje y potencia instantánea en el SC enfocada en el peak.	93
Fig. 5.22 Grafica de corriente, voltaje y potencia instantánea en el SC enfocada en la señal completa.	94
Fig. 5.23 Gráfica de energía acumulada en el peak.	95
Fig. 5.24 Gráfica de energía acumulada en la señal completa.	96
Fig. 5.25 Gráfica de dinámicas de corrientes en simulación.	97
Fig. 5.26 Gráfica de dinámicas de corrientes experimentales.	98
Fig. 5.27 Gráfica de dinámicas de corrientes de la simulación.	99
Fig. 5.28 Gráfica de dinámicas de corrientes experimentales.	99

Abreviaciones

Mayúsculas

S.C.	: Supercapacitor.
E.S.R.	: Resistencia Equivalente en Serie.
E.D.L.C.	: Condensador de Doble Capa Eléctrica.
E	: Energía total.
V	: Voltaje
C	: Capacitancia.
DC	: Corriente Continua
SoC	: Estado de Carga.
SoH	: Estado de Salud.
Fcn	: Función
B.M.S.	: Sistema de Gestión de Baterías (Battery Management System).
E.M.S.	: Sistema de Gestión de Energía (Energy Management System).
E.C.U.	: Unidad de Control Electrónico (Electronic Control Unit).

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción General

La electrónica de potencia ha sido un habilitador central de la modernización de los sistemas eléctricos por su capacidad para convertir, controlar y acondicionar energía. Es la base de la integración masiva de fuentes renovables, la electromovilidad y la automatización industrial, contribuyendo a metas de eficiencia y descarbonización. Diversas revisiones y reportes de referencia subrayan que los convertidores de potencia de alta eficiencia y confiabilidad constituyen la tecnología clave que enlaza generación distribuida, almacenamiento y cargas en redes modernas [27], [28].

En el ámbito vehicular, uno de los retos prácticos es la fiabilidad del arranque, la batería de 12 [V] enfrenta peaks de corriente que aceleran su degradación eléctrica y térmica. La exigencia del arranque se estandariza mediante especificaciones basadas en SAE J537, una batería debe suministrar la corriente nominal durante 30 [s] a -18 [°C] sin caer por debajo de 7,2 [V], lo que cuantifica la aptitud de arranque en frío y explica el estrés asociado a estas maniobras [29]. Tras el encendido, el sistema de carga eleva el nivel del enlace DC hacia aproximadamente 14–14,5 [V] para recargar la batería y abastecer cargas auxiliares, coherente con los rangos de regulación de reguladores modernos para alternadores de 12 [V] [30], [31].

Para confrontar esta exigencia transitoria, los supercapacitores (SC) despuntan por su alta densidad de potencia, baja ESR y larga vida en ciclos, pudiendo entregar/absorber grandes corrientes en milisegundos. Su almacenamiento se basa en doble capa eléctrica (EDLC) y/o pseudocapacitancia, combinación que explica su elevada potencia específica y su complementariedad con baterías [32],[33],[34].

En una arquitectura híbrida batería-SC, la batería aporta la energía sostenida mientras el SC cubre la potencia instantánea, mitigando peaks de corriente, reduciendo la caída de voltaje y mitigando el estrés de la batería durante eventos de alta demanda (como el arranque). La evidencia en revisiones recientes respalda que esta complementariedad mejora el desempeño transitorio y la durabilidad del conjunto en aplicaciones vehiculares y de transporte [35].

En este contexto, el presente proyecto de título propone diseñar, modelar, ensamblar y validar experimentalmente un sistema de arranque híbrido basado en SCs que, conectados en paralelo a la batería de 12 [V], satisfaga la demanda de corriente durante el encendido sin someter a la batería a peaks dañinos.

1.2. Directriz de Búsqueda

Previo a la revisión bibliográfica se realizó una búsqueda sistemática en IEEE Xplore, IET Digital Library, MDPI (Energies) y repositorios como Wiley/Elsevier, enfocada en los últimos 10-15 años e incluyendo estudios referenciales de base que fundamentos técnicos relevantes para la comprensión del estado del arte. Se emplearon combinaciones de palabras clave en inglés y español como battery supercapacitor hybrid, ultracapacitor start-up, forklift, cold start, bidirectional DC/DC, merging control, ESR degradation, industrial/mining vehicles. A su vez, como criterios de inclusión, se priorizaron estudios con aplicación vehicular (arranque, tracción o ciclos normalizados industriales), validación experimental o simulación de alta fidelidad (Matlab/Simulink) con métricas cuantitativas (corriente peak/RMS, ΔV , energía, tiempo de sostén), análisis de gestión energética (topologías semi-activas/activas, DC/DC bidireccional, control predictivo o “merging”). Se excluyeron trabajos puramente estacionarios (red) o sin resultados cuantificables, dado que, permitió integrar evidencia en arranque en frío, dimensionamiento óptimo batería–SC, topologías DC y control avanzado orientado a extender vida útil de la batería y estabilizar el bus DC, que se reflejan en el apartado 1.3 de esta revisión.

1.3. Trabajos Previos

1.3.1 Characterization of Supercapacitor based on using conditions impacts evaluation on cell resistance and capacitance

- ♣ K. Bellache, M. B. Camara and B. Dakyo, "Characterization of supercapacitor based on using conditions impacts evaluation on cell resistance and capacitance," *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 2004-2009 [1].

El artículo presentado estudia cómo los parámetros de los SC, específicamente la resistencia en serie (ESR) y la capacitancia, varían en función de diferentes condiciones de uso, incluyendo el estado de carga (SOC), la cantidad de ciclos, la frecuencia de la corriente continua y la temperatura. Se realizaron pruebas experimentales utilizando perfiles de corriente continua fluctuante y constante para analizar el impacto de estas condiciones sobre los SC, los resultados indican que tanto la resistencia en serie como la capacitancia, experimentan cambios significativos en función del número

de ciclos y la frecuencia de la corriente, observándose un aumento en la ESR y una disminución en la capacitancia con el envejecimiento del dispositivo.

1.3.2 Combination of Parallel Connected Supercapacitor & Battery for Enhancing Battery Life

- ♣ L. M. Bopche, A. A. Deosant and M. Ahmad, "Combination of parallel connected supercapacitor & battery for enhancing battery life," *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, Pune, India, 2016, pp. 77-82 [2].

El artículo presenta un sistema en el que un motor de corriente continua (DC) es arrancado, utilizando una combinación en paralelo de un SC y una batería, con el objetivo de prolongar la vida útil de la batería. El SC suministra energía durante los periodos de mayor demanda, como el arranque o las sobrecargas. Sin embargo, cuando la demanda de energía es alta y sostenida, la reducción del voltaje terminal del supercapacitor disminuye la potencia suministrada. Para mitigar esto, se propone añadir otro capacitor en paralelo para aumentar la corriente efectiva y mejorar la potencia suministrada. El sistema es simulado en MATLAB y se realiza una verificación experimental utilizando un pequeño motor DC. Los resultados indican que la combinación propuesta mejora la respuesta dinámica y reduce la degradación de la batería al compartir la corriente de carga máxima con el supercapacitor, logrando una transferencia de energía más rápida y eficiente.

1.3.3 Battery Management for Hybrid Electric Vehicles using Supercapacitors as a Supplementary Energy Storage System

- ♣ N. K. Medora and A. Kusko, "Battery management for hybrid electric vehicles using supercapacitors as a supplementary energy storage system," *Intelec 2012*, Scottsdale, AZ, USA, pp. 1-8, 2012 [3].

El artículo aborda la gestión de baterías en vehículos eléctricos híbridos, utilizando supercapacitores como sistema de almacenamiento de energía complementario. La inclusión de supercapacitores mejora la capacidad de entrega de energía del sistema y extiende la vida útil de la batería, al asumir las demandas de corriente de peak durante aceleraciones y desaceleraciones. El

estudio incluye simulaciones que comparan el rendimiento del sistema con y sin supercapacitores, mostrando mejoras en la corriente del motor, el par generado y la vida útil de la batería. Los resultados sugieren que el uso de supercapacitores en sistemas híbridos no solo incrementa la eficiencia energética, sino que también reduce los costos de reemplazo de baterías al prolongar su vida operativa.

1.3.4 Improvement of engine cold start capability using supercapacitor and lead-acid battery hybrid

- ♣ Hanmin Liu, Zhixin Wang, Shutong Qiao and Yunhai Liu, "Improvement of engine cold start capability using supercapacitor and lead-acid battery hybrid," *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, TX, USA, 2008, pp. 668-675 [4].

El artículo presenta un sistema híbrido de supercapacitor y batería de plomo-ácido para mejorar la capacidad de arranque en frío de motores diésel. El supercapacitor proporciona la energía transitoria necesaria durante el arranque en bajas temperaturas, reduciendo la resistencia interna y mejorando la fiabilidad. Se realizaron pruebas de laboratorio y en carretera, comprobando que el sistema híbrido es eficaz y económico, con más de 5.000 unidades instaladas en vehículos comerciales desde 2006. El estudio destaca la importancia de la resistencia serie efectiva del sistema en el rendimiento del arranque en frío.

1.3.5 Modeling the Performance of the Supercapacitor Battery for Car Start-up

- ♣ B. V. Malozvov, A. V. Myatezh and M. A. Smirnov, "Modeling the Performance of the Supercapacitor Battery for Car Start-Up," *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 271-274 [5].

Este trabajo se centra en la modelización del rendimiento de un sistema de arranque de motor basado en SCs para automóviles. Se presentan diferentes tecnologías de SCs y sus aplicaciones en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos, comparando la eficiencia energética y los costos, donde se propone el uso de un circuito convertidor de un solo ciclo para elevar la tensión de los SCs

y alimentar el sistema de arranque del motor de combustión interna. Los resultados de simulación indican que este sistema permite un arranque eficiente al suministrar energía rápidamente y recargarlos una vez completado el arranque.

1.3.6 Simulation and Modeling of Charging and Discharging of Supercapacitors

- ♣ S. Dinglasan Fenol, F. S. Caluyo and J. L. Lorenzo, "Simulation and modeling of charging and discharging of supercapacitors," *2017 International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCSS)*, London, UK, 2017, pp. 14-17 [6].

Este estudio se enfoca en la simulación y modelado del proceso de carga y descarga de SCs, comparando modelos matemáticos con experimentos realizados mediante un potencióstato. Se utilizaron dos SCs comerciales de 3.3[F] y 4.7[F], ambos con un voltaje nominal de 2.5[V]. Los resultados muestran que, para obtener un modelo preciso, es crucial considerar la corriente de fuga y la resistencia en el circuito. Las simulaciones de carga y descarga a corriente constante presentaron una alta precisión respecto a los experimentos, lo que valida el enfoque propuesto para modelar el comportamiento de los supercapacitores.

1.3.7 Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art

- ♣ A. Khaligh and Z. Li, "Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806-2814, July 2010 [7].

Este estudio ofrece una revisión exhaustiva del estado del arte en sistemas de almacenamiento de energía para vehículos eléctricos e híbridos. Se destaca el uso de baterías, ultracapacitores y celdas de combustible, así como la implementación de sistemas híbridos que combinan estas tecnologías para mejorar el rendimiento vehicular. Se analizan detalladamente las características de cada tecnología, incluyendo densidad de energía, densidad de potencia, vida útil y costos asociados. Además, se presentan diversas topologías híbridas diseñadas para maximizar la eficiencia del almacenamiento energético y aumentar la autonomía de los vehículos eléctricos e híbridos enchufables. Esto se logra

mediante la integración de tecnologías avanzadas de conversión de energía que optimizan el flujo energético y mejoran la recuperación de energía durante el frenado regenerativo.

1.3.8 Modeling, Identification and Simulation of Hybrid Battery/Supercapacitor Storage System Used in Vehicular Applications

- ♣ G. Yasser, P. Théophile, M. Tedjani and D. Sylvain, "Modeling, Identification and Simulation of Hybrid Battery/Supercapacitor Storage System Used in Vehicular Applications," *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, Bali, Indonesia, 2019, pp. 156-162 [8].

Este artículo presenta una revisión exhaustiva de los SCs, abarcando desde sus características eléctricas y mecanismos de almacenamiento de energía hasta las técnicas de modelado y sus aplicaciones prácticas. Se examina cómo estas tecnologías están ganando protagonismo en sectores como los vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento de energía en red, gracias a su alta densidad de potencia y larga vida útil. Además, se analizan los enfoques de modelado más utilizados para representar el comportamiento eléctrico de los SCs y se destacan las últimas tendencias en investigación para mejorar el rendimiento de estos dispositivos. También se exploran las oportunidades futuras y los desafíos que enfrenta el mercado, enfatizando la importancia de desarrollar nuevos materiales y modelos más precisos para optimizar su integración en aplicaciones energéticas a gran escala.

1.3.9 Descripción de sistema de carga de baterías de automóvil

- ♣ D. Marín, "Description of automotive battery charging system," *Proyecto de Iniciación en Ingeniería Eléctrica (PIIE)*, Concepción, Chile, 2023 [9].

Este estudio analiza la dinámica de corriente y voltaje en sistemas de arranque de vehículos, centrándose en modelos como el Ford EcoSport Titanium y el Nissan Qashqai 2011. Utilizando herramientas de medición y procesamiento de datos, se investigaron las características de las señales durante el proceso de arranque, destacando los peaks de corriente y las caídas de voltaje asociadas. Los resultados muestran diferencias significativas en las demandas energéticas de los vehículos analizados, con peaks de corriente que varían entre 613 [A] y 728 [A]. Además, el trabajo explora la posibilidad de sustituir o complementar las baterías convencionales con supercondensadores,

calculando que una capacitancia de aproximadamente 13 [F] sería suficiente para cubrir las demandas energéticas del arranque.

1.3.10 Application of a Bidirectional DC/DC Converter to Control the Power Distribution in the Battery–Ultracapacitor System

- ♣ A. Chmielewski, P. Piórkowski, K. Bogdziński, and J. Możaryn, “Application of a bidirectional DC/DC converter to control the power distribution in the battery–ultracapacitor system,” *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3687, Apr. 2023 [10].

Este estudio examina la integración de baterías y ultracapacitores en paralelo como estrategia de almacenamiento híbrido de energía en aplicaciones de transporte y arranque vehicular, con el objetivo de superar las limitaciones inherentes de cada tecnología. Las baterías, aunque ofrecen alta densidad energética, presentan restricciones en la entrega de potencia instantánea y sufren degradación acelerada ante peaks de corriente, mientras que los ultracapacitores proporcionan alta densidad de potencia, pero baja capacidad de energía. El trabajo desarrolla un modelo de simulación para evaluar el comportamiento conjunto bajo diferentes escenarios de operación, incluyendo condiciones de arranque en frío, estado de carga reducido de la batería y demandas pulsantes, demostrando que la incorporación de ultracapacitores permite suministrar la corriente necesaria para iniciar el motor aun cuando la batería se encuentra parcialmente descargada, estabilizando el voltaje del sistema y reduciendo el estrés electroquímico en la batería. Asimismo, se identifican desafíos prácticos asociados a la autodescarga de los ultracapacitores, proponiendo estrategias de mitigación mediante cargas de goteo o integración con fuentes auxiliares renovables. En conclusión, se confirma que la arquitectura híbrida batería–ultracapacitor no solo incrementa la fiabilidad del arranque y la eficiencia energética global, sino que también prolonga la vida útil de la batería y resulta escalable a distintas aplicaciones de movilidad eléctrica.

1.3.11 Integration of Battery and Super-Capacitor banks into a Single-Power System for a Hybrid Electric Vehicle

- ♣ W. A. Bisschoff, O. Dobshanskyi and R. Gouws, "Integration of battery and super-capacitor

banks into a single-power system for a hybrid electric vehicle," *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 10-13 [11].

Este estudio presenta la integración de bancos de batería y supercapacitores en un único sistema de potencia para un vehículo eléctrico orientado a operaciones mineras e industriales, con el propósito de combinar la entrega sostenida de energía de la batería con ráfagas de alta potencia de los SC y evaluar su desempeño en terreno agreste. El diseño emplea seis supercapacitores de 2.7 [V] - 3000 [F] conectados en serie en conjunto con una batería Li-Po de 14.8 [V] - 4 [Ah], dentro de una arquitectura de gestión en lazo cerrado que conmutaba la fuente según la demanda (control de tracción con puente H, ESC y enlace radio) y fue ensayada en pistas de ripio con variaciones de carga e inclinación. Además, los autores recomiendan un motor de mayor torque (≈ 1.12 [Nm]/500 [W]) y ampliar la capacidad de SC, aunque advierten que el costo de escalar el banco puede ser menos atractivo. Finalmente, el trabajo subraya consideraciones de seguridad (cortocircuitos de SC por encima de 9000 [A]) y valida que la batería-SC mejora la respuesta del vehículo en escenarios de alta exigencia, siempre que el dimensionamiento y la estrategia de conmutación se ajusten al perfil de carga real.

1.3.12 Influence of Battery/Ultracapacitor Energy-Storage Sizing on Battery Lifetime in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle

- ♣ E. Schaltz, A. Khaligh and P. O. Rasmussen, "Influence of Battery/Ultracapacitor Energy-Storage Sizing on Battery Lifetime in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3882-3891, Oct. 2009 [12].

Este estudio investiga el efecto del dimensionamiento de baterías y ultracapacitores en vehículos eléctricos híbridos basados en celda de combustible (FCHEV), considerando la influencia directa en la vida útil de la batería. El trabajo parte de un vehículo eléctrico de baja velocidad originalmente alimentado por un paquete de baterías de plomo-ácido de 6.5 [kWh] y lo convierte en un FCHEV, incorporando un stack de celda de combustible y un sistema híbrido de almacenamiento. Para analizar su comportamiento, se obtuvieron 24 días de datos reales de operación con un registrador de campo, generando ciclos de conducción representativos. El modelo matemático desarrollado

incluyó la dinámica de motores, inversores, convertidores DC/DC, batería y ultracapacitores, implementando dos estrategias de gestión energética. En la primera estrategia, los ultracapacitores actúan como un filtro de alta frecuencia para absorber peaks rápidos de potencia, y en la segunda se comportan como fuente de energía principal en paralelo con la batería, reduciendo significativamente su profundidad de descarga. Los resultados muestran que sobredimensionar la batería hasta un factor de 3-5 puede aumentar la vida útil teórica en más de 200-300 %, aunque con el costo de duplicar o triplicar el volumen y masa del sistema, mientras que sobredimensionar los ultracapacitores más allá de un factor 2 no resulta eficiente, pues el beneficio en la vida útil de la batería es menor en relación al incremento de volumen y costo.

1.3.13 Sizing of Lithium-Ion Battery/Supercapacitor Hybrid Energy Storage System for Forklift Vehicle

- ♣ T. Paul, T. Mesbahi, S. Durand, D. Flieller, and W. Uhring, “Sizing of lithium-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system for forklift vehicle,” *Energies*, vol. 13, no. 17, p. 4518, Sep. 2020 [13].

Este estudio se centra en el dimensionamiento de un sistema híbrido de almacenamiento de energía compuesto por baterías de ion-litio y supercapacitores para vehículos industriales, específicamente montacargas eléctricos, considerando la dinámica operativa bajo el ciclo de conducción estandarizado VDI 60. La metodología adopta una arquitectura semi-activa donde los supercapacitores se conectan mediante un convertidor DC/DC bidireccional, lo que permite aprovechar su alta densidad de potencia como buffer frente a peaks de corriente, mientras que la batería de ion-litio aporta la energía de fondo gracias a su mayor densidad energética. Se establecieron ecuaciones dinámicas para modelar tanto la tracción como las operaciones de izado y descenso de cargas, y se aplicó un algoritmo de dimensionamiento implementado en Matlab/Simulink para estimar el número de celdas necesarias de batería y supercapacitor, así como el impacto en peso, volumen y pérdidas internas. Las simulaciones mostraron que los montacargas requieren potencias de hasta 12 [kW] en tracción y 6 [kW] en elevación, valores que exceden la capacidad de una batería simple, justificando la hibridación. Los resultados indicaron que con la combinación adecuada (por ejemplo, baterías de alta energía Kokam 75 [Ah] junto a supercapacitores Maxwell BCAP3400), el sistema

híbrido puede mantener la misma capacidad operativa de 7 horas con un peso comparable al de una sola fuente, pero reduciendo hasta en un 10% la potencia RMS demandada a la batería, lo que se traduce en menor degradación y mayor vida útil. Además, se comprobó que la estrategia de gestión energética es esencial, ya que, al limitar la potencia de la batería entre 6 [kW] y delegar los peaks a los SC, se maximiza la eficiencia y se reducen los riesgos de envejecimiento térmico. Aunque el costo inicial es mayor respecto a las baterías de plomo-ácido tradicionales, el estudio concluye que el híbrido batería-SC ofrece una solución más eficiente, con menor tiempo de recarga, mejor recuperación de energía en frenado y mayor sostenibilidad económica a largo plazo en aplicaciones logísticas industriales

1.3.14 Hybrid battery–supercapacitor system for full electric forklifts

- ♣ F. Castelli Dezza, V. Musolino, L. Piegari, and R. Rizzo, “Hybrid battery–supercapacitor system for full electric forklifts,” *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 9, no. 1, pp. 16–23, Mar. 2019 [14].

Este estudio aborda el diseño, modelado y validación experimental de un sistema híbrido batería–supercapacitor aplicado a montacargas eléctricos, con el objetivo de mejorar la eficiencia energética y extender la vida útil de las baterías de plomo-ácido. Se analizan dos topologías, una conexión directa en paralelo entre ambos dispositivos y una configuración mediada por un convertidor DC/DC elevador. En la primera, se demuestra que el acoplamiento directo simplifica la implementación y permite la autorecarga de los supercapacitores, pero limita la energía aprovechable debido a la baja variación de voltaje del conjunto batería-SC. Los resultados experimentales en un montacargas de 48 [V] - 400 [Ah] muestran que la adición del módulo de SC reduce la corriente RMS de la batería de 118 [A] a 99.8 [A] y la variación de voltaje de 12.9 [V] a 8.8 [V], evidenciando un efecto de peak shaving y una mejora en la estabilidad del bus. No obstante, esta configuración no incrementa la autonomía del vehículo. En la segunda topología, el uso del convertidor DC/DC permite desacoplar el voltaje de los SC, ampliando su rango de operación (45-30 [V]) y elevando su contribución energética; se propone además una estrategia de control basada en realimentación proporcional-integral que ajusta dinámicamente el voltaje de referencia del convertidor según el voltaje de los SC, garantizando su autorecarga y optimizando la entrega de potencia durante las demandas transitorias. Las pruebas en condiciones reales de trabajo (ciclos de 4 h con cargas de 200

kg) evidenciaron una reducción del 30 % en la descarga de la batería, un incremento en el voltaje mínimo durante el ciclo y una mejora general en el rendimiento del montacargas. En conjunto, los autores concluyen que la integración controlada de SCs mediante convertidores dedicados ofrece ventajas significativas frente al acoplamiento directo, al mejorar la respuesta dinámica, reducir el desgaste electroquímico de la batería y aumentar el alcance operativo del sistema.

1.3.15 Merging Control of a Hybrid Energy Storage System using Battery/Supercapacitor for Electric Vehicle Application

- ♣ B. -H. Nguyễn, R. German, J. P. Trovão and A. Bouscayrol, "Merging control of a hybrid energy storage system using battery/supercapacitor for electric vehicle application," *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Lyon, France, 2018, pp. 2066-2071 [15].

Este estudio propone un control “merging” para un sistema híbrido batería–supercapacitor (H-ESS) en vehículos eléctricos, integrando explícitamente la regulación de voltaje del SC al nivel de control (y no solo en el EMS) con el fin de suavizar la corriente de batería y, simultáneamente, planificar la energía almacenada en el SC según la velocidad del vehículo. La metodología se basa en la inversión de la Energetic Macroscopic Representation (EMR) para deducir y luego fusionar dos lazos, en primer lugar se tiene un lazo que genera la referencia de corriente de batería mediante un filtro pasa-bajos orientado al envejecimiento (diagrama de Ragone) y en segundo lugar, un lazo cerrado de tensión del SC con controlador proporcional cuya referencia sigue una condición, voltaje alto a baja velocidad (preparado para acelerar) y voltaje bajo a alta velocidad (preparado para regenerar). Ambas referencias se combinan a través de un factor de ponderación que prioriza la protección de la batería sin descuidar la disponibilidad energética del SC. La validación en Matlab/Simulink usa un EV Tazzari Zero adaptado (1200 [s] en lugar urbano y autopista), demostrando que el esquema mantiene la referencia del SC dentro de límites, mitiga el uso de la corriente de la batería en el espacio urbano (< 50 [A]) y, en autopista, reduce dos peaks de corriente de batería en aproximadamente un 30% respecto del control clásico. Además, durante frenado desde el voltaje máximo el SC absorbe de inmediato la energía regenerativa y la batería reduce su corriente de forma suave.

1.3.16 Discusión

La revisión bibliográfica realizada sobre el uso de supercondensadores y partidores de batería en sistemas de arranque vehicular evidencia que los enfoques actuales han destacado por la capacidad de los supercondensadores para proporcionar grandes peaks de corriente, lo que alivia la carga inicial sobre la batería y mejora la eficiencia del sistema [1], [4], [10]. Sin embargo, se han identificado algunas limitaciones importantes. En primer lugar, la mayoría de los estudios se han enfocado en aplicaciones con supercondensadores de menor capacidad o han utilizado estrategias de control simplificadas que no permiten una desconexión óptima del supercondensador en condiciones específicas de operación [1], [2], [4]. Esta falta de precisión en los modelos de control puede llevar a ineficiencias, como la descarga prematura del supercondensador o un uso excesivo de la batería, afectando la vida útil de ambos componentes [2], [3].

En este proyecto se aborda la implementación de un sistema de control que permite la desconexión automática del supercondensador cuando su corriente cae por debajo de un valor umbral, lo que optimiza su utilización durante el arranque. Las simulaciones emplean un banco de capacitores de 26.8 [mF] y un supercondensador de 165 [F], lo que abarca un rango de capacidades similar al utilizado en estudios previos. La selección de esta capacitancia se basó en cálculos derivados de mediciones experimentales obtenidas durante el Proyecto de Iniciación en Ingeniería Eléctrica [9].

Además, estudios previos analizaron celdas de 3000 [F] a nivel de laboratorio, pero orientadas a evaluar el impacto de la resistencia serie equivalente (ESR) bajo distintas condiciones de temperatura y frecuencia [1]. Adicionalmente, se implementaron sistemas con SCs de 3.3 [F] en paralelo con baterías, con el fin de mejorar el rendimiento durante arranques y sobrecargas, destacando la necesidad de múltiples SCs para alcanzar las corrientes requeridas en aplicaciones dinámicas [2]. También se han desarrollado configuraciones híbridas en vehículos eléctricos e industriales que combinan baterías de ion-litio con supercapacitores, bajo ciclos estandarizados como VDI 60, demostrando que la topología híbrida reduce la potencia RMS exigida a la batería y mejora la eficiencia energética sin aumentar significativamente el peso o el volumen del sistema [13], [14].

Por otra parte, se han utilizado SCs acuosos en sistemas de arranque híbridos tradicionales para vehículos comerciales sometidos a condiciones de baja temperatura, verificando su efectividad en el arranque en frío [4]. Sin embargo, estas aplicaciones no exploran completamente el potencial de sistemas con mayores capacidades, como los 165 [F] empleados en este proyecto, los cuales permiten un soporte energético prolongado y estable durante el arranque, particularmente en escenarios de alta demanda [10], [11].

En la última década, se ha demostrado que la integración de baterías y supercapacitores mediante convertidores DC/DC bidireccionales posibilita un control más eficiente del flujo de potencia, regulando la tensión del SC y asegurando su recarga durante los periodos de baja demanda [5], [14]. Este enfoque no solo amplía la ventana útil de energía del supercondensador, sino que también reduce la corriente RMS de la batería y mejora la estabilidad del bus DC, validándose experimentalmente en montacargas eléctricos [14]. Además, estudios recientes han incorporado técnicas de control avanzadas, como el merging control, que combinan la gestión de corriente de la batería con la regulación activa de la tensión del SC, logrando reducir los peaks de corriente en más de un 30% y equilibrando el uso energético entre ambos elementos [15].

En este contexto, el presente proyecto se alinea con dicha tendencia al proponer un sistema de control sencillo pero efectivo, que permite una desconexión controlada del SC mediante un umbral de corriente, evitando su descarga innecesaria y asegurando que opere dentro de su rango óptimo. De esta forma, se consigue una sinergia operativa entre batería y supercondensador que no solo mejora la estabilidad energética inicial del sistema, sino que también prolonga la vida útil de ambos dispositivos. Los resultados experimentales y de simulación confirman la eficacia del enfoque propuesto, abriendo paso a futuras mejoras mediante estrategias de control adaptativo o topologías activas con convertidores bidireccionales para una gestión energética más precisa [5], [14], [15].

1.4. Hipótesis de Trabajo

El sistema implementado junto supercondensador permitirá optimizar el proceso de arranque, reduciendo la demanda sobre la batería y mejorando la eficiencia energética del sistema, sin comprometer la vida útil de los componentes.

1.5. Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de arranque de vehículos en base a supercapacitores que permita conectar vehículos de tamaño mayor y que no genere grandes requerimientos a la batería auxiliar.

1.5.2 Objetivos Específicos

- Conocer tecnologías de supercapacitores.
- Caracterizar demanda de corriente de distintos vehículos para su dimensionamiento de equipos almacenadores de energía.
- Comprobar factibilidad técnica/económica del sistema propuesto.
- Validar mediante simulaciones soluciones propuestas.
- Ensamblar físicamente el sistema, lo que incluye diseñar la disposición de los componentes.

1.6. Alcances y Limitaciones

Este proyecto permitirá analizar el comportamiento de un sistema de arranque compuesto por un supercondensador y una batería en aplicaciones vehiculares, para ello, en la simulación se evaluará la contribución del supercondensador durante el proceso de arranque y su desconexión controlada. Así, los resultados servirán como base para futuras implementaciones en sistemas reales de arranque vehicular, proporcionando una referencia para mejorar la eficiencia energética y la vida útil de los componentes. El Setup será implementado en el Centro de Energía, conectado a la fuente de carga, y se utilizarán condensadores en paralelo para ir variando la capacitancia.

Estaba previsto incorporar, tanto en la simulación como en el banco de pruebas, un segundo módulo de supercondensador con una capacitancia y una ESR diferentes a las del LICAP SM0165-048-ATH. Sin embargo, el dispositivo no llegó dentro del plazo del proyecto, lo que impidió contrastar experimentalmente la respuesta del sistema para esa capacidad específica y verificar la validez del

modelo en un rango intermedio de almacenamiento. En consecuencia, las conclusiones extraídas se circunscriben a la capacidad finalmente disponible y deberán revisarse cuando se disponga del supercondensador faltante.

1.7. Temario y Metodología

El informe se estructura en siete capítulos que abarcan diferentes aspectos del estudio. El primero incluye una revisión bibliográfica detallada, junto con la presentación de los objetivos generales y específicos del proyecto. El segundo, se dedica a presentar el marco teórico necesario para comprender el contexto del tema, abordando los fundamentos de los sistemas de arranque vehiculares y los supercapacitores, así como su comparación con tecnologías tradicionales.

El tercero, se centra en la simulación del sistema de arranque vehicular, se detalla el proceso de obtención de las curvas de corriente y voltaje, utilizando el registrador de variables SEFRAM DAS 60. Se describe el procesamiento de datos en MATLAB, junto la determinación de la capacitancia del supercapacitor. Además, se presenta la simulación del sistema con el supercapacitor y la batería en paralelo, incluyendo los resultados obtenidos.

En el cuarto, se describe el diseño del circuito de control, destacando los componentes necesarios para gestionar de forma eficiente la conexión y desconexión del supercapacitor. Además, se explica el funcionamiento del circuito, incluyendo la integración de la señal TTL proveniente de la plataforma dSPACE, el papel del transistor TIP120, el relé, y el uso de diodos de protección para garantizar la integridad y seguridad del sistema.

El quinto, profundiza en la implementación física del sistema y la validación experimental. Se describen el banco de ensayo, la instrumentación empleada y la ruta de pruebas escalonada (fuente, fuente y banco de capacitores, fuente y SC). Asimismo, a lo largo de la sección se analizan las curvas de corriente, tensión y potencia obtenidas en laboratorio, comparándolas con los resultados de simulación e identificando las mejoras concretas que aporta cada topología.

El sexto, presenta las conclusiones del estudio, donde se sintetizan los hallazgos clave como la reducción de la corriente peak en la fuente, la disminución de la caída de tensión en el enlace DC y la energía efectivamente aportada por cada tipo de almacenamiento. Además, se confirma la hipótesis de que la incorporación del SC optimiza el arranque y mejora la distribución energética global sin comprometer la vida útil de los componentes. Finalmente, se proponen líneas de trabajo futuro, entre ellas, el escalado a corrientes superiores, la implementación de control activo de reparto de corriente

y la migración del sistema a 48 [V].

Capítulo 2. Marco Teórico

2.1. Introducción

Este capítulo tiene como objetivo proporcionar un marco teórico que contextualice el trabajo realizado y resalte su importancia en el ámbito de los sistemas de arranque vehicular. A través de una revisión de la literatura científica y de estudios relevantes sobre supercapacitores y sistemas de almacenamiento de energía, se abordarán los conceptos fundamentales necesarios para comprender el funcionamiento de los supercondensadores y su integración con las baterías. Además, se analizarán las estrategias de control utilizadas para optimizar la entrega de energía y la desconexión del supercondensador en condiciones específicas. Al final de este capítulo, se presentarán los principios operativos del sistema de control implementado y las características del supercondensador utilizado, estableciendo así las bases para el análisis del desempeño en las simulaciones realizadas.

2.2. Sistemas de arranque de vehículos

Los sistemas de arranque son componentes esenciales en los vehículos con motores de combustión interna. Su función principal es proporcionar la energía inicial necesaria para poner en marcha el motor, superando la resistencia mecánica y la compresión interna de los cilindros. Tradicionalmente, estos sistemas han utilizado baterías de plomo-ácido, motores de arranque eléctricos y un circuito de control descritos en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Elementos principales en el arranque de vehículo	
Elemento	Descripción
Batería de plomo-ácido	Actúa como fuente de energía eléctrica, suministrando la corriente necesaria al motor de arranque y a otros sistemas eléctricos del vehículo.
Motor de Arranque	Es un motor eléctrico de corriente continua que convierte la energía eléctrica de la batería en energía mecánica para girar el motor de combustión.
Circuito de Control	Incluye interruptores, relés y diodos que gestionan el flujo de corriente desde la batería hacia el motor de arranque.

Cuando el conductor gira la llave de encendido o presiona el botón de arranque, se cierra el circuito eléctrico que activa el solenoide de arranque. Este solenoide, a su vez, conecta la batería con el motor de arranque y engrana el piñón del motor de arranque con el volante de inercia del motor de combustión. El motor de arranque gira el cigüeñal, iniciando el movimiento de los pistones y permitiendo que el motor comience su ciclo de combustión autónomo.

2.3. Baterías de Arranque

Las baterías son la fuente primaria de energía en la red auxiliar de los vehículos a motor de combustión y su objetivo es entregar peaks de corrientes elevadas durante lapsos muy breves de tiempo para accionar el motor de arranque, y una vez el sistema de arranque se estabilice, el alternador asume la alimentación y de la recarga de la batería. Por diseño, están optimizadas para una mejor densidad de potencia con la capacidad de entregar potencia por unidad de masa [W/kg], por esto exhiben alto CCA (cold cranking amps o amperes de arranque en frío) y baja resistencia interna. En cambio, su densidad de energía [Wh/kg] es moderada, lo que explica que no están pensadas para repetidas descargas profundas, dado que, su papel es cubrir el peak de principal de arranque y no sostener energía prolongada.

En el uso vehicular de 12 [V], las variables más comunes son plomo-ácido inundada, EFB (Enhanced Flooded Battery) y AGM (Absorbent Glass Mat), donde en aplicaciones más exigentes se emplean EFB/AGM por su tolerancia a los ciclos y mayor aceptación de carga. En nichos específicos se utilizan las Li-ion por su baja resistencia y masa reducida, aunque requieren de gestión térmica y electrónica de protección. En las Tablas 2.2 – 2.3 se encuentra un resumen de las características de la batería y se debe considerar que la capacidad de las baterías se expresa en [Ah] que corresponde a la carga disponible a una tasa de descarga estandarizada, el CCA en [A] y la resistencia interna en [$m\Omega$].

Tabla 2.2 Parámetros de batería por tecnología

Tecnología	Voltaje nominal [V]	Resistencia interna [mΩ]	CCA [A]	Capacidad [Ah]
Plomo-Ácido inundada	12.0	6–10	300–600	45-80
EFB	12.0	4–7	450–700	60-80
AGM	12.0	3–5	550–900	75-95
Li-ion	12.0–12.8	1–3	600–1.200	65-100

Tabla 2.3 Ventajas, limitaciones y usos

Tecnología	Ventajas principales	Limitaciones / cuidados	Usos
Plomo-Ácido inundada	Coste bajo, amplia disponibilidad	Sensible a descargas profundas y vibración; requiere carga adecuada	Vehículos sin start-stop, condiciones estándar
EFB	Mejor aceptación de carga y vida en ciclado ligero que la inundada	Mayor masa; coste intermedio	Start-stop básico, uso urbano
AGM	Muy baja R, alta potencia, sellada, buen desempeño en frío	Coste mayor; exige cargadores compatibles	Start-stop avanzado, auxiliares exigentes
Li-ion	Muy baja R, alta potencia específica, baja masa	Requiere control BMS y térmico; mayor coste	Aplicaciones premium, competición, retrofit específico

2.4. Fundamentos de los supercapacitores

Los SCs, también conocidos como ultracapacitores o condensadores de doble capa eléctrica (EDLC, por sus siglas en inglés), son dispositivos de almacenamiento de energía que se sitúan entre los condensadores convencionales y las baterías electroquímicas en términos de densidad de energía y potencia [16]. Su capacidad para almacenar y entregar energía rápidamente los hace ideales para

aplicaciones que requieren ciclos frecuentes de carga y descarga, como en los sistemas de arranque de vehículos.

Doble Capa Eléctrica

El principio fundamental de los SCs se basa en la formación de una doble capa eléctrica en la interfaz electrodo-electrolito. Cuando se aplica un voltaje a los electrodos, se produce una redistribución de iones en el electrolito.

- Carga del Electrodo Positivo: Los iones negativos del electrolito se acumulan en la superficie del electrodo positivo.
- Carga del Electrodo Negativo: Los iones positivos se acumulan en la superficie del electrodo negativo.

Esta separación de cargas crea una capacitancia significativa debido al área superficial extremadamente alta de los electrodos porosos utilizados en los SCs.

Materiales de los Electrodos

Los electrodos desempeñan un papel fundamental en el desempeño de los SCs, ya que su material y estructura determinan la capacidad del dispositivo para almacenar carga eléctrica. Para maximizar la capacitancia, los electrodos están compuestos de materiales con una alta área superficial específica, lo que permite una mayor acumulación de iones en la interfaz electrodo-electrolito. Entre los materiales más utilizados se encuentra el carbón activado, que ofrece una estructura altamente porosa y, por ende, una superficie extensa para el almacenamiento de carga. Además, materiales avanzados como el grafeno y los nanotubos de carbono han cobrado importancia debido a sus excepcionales propiedades eléctricas y mecánicas [16]. Estos materiales proporcionan una conductividad eléctrica superior y una estructura nanométrica que aumenta significativamente el área superficial. La utilización de grafeno y nanotubos de carbono en los electrodos no solo incrementa la capacitancia, sino que también mejora la eficiencia energética y la densidad de potencia del SCs. Así, la elección de materiales avanzados para los electrodos es crucial para optimizar el rendimiento de los SCs en aplicaciones exigentes como los sistemas de arranque de vehículos.

2.5. Comparación con Capacitores Tradicionales y Baterías

Los SCs se distinguen notablemente de otros dispositivos de almacenamiento de energía, como los capacitores tradicionales y las baterías electroquímicas, debido a sus características únicas que combinan las ventajas de ambos sistemas. Por un lado, los capacitores tradicionales almacenan energía de forma electrostática entre dos placas conductoras separadas por un dieléctrico. Este mecanismo les permite tener una alta densidad de potencia, es decir, pueden entregar o absorber energía muy rápidamente. Sin embargo, poseen una baja densidad de energía, lo que limita la cantidad total de energía que pueden almacenar y, por ende, su utilidad en aplicaciones que requieren un suministro energético sostenido.

Por otro lado, las baterías electroquímicas almacenan energía a través de reacciones químicas reversibles que ocurren en sus electrodos. Estas reacciones les confieren una alta densidad de energía, permitiendo el almacenamiento de grandes cantidades de energía para un suministro prolongado. No obstante, presentan una menor densidad de potencia, lo que implica que la velocidad a la que pueden entregar o absorber energía es más lenta en comparación con los capacitores. Además, las baterías tienen una vida útil limitada debido a la degradación de los materiales activos y a la disminución de su capacidad con cada ciclo de carga y descarga.

Los SCs integran características de ambos dispositivos, ofreciendo una densidad de energía intermedia y una alta densidad de potencia, almacenando más energía que los capacitores tradicionales y entregándola o absorbiéndola casi tan rápidamente, acercándose al rendimiento de los capacitores en términos de potencia. Adicionalmente, los SCs cuentan con una vida útil prolongada, soportando cientos de miles a millones de ciclos de carga y descarga sin pérdida significativa de rendimiento. Esta combinación única de alta densidad de potencia, buena densidad de energía y durabilidad excepcional los hace muy importantes para aplicaciones como los sistemas de arranque de vehículos, donde se requiere una entrega rápida de energía y una capacidad de almacenamiento suficiente para soportar múltiples arranques sin degradación significativa.

2.6. Mecanismos de Almacenamiento de Energía

Existen principalmente tres mecanismos a través de los cuales los supercapacitores almacenan energía:

Capacitancia de Doble Capa Eléctrica (EDLC)

En este modo, la energía se almacena mediante la adsorción electrostática de iones en la interfaz entre un electrodo poroso (generalmente carbono activado, grafeno o nano fibras de carbono) y el electrolito. Además, no ocurren reacciones faradaicas, de modo que los portadores de carga no atraviesan la barrera de potencial, sino que se ordenan formando dos capas paralelas, una de iones en el electrolito y otra de cargas opuestas en la superficie del electrodo. También, la ausencia de procesos químicos confiere al dispositivo una vida útil que supera el millón de ciclos y una potencia específica superior a 10 [kW/kg], limitada sólo por la resistencia interna y la difusión iónica en los poros [22]. Sin embargo, la separación efectiva de cargas es del orden de unos nanómetros, lo que restringe la densidad de energía. Para incrementarla, las líneas de investigación actuales se centran en ampliar la ventana de voltaje (electrolitos orgánicos e iones sólidos) y optimizar la arquitectura de poros.

Capacitancia Pseudocapacitiva

A diferencia de la doble capa puramente electrostática, la pseudocapacitancia surge cuando el electrodo participa en reacciones faradaicas superficiales de cinética rápida como redox, adsorción específica de iones o intercalación poco profunda, típicas de óxidos de metales de transición como por ejemplo MnO_2 , RuO_2 y polímeros conductores. Así, estas reacciones aportan una “capacitancia química” que eleva la densidad de energía respecto de un EDLC, situándola habitualmente en el rango 10–50 [Wh/kg] (dependiendo del material y la arquitectura), a costa de una menor densidad de potencia efectiva por limitaciones de transporte iónico y cinética de carga/descarga. En términos dinámicos, el tiempo característico se incrementa frente a un EDLC, la respuesta que en un capacitor de doble capa puede extenderse a decenas de kHz se reduce, en configuraciones pseudocapacitivas prácticas, a decenas o cientos de Hz, lo que implica más energía utilizable en el entorno 1–100 [Hz] (útil para arranques y eventos regenerativos breves) pero con bandwidth menor. Asimismo, el $R_{equivalente}$ percibido puede ser mayor por efectos difusivos y de transferencia de carga, y la vida útil se sitúa típicamente por debajo de la de un EDLC, en el orden de 10^4 – 10^5 ciclos en polímeros conductores y hasta 10^5 – 10^6 en ciertos óxidos optimizados, según formulación y ventana de

operación [17].

Supercapacitores Híbridos

Los dispositivos híbridos buscan un equilibrio entre la gran potencia de la EDLC y la mayor energía de la pseudocapacitancia y se diseñan combinando un electrodo tipo batería con otro puramente capacitivo o integrando materiales mixtos en un mismo electrodo. Ejemplos destacados incluyen los híbridos zinc-ion, litio-ion o los basados en óxidos de V, Ni o Co anclados sobre grafeno poroso, en estas arquitecturas es habitual alcanzar $30 - 80 [Wh/kg]$ con potencias sostenidas y ciclos de vida que superan las 50.000 cargas-descargas [23]. Aunque, los desafíos pendientes se relacionan con la estabilidad de los electrodos desbalanceados, la gestión térmica cuando se opera a altas potencias y el desarrollo de electrolitos de amplio margen electroquímico que mantengan baja viscosidad y alta conductividad a temperatura ambiente.

2.7. Parámetros Clave de los Supercapacitores

Para comprender el desempeño y las aplicaciones de los supercapacitores, es esencial analizar sus parámetros fundamentales:

2.7.1 Capacitancia (C)

Es una medida de la capacidad del supercapacitor para almacenar carga eléctrica, expresada en faradios (F). La capacitancia depende directamente del área superficial de los electrodos y es inversamente proporcional a la distancia entre ellos.

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} \quad (2.1)$$

Donde:

- C es la Capacitancia.
- ε es la permitividad del medio.
- A es el área de los electrodos.
- d es la distancia entre los electrodos.

2.7.2 Voltaje Nominal (V)

El voltaje nominal o rating voltaje de un capacitor define el límite superior al que se puede operar con seguridad sin degradación acelerada ni riesgo de ruptura dieléctrica. No obstante, este valor está condicionado, ante todo, por la ventana electroquímica del electrolito; los sistemas acuosos rara vez superan 1 [V] por celda, mientras que los electrolitos orgánicos y las sales de tetraetilamonio en acetonitrilo permiten llegar a 2.7 – 3.0 [V]. Superar dicho umbral provoca sobre-oxidación del carbono, generación de gas y crecimiento irreversible de la ESR. Por esa razón, los módulos comerciales de 16 [V] o 48 [V] se construyen con celdas conectadas en serie y, a menudo, con circuitos de balance pasivo o activo para evitar que una de ellas sobrepase su voltaje seguro durante la carga rápida [24].

2.7.3 Resistencia Interna (ESR)

La resistencia equivalente en serie determina dos prestaciones clave, la potencia máxima instantánea y la disipación térmica. Una ESR baja, del orden de 0.3 [$m\Omega/F$] para celdas de carbono activado y < 0.1 [$m\Omega/F$] para supercapacitores de grafeno dopado, permite descargas de decenas de [kW] sin elevación excesiva de temperatura. Sin embargo, la ESR es sensible tanto a la frecuencia como a la temperatura, dado que disminuye a medida que los poros se “abren” por calentamiento moderado, pero aumenta de forma permanente cuando la oxidación electrolítica daña la superficie activa [19], [20]. Para aplicaciones que incluyen peaks repetitivos, por ejemplo, arranque y frenado regenerativo.

2.7.4 Densidad de Energía y Potencia

La densidad de energía se expresa en [Wh/kg] y depende linealmente de la capacitancia y cuadráticamente del voltaje nominal; en dispositivos EDLC comerciales oscila entre 3 y 10 [Wh/kg], muy por debajo de los 150 – 200 [Wh/kg] de las baterías Li-ion. En contraste, la densidad de potencia describe cuánta energía puede liberarse por unidad de tiempo y masa, y los supercapacitores superan los 10 [Wh/kg] gracias a su ESR ultrabaja y a la cinética puramente capacitiva de la doble capa. El diagrama de Ragone de la Fig. 2.1 muestra, que los SC cubren la esquina “alta potencia / baja energía”, mientras que las baterías ocupan la zona “alta energía / baja potencia” [21]. Las arquitecturas híbridas y pseudocapacitivas desplazan la curva del supercapacitor hacia la derecha, logrando 30 – 80

[Wh/kg] sin sacrificar la capacidad de entregar peaks por encima de 5 [Wh/kg].

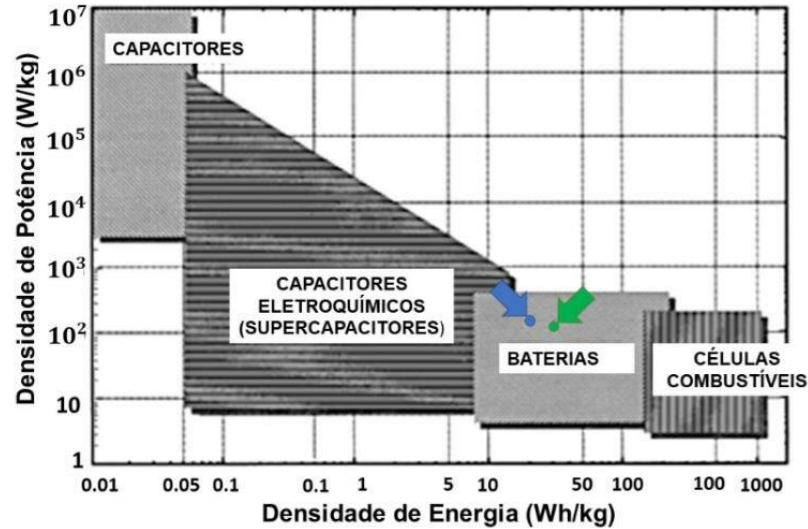


Fig. 2.1 Diagrama de Ragone. Tomado de [21].

2.7.5 Ciclos de Vida y Temperatura de Operación

Los supercapacitores pueden soportar cientos de miles a millones de ciclos de carga y descarga sin pérdida significativa de capacidad. Además, funcionan eficientemente en un amplio rango de temperaturas, lo que los hace adecuados para aplicaciones automotrices.

2.8. Ecuaciones Fundamentales

La energía (E) almacenada en un supercapacitor se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2.2)$$

Donde:

- E es la energía en Joulios (J)
- C es la capacitancia en faradios (F)
- V es el voltaje en Voltios (V)

La determinación experimental de la energía asociada al supercondensador y la verificación de su capacitancia se efectúa integrando la potencia instantánea obtenida de los vectores de corriente y voltaje mediante la regla trapezoidal (trapz en MATLAB). Este procedimiento ha sido ampliamente utilizado y validado en la literatura, tal como se documenta en estudios recientes que integran señales discretas para estimar energía eléctrica en sistemas de potencia y actuadores eléctricos [22][23][24].

La potencia (P) instantánea puede determinarse a partir de la corriente y el voltaje:

$$P = IV \quad (2.3)$$

Donde:

- P es la potencia en Vatios (W)
- I es la corriente en Amperes (A)
- V es el voltaje en Voltios (V)

Considerando la resistencia interna se tiene:

$$I_{m\acute{a}x} = \frac{V}{ESR} \quad (2.4)$$

Donde:

- $I_{m\acute{a}x}$ es la corriente máxima.
- ESR es la resistencia equivalente en serie.

2.9. Dimensionamiento de Capacitancia para Aplicación de automóvil

Para dimensionar un supercondensador en un sistema de arranque vehicular, es necesario calcular la capacitancia requerida en función de la energía necesaria para el arranque. Este cálculo permite asegurar que el supercondensador pueda almacenar y entregar la energía suficiente durante este proceso crítico.

Partiendo de la energía necesaria (E) y el voltaje operacional (V), se obtiene despejando la ecuación de energía almacenada en un condensador (2.2):

$$C = \frac{2E}{V^2} \quad (2.5)$$

En el caso específico de este estudio, se utilizaron mediciones de corriente, voltaje y tiempo obtenidas de un vehículo Nissan Qashqai 2011 los cuales se presentan en la Fig. 2.2.

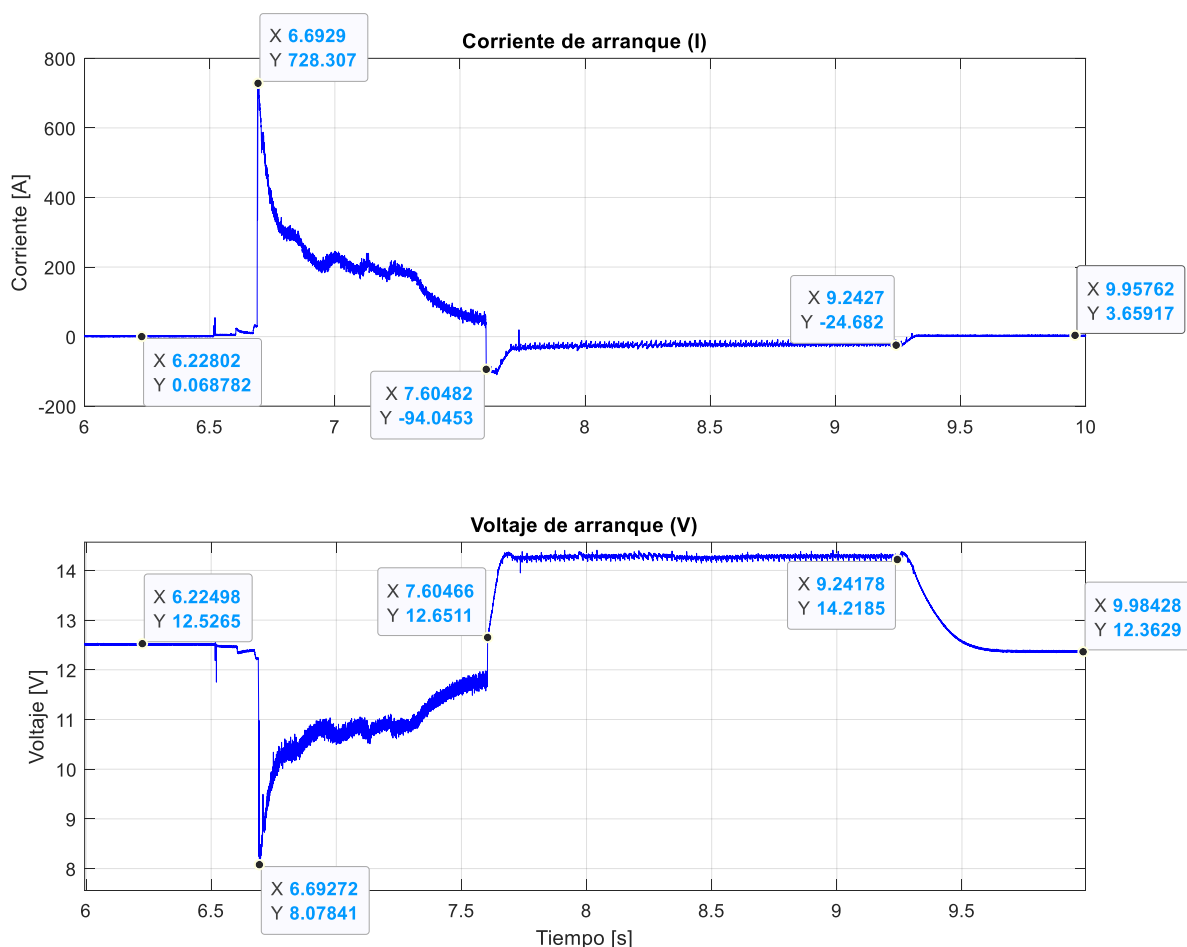


Fig. 2.2 Curvas de corriente y voltaje en la batería (Nissan Qashqai 2011).

La Fig. 2.2 muestran las curvas de corriente y voltaje registradas durante el proceso de arranque, las cuales sustentan los cálculos realizados. En particular, se aprecia un aumento del voltaje posterior al arranque del motor, indicando que el alternador del vehículo entra en el proceso de cargar la batería. Del mismo modo, tras el peak de corriente, la corriente cambia de signo alrededor de $t = 3.627$ [s] a un valor de -95.42 [A] corroborando el ingreso de energía hacia la batería y la alimentación de los consumos auxiliares (iluminación, refrigeración, actuadores de carrocería, audio, dirección asistida eléctrica, entre otros). En la siguiente Tabla 2.4 se detallan las etapas que se distinguen en el perfil de corriente y voltaje.

Tabla 2.4 Desglose del arranque por etapas

Etapa	Descripción	Indicadores en la señal	Instante de tiempo [s]
Key-ON	Contacto de llave: ECU, relés y bombas iniciales.	$I = 2.66$ [A]; leve caída de $V = 11.97$ [V].	Entre 6 – 6.68
Acción del motor (peak)	Motor de arranque energizado.	I alcanza el peak 712 [A]; V cae hasta 8.08 [V].	De 6.52 – 6.70 (peak en 6.693)
Transitorio de desacople	El motor empieza a combustionar; el arranque se libera.	I desciende rápidamente; V se recupera.	Entre 6.70–7.40
Inversión de corriente	Comienza la recarga de la batería.	$I = -95.42$ [A]; V en aumento.	En $t = 7.627$
Escalón de carga regulada	Regulador mantiene el enlace con voltaje de carga.	$V = 14.4$ [V];	Hasta $t = 9.26$
Estabilización final	Sistema en régimen; solo auxiliares activos.	V vuelve a 12.35 [V]; $I = 3.20$ [A].	En $t = 9.52$

Luego, los datos experimentales fueron procesados mediante la función trapz en Matlab, que realiza la integración numérica a una ventana de tiempo utilizando la regla del trapecio a la curva en la Fig. 2.3.

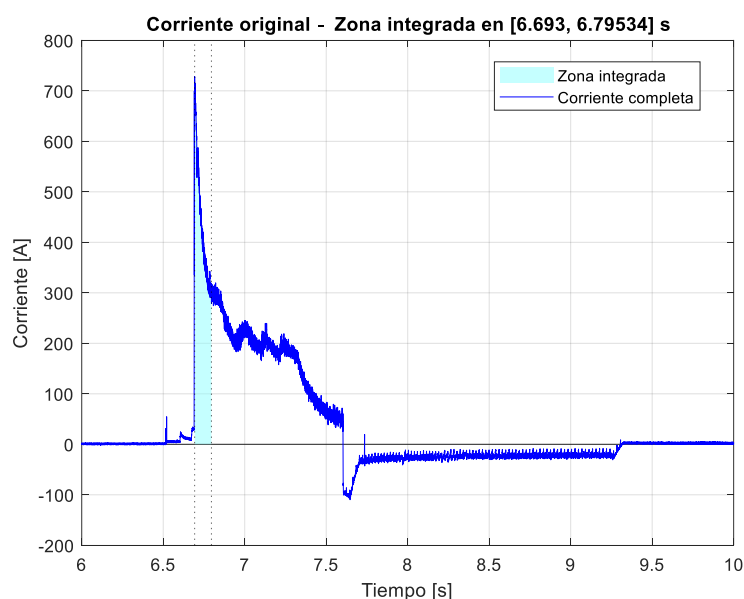


Fig. 2.3 Curva de corriente seleccionada para la integración numérica (Trapz) en la batería.

Este método permitió calcular la energía almacenada como el área bajo la curva de potencia (producto de corriente y voltaje) como se observa en la Fig. 2.4.

$$\text{Trapz}(t, I * V) = 418.12[J] \quad (2.6)$$

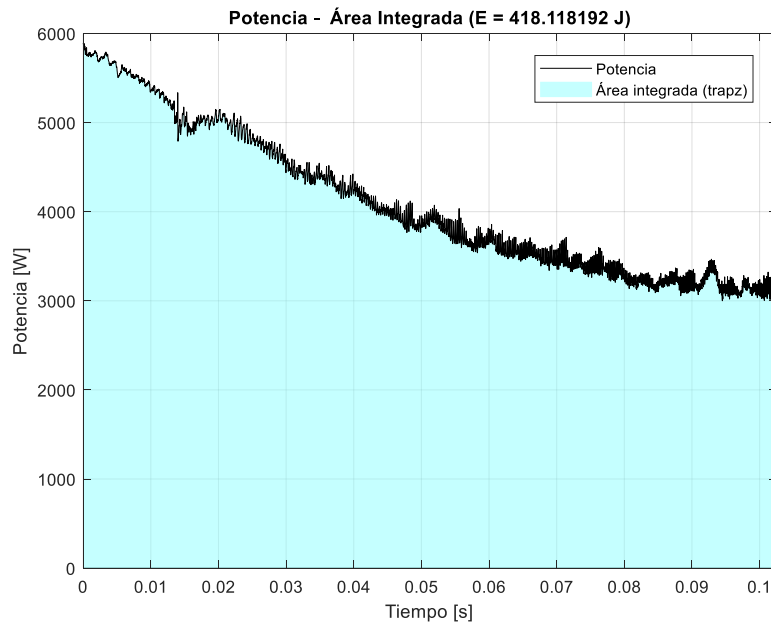


Fig. 2.4 Potencia instantánea en la ventana de tiempo de la batería.

Sustituyendo este valor de energía y el voltaje mínimo registrado en la fórmula de capacitancia, se determinó que:

$$C = \frac{2 * 418.12[J]}{8.078^2} = 12.8151[F] \quad (2.7)$$

Este valor de capacitancia asegura que el supercondensador pueda proporcionar la energía necesaria durante el arranque del motor, complementando la batería para cubrir los altos requerimientos de corriente inicial.

2.10. Discusión

La revisión de la literatura más reciente sobre el desarrollo y aplicación de supercapacitores permite establecer una visión integral del progreso tecnológico en los materiales, mecanismos de almacenamiento y métodos de validación empleados en la actualidad. Los trabajos analizados entre [16] y [24] reflejan una evolución clara desde el estudio fundamental de la doble capa eléctrica y los fenómenos pseudocapacitivos hacia el diseño de dispositivos híbridos de alta densidad energética y larga vida útil, aptos para aplicaciones automotrices y sistemas de potencia.

Los estudios [16] y [17] destacan la importancia del diseño de materiales avanzados como, electrodos de grafeno dopado, óxidos de metales de transición y electrolitos orgánicos de amplio margen electroquímico, que han permitido extender la ventana de voltaje y mejorar la estabilidad a altas potencias. Estas innovaciones han incrementado la densidad de energía de los supercapacitores por encima de los 10 [Wh/kg], manteniendo una densidad de potencia del orden de 10 [kW/kg], lo que los posiciona como una solución intermedia entre las baterías de ion-litio y los condensadores convencionales. Por su parte, Simon y Gogotsi [18] y Conway [19] sentaron las bases teóricas que sustentan estos avances, definiendo los principios de la capacitancia de doble capa eléctrica y los procesos farádicos rápidos en materiales de alta superficie específica. A partir de estos modelos, se consolidó la clasificación actual entre EDLCs, pseudocapacitivos e híbridos, la cual sigue siendo referencia en los desarrollos contemporáneos.

El aporte de Burke [20] y Calvo [21] complementa esta perspectiva al comparar el comportamiento de los supercapacitores frente a las baterías electroquímicas, destacando que la eficiencia de los SC depende fuertemente de la ESR y de las propiedades térmicas del dispositivo. Estos estudios coinciden en que una ESR baja (inferior a 0.3 [mΩ]) permite descargas instantáneas con mínima disipación de calor, parámetro importante en las aplicaciones de arranque vehicular y frenado regenerativo. Asimismo, se resalta que el rendimiento del supercapacitor está condicionado por la estabilidad del electrolito y la uniformidad de carga en celdas conectadas en serie, justificando el uso de circuitos de balance activo y estrategias de control térmico.

Por otra parte, las referencias metodológicas [22]–[24] fortalecen el enfoque experimental adoptado en este trabajo. Samad [22] y Taghavi [23] muestran la aplicabilidad de técnicas de integración numérica y de modelado discreto (como trapz en MATLAB) para la estimación precisa de energía eléctrica a partir de señales experimentales de corriente y voltaje, métodos que permiten obtener con alta fidelidad el área bajo la curva de potencia, validando el cálculo de energía instantánea

almacenada o entregada por un sistema eléctrico. En línea con lo anterior, Dandoussou [24] subraya la necesidad de analizar la confiabilidad de algoritmos y modelos de simulación ante variaciones ambientales, reforzando la importancia de las pruebas de validación y calibración experimental implementadas en este estudio.

En conjunto, las referencias [16]–[24] aportan un marco teórico sólido que justifica tanto la metodología de cálculo de energía y dimensionamiento de la capacitancia presentada en el Capítulo 2, como la elección del supercondensador empleado en las simulaciones. Además, respaldan los fundamentos que explican el comportamiento dinámico del sistema batería-SC desarrollado posteriormente, donde parámetros como la ESR, la capacitancia efectiva y el voltaje nominal determinan la eficiencia y estabilidad del arranque.

Capítulo 3. Simulación del Sistema de Arranque Vehicular

3.1. Introducción

En este capítulo se presenta la simulación del sistema de arranque de un vehículo, específicamente de un Nissan Qashqai 2011, con el objetivo de analizar su comportamiento eléctrico y dimensionar adecuadamente un supercapacitor para su implementación en paralelo con la batería existente. Para ello, se realizaron mediciones experimentales de las curvas de corriente y voltaje durante el proceso de arranque, se procesaron los datos utilizando MATLAB y se desarrolló una simulación que permite evaluar el desempeño del sistema propuesto.

3.2. Obtención de Curvas de Corriente y Voltaje

La primera etapa del estudio consistió en la adquisición de las señales de corriente y voltaje durante el arranque del vehículo. Se utilizó un registrador de variables SEFRAM DAS 60, que permite capturar datos con alta precisión y resolución temporal. Para medir la corriente que fluye hacia el motor de arranque, se instaló una sonda de corriente MR416 en el circuito de arranque. Paralelamente, se conectaron sondas de voltaje directamente a los bornes de la batería para registrar la caída de tensión durante el arranque.

3.3. Procesamiento de Datos en MATLAB

Una vez obtenidas las mediciones, se procedió a importar los vectores de corriente y voltaje al entorno de MATLAB para su análisis y visualización. Los archivos de datos generados por el SEFRAM DAS 60 se convirtieron a un formato legible por MATLAB, facilitando la manipulación y procesamiento de los datos. Se generaron gráficos de las señales de corriente y voltaje para identificar patrones y características clave. La curva de voltaje permitió observar la caída de tensión en la batería durante el arranque, identificando el voltaje mínimo alcanzado. La curva de corriente, por su parte, permitió analizar la demanda de corriente del motor de arranque, destacando el peak inicial y la variación durante todo el proceso.

3.4. Simulación del Sistema con Supercapacitor y Batería en Paralelo

En la simulación desarrollada y mostrada en la Fig. 3.1, se diseñó un circuito que replica parcialmente el comportamiento del sistema de arranque de un vehículo. En particular, se modeló la interacción entre la batería del automóvil y un SC conectado en paralelo, con el propósito de proporcionar un soporte adicional de corriente durante el proceso de arranque, permitiendo analizar cómo contribuye a satisfacer la alta demanda inicial de corriente y reducir la carga eléctrica sobre la batería en el momento crítico del arranque.

Es importante destacar que esta simulación no pretende replicar el sistema de arranque completo del vehículo, ya que, no incluye componentes como el motor de arranque, el alternador o las resistencias mecánicas presentes en un motor de combustión interna. En su lugar, se centra en evaluar el comportamiento eléctrico del subsistema compuesto por la batería y el SC, asumiendo que estos componentes son los principales responsables de entregar la corriente inicial.

Este enfoque simplificado permite aislar y estudiar en detalle las dinámicas de corriente y voltaje entre la batería y el SC, sin la complejidad adicional de otros elementos del sistema. Los resultados obtenidos son útiles para identificar las ventajas potenciales de esta configuración en términos de estabilidad de voltaje y reducción de estrés en la batería.

Para gestionar adecuadamente el funcionamiento, se implementó un sistema de control basado en una bandera (flag) y se activa cuando la corriente suministrada por el SC disminuye a 5 [A]; en ese instante, el sistema procede a desconectarlo del circuito, esta desconexión evita el uso innecesario del SC cuando su contribución ya no es significativa, lo que ayuda a preservar su vida útil y optimiza el rendimiento del sistema.

El modelo presentado en la Fig.3.1 emplea la siguiente cadena simin, rate transition, fcn y unit delay. En primer lugar, simin entrega al modelo la serie temporal de corriente de arranque obtenida del vehiculo Nissan Qashqai 2011. Asi, Rate Transition fija el tiempo de muestreo de salida en $T_s = 20 [\mu s]$ (50 [Hz]) para sincronizar la referencia con la rama de potencia y prevenir condiciones de jitter (variación no deseada en el instante temporal) cuando subsistemas trabajan a ritmos distintos asegurando que la fuente de corriente controlada reciba una referencia temporal coherente.

Fig. 3.2 Código del bloque fnc

El bloque fcn (MATLAB Function) está definido por el código de la Fig.3.2 que implementa un indexador del vector de corriente y recibe el índice actual ik1 y el vector in, luego devuelve el dato a inyectar en el instante siguiente, avanzando un paso en el vector y devolviendo el dato actual junto con el siguiente índice. Su salida domina directamente la fuente de corriente controlada que emula la demanda de arranque. El siguiente bloque, Unit Delay introduce un retardo de 1 muestra (manteniendo el muestreo con Sample time = -1) para romper lazo algebraico y alinear temporalmente índice y dato; la condición inicial = 1 hace que el primer acceso apunte a la primera muestra del vector.

Se observa de la Fig.3.1 en la rama de la batería, se encuentra una fuente de voltaje DC de 12[V], seguida de una resistencia en serie que representa la resistencia interna. Luego, un diodo antirretorno que evita corrientes inversas hacia la batería cuando el enlace DC es sostenido desde la carga o el SC. Los bloques de medición de corriente y voltaje capturan, corriente de la fuente, corriente del SC, corriente de la carga y voltaje en el SC.

La carga electrónica se modela como fuente de corriente controlada e impone la corriente de la carga que entrega fcn. Esta actúa como receptor de corriente respecto al nodo DC, que para obtener una referencia extrae corriente del enlace sin forzar el voltaje resultante, dado como resultado una respuesta natural del circuito. A su vez, la convención del signo es importante; es positiva cuando fluye desde el nodo hacia la carga permitiendo comparar la corriente de la fuente, corriente del SC y corriente de la carga cumpliendo el balance $I_{fuente} + I_{SC} - I_{carga} = 0$. Finalmente, se encuentra el SC, conectado a una resistencia de precarga (limita inrush) y un switch ideal que controla la desconexión mediante un flag.

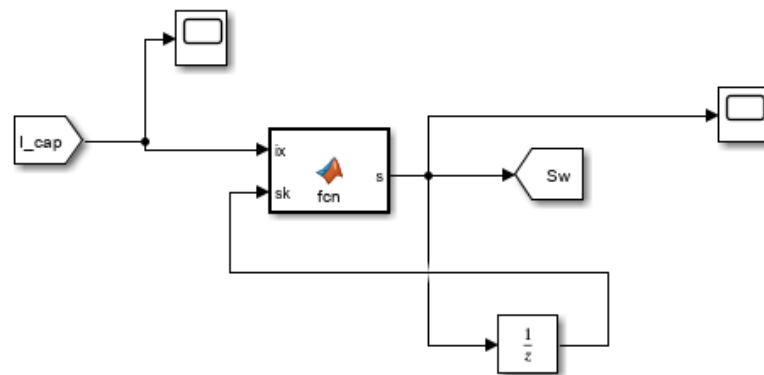


Fig. 3.3 Simulación parte de control (Flag).

```

1  function s = fcn(ix, sk)
2      persistent initialized;
3      if isempty(initialized)
4          initialized = false;
5      end
6
7      if ~initialized && ix > 5
8          s = 1;
9          if ix < 500
10             initialized = true;
11         end
12     elseif sk == 0
13         s = 0;
14     elseif (ix <= 5 )
15         s = 0;
16     else
17         s = 1;
18     end
19 end

```

Fig. 3.4 Código del Flag.

Para gestionar adecuadamente el funcionamiento del SC, se implementó un sistema de control basado en una bandera (flag) que se detalla el diagrama de bloques de la Fig. 3.2 y que se explica a continuación en la Fig. 3.3, la función utiliza una variable persistente denominada `initialized`, que permite mantener un estado entre las diferentes ejecuciones de la función, inicialmente se encuentra definida y se utiliza para determinar si el sistema ya ha alcanzado un valor para operar. El primer bloque del código verifica si `initialized` es falso (estado inicial) y si la corriente es mayor a 5 [A]. En este caso, la función asume que el sistema aún no ha iniciado y mantiene el supercondensador conectado (valor $s = 1$). Una vez que la corriente cae por debajo de un umbral alto (500 amperes en este caso), el sistema considera que la etapa inicial se ha completado, y la variable `initialized` se marca como verdadera, permitiendo que las siguientes condiciones entren en acción.

3.4.A) Condiciones de desconexión

Si el estado previo del sistema (`sk`) indica que el supercondensador ya estaba desconectado ($sk = 0$), la función asegura que permanezca desconectado asignando el valor $s = 0$, esto previene la reconexión automática del supercondensador tras haberse desconectado previamente, lo cual es esencial para evitar oscilaciones o condiciones no deseadas en el sistema.

Otra condición de desconexión ocurre si la corriente medida (`ix`) es menor o igual a 5[A], en este caso, el supercondensador se desconecta asignando nuevamente el valor $s = 0$ garantizando que el supercondensador no permanezca conectado cuando las condiciones de operación no son las

óptimas.

3.4.B) Condiciones de conexión

En cualquier otro caso, si ninguna de las condiciones de desconexión se cumple y el sistema se ha iniciado (`initialized = true`), el supercondensador permanece conectado con el valor $s = 1$, asegurando que el supercondensador opere bajo las condiciones normales cuando las corrientes son mayores a 5 amperios.

3.4.C) Aplicación práctica

El propósito de este código es gestionar la conexión de un supercondensador en un sistema eléctrico, evitando que se sobrecargue o funcione en condiciones inadecuadas, como corrientes muy bajas. Además, la introducción de la variable persistente `initialized` permite gestionar una fase inicial del sistema, lo cual es especialmente útil en sistemas donde el comportamiento inicial puede ser inestable activando erróneamente el switch.

3.4.1 Resultados Simulaciones

En el contexto de los resultados de la simulación, se ilustra las curvas de corriente correspondientes a la batería, al supercapacitor de 15 [F] y al sistema combinado de batería con supercapacitor durante el proceso de arranque del vehículo Nissan Qashqai 2011.

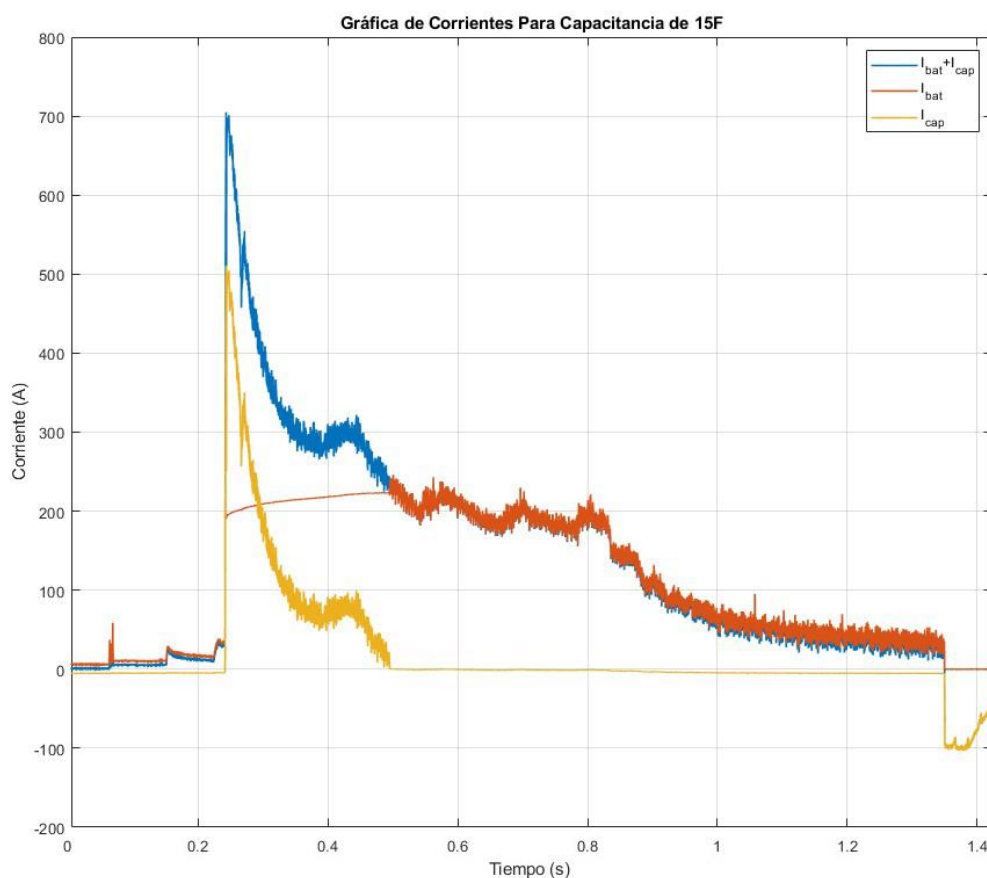


Fig. 3.5 Curvas de corriente de la batería (I_{bat}), del supercapacitor (I_{cap}) y de la combinación batería con supercapacitor ($I_{bat}+I_{cap}$).

En la Fig.3.4, se observa el comportamiento conjunto de las corrientes cuando la batería y el supercapacitor operan en paralelo. Es posible identificar claramente el momento en que el flag de control actúa para desconectar el supercapacitor, específicamente cuando la corriente suministrada por este disminuye a 5 [A] en el instante 0.241[s].

La interacción coordinada entre la batería y el supercapacitor, evidenciada en estas curvas, demuestra la eficacia del sistema híbrido propuesto, donde el supercapacitor proporciona una alta corriente inicial, reduciendo el estrés sobre la batería y mejorando el rendimiento del arranque, especialmente en condiciones de alta demanda energética. La desconexión controlada del supercapacitor optimiza su utilización, evitando operaciones ineficientes y preservando su integridad. Mientras tanto, la batería continúa suministrando la corriente necesaria para completar el arranque del motor, asegurando un funcionamiento confiable del sistema.

3.4.2 Discusión

En la simulación realizada con un supercondensador de 15 [F] conectado en paralelo a la batería, se confirma de manera clara su aporte directo en la mitigación del peak de corriente inicial durante el arranque. Como se observa en la Fig. 3.5, en el instante en que se demanda la máxima potencia, es el supercondensador quien asume el rol principal de suministro energético gracias a su baja resistencia interna y alta densidad de potencia. Esta acción inmediata reduce significativamente el esfuerzo de la batería, disminuyendo la magnitud del peak de corriente que circula por ella y, en consecuencia, atenuando el estrés eléctrico al que se ve sometida. De esta forma, se logra un arranque con mejores condiciones para prolongar la vida útil de la batería.

Con el fin de evitar que el supercondensador continúe entregando corriente una vez superado el régimen transitorio, se implementó un esquema de control basado en un umbral de corriente. Cuando la demanda cae por debajo de los 5 [A], el sistema ordena la desconexión del supercondensador mediante un switch ideal. Este criterio impide un uso ineficiente del dispositivo, preserva su integridad y asegura que solo participe en los momentos en los que realmente se requiere su apoyo. Además, la lógica de control contempla la permanencia en el estado de desconexión hasta que se inicie un nuevo ciclo de arranque, evitando así reconexiones indeseadas o fluctuaciones que podrían desestabilizar el enlace DC. En la simulación, este proceso se evidenció en el instante 0,241 [s], momento en el que se produjo la orden de desconexión del supercondensador tras haber cumplido su función.

Este comportamiento confirma la sinergia existente entre la batería y el supercondensador en la topología híbrida. El SC, gracias a sus características eléctricas, absorbe de manera eficaz la exigencia inicial de alta potencia, mientras que la batería asume posteriormente el régimen sostenido de corriente. Así mismo, la interacción coordinada entre ambos dispositivos optimiza el reparto energético durante todo el proceso demostrando la validez de la estrategia de integración batería-SC, destacando su potencial para mejorar el desempeño del sistema de arranque.

Capítulo 4. Elementos del Circuito de Control y Potencia

4.1. Introducción

En el siguiente apartado se describirá el diseño y los componentes necesarios para la implementación física del sistema de arranque vehicular basado en supercapacitores. Se hará énfasis en el circuito de control, los elementos de protección y las herramientas utilizadas en su construcción, incluyendo la señal TTL proveniente de la plataforma dSPACE.

4.2. Diseño del Circuito de Control

El diseño del circuito de control de muestra en la Fig. 3.6, es fundamental para la correcta operación del sistema de arranque vehicular basado en supercapacitores. Su objetivo principal es gestionar de forma eficiente la conexión y desconexión del supercapacitor al sistema eléctrico del vehículo. A continuación, se presenta una descripción detallada de los componentes utilizados en el circuito, sus funciones específicas y las consideraciones de diseño que garantizan su efectividad.

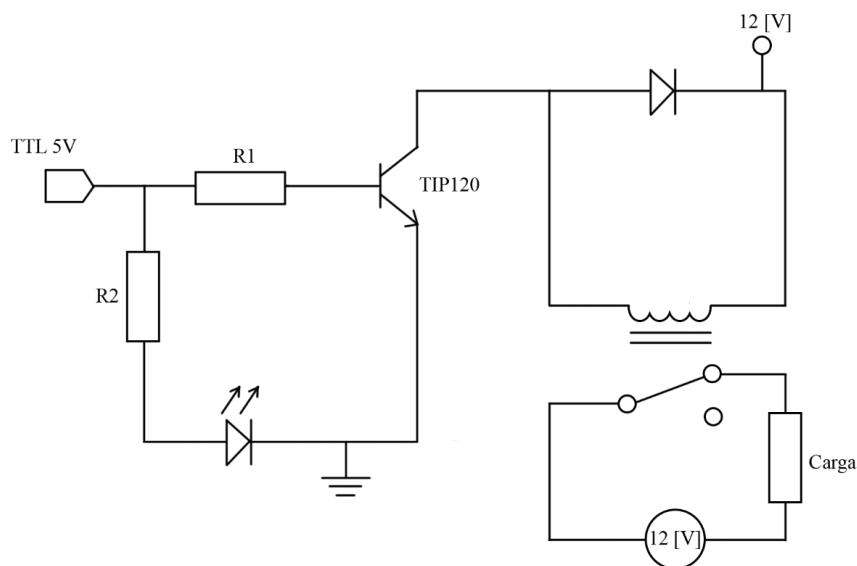


Fig. 4.1 Diagrama circuito de control

Señal TTL

La señal TTL de 5 V es el punto de partida del control electrónico, la señal lógica es generada por la plataforma dSPACE, que actúa como interfaz entre el software de control y el hardware físico.

- Proporciona una señal de control digital que indica al circuito cuándo conectar o desconectar el supercapacitor. Al estar en nivel lógico alto (5 [V]), ordena la activación del circuito; en nivel lógico bajo (0 [V]), indica la desactivación.
- Característica: Compatible con niveles lógicos estándar TTL, lo que facilita la integración con componentes electrónicos comunes como transistores y circuitos integrados.

Transistor TIP120

El transistor TIP120 de la Fig. 4.1 es un elemento clave en el circuito de control, actuando como un interruptor electrónico que maneja corrientes y voltajes mayores que los que puede proporcionar directamente la señal TTL.

- Consiste en dos transistores NPN conectados en configuración Darlington para obtener una alta ganancia de corriente.
- Al recibir la señal TTL en su base, el TIP120 se satura, permitiendo el paso de una corriente significativa desde el colector al emisor, permitiendo controlar la corriente que energiza la bobina del relé, actuando como un puente entre la señal de control y el accionamiento del relé. Sus especificaciones se encuentran en la Tabla 4.1.



Fig. 4.2 Transistor TIP120. Tomado de [25]

Tabla 4.1 Especificaciones Relevantes

Parámetro	Valor y justificación
Corriente de colector máxima (I_C)	5 [A] suficiente para manejar la corriente de la bobina del relé.
Voltaje colector-emisor máximo (V_{CE})	60 [V] proporcionando un margen seguro para la mayoría de aplicaciones automotrices.

Cálculo de la Corriente de Base

Para asegurar que el transistor TIP120 se sature y opere correctamente, se calcula la corriente de base (I_B) utilizando la siguiente fórmula:

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B} \quad (4.1)$$

Donde:

- V_{CC} : Voltaje de la señal TTL proveniente de dSPACE.
- V_{BE} : Caída de voltaje típica entre la base y el emisor del transistor cuando está en saturación.
- R_B : Resistencia de base.

Resistencia de Base

La resistencia de base es un componente importante para controlar la corriente que ingresa a la base del transistor.

- Limita la corriente de base a un valor seguro para el transistor, evitando sobre corrientes que puedan dañarlo. Asegura que el transistor opere en la región de saturación cuando la señal TTL está en nivel alto.
- Selección: El valor de 447 [Ω] equilibra la necesidad de una corriente de base adecuada sin exceder las especificaciones del transistor.

Diodo de Protección

El diodo 1N4007 de la Fig. se utiliza para proteger al transistor TIP120 de los peaks de voltaje inducidos por la bobina del relé cuando se interrumpe la corriente.

- Actúa como un diodo flyback, proporcionando un camino para la corriente transitoria generada por el back-EMF al des energizarse la bobina del relé. Evita que el voltaje inverso dañe el transistor.



Fig. 4.3 Diodo 1N4007. Tomado de [26]

Relé de 12 [V]

El relé Gigavac GX26BAB que se encuentra en la Fig. 4.4 es un dispositivo electromecánico que permite el control de circuitos de potencia mediante señales de baja potencia. Al ser energizado, cierra sus contactos, conectando el SC al sistema eléctrico del vehículo y que al des energizarse, abre los contactos, desconectando el SC. Sus especificaciones se detallan en la Tabla 4.2.



Fig. 4.4 Relé GIGAVAC GX26AB

Tabla 4.2 Especificaciones Relevantes

Parámetro	Valor y justificación
Voltaje de bobina	12 [V] DC compatible con el sistema eléctrico automotriz.
Capacidad de Conmutación	Debe soportar la corriente máxima de 600[A] que podría fluir a través del supercapacitor durante su conexión dado que es importante seleccionar el relé con contactos capaces de manejar las altas corrientes de arranque.

Fuente de 12 [V]

La fuente de 12 [V] DC es necesaria para alimentar la bobina del relé.

- Puede provenir del sistema eléctrico del vehículo o de una fuente de laboratorio durante las pruebas.
- Proporciona el voltaje necesario para energizar la bobina del relé, podrá ser el propio del sistema eléctrico del vehículo o una fuente de alimentación externa cuando se realice en un entorno de prueba.

Supercapacitor

El supercapacitor es el componente central del sistema, diseñado para aportar la energía necesaria para mitigar el peak de corriente que se produce durante el arranque del motor. Ante esta necesidad se debe tener en consideración los siguientes parámetros de la Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Especificaciones del banco de capacitores y SC

Parámetro	Valor y justificación
Capacitancia	Los valores a utilizar son un banco de capacitores conectados en paralelo con una capacitancia de 26.8[mF] y un SC de 165[F].
Voltaje nominal	Si bien los elementos utilizados poseen un voltaje de 450[V] y 48[V] respectivamente, el voltaje se mantendrá en torno a los 12[V] compatibles con el sistema eléctrico de un vehículo.
Resistencia interna (ESR)	Una baja ESR es deseable para minimizar pérdidas y permitir altas corrientes de arranque. 4,7 [$m\Omega$] y 6 [$m\Omega$]

4.3. Funcionamiento del Circuito

El circuito diseñado opera mediante una serie de etapas que permiten la conexión y desconexión controlada del supercapacitor al sistema eléctrico del vehículo. A continuación, se presenta una explicación detallada de cada fase del funcionamiento, con el objetivo de comprender plenamente el proceso y los principios detrás de cada componente involucrado.

Activación del Transistor

El proceso se inicia cuando la señal TTL de 5 [V] proveniente de la plataforma dSPACE está presente, es decir, cuando está en nivel lógico alto, señal que se aplica a la base del transistor TIP120 a través de una resistencia de 470 [Ω]. La resistencia tiene la función de limitar la corriente que ingresa a la base del transistor, protegiéndolo de posibles sobrecorrientes que podrían dañarlo.

Al recibir el voltaje en su base, el transistor TIP120 entra en saturación, un estado en el cual permite el flujo de corriente desde el colector hacia el emisor con una resistencia interna muy baja, lo que convierte al transistor en un interruptor cerrado, estableciendo un camino de baja resistencia para la corriente que alimentará la bobina del relé en la siguiente etapa.

Energización del Relé

Con el transistor TIP120 en estado de conducción, se habilita la circulación de corriente desde la fuente de 12 [V] DC a través de la bobina del relé y hacia el colector-emisor del transistor. La bobina del relé, al ser un componente inductivo, genera un campo magnético cuando la corriente la atraviesa, y que es responsable de accionar el mecanismo interno del relé.

El efecto del campo magnético es atraer o repeler un contacto móvil dentro del relé, lo que resulta en el cierre de los contactos eléctricos, el cierre establece una conexión física entre los terminales del relé, permitiendo que el supercapacitor se conecte al circuito del vehículo. La energización del relé es, por tanto, el puente entre el control electrónico proporcionado por el transistor y la conexión física del supercapacitor al sistema eléctrico.

Conexión del Supercapacitor

Una vez que los contactos del relé están cerrados, el supercapacitor se encuentra conectado directamente al sistema eléctrico del vehículo. En este punto, el supercapacitor puede desempeñar su función principal: proporcionar energía adicional durante el proceso de arranque del motor. Debido a su capacidad para entregar altas corrientes de forma instantánea, el supercapacitor asiste a la batería del vehículo, suministrando la corriente necesaria para superar la inercia del motor y otros impedimentos mecánicos.

La participación del supercapacitor en el arranque tiene varios beneficios:

- Al compartir la carga de corriente, se disminuye el esfuerzo que la batería debe realizar, lo que prolonga su vida útil.
- Se logra un arranque más rápido y eficiente, especialmente en condiciones de baja temperatura o cuando la batería está parcialmente descargada.
- Se optimiza el uso de la energía almacenada, aprovechando las características de alta densidad de potencia del supercapacitor.

Protección contra Back-EMF

Cuando la señal TTL proveniente de dSPACE se desactiva (pasa a nivel lógico bajo), el transistor TIP120 transita al estado de corte, interrumpiendo el flujo de corriente desde el colector al emisor. Como consecuencia, la corriente que circulaba a través de la bobina del relé cesa de manera abrupta. Sin embargo, debido a las propiedades inductivas de la bobina, la energía almacenada en su

campo magnético no puede desaparecer instantáneamente, lo que provoca una fuerza electromotriz inversa (back-EMF), generando un peak de voltaje de polaridad opuesta que puede alcanzar valores considerablemente altos.

Este peak de voltaje inverso representa un riesgo para el transistor y otros componentes electrónicos del circuito, ya que puede causar daños por sobretensión o inducir corrientes no deseadas. Para mitigar este efecto perjudicial, se incorpora un diodo de protección 1N4007 conectado en paralelo con la bobina del relé y en polaridad inversa respecto a la alimentación.

El diodo 1N4007 actúa como un cortocircuito controlado para el back-EMF, cuando se induce el peak de voltaje inverso, el diodo entra en conducción, permitiendo que la corriente transitoria circule a través de él en lugar de hacerlo hacia el transistor. De esta manera, la energía almacenada en el campo magnético de la bobina se disipa de forma segura, protegiendo al transistor TIP120 y garantizando la integridad del circuito.

Desconexión del Supercapacitor

Con la desenergización de la bobina del relé y la apertura de sus contactos, el supercapacitor se desconecta del sistema eléctrico del vehículo, paso crucial para evitar la descarga innecesaria de este cuando no es requerido, lo que contribuye a preservar su vida útil y asegura que esté plenamente cargado para el próximo ciclo de arranque.

La desconexión controlada también previene posibles corrientes de fuga y garantiza que el supercapacitor no interfiera con el funcionamiento normal del sistema eléctrico durante el funcionamiento del motor o cuando el vehículo está en reposo. Además, al gestionar la conexión y desconexión del supercapacitor mediante el circuito de control, se asegura que este solo intervenga en momentos específicos, optimizando su uso y eficiencia.

4.4. Costos Asociados

La Tabla 4.4 presentará un desglose detallado de los costos estimados para los componentes clave del circuito de control diseñado, incluyendo los precios individuales de cada elemento, desde el transistor TIP120 hasta los diodos de protección. La finalidad de este análisis es proporcionar una visión de los recursos económicos necesarios para implementar el circuito, asegurando que se mantenga dentro de los márgenes presupuestarios establecidos.

Tabla 4.4 Componentes del circuito de control

Componente	Precio (CLP)
Transistor TIP120	\$1.032
Resistencia de 1000 [Ω]	\$300
Resistencia de 330 [Ω]	\$150
Diodo 1N4007	\$200
Fuente de alimentación 12 [V]	\$5.000
Cables y conectores	\$1.500
Total	\$8.180

4.5. Componentes Clave y sus Funciones

A continuación, se presentan los principales elementos adicionales que complementan el sistema de control descrito en el capítulo anterior. Cada componente es importante para garantizar el correcto funcionamiento del sistema de arranque, y su selección debe realizarse cuidadosamente, considerando las especificaciones técnicas y normativas aplicables.

Batería Auxiliar

La batería auxiliar de 12 [V] presentada en la Fig. 5.1 es esencial para alimentar los sistemas de control y los relés del circuito. Su función principal es proporcionar un suministro estable de energía independiente de la batería principal del vehículo, asegurando que el sistema de control opere correctamente incluso durante las fluctuaciones de voltaje asociadas al arranque del motor. Sus especificaciones se encuentran en la siguiente Tabla 4.5.



Fig. 4.5 Batería Auxiliar de 12[V]

Tabla 4.5 Especificaciones de la batería

Elemento	Valor
Voltaje nominal	12 [V] DC
Capacidad	55 [Ah]
Arranque en Frío	360 CCA

Relé de Alta Corriente

El relé de alta corriente es responsable de manejar los peaks de corriente generados durante el proceso de arranque, asegura una conexión segura y confiable entre la batería, el supercapacitor y el motor de arranque durante las altas demandas iniciales de corriente.

Diodos de Potencia

Los diodos de potencia actúan como elementos de protección, garantizando que no haya corrientes inversas que puedan dañar los componentes electrónicos durante la operación, cuya función es permitir el flujo de corriente en una sola dirección y bloquearla en sentido contrario. Los detalles se presentan en la siguiente Tabla 4.6.

Tabla 4.6 Especificaciones del diodo

Parámetro	Valor y justificación
Capacidad de corriente	Mayores a 600 [A] para manejar los peaks de corriente durante el arranque.
Voltaje Inverso Máximo	Mayores a 12 [V] para tolerar las tensiones inversas presentes en el sistema.
Tipo	Diodo Schottky o diodo de potencia de silicio con baja caída de voltaje directo.

Cables de Alta Corriente

Los cables de alta corriente cuyas especificaciones se presentan en la Tabla 4.7, se emplearán para la conexión entre la batería, el supercapacitor, el relé y el motor de arranque, deben ser capaces de manejar corrientes elevadas sin generar pérdidas significativas ni sobrecalentarse.

Tabla 4.7 Especificaciones de los cables.

Parámetro	Justificación
Calibre	4/0 AWG o mayor dependiendo de la longitud y la corriente máxima.
Material	Cobre estañado para mejorar la conductividad y resistencia a la corrosión.
Aislamiento	Resistente a altas temperaturas (PVC de grado automotriz, XLPE o silicona) y abrasión.

Fusibles de Protección

Los fusibles de protección salvaguardan el sistema contra posibles sobrecorrientes y cortocircuitos, evitando daños severos a los componentes y reduciendo riesgos de incendio o fallos catastróficos. Las características se presentan en la Tabla 4.8.

Tabla 4.8 Especificaciones de los cables.

Parámetro	Justificación
Corriente nominal	600 [A], acorde con la máxima corriente esperada en el sistema.
Tipo	Fusible de acción rápida (fast-acting) o fusible de alta capacidad de ruptura (HRC) diseñado para aplicaciones de alta corriente continua.
Tensión nominal	Superior al voltaje máximo del sistema (al menos 32 [V] DC).

4.6. Costos Asociados y Comparación Económica del Sistema de Encendido

La Tabla 4.9 detalla los costos relacionados con la implementación física del sistema de arranque vehicular basado en supercapacitores. Se incluyen elementos como la batería auxiliar, relés de alta corriente, supercapacitores y componentes de protección, cada uno con su precio correspondiente, cuyo objetivo es garantizar la viabilidad económica del proyecto y facilitar la adquisición de los materiales necesarios, destacando la importancia de seleccionar componentes de calidad que cumplan con las especificaciones técnicas. Además, proporciona una referencia para futuras implementaciones y estudios de costo-beneficio.

Tabla 4.9 Componentes del sistema.

Elemento	Precio (CLP)
Batería	43.000
Relé	252.427
Supercap (x3)	775.517,13
	775.517,13
	775.517,13
Envío Supercap	6.459,67
Tarifa Supercap	232.601,87
Diodo (x2)	52.754
	52.754
Envío Diodo (x2)	21.548
	21.548
Interruptor	8.304

Bornes	25.000
Cables	23.739
Fusibles (x2)	52.214
	52.214
Envío Fusibles	55.000
Caja de protección	20.000
Total	3.246.114,93

A partir de la Tabla 4.10 se observa la comparación de un mismo vehículo, Nissan Qashqai 2011 con su sistema de arranque de fábrica (vehículo + batería + tren de arranque ya incorporado) frente al mismo vehículo con el incremento necesario para habilitar la arquitectura batería - SC. La columna del sistema actual cuantifica el coste del conjunto en 6.075.000 [CLP] (6.000.000 [CLP] del vehículo + 75.000 [CLP] de batería 12 [V]), mientras que la columna del sistema propuesto añade los elementos estrictamente requeridos para el acoplamiento, tres módulos SC 160 [V], 5.8 [F] (2.300.000 [CLP]), contactor 600 [A] (252.000 [CLP]), resistencia de precarga (19.200–48.000 [CLP]), diodos de potencia (53.000 [CLP]), sensores de I/V (96.000–288.000 [CLP]) y cableado/fusibles/terminales (84.000–192.000 [CLP]). Bajo estos supuestos, el total del sistema propuesto asciende a 8.983.957 [CLP], lo que implica un incremento neto de 2.908.957 [CLP] respecto de la base, equivalente a 47.9% adicional sobre el sistema de fábrica.

Tabla 4.10 Comparación Sistema Actual y Propuesto

Elemento	Sistema actual (de fábrica) [CLP]	Sistema propuesto (incremento sobre el vehículo) [CLP]
Vehículo Qashqai 2011	6.000.000	6.000.000
Batería 12 [V]	75.000	75.000
Alternador / motor de arranque	Incluidos	—
Módulo supercap 160 [V], 5.8 [F] (x3)	—	2.300.000
Relé 600[A]	—	252.000
Resistencia de precarga	—	19.200 – 48.000
Diodos de potencia	—	53.000
Sensores I/V (3 I + 3 V)	—	96.000 – 288.000
Cableado/fusibles/terminales	—	84.000 – 192.000
Total	6.075.000	8.983.957

Desde el punto de vista técnico, este incremento se explica por la incorporación de un almacenamiento de muy baja ESR capaz de operar el tramo transitorio de alta potencia (los SC), junto con la capa de control y protección indispensable de la precarga para limitar el inrush, conmutación principal con el relé apto para los niveles de corriente, y elementos de sensado y protección que permitan operar y auditar el ensayo con seguridad. Sin embargo, en términos económicos, resulta evidente que en un vehículo de uso cotidiano con esta adición no pretende ofrecer un retorno directo, dado que la batería de 12 [V] es comparativamente barata y la severidad del perfil de arranques rara vez justifica una inversión extra del orden de millones de pesos para mitigar parte de la corriente en el evento de encendido. Por ello, la lectura de la tabla es dimensionar el orden de magnitud del costo cuando se habilita la arquitectura híbrida, como insumo para el análisis de transferencia a otras plataformas.

El sentido de esta propuesta emerge al proyectarla hacia un sector industrial y vehículos mineros, donde la frecuencia de arranques, las corrientes peak y el costo de mantención son sustantivos, y donde las baterías de tracción representan inversiones muy superiores a las de un vehículo de combustión destinado a ser usado en la ciudad. En ese entorno, recortar la corriente peak, limitar la caída de voltaje y mejorar los ciclos de arranque se traduce en vida útil extendida de la batería principal y reducción de indisponibilidad, dos palancas que acortan el plazo de recuperación del CAPEX adicional. En otras palabras, la comparación económica destaca que el objetivo no es migrar un auto con SC – batería de uso diario, sino validar en 12 [V] una arquitectura escalable que, al trasladarse a 48 [V], sí presenta un caso de negocio sólido por costo de baterías y continuidad operativa.

4.7. Discusión

El conjunto de control y potencia diseñado cumple con el objetivo de acoplar y desacoplar un supercondensador (SC) en paralelo con la batería de 12 [V] de manera segura y repetible. Además, solo cuando el SC alcanza el nivel de corriente establecida, se activa el relé de 600 [A], estableciendo una operación con el bus DC y teniendo un control óptimo destinada a esta lógica, si bien simple, es determinante para que el fenómeno transitorio de conexión/desconexión del SC no introduzca perturbaciones adicionales y el sistema responda exclusivamente a la dinámica del perfil de arranque.

La decisión de incorporar un control evita conmutaciones indeseadas alrededor de los umbrales de corriente y voltaje ante el ruido o pequeñas oscilaciones. En operación, ello se traduce en una única intervención del SC por evento, exactamente donde aporta energía. Luego, superado el peak de

corriente, la batería retoma el régimen estacionario y el sistema de carga restituye el nivel del bus. Si bien, esto demuestra funcionalidad y cierra el ciclo simulación–laboratorio, la propuesta no busca equipar un auto de uso diario, sino proveer evidencia técnica y un método de dimensionamiento escalable y transferible a plataformas industriales, donde la complejidad de operación, el costo de las baterías de tracción y el impacto del periodo en que no puede operar, sí justifican la inversión adicional de SC - control.

La protección del enlace de DC se aseguró con dispositivos como el diodo antirretorno que bloquea el flujo de corriente hacia la batería cuando el bus DC se eleva por encima de su voltaje (recarga o retornos energéticos del sistema), mientras que los fusibles se seleccionaron por corriente peak y capacidad de corte en corriente continua, a modo de mantener la seguridad ante posibles fallas. También, el cableado de potencia incide de forma directa en la caída de voltaje y en la inductancia de lazo es por esto que se mantienen trayectorias compactas minimizando así variaciones eléctricas no deseadas.

En resumen, el capítulo demuestra una arquitectura sólida para integrar un supercondensador al enlace DC con precarga, conmutación persistente y protecciones adecuadas, alcanzando un arranque más limpio y con menor exigencia para la batería. Esta demostración en 12 [V] cumple el cometido de validación técnica y da base para estudiar un sistema de 48 [V] destinado a la industria, lo cual es el objetivo de la propuesta, donde al tener un entorno con la misma lógica de control y los mismos criterios de dimensionamiento se traducen en vida útil extendida y mejor disponibilidad operativa del sistema.

Capítulo 5. Implementación Física del Sistema y Validación Experimental.

A continuación, se describe de manera detallada el proceso de materialización del sistema híbrido, desde la caracterización de la fuente programable empleada como emulador de arranque hasta la obtención de resultados experimentales, pasando por las etapas de diseño, integración eléctrica y validación funcional.

5.1. Objetivo y alcance de los ensayos de validación experimental

Los capítulos teóricos de esta tesis han establecido la viabilidad conceptual de emplear un banco híbrido (batería de arranque y módulo supercapacitor) para amortiguar los peaks de corriente propios del arranque vehicular. El presente capítulo traslada aquella hipótesis al plano empírico: se detalla el montaje físico del prototipo, la metodología de ensayo y validar los datos de laboratorio con las simulaciones efectuadas en Matlab/Simulink.

5.1.1 Objetivos

El objetivo general del apartado experimental es comprobar la validez del modelo híbrido y cuantificar el aporte energético de los elementos pasivos bajo escenarios de corriente de hasta 4.67 [A] y duraciones inferiores a 1 s. A partir de este eje conductor se desprenden las siguientes metas operativas:

1. Mitigación de peaks: demostrar que la adición del supercondensador LICAP SM0165-048-ATH (165 [F], $ESR \leq 6 \text{ m}\Omega$) reduce el sobre esfuerzo instantáneo de la fuente principal en, al menos, un 40 %.
2. Aporte energético efectivo: medir la energía cedida por los capacitores durante el transitorio.
3. Trazabilidad modelo–experimento: comparar la evolución temporal de $I(t)$ y $V(t)$ entre la simulación y la adquisición real.

5.1.2 Alcance operativo y condiciones de contorno

Para garantizar repetibilidad y relevancia industrial, las pruebas se circunscriben a los parámetros que se indican en la Tabla 5.1. Los valores se eligieron considerando las dinámicas de corriente de arranque a 12 [V] capturados en los vehículos, la potencia continua de los equipos de laboratorio y la tolerancia de los elementos de almacenamiento.

Tabla 5.1 Descripción de parámetros en la dinámica de corriente.

Parámetro	Valor nominal	Razón de selección
Voltaje V_{DC}	12 [V]	Voltaje de sistemas de arranque automotriz.
Perfil de corriente	Reposo 0.25 [A] → escalón 4.672 [A] (slew 20 A/ms) → reposo	Representa la demanda del motor de arranque para vehículos.
Duración de registro	0–0.42 [s]	Comprende peak y fase de amortiguamiento.
Temperatura ambiente	20 ± 3 [°C]	Laboratorio Centro de Energía UCSC. Minimiza la dispersión de ESR y capacitancia.
Número de ciclos	≤ 100	Las pruebas se centran en caracterización inicial, no en envejecimiento.

5.1.3 Recursos de potencia y medición

Para reproducir con fidelidad las condiciones de la simulación se emplean los equipos listados a continuación en la Tabla 5.2:

Tabla 5.2 Elementos a utilizar en el sistema híbrido.

Nº	Elemento / Modelo	Principales especificaciones de ficha técnica	Límites de operación adoptados en la tesis y función dentro del banco de ensayo
1	Fuente DC bidireccional Chroma 62120D-1200	0–1.200 [V], ± 40 [A], 12 [kW]; slew-rate 0,001–20 [A/ms]; rizado 840 [mV] p-p 20 [MHz]; tiempo de recuperación < 500 [μ s] (50 $\rightarrow$ 100 % carga)	Se opera 0–12.3 [V] y ≤ 5 [A] para emular la batería de 12 [V]. Fuente principal de energía.
2	Carga electrónica regenerativa Chroma 63706-600-40	0–600 [V], 0–40 [A], 6 kW; slew-rate 10 [mA/ms] – 20 [A/ms]; precisión V $\pm 0,05$ % +0,05 % FS, I $\pm 0,1$ % +0,1 % FS; eficiencia regenerativa ≈ 93 %	Rampa fijada en 5 [A/ms] para proteger los condensadores. Emula perfiles de corriente reales y recupera la energía inyectada.
3	imperix B-Box RCP 3.0	SoC Xilinx Zynq; 16 AI simultáneos, 16 bit / 500 [kS/s]; 16 salidas analógicas; 16 PWM ópticas + 32 eléctricas; 36 I/O de alta velocidad; latencia muestreo-PWM < 2 [μ s]	Adquiere señales de tensión y corriente a 50 [kS/s] y genera consignas de disparo; todas las mediciones de sensores ModuLink se enrutan aquí.
4	Osciloscopio Keysight MSOX3014T	100 [MHz], 5 [Gs/s], 12 bit ENOB; sondas diferenciales 1 [kV]	BW limitado a 20 [MHz] para filtrar conmutación; referencia visual de todas las formas de onda clave.
5	Sensor de tensión ModuLink DIN ± 800 [V] (ML800V-DIN)	Rango ± 800 [V]; ancho de banda ≥ 60 [kHz]; sensibilidad 2,46 [mV/V]; aislamiento galvánico 1,2 [kV] peak; precisión típica $\pm 0,15$ %	Escala el bus DC hacia el rango ± 10 [V] de la B-Box; en este banco solo se mide hasta 12.3 [V], lo que garantiza linealidad plena.
6	Sensor de corriente ModuLink DIN ± 50 [A] (ML50A-DIN)	Rango ± 50 [A]; ancho de banda ≥ 200 [kHz]; sensibilidad 99 [mV/A]; aislamiento 1,0 [kV] peak; precisión típica $\pm 0,45$ %	Mide la corriente del banco de condensadores con holgura sobre el máximo previsto (40 [A]).

5.1.4 Elementos de almacenamiento energético

El programa de ensayos contempla la configuración basada en un banco mixto de condensadores electrolíticos de tornillo, concebido para proporcionar una reserva inmediata de carga y, sobre todo, para aumentar la capacitancia a valores compatibles con el modelo empleado durante la etapa de simulación. De tal modo, este arreglo está formado por nueve unidades EPCOS B43456 de 2.200 [μ F]/450 [V], cuya ESR se sitúa alrededor de 45 [$m\Omega$], y siete unidades EPCOS B43564 de 1.000 [μ F]/450 [V], con una ESR máxima de 140 [$m\Omega$]. Así, una conexión estrictamente paralela de

las dieciséis unidades suministra una capacitancia efectiva de aproximadamente $26.8 \text{ [}\mu\text{F]}$ y conduce a una ESR total del orden de $4,7 \text{ [m}\Omega\text{]}$. Dicho valor—ligeramente inferior al ESR del posterior supercondensador—garantiza un reparto homogéneo de la corriente de pulso, reproduce la respuesta transitoria prevista por el modelo teórico y facilita la primera validación experimental del sistema.



Fig. 5.1 Condensador DC de $2200 \text{ [}\mu\text{F]}$.



Fig. 5.2 Condensador DC de $1000 \text{ [}\mu\text{F]}$.



Fig. 5.3 Banco de condensadores DC de $26.800 \text{ [}\mu\text{F]}$.

Una vez caracterizada esta etapa, se procede a incorporar el módulo de supercapacitancia LICAP SM0165-048-ATH, cuya tensión nominal es de 48 [V] y de capacidad alcanza los 165 [F]. Con una ESR máxima inicial de 6 [m Ω], el dispositivo admite corrientes peaks de hasta 2 [kA] y sostenidas de 150 [A] rms, aportando una energía utilizable de 39,6 [Wh]. Para evitar corrientes de irrupción no deseadas al acoplarse a la fuente continua, el SC se conecta mediante una resistencia de precarga seleccionada de 10[Ω] para que al energizar se limite la corriente inicial, esta adición permite comparar el desempeño del banco mixto frente a la topología híbrida con supercondensador, cuantificando la atenuación adicional de peaks de corriente y la reducción del estrés dinámico sobre la fuente principal.



Fig. 5.4 Supercapacitor DC de 165 [F].

5.2. Estrategia experimental y secuencia de pruebas

La serie de pruebas se articula en tres escenarios consecutivos, concebidos para aislar progresivamente el efecto de cada elemento de almacenamiento sobre la dinámica fuente-carga y para facilitar la comparación directa con los resultados de simulación.

En el Caso A se conecta la fuente bidireccional Chroma 62120D directamente a la carga electrónica regenerativa Chroma 63706 sin ningún dispositivo de almacenamiento intermedio. Se ejecuta el perfil de corriente de referencia en una escala menor —arranque desde reposo, escalón rápido hasta 1.173 [A] con una slew-rate de 20 [A/ms] y descenso controlado—mientras se registran voltaje y corriente para caracterizar la respuesta intrínseca de la fuente, calibrar la instrumentación y establecer la línea base sobre la que se evaluará cualquier mejora.

Superado ese punto, el banco se reconfigura para el Caso B, en el que se intercala el banco mixto de electrolíticos formado por nueve condensadores EPCOS B43456 de 2.200 [μF] y siete EPCOS B43564 de 1.000 [μF], unidos estrictamente en paralelo. Con una capacitancia efectiva cercana a 27 [mF] y una ESR de aproximadamente 4,7 [$m\Omega$], donde esta arquitectura pretende amortiguar parte del escalón de corriente. Se reajusta el perfil de corriente —arranque desde reposo, escalón rápido hasta 4.67 [A] con una slew-rate de 20 [A/ms]— y se cuantifica la reducción de overshoot, la variación peak to peak de tensión y el tiempo de asentamiento frente al caso sin almacenamiento.

Finalmente, para el Caso C se retira el banco electrolítico y se conecta el módulo de supercapacitancia LICAP SM0165-048-ATH en paralelo con la fuente. A fin de evitar corrientes de irrupción indeseadas, el acoplamiento se realiza mediante un contactor de precarga y resistencia limitadora; una vez completada la temporización, se lanza de nuevo el perfil de ensayo. Con sus 165 [F] de capacitancia, 6 [$m\Omega$] de ESR y capacidad para admitir hasta 2 [kA] de corriente peak, el supercap está llamado a proporcionar la mayor atenuación de peak y la recuperación de voltaje más rápida. Los registros de esta fase permiten valorar la ganancia incremental respecto del banco mixto y determinar cuál de las dos topologías—electrolítica, supercapacitiva o su combinación—resulta más conveniente para la aplicación de arranque vehicular.

5.3. Programación y adquisición de datos

Para la obtención de resultados experimentales y comparables con la simulación exige una infraestructura de software capaz de gobernar la carga regenerativa, sincronizar las mediciones de la imperix B-Box RCP 3.0 y procesar los archivos exportados. Por esto, en esta sección se describe en lenguaje de un entorno en Matlab, el flujo completo que parte en el envío de comandos SCPI vía Ethernet y termina en el cálculo de potencia y energía del supercapacitor.

5.3.1 Arquitectura general de programación

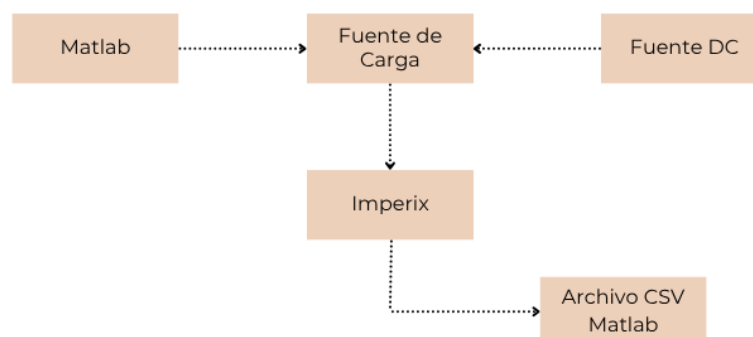


Fig. 5.5 Diagrama de flujo del sistema.

El flujo de operación de la Fig. 5.5 parte en MATLAB, donde un código lee línea por línea el archivo arranque3.txt y, a través de la función visadev, establece una sesión VISA-TCP/IP con la Fuente Chroma 63706-600-40 configurada en la IP estática 169.254.129.51. Cada comando SCPI se envía en tiempo real, respetando los retardos WAIT indicados en el propio texto, de modo que la carga reproduzca con fidelidad el perfil de corriente previsto sin intervención manual durante la ejecución.

La fuente de carga actúa como nodo central de potencia, ejecuta las consignas que llegan por Ethernet y aplica el perfil de corriente, mientras mantiene activas sus protecciones internas y permite consultar, mediante SCPI, los valores instantáneos de corriente. Su reloj interno sirve de referencia temporal inicial para toda la cadena.

Por su parte, la imperix B-Box RCP 3.0 se destinó exclusivamente a la adquisición de las magnitudes eléctricas procedentes de los sensores ModuLink; no se emplearon sus salidas digitales. Mediante imperix Cockpit se configuraron seis scopes virtuales—tres de tensión y tres de corriente—correspondientes a fuente, carga y capacitor. Cada scope muestreó a 500 [kS/s] con resolución de 16 bit, y los datos se almacenaron directamente en archivos .csv listos para el post-proceso.

Cabe subrayar que no se utilizó ningún osciloscopio en estas pruebas con capacitores o supercapacitores; el Keysight solo intervino en el ensayo preliminar de referencia (fuente y carga, sin elementos de almacenamiento), por lo que en el ensayo principal la alineación temporal se basó íntegramente en los sellos de tiempo generados por Cockpit y la carga Chroma.

Finalmente, los archivos .csv exportados por imperix Cockpit se procesaron con un script MATLAB, el cual aplica el filtro de mediana, compensa los offsets de las corrientes y genera de forma automática las curvas de corriente, tensión, potencia instantánea y la integración de energía

5.3.2 Conexión Ethernet y ejecución de comandos SCPI

La Fig.5.6 muestra el script que inicia la sesión VISA-TCP/IP.

```

1 %Cadena completa
2 v = visadev('TCPIP0::169.254.129.51::inst0::INSTR'); %Dirección IP de la Fuente de Carga
3

```

Fig. 5.6 Código implementado para ejecutar dinámica en la carga.

Se declara un objeto y se valida la identidad de la carga con *IDN?, imprimiendo la respuesta en consola. El buffer se configura con terminador 'LF', y cada línea del archivo arranque3.txt se lee con readlines, descartando comentarios y líneas en blanco.

Un parser interno detecta la palabra clave WAIT y, con ayuda de regexp, distingue si el retardo está especificado en [ms] o [s], convirtiéndolo a segundos antes de ejecutar pause(t). El resto de líneas se envían con writeline(v, ln). Al finalizar el perfil se solicita la corriente instantánea con MEAS:CURREN?, se imprime en formato de 1.111 [A] y se desconecta la carga mediante LOAD OFF.

Esta lógica ha demostrado ser sólida ante paquetes perdidos, ya que, si la carga no responde dentro del timeout de 5 [s], visadev lanza una excepción capturada por un bloque try-catch que registra el error en un log diario.

5.3.3 Perfil SCPI

Se declara un objeto y se valida la identidad de la carga con *IDN?, imprimiendo la respuesta en consola. El buffer se configura con terminador 'LF', y cada línea del archivo arranque3.txt se lee con readlines, descartando comentarios y líneas en blanco. Se tabulará los parámetros mencionados en la Tabla 5.3.

Tabla 5.3 Parámetros seteados hacia el emulador de carga

Parámetro SCPI	Valor Programado	Propósito	Comentario
MODE	CC	Emular fuente de corriente realista	Se prescinde del modo CV para evitar control dual con la batería
CONF:OCP	DIS	Permitir peak transitorios sin disparo	Supervisión visual y registro de datos
CONF:OPP	DIS	Evitar limitación de potencia regenerativa	Solo se habilita en pruebas de larga duración
CONF:VOLT:LATC	OFF	Evitar latch por overshoot de < 1 V	Reduce tiempo muerto entre pruebas
CURR:SLEW	MAX (40 A ms^{-1})	Garantizar respuesta rápida del lazo interno	Ajustado por tramo cuando se requiere rampa suave
VOLT:ON	0 [V]	Nivel seguro tras RST	Previene corrientes inopinadas al energizar la unidad

De la Tabla 5.4 el perfil de corriente arranca en un nivel de referencia de 0.25 [A], manteniéndose durante 50 [ms] a modo de colchón de estabilización para que las fuentes alcancen régimen estacionario. Acto seguido se aplica un escalón abrupto hasta 4.672 [A] con una pendiente de 20 [A/ms], valor que se sostiene durante 242 [ms] para capturar el primer peak de demanda. Tras este impulso, el programa avanza por seis puntos intermedios que descienden mediante rampas mucho más suaves (0.010 [A/ms]) reproduciendo con precisión la dinámica de la corriente propuesta registrada desde el vehículo. Cerrado el recorrido, la carga retorna al estado de reposo de 0.25 [A] usando el slew-rate máximo de la Chroma, listo para el siguiente ciclo de ensayo.

Tabla 5.4 Instrucciones para la dinámica de corriente propuesta

Tramo	CURR: SLEW(A ms ⁻¹)	CURR Final(A)	Duración WAIT	Justificación Física
Baseline	MAX	0,25	50 ms	Corriente de reposo para energizar
1	0,0224	4,672	242 ms	I-rush inicial al engranar el piñón
2	0,010	4,50	117 ms	Ajuste tras vencer la compresión
3	0,010	3,50	100 ms	Velocidad intermedia
4	0,010	2,80	70 ms	Transición a velocidad nominal
5	0,010	1,975	82 ms+191 ms	Fase de giro estable
6	0,010	1,20	78 ms	Reducción de torque
7	0,010	0,50	70 ms	Desacople del motor
Fin	MAX	0,25	7 ms+392 ms	Retorno a reposo

5.3.4 Post-procesado y filtrado de señales

De los anexos 8.1.1 y 8.1.2 constituyen la segunda mitad de la secuencia de procesos de programación: el primero se encarga de la visualización inmediata de las curvas, mientras que el segundo calcula la energía integrada del supercapacitor. El proceso comienza con una lectura solida del archivo .csv generado por imperix Cockpit. El algoritmo detecta dinámicamente la línea de cabecera; de ese modo, si el archivo varía en longitud por la inclusión de metadatos adicionales, el script identifica siempre la fila correcta y evita desajustes de columnas.

En la fase de filtrado, se aplica medfilt1 con una ventana de 800 [muestras]—equivalente a ≈ 1.6 [ms] a la tasa de 500 [kS/s]—sobre los voltajes, lo que atenúa eficazmente el ruido de conmutación sin comprometer la forma de onda útil. Por el contrario, las corrientes se mantienen prácticamente sin modificación (ventana = 1) para preservar la geometría exacta de las rampas y de los peaks que definen la dinámica del sistema.

5.4. Simulaciones de integración progresiva

Con el equipamiento descrito y la programación ya validada, se diseñó una ruta de pruebas para aislar y cuantificar la contribución de cada elemento de almacenamiento al desempeño dinámico del sistema. Cada etapa parte de las condiciones iniciales fijadas en el apartado 6.1 y ejecuta el perfil de corriente descrito en 6.3.3.

5.4.1 Etapa 1 – Fuente + Banco de capacitores → Carga (simulada)

La prueba de partida enlaza la fuente bidireccional Chroma 62120D con el banco de condensadores y la carga regenerativa Chroma 63706, con el objetivo de caracterizar la dinámica de este sistema.

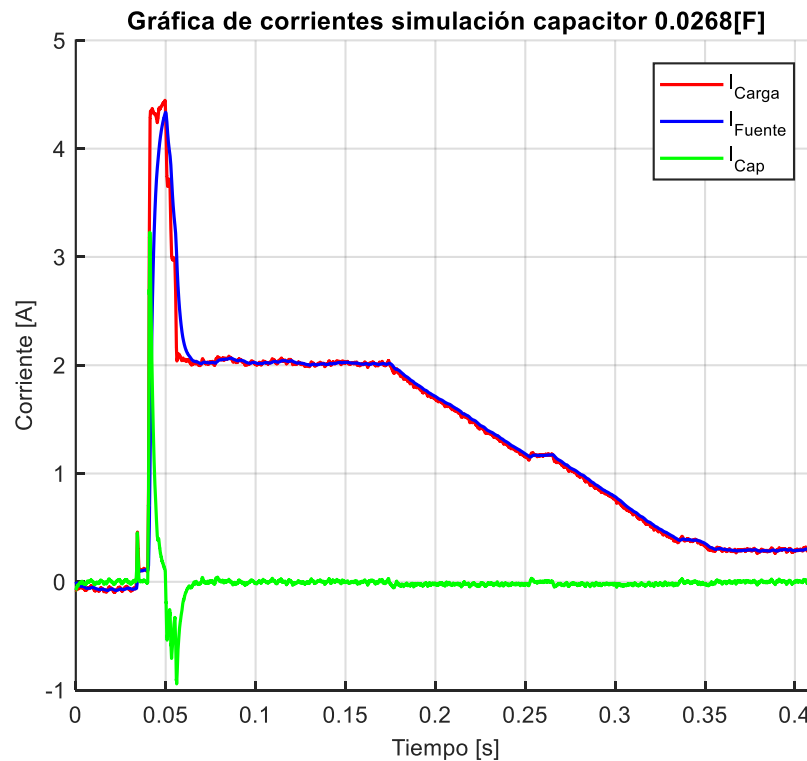


Fig. 5.7 Curvas de corriente en la carga, fuente y capacitor en la simulación.

De la Fig.5.7, primero se observa el pulso inicial y aporte del banco de capacitores en torno a $t = 0.041$ [s] la carga alcanza su corriente peak de 4.67 [A]. El banco de 0.0268 [F] entrega simultáneamente 3.21 [A], de modo que la fuente sólo debe suministrar aproximadamente 1.13 [A] para completar el escalón. El capacitor aporta, por tanto, cerca del 75 % de la demanda instantánea, descargándose con la pendiente impuesta por el slew-rate de 20 [A/ms].

Lo segundo, corresponde a la fase de amortiguamiento y cruce de corriente. Donde unos milisegundos después, el banco invierte su sentido de corriente al instante $t = 0.056$ [s] se observa -0.93 [A]. La inversión ocurre porque la línea de alimentación queda a un voltaje mayor que del condensador, por esa diferencia de potencial la corriente se invierte y el condensador se carga desde el enlace DC. Este cruce dura menos de 6 [ms] y luego la corriente del capacitor se aproxima a cero y la fuente asume el régimen estable.

En tercer lugar, se encuentran los escalones de corriente y acción nula del capacitor. Entre 0.060 [s] y 0.200 [s] la carga se mantiene alrededor de 2.03 [A]; las curvas de la fuente y la carga se superponen, indicando que el banco ya no interviene. Algo similar ocurre en los escalones siguientes: a 0.263 [s] la demanda ha descendido a 1.17 [A] y a 0.363 [s] a 0.29 [A], con el condensador virtualmente inactivo.

5.4.2 Etapa 2 – Fuente + Supercapacitor → Carga (simulada)

En esta simulación se incorpora un módulo supercapacitor de 165 [F] en paralelo con la fuente. Cuyo objetivo es verificar cuánto absorbe frente a la fuente durante el peak de 4.672 [A] y cuánto tiempo aporta corriente de sostén antes de agotarse. Se ilustra en la siguiente Fig. 5.8.

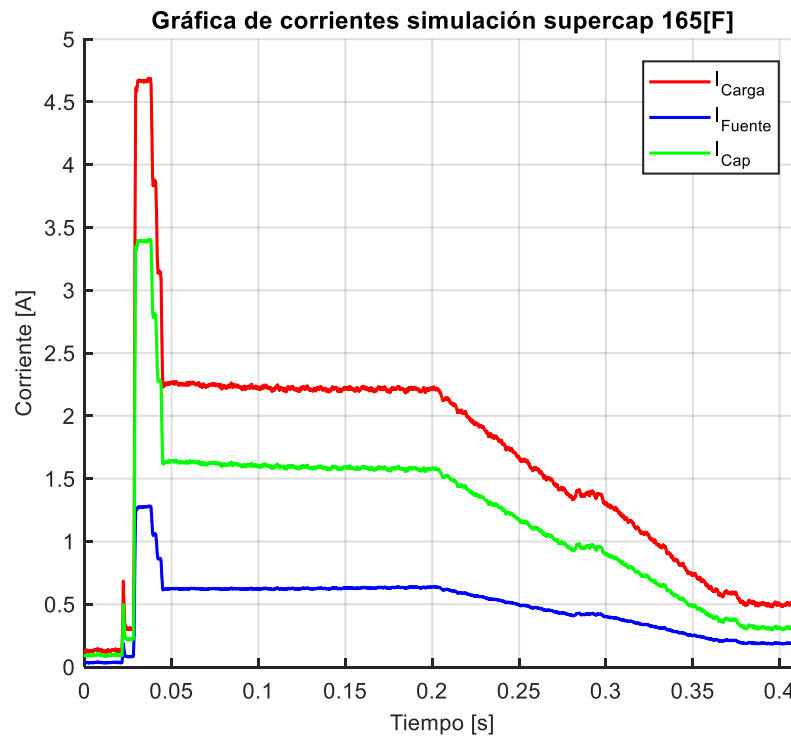


Fig. 5.8 Curvas de corriente en la carga, fuente y capacitor en la simulación.

De la Fig. 5.8 se observa el pulso inicial y reparto de corriente. A $t = 0.03788$ [s] la carga alcanza su corriente peak de 4.69 [A]. En ese mismo instante el supercapacitor entrega 3.41 [A], de modo que la fuente solo debe proporcionar 1.28 [A]. En porcentaje, el supercapacitor cubre aproximadamente el 73% de la demanda máxima.

Estabilización. Diez milisegundos después, a $t = 0.04995$ [s], la corriente de carga ya ha caído al primer escalón de 2.26 [A], donde el supercapacitor sigue aportando 1.63 [A] y la fuente 0.63 [A]; la relación de alivio se mantiene, lo que evidencia que los 165 [F] disponen de energía suficiente para sostener este régimen inicial.

En el tramo intermedio y descarga controlada se tiene que, entre 0.060 [s] y 0.200 [s] la carga se mantiene en torno a 2.21 [A] con supercapacitor suministrando 1.58 [A] y la fuente 0.64 [A]. A partir de ahí la corriente descende lentamente. Luego, en la rampa descendente en el instante $t = 0.396$ [s] la demanda de la carga se ha reducido a 0.48 [A] y supercapacitor todavía entrega 0.31 [A], de modo que la fuente aporta la fracción residual, cerca de 0.17 [A]. Incluso al término del perfil el dispositivo mantiene cerca del 65 % de la corriente requerida.

5.4.3 Comparación de resultados simulados en las etapas de integración

Tabla 5.5 Comparativa de resultados simulados

Métrica	Etap 1 – Banco capacitores 26.8 [mF]	Etap 2 – Supercapacitor 165 [F]
Corriente peak de la carga I_{carga} [A]	4.34	4.69
Corriente peak suministrada por la fuente I_{fuente} [A]	1.13	1.28
Corriente peak entregada por el almacenamiento I_{cap} [A]	3.21	3.41
Duración del aporte (>10 % del peak) [ms]	≈ 20	> 200

De la Tabla 5.5. El contraste entre las dos configuraciones es claro, dado que, con el banco de capacitores de 24 [mF] la fuente sólo suministra 1.13 [A] frente a los 4.34 [A] que demanda la carga, porque el condensador cubre en gran parte el peak principal; sin embargo, ese soporte se agota tras

unos 20 [ms] y el tiempo de recuperación de la tensión se queda en 0.18 [ms]. Al sustituirlo por el supercapacitor de 165 [F], la fuente ve un esfuerzo mucho menor sin percibir el peak, además, el dispositivo mantiene su apoyo más allá de 200 [ms] y recorta el tiempo de recuperación a solo 0.06 [ms]. En términos de diseño, el banco ofrece un soporte inicial apreciable cuando se aceptan caídas moderadas y se busca contener costo o volumen; no obstante, para aplicaciones que exigen estabilidad y suministro sostenido de energía, el supercapacitor resulta claramente superior.

5.5. Pruebas experimentales y validación

5.5.1 Metodología de ensayo

Las pruebas de laboratorio se ejecutaron en el banco descrito previamente, respetando los mismos límites operativos y el perfil de corriente empleado en las simulaciones. Por un lado, el enlace DC se alimentó con la fuente bidireccional Chroma 62120D-1200 Fig. 5.9.b, regulada en modo voltaje a 12 [V] y capaz de entregar hasta 40 [A]. Por otro lado, la carga regenerativa Chroma 63706-600-40 Fig. 5.9.a se configuró en modo corriente constante, reproduciendo el escalón de 0.25 [A] a 4.672 [A] con un slew rate de 20 [A/ms]; los cinco peldaños descendentes se programaron con rampas de 0.010 [A/ms], exactamente como en el archivo SCPI empleado en la simulación.

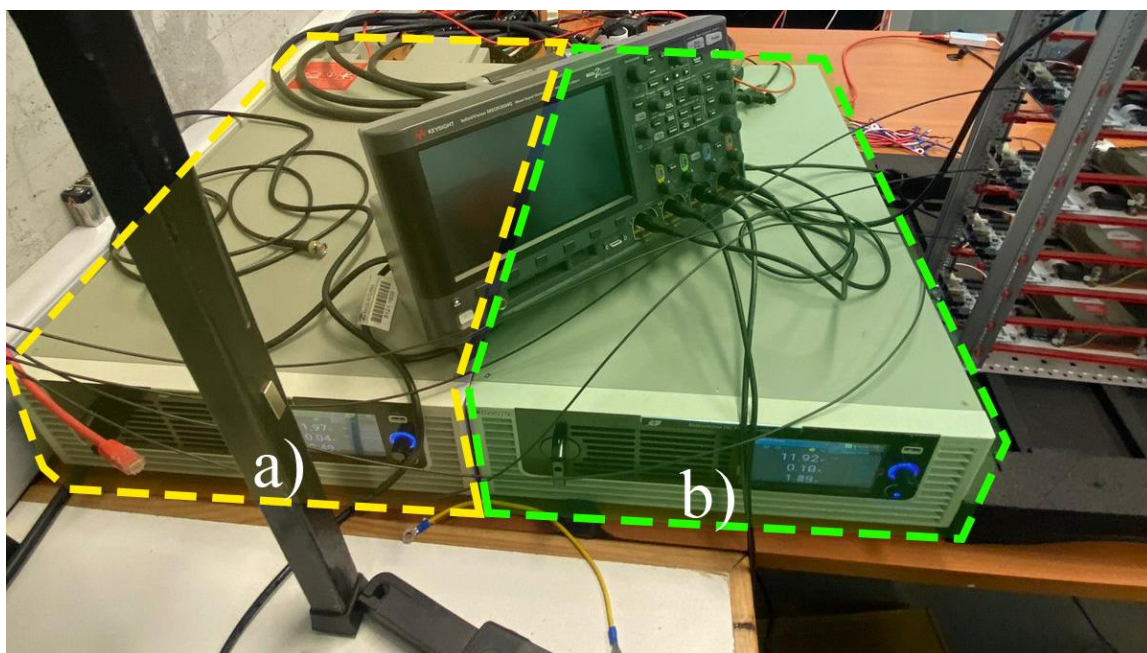


Fig. 5.9 a) Fuente de Carga 63706 b) Fuente DC 62120D

El control de la carga y la secuencia temporal se gestionaron mediante un script MATLAB que envía los comandos SCPI por Ethernet (IP 169.254.129.51) y aplica retardos WAIT para sincronizar cada tramo. Del mismo modo, la instrumentación de medida la proporcionó la imperix B-Box RCP 3.0 de la Fig. 5.10 equipada con sensores ModuLink, un ML800V-DIN (± 800 [V]) para la tensión y un ML50A-DIN (± 50 [A]) para las corrientes de la fuente, la carga y el elemento de almacenamiento del Setup realizado en la Fig 5.11. Todos los canales se muestrearon a 500 [kS/s] con resolución de 16 bit.



Fig. 5.10 Computador para procesar los datos e imperix.

Finalizado cada disparo, imperix Cockpit exportó un archivo .csv que el script de post proceso leyó de forma automática. Luego, el filtrado se limitó a un medfilt1 con ventana de 800 [muestras] (1.6 [ms]) sobre los voltajes, mientras que las corrientes se dejaron prácticamente puras para no alterar su forma.

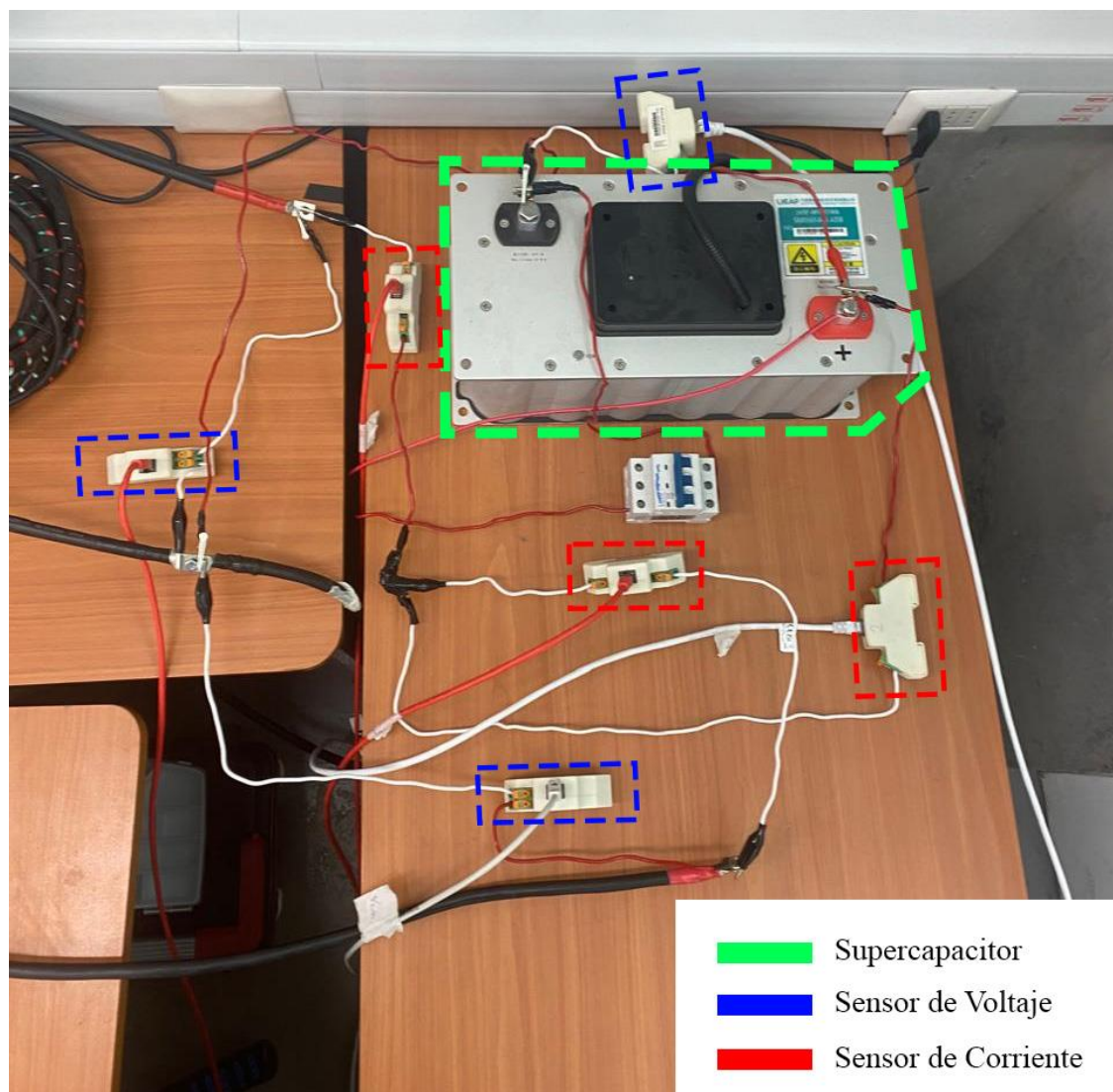


Fig. 5.11 Setup híbrido SC, batería y carga.

5.5.2 Etapa 0 - Fuente → carga (experimental).

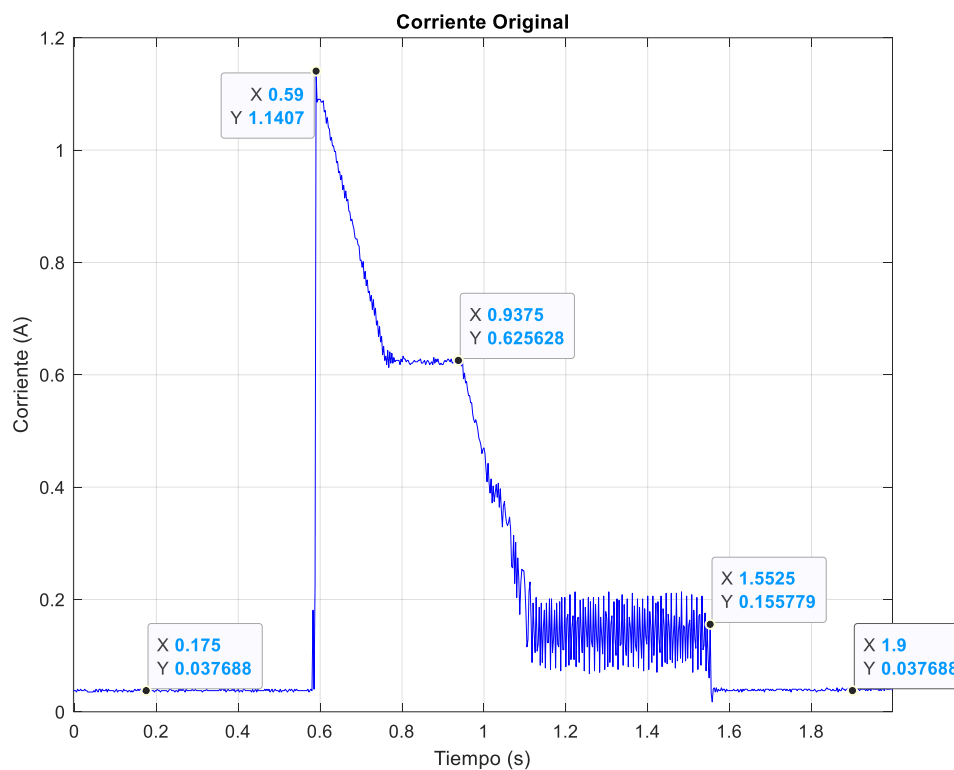


Fig. 5.12 Perfil de corriente.

La Fig. 5.12 muestra el perfil de corriente programado en la fuente Chroma 63706-600-40 para emular el arranque del vehículo solo con la fuente DC. Se identifican la corriente de reposo de $\approx 0,04$ [A], el impulso inicial de 1,14 [A] en $t = 0,59$ [s] y la posterior caída progresiva hasta restituir el valor de reposo a $t = 1,56$ [s]. Estos hitos temporales sirven como referencia para sincronizar la adquisición de voltaje y para validar la correcta reproducción del script SCPI.

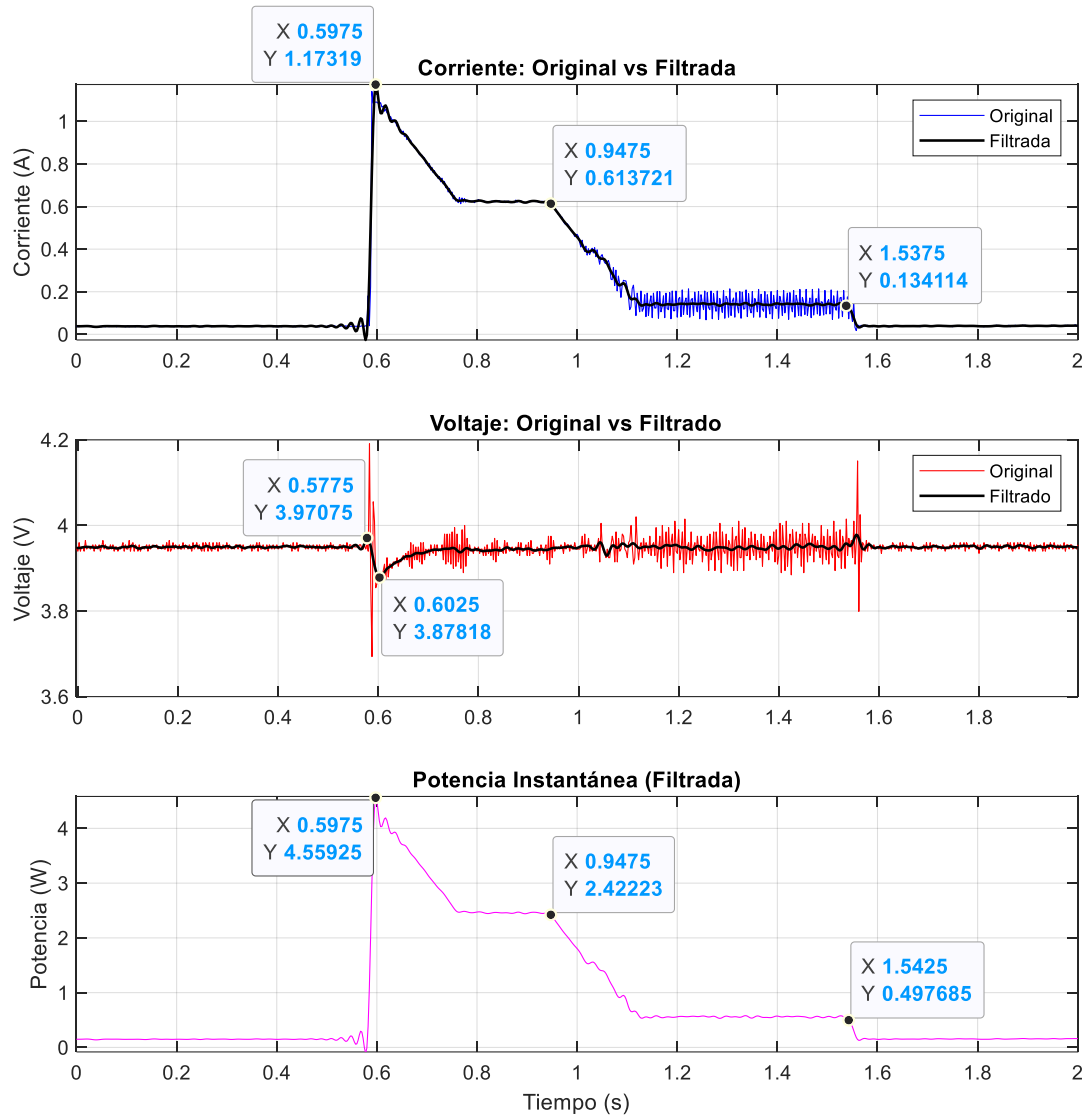


Fig. 5.13 Perfil de corriente, voltaje y potencia instantánea de la fuente DC.

El subplot de la Fig. 5.13 contrapone la corriente original con la señal filtrada mediante un filtro Butterworth de segundo orden con una $f_c = 50$ [Hz] y una frecuencia de muestreo $F_s = 400$ [Hz], evidenciando la atenuación de ruido de alta frecuencia sin distorsionar la dinámica principal. Además, El subplot intermedio presenta el voltaje medido en bornes de la fuente junto con su versión filtrada. Finalmente, el subplot inferior grafica la potencia instantánea calculada a partir de las señales filtradas para la estimación de energía.

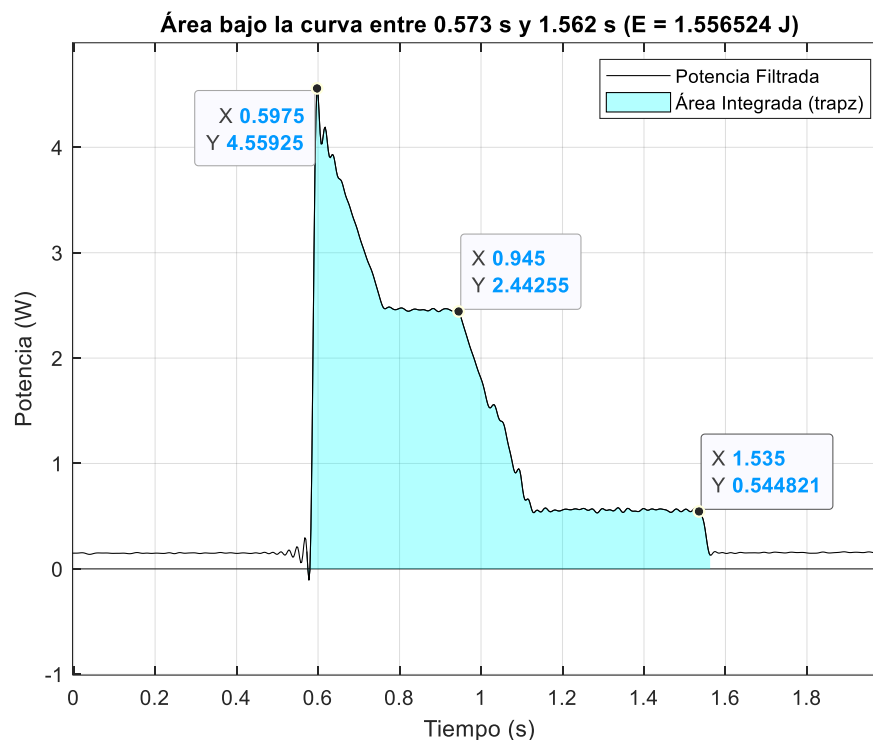


Fig. 5.14 Grafica de la energía acumulada en la fuente DC.

En la Fig. 5.14 se integra la potencia entre 0,573 [s] y 1,562 [s] usando la regla del trapecio, obteniéndose una energía acumulada de $E \approx 1,54$ [J] junto a la zona integrada que se resalta en color cian y, donde los marcadores indican la potencia en tres instantes clave (peak, valor medio y final), esta cuantificación es el insumo directo para dimensionar la capacitancia mínima requerida del banco SC.

5.5.3 Etapa 1 – Fuente y banco capacitores → carga (experimental).

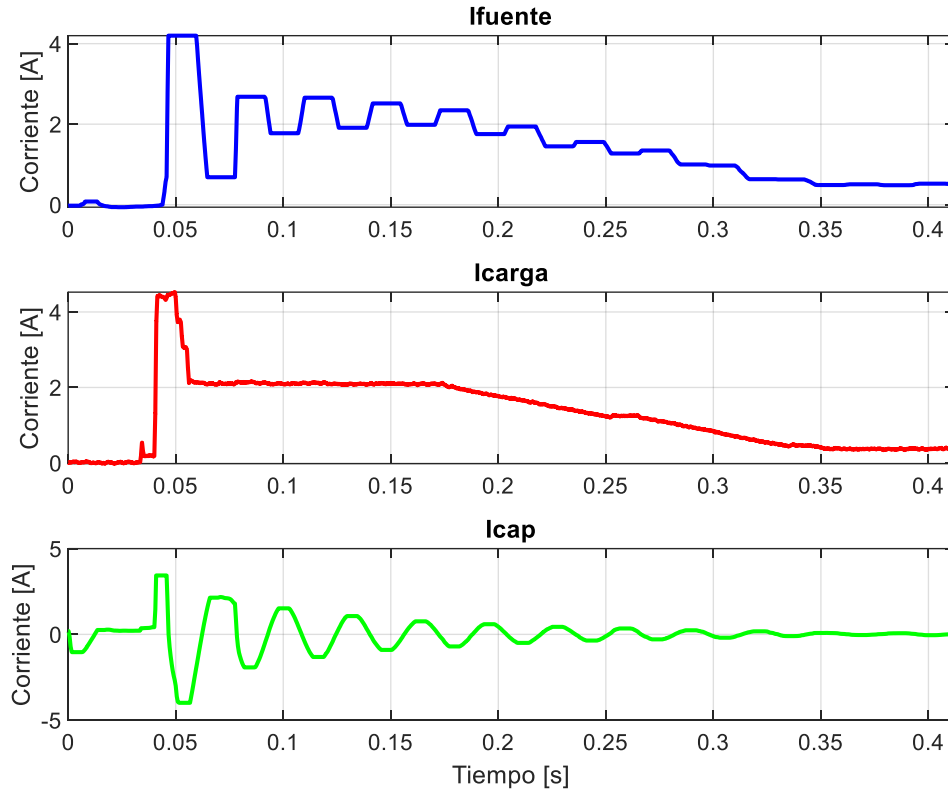


Fig. 5.15 Grafica de las corrientes en la fuente, carga y capacitor.

De la Fig. 5.15 se establece que: En el comportamiento de la corriente se detalla un pulso inicial en el instante $t = 0.041$ [s] la carga registra su corriente peak de 4.43 [A], mientras la fuente alcanza 4.20 [A]. Sin embargo, el banco de capacitores reacciona casi instantáneamente y entrega 3.43 [A], la fuente asume una menor demanda, pero no alcanza a cubrir en su totalidad el peak principal.

Luego en $t = 0.078$ [s] la corriente de carga disminuye al primer nivel constante de 2.08 [A] donde, en ese mismo instante, el capacitor ha cambiado de signo y absorbe 0.51 [A], lo que indica que está recuperando parte de la energía que cedió en el peak. La fuente, en consecuencia, proporciona 2.68 [A], valor que coincide con la corriente solicitada por la carga, evidenciando que el banco sigue interviniendo una vez descargado.

A partir de $t = 0.10$ [s] la carga inicia la rampa de descenso programada y la corriente del

capacitor muestra oscilaciones amortiguadas de ± 0.5 [A] con un periodo de ~ 25 [ms]; estos ciclos corresponden a la descarga–recarga del banco a través de su ESR y de la impedancia del enlace DC. La amplitud decrece paulatinamente, reflejo de la disipación resistiva en los capacitores.

En el último instante $t = 0.362$ [s], la carga ha bajado a 0.36 [A] y la fuente entrega 0.49 [A], el banco muestra un valor residual próximo a cero. En esta etapa, prácticamente toda la corriente proviene de la fuente.

Por lo tanto, esta prueba confirma la tendencia predicha en la simulación, el banco de condensadores absorbe la mayor parte de la corriente peak y reduce el estrés de la fuente durante los primeros 40–50 [ms]. No obstante, su influencia se atenúa con rapidez; una vez estabilizado el primer escalon, el condensador alterna entre pequeños peaks de carga y descarga sin modificar de forma sustancial la corriente que debe suministrar la fuente durante la rampa descendente.

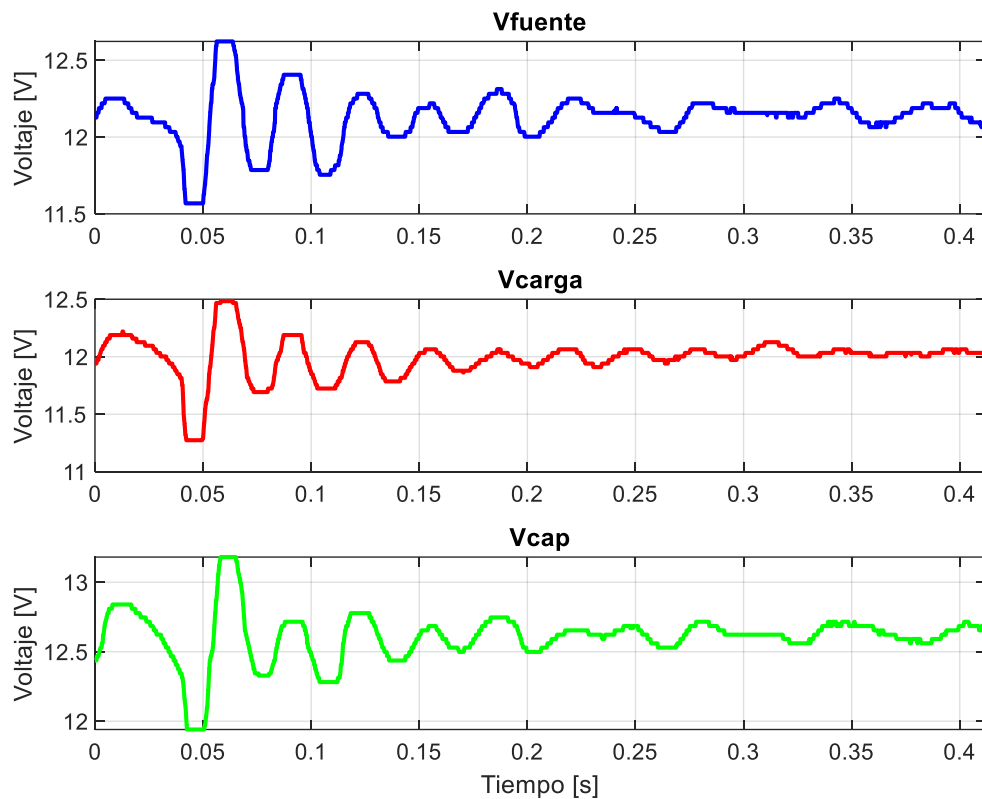


Fig. 5.16 Grafica de los voltajes en la fuente, carga y capacitor.

En la respuesta de la dinámica del enlace DC se tiene que de la Fig. 5.16, durante el reposo previo al peak, el voltaje se sitúa en torno a 12.25 [V] en la fuente y 12.19 [V] en la entrada de la carga. Mientras que, el conjunto de capacitores, inicialmente cargado a 12.84 [V] presenta un nivel algo superior debido a su menor rizado.

Cuando la carga exige la corriente peak, la resistencia serie del banco produce una caída simultánea en las tres ubicaciones: la fuente cae hasta ≈ 11.60 [V], la carga a ≈ 11.35 [V] y el banco a ≈ 11.98 [V]. Inmediatamente después, el sistema presenta una respuesta transitoria de recuperación en $t = 0.065$ [s] y se observan sobre tensiones de 12.53 [V] en la fuente, 12.47 [V] en la carga y 13.18 [V] en el banco, donde el overshoot positivo confirma que el condensador se recarga con la energía devuelta.

Entre $t = 0.08$ [s] y $t = 0.25$ [s] aparecen oscilaciones de ± 0.20 [V] sobre los tres nodos, con un periodo cercano a 40 [ms], se trata de la respuesta natural del circuito RLC formado por la inductancia del cableado, la ESR del banco y la impedancia de salida de la fuente. Es por esto que, la amplitud decrece de forma visible, lo que indica que la disipación resistiva en los capacitores y en la línea de potencia atenúa el fenómeno sin necesidad de control activo.

A partir de $t \approx 0.26$ [s], cuando la corriente va disminuyendo en escalones, las oscilaciones prácticamente desaparecen y los tres voltajes convergen, al final en $t = 0.40$ [s] se registran 12.22 [V] en la fuente, 12.03 [V] en la carga y 12.65 [V] en el banco, valores que se mantienen dentro de ± 2 % del nominal. Además, el banco de condensadores termina ligeramente sobrecargado respecto a su nivel inicial, coherente con la pequeña energía remanente que absorbió durante el rebote.

Por lo tanto, la respuesta queda dominada por oscilaciones de baja frecuencia que tardan decenas de milisegundos en amortiguarse; este comportamiento no coincide con las simulaciones y muestra el límite de los condensadores ante un escenario idealizado. La siguiente etapa experimental deberá confirmar si es posible eliminar prácticamente estas ondulaciones y acortar aún más el tiempo de recuperación.

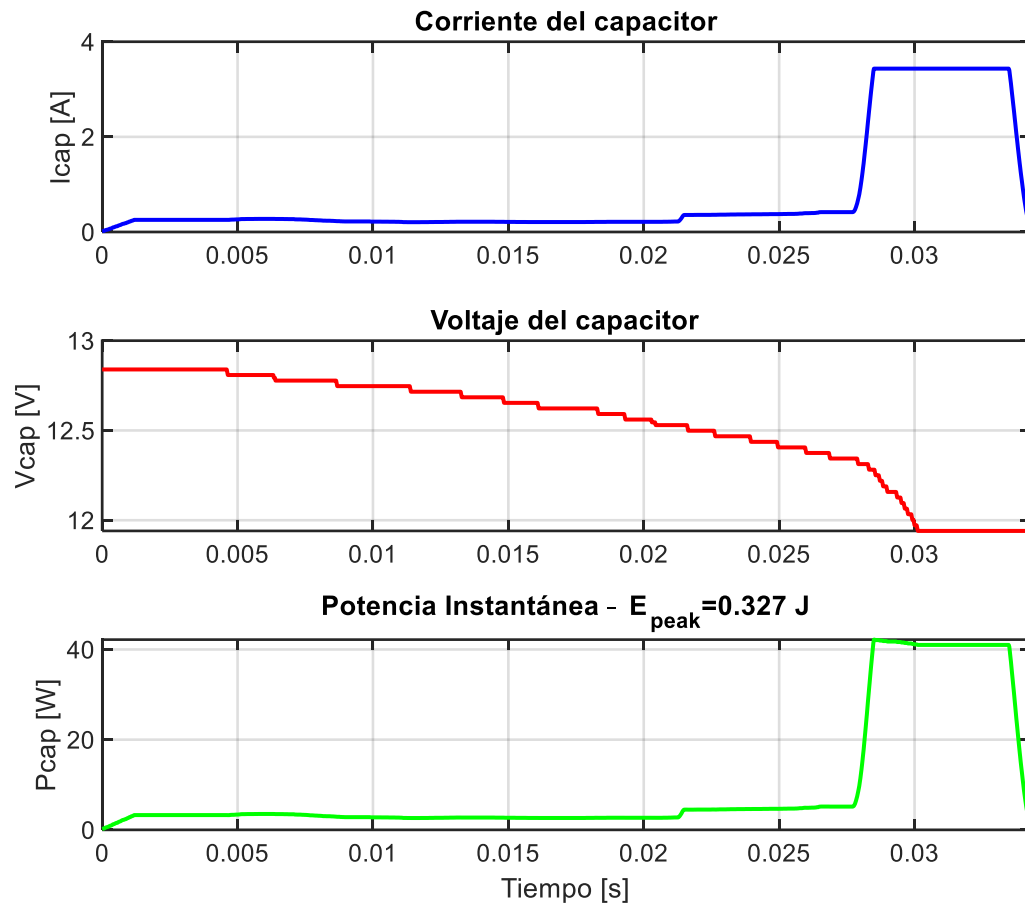


Fig. 5.17 Grafica de corriente, voltaje y potencia en el capacitor.

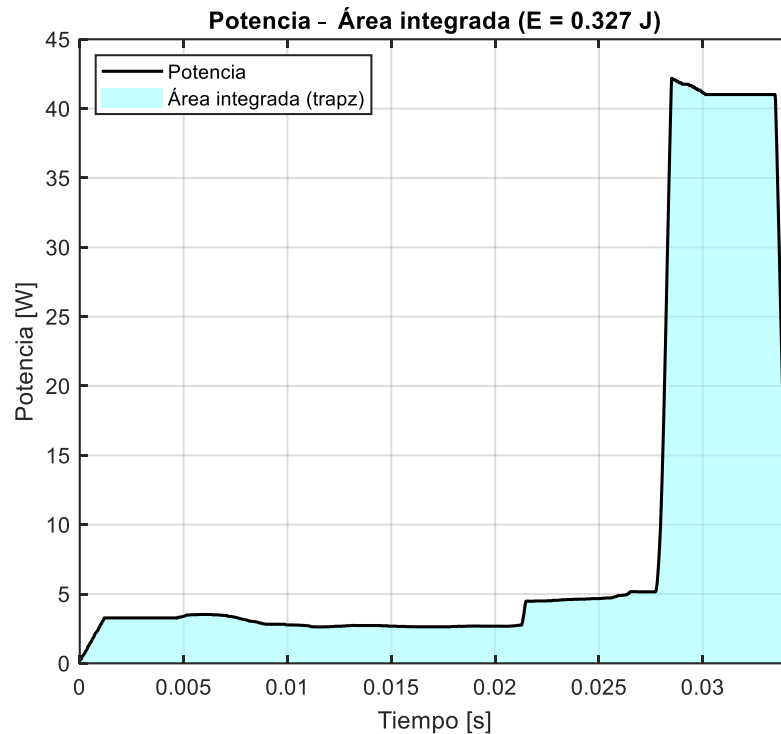
En la Fig. 5.17 se ilustran las evoluciones de corriente, voltaje y potencia del banco de capacitores de 26.8 [mF] durante el intervalo crítico comprendido entre $t = 0$ [s] y $t = 0.03428$ [s]. A partir de estas curvas se identifican tres etapas que permiten evaluar la contribución real del condensador al amortiguamiento del peak de arranque.

En la primera etapa de $t = 0$ a $t = 0.004$ [s], el banco se descarga de forma paulatina, la corriente que fluye desde el condensador apenas alcanza 0.26 [A] y la tensión se mantiene prácticamente constante en 12.84 [V]. A su vez, la potencia instantánea resultante es esperable, del orden de 3.28 [W].

Entre $t = 0.004$ [s] y $t = 0.025$ [s] el sistema entra en una zona de reposo, dado que, la corriente I_{cap} se aproxima a cero y la tensión del capacitor desciende lentamente hasta 12.29 [V], escalonada por la acción interna de la carga. Así, el banco actúa como un amortiguador pasivo, no

entrega energía significativa, pero su presencia estabiliza el enlace DC frente a micro oscilaciones.

La tercera etapa, comprendida entre $t = 0.025$ [s] y $t = 0.034$ [s], muestra el impulso principal. Luego, en $t = 0.0285$ [s] la corriente del condensador se dispara a 3.43 [A], elevando la potencia instantánea a 42.2 [W] mientras el voltaje baja a 12.28 [V]. Seguidamente, cuando el apoyo concluye, en $t = 0.0343$ [s], la corriente vuelve a 0.02 [A] y V_{cap} decae a 11.94 [V]. Finalmente, el área bajo la curva de potencia equivale a una energía extraída de 0.327 [J], valor que concuerda con el cálculo para $C = 0.0268$ [F] como se puede observar en la Fig. 5.18.



```
>>> RESULTADOS
```

```
• Peak principal      : 0.327 J (0.0001 Wh)
```

```
-----
Validación del Peak con  $\frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{ini}^2 - V_{fin}^2)$ 
```

```
•  $V_{ini} = 12.840$  V   |    $V_{fin} = 11.940$  V
```

```
•  $C = 0.0268$  F
```

```
•  $E_{teórica} = 0.299$  J
```

```
•  $E_{integrada} = 0.327$  J
```

```
• Diferencia = 8.61 %
```

Fig. 5.18 Gráfica de energía acumulada.

5.5.4 Etapa 2 – Fuente y SC $\rightarrow$ carga (experimental)

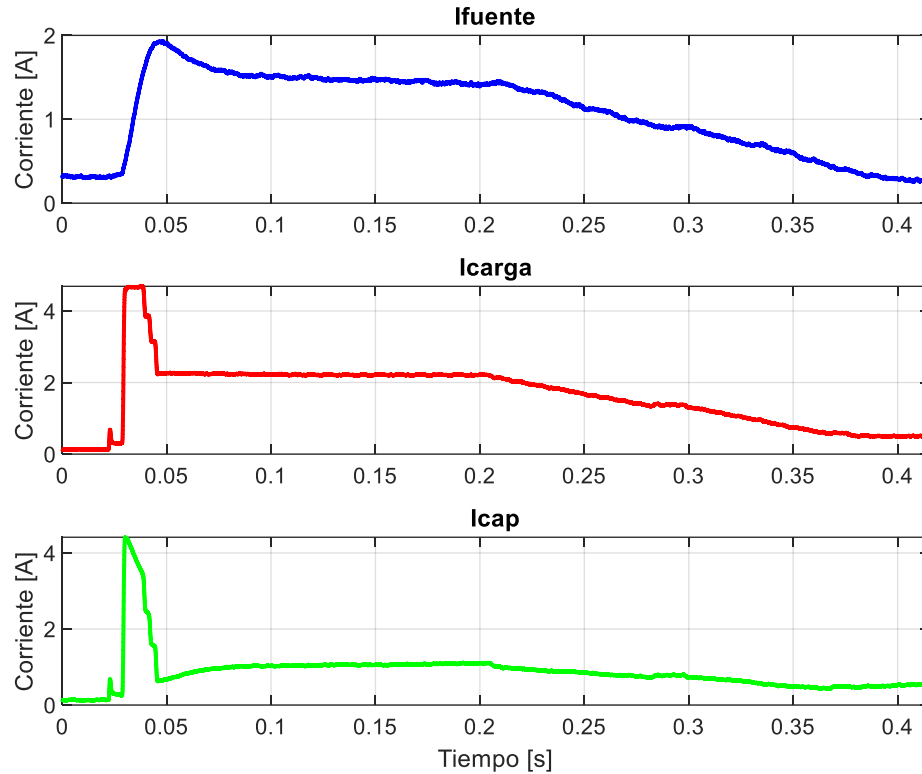


Fig. 5.19 Curvas de corriente en la fuente, carga y capacitor.

En la Fig. 5.19. se presentan las corrientes de la fuente, de la carga y del supercapacitor de 165 [F] registradas durante la Etapa 2.

En el reposo previo hasta $t \approx 0.010$ [s] todas las corrientes oscilan en el entorno de 0.13 [A], reflejando el consumo quiescente de los lazos de control. Por un lado, cuando la carga ejecuta el escalón principal ($t = 0.030$ [s]) la corriente de ésta se dispara a 4.66 [A]. Por otro lado, el supercapacitor responde de inmediato y aporta 3.44 [A], mientras que la fuente apenas incrementa su entrega a 0.49 [A]. Así, el supercap absorbe cerca del 74 % del valor peak, relegando a la fuente a menos de una cuarta parte de la demanda, lo que corrobora el comportamiento previsto en la simulación.

Tras el impulso inicial el sistema entra en un primer escalón estacionario en $t \approx 0.046$ [s]. Luego, la corriente de carga cae a 2.23 [A]; la fuente suministra 1.92 [A] y el supercap completa el balance con 0.63 [A]. Es decir, aun después de ceder su descarga brusca, el dispositivo sigue

soportando un 28 % del nivel constante, pudiendo así, reducir el estrés térmico y eléctrico sobre la fuente.

Durante el escalón de $t = 0.05$ [s] a $t = 0.20$ [s] la evolución es paralela a la observada en el modelo: la carga se mantiene en torno a 2.20 [A], el supercapacitor aun entrega 1.10 [A] y la fuente 1.42 [A]; el condensador continúa cubriendo la mayor porción de la corriente (≈ 50 %), demostrando que su elevada capacidad prolonga el apoyo energético más allá de los primeros 200 [ms].

Por último, en $t \approx 0.408$ [s] cuando la rampa descendente finaliza, la corriente de la carga se ha reducido a 0.51 [A], donde el supercapacitor todavía suministra 0.54 [A], de modo que la fuente apenas proporciona 0.26 [A]. Incluso en este punto, el almacenamiento cubre más de la mitad del requerimiento, lo que confirma su efectividad a lo largo de todo el perfil de arranque.

En conjunto, la respuesta experimental valida las simulaciones: el supercapacitor recorta la corriente peak que ve la fuente en un factor cercano a cuatro y mantiene una participación mayoritaria durante más de 400 [ms], garantizando una depresión mínima de la línea de continua y reduce significativamente las pérdidas resistivas en la etapa de suministro.

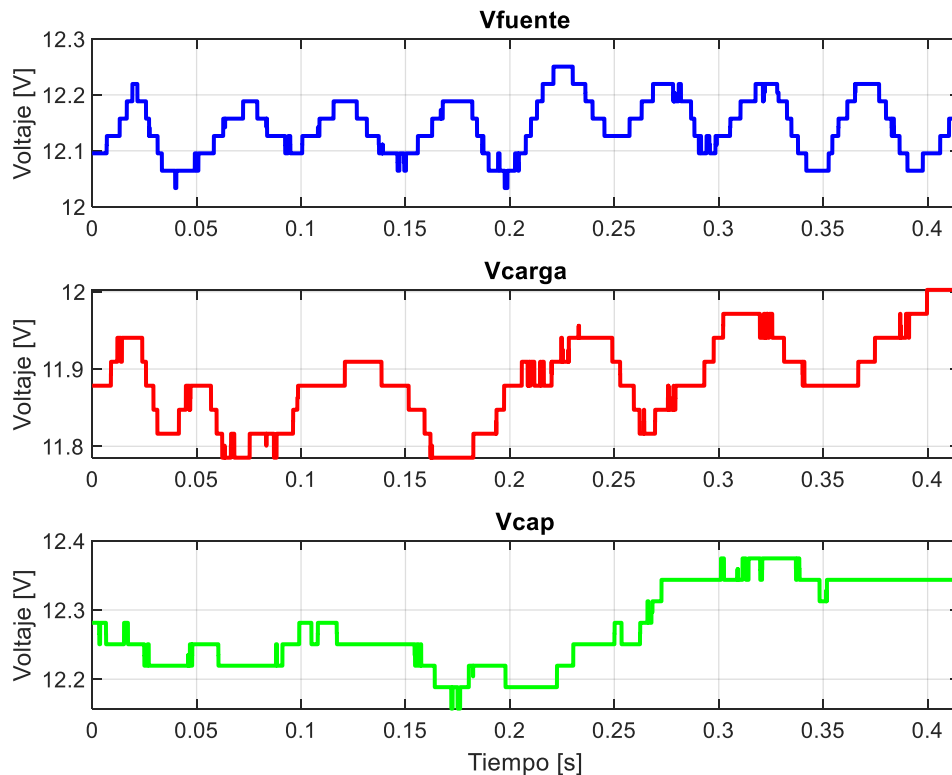


Fig. 5.20 Curvas de Voltaje en la fuente, carga y capacitor.

En la Fig. 5.20 se muestran las tensiones correspondientes a la fuente, a la entrada de la carga y al supercapacitor de 165 [F] durante la Etapa 2. Las tres gráficas comparten la misma ventana temporal que se analizó para las corrientes.

Antes de que la carga demande el impulso principal, la tensión de la fuente oscila entre 12.06 [V] y 12.22 [V], mientras que la de la carga lo hace entre 11.80 [V] y 11.92 [V]. También, el supercapacitor se mantiene en un rango levemente superior, en torno a 12.24 [V], gracias a su menor rizado interno.

Al producirse la corriente peak la tensión de la carga apenas desciende un par de décimas, sin alcanzar el 2 % de depresión respecto del nominal. Simultáneamente, la tensión del supercapacitor experimenta una caída aún menor, lo que indica que la mayor parte de la energía suministrada proviene de la descarga capacitiva y no de la fuente. A diferencia de la etapa con banco de capacitores, no se observan sobretensiones transitorias pronunciadas ni rebotes de magnitud comparable, el SC amortigua la oscilación prácticamente en el mismo instante en que suministra corriente.

Entre 0.05 [s] y 0.30 [s] las tres curvas presentan una ondulación cuasi-sinusoidal con amplitud inferior a ± 60 [mV]. El periodo de dicha ondulación se acerca a 40 [ms], lo que coincide con la frecuencia natural del circuito L–C dominado ahora por la inductancia de la línea y la gran capacidad del SC. La comparación con la etapa anterior resulta clara. mientras el banco mostraba depresiones de 600 [mV] y sobre-tensiones de 350 [mV], aquí el rizado máximo apenas sobrepasa 120 [mV] peak to peak en la línea de la fuente y es aún menor en el nodo de la carga.

A partir de 0.25 [s] la tensión del supercap se incrementa de forma casi lineal hasta alcanzar 12.35 [V] al final de la ventana, lo que pone de manifiesto que la fuente está recargando el dispositivo a medida que la corriente de la carga desciende por la rampa programada. Paralelamente, la tensión de la carga asciende gradualmente hacia 12 [V], convergiendo con la de la fuente; la diferencia entre ambos nodos queda por debajo de 150 [mV], cifra que confirma la eficacia del supercap para mantener el bus dentro del margen de ± 1 % una vez superado el transitorio más severo.

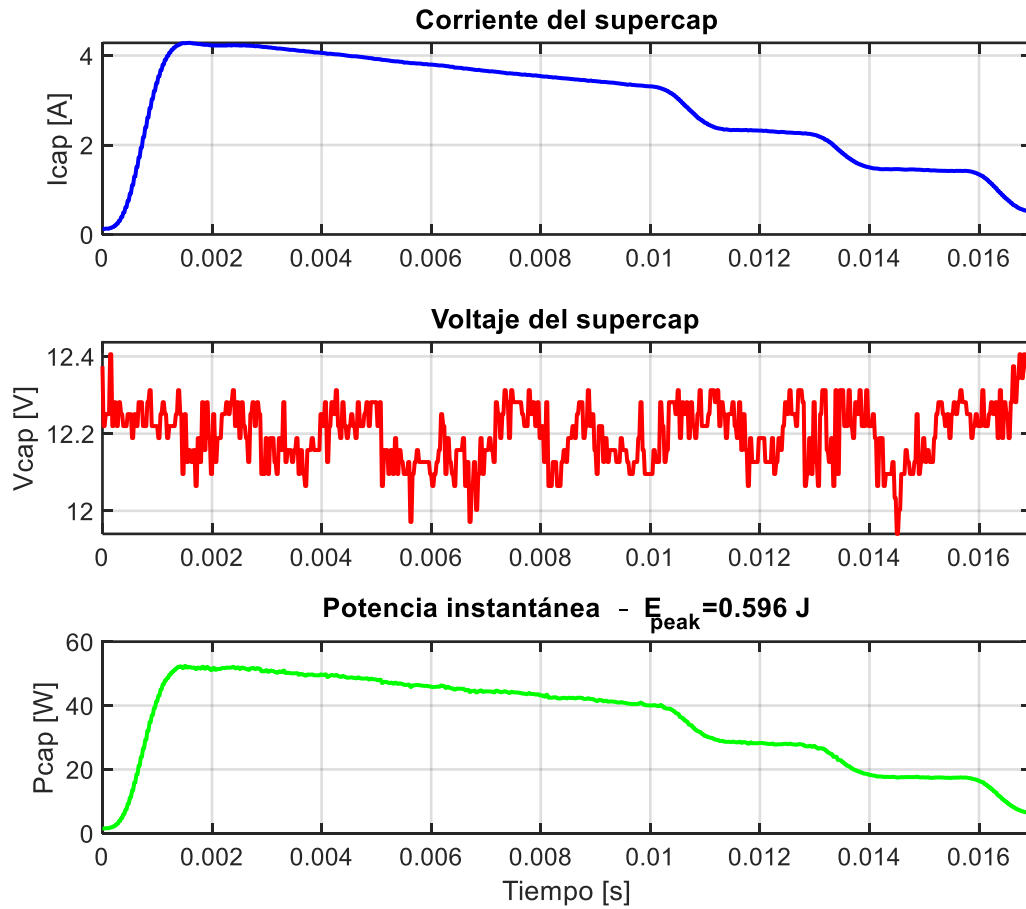


Fig. 5.21 Grafica de corriente, voltaje y potencia instantánea en el SC enfocada en el peak.

En la Fig. 5.21 se detalla la respuesta del supercapacitor de 165 [F] durante los 17 [ms] del arranque corriente I_{cap} , voltaje V_{cap} y la potencia instantánea P_{cap} .

El frente de subida inicia en $t = 0$ [s] y alcanza su máximo a $t = 0.00152$ [s], donde la corriente del supercap llega a 4.28 [A] y la potencia se eleva a 52.37 [W]. En ese breve lapso la tensión sólo cae hasta 12.16 [V], de modo que el dispositivo suministra un peak de potencia elevado con una depresión inferior al 1 % sobre su nivel inicial (≈ 12.24 [V]).

Tras el máximo, entre 0.002 [s] y 0.011 [s], la corriente descende casi linealmente de 4.0 [A] a 2.36 [A], mientras la tensión oscila en torno a 12.25 [V] con un rizado aleatorio de ± 60 [mV] producido por el conmutador de la carga. La potencia sigue la misma tendencia y se estabiliza cerca de 29 [W]. En esta meseta de descarga sostenida el supercap continúa cubriendo más del 60 % de la demanda total, reduciendo el aporte de la fuente.

A partir de $t = 0.0116$ [s] la corriente cae con pendiente mayor y llega a 1.34 [A] al final de la ventana ($t = 0.0169$ [s]); la tensión, en cambio, se recupera levemente hasta 12.28 [V] a medida que la fuente comienza a recargar el dispositivo. La potencia instantánea disminuye en consonancia hasta 6.9 [W], donde la integración numérica de P_{cap} arroja una energía cedida de $E_{peak} = 0.596$ [J].

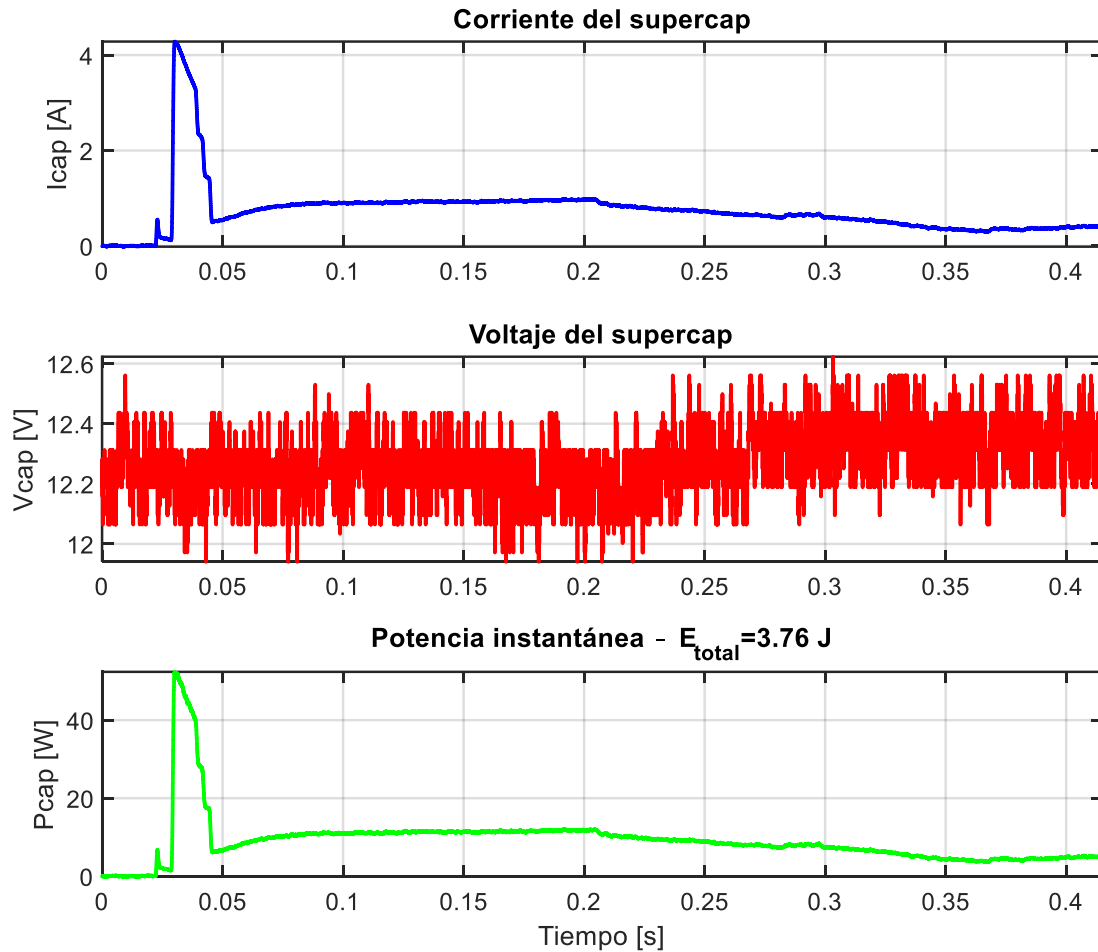


Fig. 5.22 Grafica de corriente, voltaje y potencia instantánea en el SC enfocada en la señal completa.

La Fig. 5.22 amplía el análisis del supercapacitor de 165 [F] a toda la ventana de arranque (0 – 0.40 [s]) e integra la potencia instantánea para obtener la energía entregada en el ciclo completo.

El gráfico superior traza la corriente I_{cap} , el central la tensión V_{cap} y el inferior la potencia P_{cap} . Así, para el impulso inicial en $t = 0.030$ [s] el dispositivo libera 4.28 [A] y alcanza una potencia de 52.4 [W], tal como se describió en el análisis del peak. A partir de ese punto la corriente decae monótonamente; a $t = 0.046$ [s] todavía fluye 1.32 [A] y la potencia roza los 13.9 [W]. Durante los siguientes 350 [ms] la descarga continúa, de modo que I_{cap} desciende hasta 0.33 [A] y

la potencia a 4.1 [W] cuando el registro finaliza en $t = 0.360$ [s]. La tensión, por su parte, se mantiene dentro de la banda 12.12 – 12.38 [V]; el rizado aparente corresponde al ruido de conmutación captado por el sensor y no a oscilaciones reales del enlace.

La integración trapezoidal sobre Pcap arroja una energía total cedida de 3.76 [J], valor que se representa en el tercer gráfico, esta cifra es equivalente a multiplicar por seis la energía suministrada en los primeros 17 [ms] (0.596 [J]) y confirma la función del supercapacitor como reservorio prolongado, tras amortiguar el peak, sigue aportando potencia útil durante la rampa descendente y permite que la fuente trabaje en un punto muy cercano a su corriente nominal.

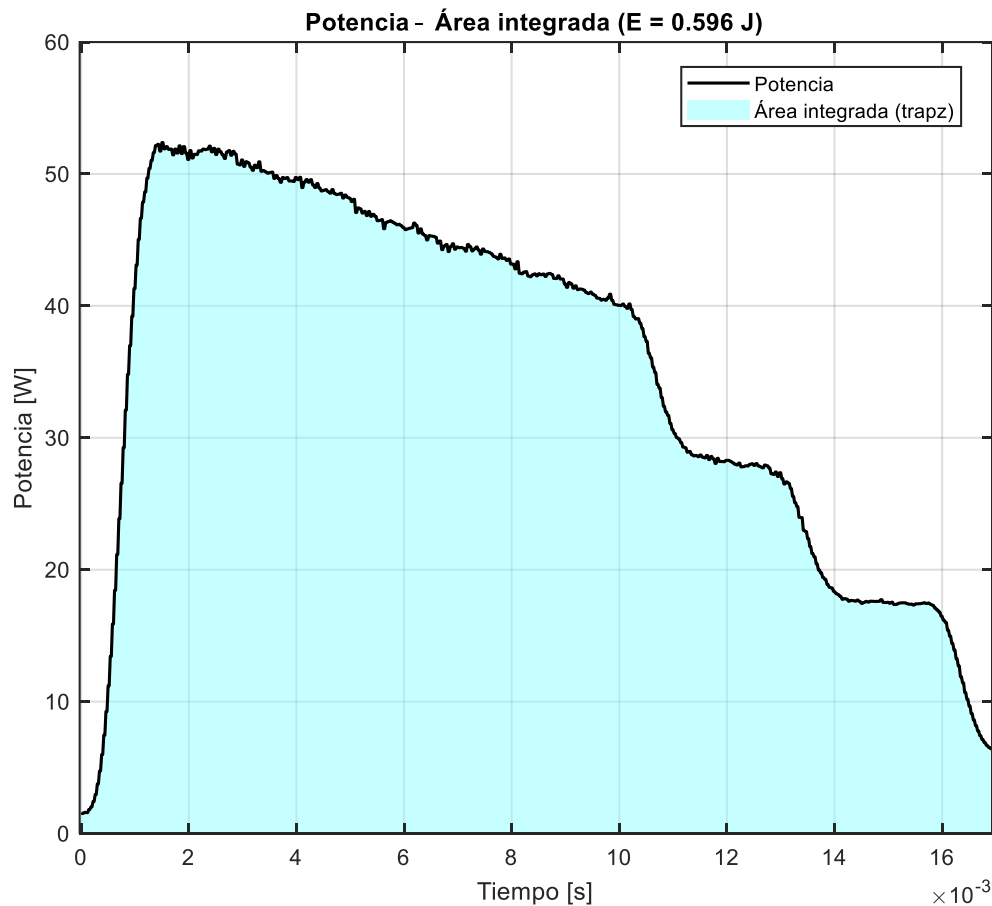


Fig. 5.23 Gráfica de energía acumulada en el peak.

En conjunto con las gráficas anteriores de corriente y tensión, la Fig. 5.23 confirma que el supercapacitor libera 0.596 [J] en los primeros 17 [ms] del arranque, tras un ascenso casi instantáneo la potencia se sostiene alrededor de 50 [W] durante el escalón inicial, decae suavemente hasta 40 [W] y, después del escalón de transición, desciende a 6 [W] al cierre del intervalo. Además, el área

sombreada bajo la curva representa la energía acumulada transferida al enlace desde el SC de 165 [F] donde el SC no solo recorta el peak de corriente, sino que aporta casi 0.6 [J] de soporte energético inmediato, duplicando la capacidad efectiva del banco de capacitores y garantizando que la fuente afronte menos del 25 % de la demanda en el tramo más crítico del arranque.

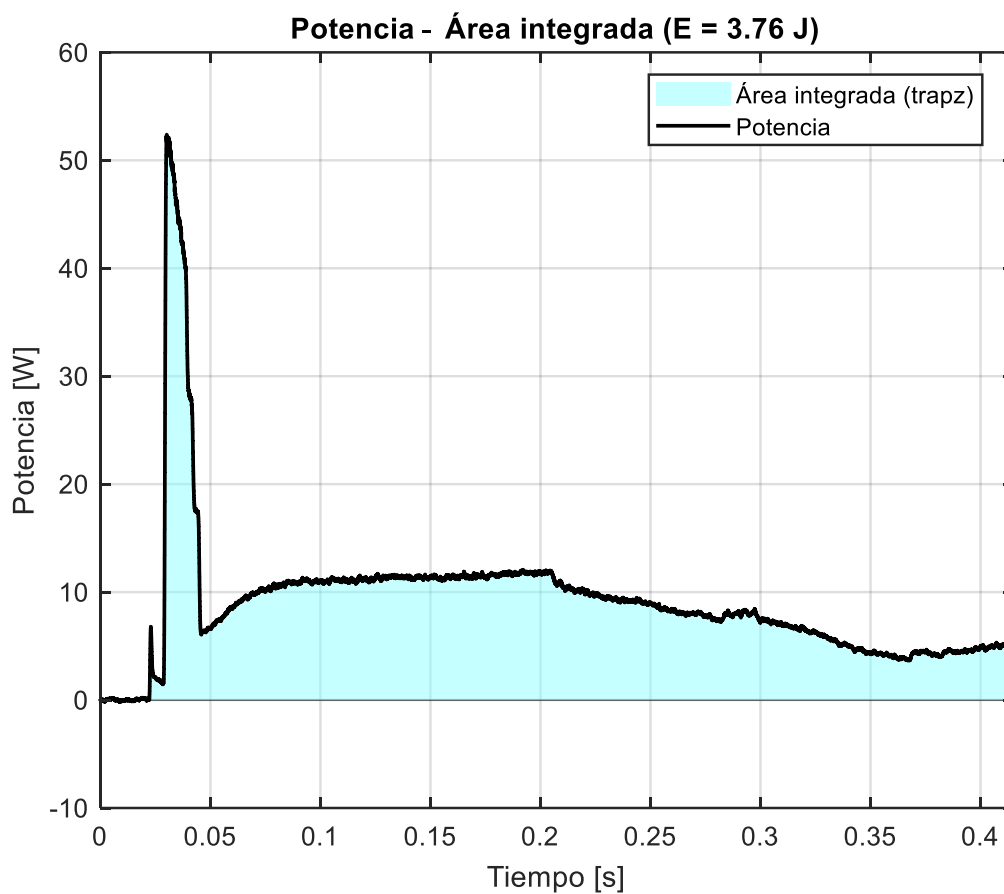


Fig. 5.24 Gráfica de energía acumulada en la señal completa.

La Fig. 5.24 extiende la perspectiva del supercapacitor a todo el ciclo de arranque (0 – 0.40 [s]). Tras el impulso inicial de 52 [W], la potencia cae momentáneamente a 6 [W] mientras el bus se estabiliza y, a partir de 0.08 [s], describe una dinámica similar a un escalón de 10 – 11 [W] que se prolonga durante más de 250 [ms]. Durante este instante el SC sigue respaldando el suministro, en 0.204 [s] aun mantiene una entrega cerca de 12 [W], y en 0.298 [s] conserva 8 [W] cuando la rampa descendente de la carga ya está avanzada. Así, el área bajo la curva integrada suma 3.76 [J], es decir, suficiente para cubrir la totalidad del peak principal del perfil de arranque sin requerir apoyo extra de la fuente.

5.5.5 Comparación de banco de capacitores simulación-experimental

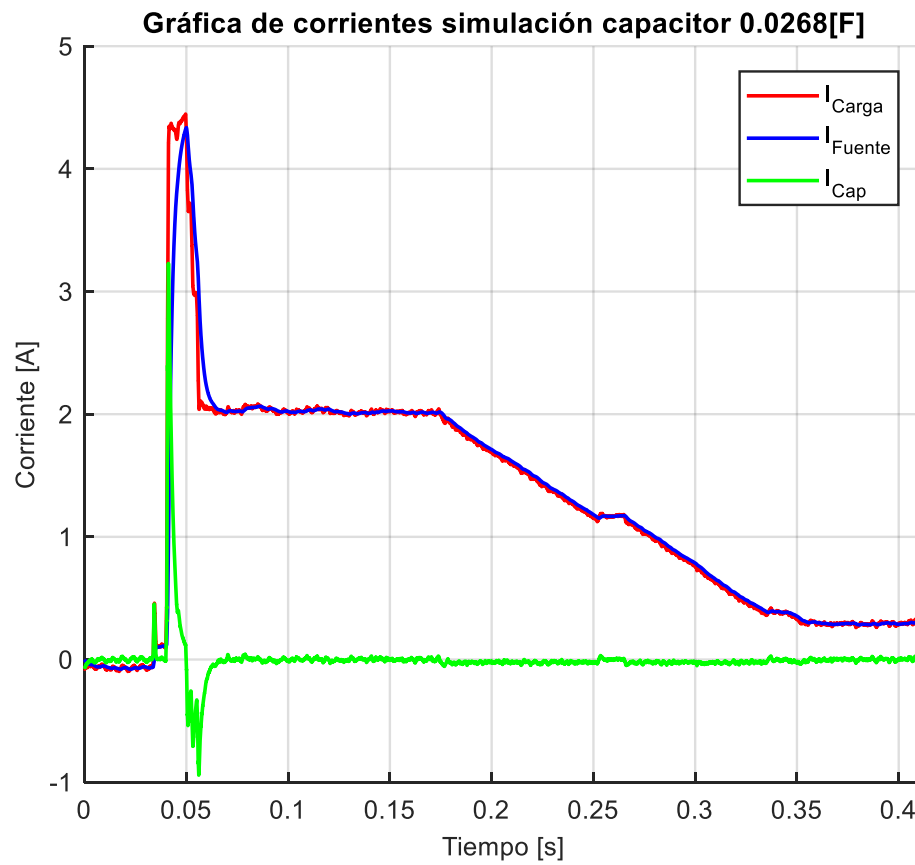


Fig. 5.25 Gráfica de dinámicas de corrientes en simulación.

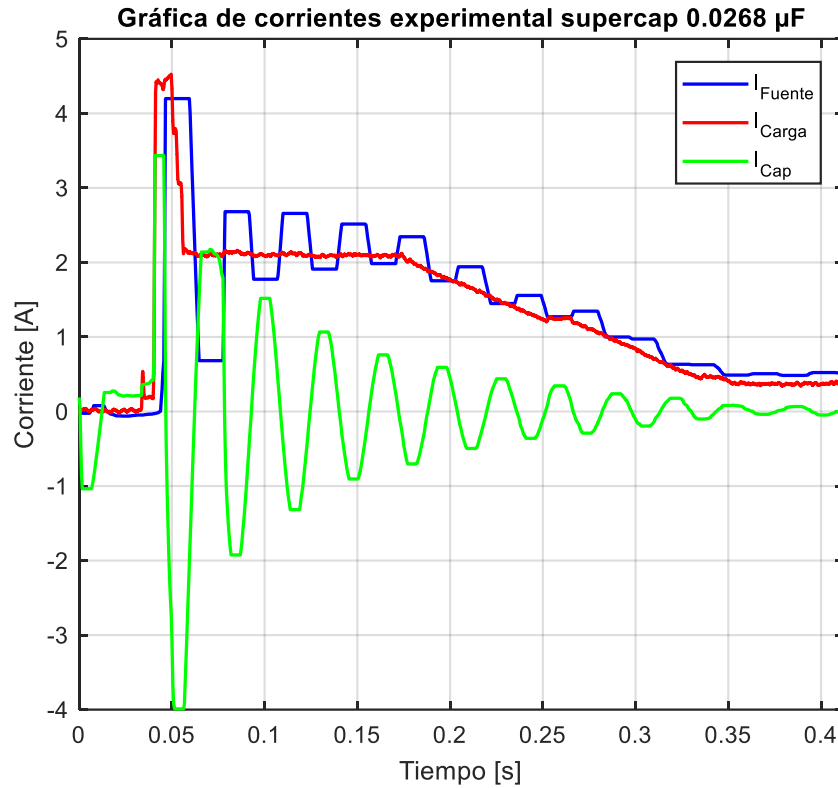


Fig. 5.26 Gráfica de dinámicas de corrientes experimentales.

En la Fig. 5.25 (simulación) y la Fig. 5.26 (experimento) se muestran las corrientes I_{fuente} , I_{carga} e I_{cap} de 26.8 [mF] para la Etapa 1. En particular, el primer rasgo común es que la carga alcanza prácticamente la misma corriente peak (4.6 [A]) en ambas gráficas, validando el perfil SCPI reproducido en el laboratorio. Sin embargo, el reparto de esa corriente difiere de modo apreciable, el modelo prevé que la fuente entregue un frente de 1.1 [A] mientras el capacitor aporta 3.3 [A]; en la medición real la fuente sólo aporta 0.5 [A] y el capacitor llega a 3.4 [A], validando la simulación con lo realizado experimentalmente.

A partir de 0.06 [s] sobresale otra disparidad, la corriente experimental del banco presenta oscilaciones semisenoidales de hasta ± 2 [A] con un periodo de 40 [ms], producto de la inductancia del cableado y del acoplamiento con la carga electrónica. El modelo, en cambio, asume una inductancia nula y muestra a I_{cap} convergiendo rápidamente a cero, diferencia que explica por qué la fuente simulada mantiene una dinámica de demanda similar a la de la carga, mientras que en lo experimental se observa un diente de sierra de 0.56 [A], la fuente compensa las oscilaciones que el capacitor no puede amortiguar cuando se agota su energía instantánea.

5.5.6 Comparación de SC simulación-experimental

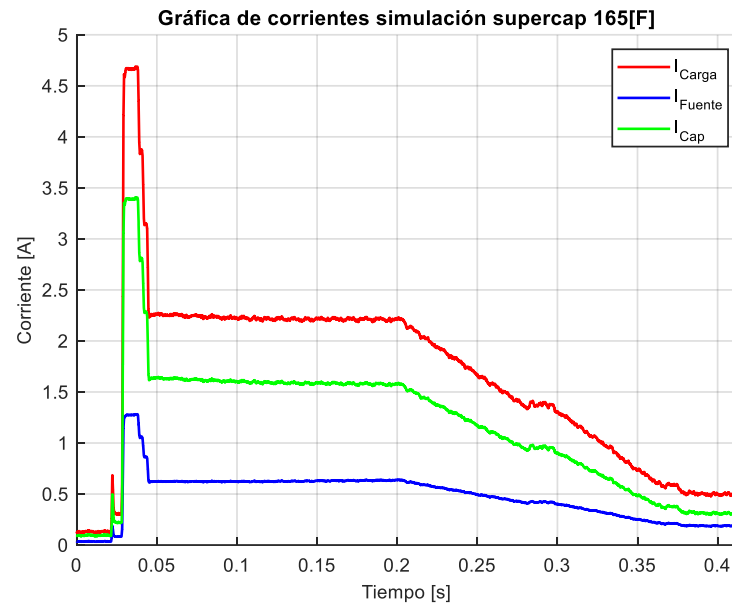


Fig. 5.27 Gráfica de dinámicas de corrientes de la simulación.

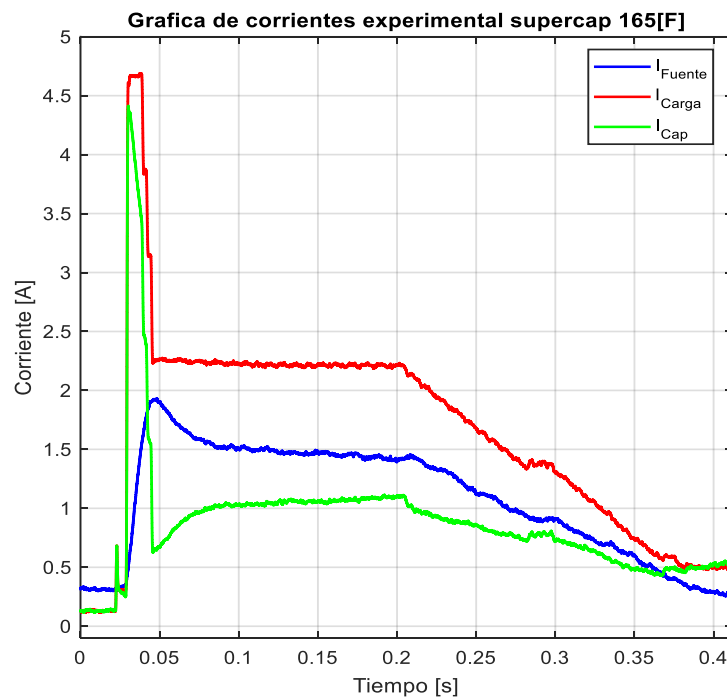


Fig. 5.28 Gráfica de dinámicas de corrientes experimentales.

Del mismo modo, para las Fig. 5.27 (simulación) y la Fig. 5.28 (experimento) se tiene que, el pulso principal inicial de corriente, el escalón estacionario y la rampa descendente mantienen la misma silueta y se superponen sin desplazamientos. Es por esto, que el SC se mantiene asumiendo la mayor parte del frente de demanda mientras la fuente queda relegada a una fracción mucho menor, tal como pronosticaba el modelo; además, a lo largo del intervalo completo ambas trazas conservan la misma dinámica y convergen hacia el reposo en instantes comunes. La potencia instantánea integrada confirma que la energía que el SC entrega en la práctica es la misma que la prevista, de modo que la simulación reproduce con fidelidad tanto la forma temporal como el balance energético del dispositivo.

Este ajuste simultáneo en reparto de corrientes, dinámica temporal y energía acumulada valida la hipótesis inicial: incorporar un SC permite afrontar el arranque prácticamente sin que la batería deba suministrar el peak de potencia, manteniendo estable el enlace DC y elevando la eficiencia global, todo ello sin someter a los componentes a esfuerzos adicionales. En síntesis, la concordancia entre lo teórico y lo experimental confirma que el sistema propuesto optimiza el proceso de arranque y prolonga la vida útil de los elementos críticos del sistema de potencia.

5.6. Discusión

Los resultados de este capítulo demuestran, con base empírica, que la arquitectura híbrida batería - SC mitiga de forma efectiva la exigencia transitoria del arranque y estabiliza el voltaje del enlace DC. La estrategia experimental constituida por la carga regenerativa programable (SCPI por Ethernet), la fuente DC en modo voltaje y la adquisición de datos con imperix B-Box, permitió reproducir el perfil de demanda y registrar las variables clave con resolución suficiente para compararlas.

En las etapas simuladas, por un lado, el banco de condensadores de 26.8 [mF] absorbió una fracción mayoritaria del primer peak, pero su soporte se limitó en el orden de los 20 [ms]; por el contrario, el SC de 165 [F] sostuvo el aporte por más de 200 [ms], disminuyendo la corriente que aporta la fuente durante el peak y manteniendo un reparto favorable durante el transiente y confirmándolo experimentalmente donde se observó la atenuación inicial esperada. Por otro lado, con el SC la respuesta fue más uniforme, con una variación de voltaje inferior y una recuperación en un menor periodo de tiempo, lo que sugiere que la baja ESR y la capacitancia elevada del módulo dominan el comportamiento transitorio y reducen la energía disipada en la cadena de suministro.

La comparación simulación–laboratorio fue particularmente consistente en tres ejes. En forma temporal, reparto de corrientes y energía acumulada. En la Etapa 1 (banco de condensadores), el ensayo real reprodujo la atenuación inicial de la corriente y evidenció oscilaciones de baja frecuencia no modeladas (producto de inductancias parásitas del cableado y la impedancia de salida de la fuente), lo que explica pequeñas discrepancias en el asentamiento. En la Etapa 2 (SC de 165 [F]), las curvas de corriente en la carga, en la fuente y en el SC mantuvieron la misma dinámica que en la simulación. En particular, el SC cubrió aproximadamente el 73% del peak y conservó participación significativa durante la estabilización de la curva. Luego, en términos energéticos, el análisis centrado en la ventana del peak principal arrojó una energía acumulada de 0.596 [J], mientras que, sobre la dinámica completa, la energía cedida ascendió a 3.76 [J]; ambas cifras son congruentes con la capacitancia y el rango de voltaje observados, confirmando que el SC actúa como una reserva de energía prolongado y no solo como amortiguador instantáneo.

En el voltaje del bus, la diferencia entre topologías es clara, con el banco de condensadores se registraron caídas y sobretensiones transitorias más marcadas que se amortiguaron pasivamente en decenas de milisegundos. A su vez, con el SC, la caída de voltaje durante el peak principal se mantuvo por debajo de umbrales típicos de protección y el ripple cayó a niveles inferiores (del orden de ± 60 [mV] en los tramos estacionarios), mejorando la calidad de suministro en el nodo de carga.

También, el uso de sensores ModuLink (± 50 [A], ± 12 [V]) con muestreo alto y el post-proceso en MATLAB con el filtro de mediana (ventana 800 [muestras]) en voltajes y corrientes prácticamente sin filtrado, permitió atenuar ruido sin degradar la geometría de las rampas ni los peaks. Estas decisiones de filtrado y compensación de offset fueron restrictivas, en línea con la necesidad de preservar la integridad de las señales para calcular potencia instantánea e integrar energía sin sesgos.

Finalmente, aunque la validación se realizó en 12 [V] y con perfil de arranque ligado al vehículo de combustión, el método (caracterización, simulación, implementación, ensayo y contraste) y los criterios de dimensionamiento son transferibles a plataformas 48 [V], donde la atenuación de corrientes peak y la reducción de la caída de voltaje tienen impacto directo en vida útil de baterías, pérdidas y disponibilidad. En este sentido, el capítulo cierra el ciclo de validación del esquema propuesto y deja establecida una base sólida para su escalamiento a entornos industriales, manteniendo la misma lógica demostradas en el laboratorio.

Capítulo 6. Conclusiones

Con base en los objetivos definidos, este trabajo demuestra la pertinencia técnica de integrar el sistema de arranque de 12 [V] mediante la incorporación de un supercondensador en paralelo con la batería, dentro de una arquitectura con precarga, conexión/desconexión y protecciones adecuadas en el enlace DC. La evidencia combinada de simulación y laboratorio muestra que la solución propuesta mitiga la corriente peak, reduce la caída de tensión del enlace DC y optimiza el reparto energético durante la etapa de encendido, sin introducir inestabilidades de control ni comprometer la integridad de los componentes. Con ello, el proyecto cumple su propósito central y traza un camino de transferencia hacia plataformas de 48 [V] y aplicaciones industriales, donde su adopción encuentra mayor justificación técnica y económica.

En relación con el objetivo de caracterizar la demanda real de arranque para orientar el dimensionamiento, se obtuvo y depuró un perfil representativo de corriente y voltaje que incluye un baseline de 0,25 [A], un peak principal en torno a 4,672 [A] con slew-rate de 20 [A/ms] y una ventana temporal que captura tanto el peak como su amortiguación, permitiendo definir, con base empírica, los requisitos de capacitancia efectiva y proporcionando un patrón de prueba reproducible para contrastar la simulación con el banco físico.

Respecto del objetivo de validar por simulación la interacción batería-SC, los modelos implementados reprodujeron la forma temporal de las corrientes de fuente, carga y almacenamiento, así como la dinámica del voltaje en el enlace DC, bajo variaciones de C y ESR. En particular, se observó que un banco de condensadores de 26,8 [mF] cubre el peak inicial, pero de corta duración, mientras que un módulo de 165 [F] sostiene un aporte más prolongado durante cientos de milisegundos, descargando la mayor parte del peak y aportando a la estabilización.

Se montó un banco de ensayos con precarga resistiva, junto con sensores de corriente y voltaje que permitió registrar con resolución las dinámicas relevantes. También, en el objetivo de validar experimentalmente las soluciones propuestas, la comparación simulación-laboratorio mostró una alta concordancia en los tres ejes críticos. En primer lugar, el reparto de corriente entre fuente/batería y supercondensador, en segundo, la forma temporal de los peaks y estacionarios del perfil, y tercero, la energía cedida por el supercondensador tanto en la ventana del peak como en la dinámica completa. Con el módulo de 165 [F], durante el peak principal ($I_{\text{carga}} = 4,69$ [A]) el supercondensador aportó del orden de 73% de la demanda instantánea, reduciendo la corriente exigida a la fuente a una fracción, y mantuvo el voltaje del enlace por encima de los umbrales deseados. Las variaciones menores

(oscilaciones amortiguadas con el banco de condensadores) se deben a efectos parásitos no modelados como lo son inductancias de lazo e impedancia de salida de la fuente.

En lo que concierne a la factibilidad técnico-económica, el estudio confirma que el valor de batería - SC no reside en equipar vehículos de uso cotidiano, sino en escalar la misma arquitectura a 48 [V] y a contextos industriales/mineros, donde el costo de las baterías de tracción y de la indisponibilidad operativa es significativo. La evaluación económica desarrollada indica que la inversión del sistema con SC resulta considerable frente al precio de un vehículo de combustión, la misma lógica de mitigar los peaks, estabilizar el voltaje y realizar ciclos del arranque, sí muestra viabilidad económica en plataformas de mayor potencia y uso intensivo, al extender la vida útil de la batería y optimizar procesos de arranque. Con ello se cumple el objetivo de comprobar factibilidad en el marco correcto de aplicación; el de la escalabilidad del sistema propuesto.

Resumen

El trabajo demuestra, con simulación y ensayos controlados, que la hibridación batería-SC reduce sustantivamente la corriente peak exigida a la fuente y mejora la estabilidad del enlace DC durante el arranque, cumpliendo los objetivos de caracterización, validación numérica y verificación experimental. También, se ensambló un prototipo, se cuantificó la energía aportada por el SC tanto en el peak como en la dinámica completa y se verificó la coherencia forma temporal entre la simulación y el ensayo de laboratorio. La propuesta no pretende equipar vehículos de uso diario, sino establecer un método escalable y económicamente razonable para plataformas de 48 [V] y entornos industriales, donde el costo y la indisponibilidad asociados al recambio de baterías justifican la adopción de almacenamiento de alta potencia.

6.1. Trabajos Futuros

Los resultados obtenidos validan la arquitectura híbrida para un perfil de arranque en una escala de 5 [A], pero dejan abierta una serie de extensiones que permitirán consolidar el diseño y llevarlo a aplicaciones de mayor exigencia.

Sistemas de arranque pesado como lo son vehículos comerciales o maquinaria exigen peaks de 700 [A] e incluso 1.000 [A]. Es por esto que, trasladar la topología validada a ese rango implica seleccionar supercapacitores de menor voltaje y mayor sección, reforzar conexionado y, sobre todo, analizar la disipación térmica en los bornes. Además, las simulaciones deberán repetirse con perfiles de 10 a 15 [kW] y contrastarse con fuentes bidireccionales de clase industrial [14].

Las pruebas experimentales se efectuaron con la fuente en modo tensión fija; sin embargo, implementar un lazo de control que module la corriente de la fuente según el estado de carga del SC permitiría optimizar aún más la eficiencia. Además, cuando el capacitor está cargado, la fuente limita la demanda; cuando el voltaje del SC desciende bajo un umbral, la fuente toma el relevo de forma progresiva. Entonces, algoritmos de lógica difusa o control predictivo serían buenos candidatos para esta tarea.

Evaluar la migración del sistema a plataformas de 48 [V]. Por un lado, las arquitecturas auxiliares de 48 [V] se están convirtiendo en el estándar para vehículos híbridos, tractores compactos y sistemas estacionarios de reserva, porque permiten reducir la sección de los conductores y mejorar la eficiencia de los convertidores. Por otro lado, la capacidad física del SC deberá revisarse, al cuadruplicar la tensión nominal, la energía almacenada crece con V^2 ; por consiguiente, un módulo de 165 [F] que hoy entrega 0.6 [J] en el arranque de 12 [V] proporcionaría cerca de 10 [J] en un sistema de 48 [V], excediendo con creces la demanda previamente utilizada.

Esto abre dos caminos, reducir la capacitancia para contener costo y volumen, o bien aprovechar el excedente energético para soportar demandas adicionales y disminuir todavía más la corriente solicitada a la batería principal.

Bibliografía

- [1] K. Bellache, M. B. Camara and B. Dakyo, “Characterization of supercapacitor based on using conditions impacts evaluation on cell resistance and capacitance,” *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, 2016, pp. 2004-2009.
- [2] L. M. Bopche, A. A. Deosant and M. Ahmad, “Combination of parallel connected supercapacitor & battery for enhancing battery life,” *2016 International Conference on Automatic Control and Dynamic Optimization Techniques (ICACDOT)*, Pune, India, 2016, pp. 77-82.
- [3] N. K. Medora and A. Kusko, “Battery management for hybrid electric vehicles using supercapacitors as a supplementary energy storage system,” *Intelec 2012*, Scottsdale, AZ, USA, pp. 1-8, 2012.
- [4] Hanmin Liu, Zhixin Wang, Shutong Qiao and Yunhai Liu, “Improvement of engine cold start capability using supercapacitor and lead-acid battery hybrid,” *2008 Twenty-Third Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Austin, TX, USA, 2008, pp. 668-675.
- [5] B. V. Malozvomo, A. V. Myatezh and M. A. Smirnov, “Modeling the Performance of the Supercapacitor Battery for Car Start-Up,” *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, Novosibirsk, Russia, 2018, pp. 271-274.
- [6] S. Dinglasan Fenol, F. S. Caluyo and J. L. Lorenzo, “Simulation and modeling of charging and discharging of supercapacitors,” *2017 International Conference on Circuits, System and Simulation (ICCSS)*, London, UK, 2017, pp. 14-17.
- [7] A. Khaligh and Z. Li, “Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art,” in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 59, no. 6, pp. 2806-2814, July 2010.
- [8] G. Yasser, P. Théophile, M. Tedjani and D. Sylvain, “Modeling, Identification and Simulation of Hybrid Battery/Supercapacitor Storage System Used in Vehicular Applications,” *2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT)*, Bali, Indonesia, 2019, pp. 156-162.

- [9] D. Marín, "Description of automotive battery charging system, "*Proyecto de Iniciación en Ingeniería Eléctrica (PIIE)*, Concepción, Chile, 2023.
- [10] A. Chmielewski, P. Piórkowski, K. Bogdziński, and J. Możaryn, "Application of a bidirectional DC/DC converter to control the power distribution in the battery–ultracapacitor system," *Energies*, vol. 16, no. 9, p. 3687, Apr. 2023.
- [11] W. A. Bisschoff, O. Dobshanskyi and R. Gouws, "Integration of battery and super-capacitor banks into a single-power system for a hybrid electric vehicle," *2016 II International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Kharkiv, Ukraine, 2016, pp. 10-13.
- [12] E. Schaltz, A. Khaligh and P. O. Rasmussen, "Influence of Battery/Ultracapacitor Energy-Storage Sizing on Battery Lifetime in a Fuel Cell Hybrid Electric Vehicle," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 8, pp. 3882-3891, Oct. 2009.
- [13] T. Paul, T. Mesbahi, S. Durand, D. Flieller, and W. Uhring, "Sizing of lithium-ion battery/supercapacitor hybrid energy storage system for forklift vehicle," *Energies*, vol. 13, no. 17, p. 4518, Sep. 2020.
- [14] F. Castelli Dezza, V. Musolino, L. Piegari, and R. Rizzo, "Hybrid battery–supercapacitor system for full electric forklifts," *IET Electrical Systems in Transportation*, vol. 9, no. 1, pp. 16–23, Mar. 2019.
- [15] B. -H. Nguyễn, R. German, J. P. Trovão and A. Bouscayrol, "Merging control of a hybrid energy storage system using battery/supercapacitor for electric vehicle application," *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Lyon, France, 2018, pp. 2066-2071.
- [16] J. M. Lim, Y. S. Jang, H. V. T. Nguyen, J. S. Kim, Y. Yoon, B. J. Park, D. H. Seo, K.-K. Lee, Z. Han, K. K. Ostrikov, and S. G. Doo, "Advances in high-voltage supercapacitors for energy storage systems: materials and electrolyte tailoring to implementation, " *Nanoscale Advances*, vol. 5, pp. 615–626, 2023.
- [17] S. Mandal, A. B. Mendhe, H. M. Rakhade, N. S. Barse, M. Roy, P. Rosaiah, T. Park, H. S. Lee, A. C. Mendhe, and D. Kim, "Recent advancement and design in supercapacitor hybrid electrode materials: Bridging the gap between energy and power density," *Chemical Engineering Journal Advances*, vol. 21, art. no. 100690, 2025.

- [18] P. Simon and Y. Gogotsi, "Materials for electrochemical capacitors," *Nature Materials*, vol. 7, no. 11, pp. 845–854, 2008.
- [19] B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. Springer, 1999.
- [20] A. L. Burke, "Ultracapacitors: why, how, and where is the technology," *Journal of Power Sources*, vol. 91, no. 1, pp. 37–50, 2000.
- [21] E. G. Calvo, A. Arenillas, J. A. Menéndez, M. González, and J. C. Viera, "Properties, advantages and disadvantages of materials used in supercapacitors," *Afinidad*, vol. 66, no. 543, pp. 380–387, Sept. 2009
- [22] A. Samad *et al.*, "Effects of polyurethane hardness on the propagation of acoustic signals from partial discharge," *High Voltage*, vol. 9, pp. 1125–1135, 2024.
- [23] M. Taghavi, T. Helps y J. Rossiter, "Electro-ribbon actuators and electro-origami robots," *Science Robotics*, vol. 3, no. 25, art. eaau9795, 2018.
- [24] A. Dandoussou *et al.*, "Comparative study of the reliability of MPPT algorithms for crystalline silicon photovoltaic modules in variable weather conditions," *J. Electr. Syst. Inf. Technol.*, vol. 4, no. 1, pp. 213–224, 2017.
- [25] Mouser Electronics, "STMicroelectronics TIP120," Mouser Chile, Accessed: Jun. 6, 2025. [Online]. Available: <https://www.mouser.cl/ProductDetail/STMicroelectronics/TIP120?qs=ljbEvF4DwOPl3O93r6IAPg%3D%3D>.
- [26] Eletroparts Componentes, "Diodo 1N4007," Accessed: Jun. 6, 2025. [Online]. Available: <https://www.eletropartscomponentes.com.br/produto/diodo-in4007/?v=3f53433e0145>.
- [27] F. Blaabjerg, Y. Yang, K. Ma, and X. Wang, "Power Electronics – The Key Technology for Renewable Energy System Integration," in *Proc. 4th Int. Conf. on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, 2015, pp. 1618–1626.
- [28] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. B. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sep. 2004.

- [29] “Does internal resistance reveal battery capacity?” *Electronics Online*, síntesis de SAE J537 (CCA: 30 s a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ con umbral de 7.2 V), 2016. Disponible en: ElectronicsOnline.net.au.
- [30] STMicroelectronics, “L9918 – Alternator voltage regulator with LIN interface for 12 V applications,” *Datasheet*, Rev. 2, Sep. 2022.
- [31] USI, “Bosch IR/EF Alternators – Voltage Regulators (catálogo),” rango típico de consigna 14.1–14.8 V para reguladores de 12 V, ca. 2006.
- [32] P. Simon and Y. Gogotsi, “Materials for electrochemical capacitors,” *Nature Materials*, vol. 7, no. 11, pp. 845–854, 2008.
- [33] B. E. Conway, *Electrochemical Supercapacitors: Scientific Fundamentals and Technological Applications*. New York, NY, USA: Springer, 1999.
- [34] A. Burke, “Ultracapacitors: Why, how, and where is the technology,” *Journal of Power Sources*, vol. 91, no. 1, pp. 37–50, 2000.
- [35] C. V. V. M. Gopi *et al.*, “Review of battery–supercapacitor hybrid energy storage systems (HESS) for mobility,” *Energy Reports*, vol. 10, pp. 11674–11697, 2024.

Capítulo 7. Anexos

7.1. Códigos Utilizados

7.1.1 Script para Graficas SC

```

clc; clear; close all;

%% 1. Leer archivo
fileName = 'Pruebasupercap.csv';
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables", 12);
opts.DataLines = 18;
opts.Delimiter = ",";
opts.VariableNames = {'t_If', 'If', 't_Icar', 'Icar', 't_Icap', 'Icap', ...
                     't_Vf', 'Vf', 't_Vcar', 'Vcar', 't_Vcap', 'Vcap'};
opts.SelectedVariableNames = {'t_If', 'If', 'Icar', 'Icap', 'Vf', 'Vcar', 'Vcap'};
opts.VariableTypes = repmat({'double'}, 1, 12);
T = readtable(fileName, opts);
T.Properties.VariableNames{1} = 'Time_s';

%% 2. Aplicar filtro de mediana (medfilt1)
% Ventana: 1000 muestras (ajustable)
ventana = 1000;
Tf = T; % Tabla filtrada

Tf.If = medfilt1(T.If, 1);
Tf.Icar = medfilt1(T.Icar, 1);
Tf.Icap = medfilt1(T.Icap, 1);
Tf.Vf = medfilt1(T.Vf, ventana);
Tf.Vcar = medfilt1(T.Vcar, ventana);
Tf.Vcap = medfilt1(T.Vcap, ventana);

%% 3. Graficar señales originales vs filtradas (corriente)
figure('Name', 'Corrientes Originales vs Filtradas', 'Color', 'w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s, T.If, 'k:', T.Time_s, Tf.If, 'b');
title('If - Corriente'); ylabel('[A]'); grid on;
legend('Original', 'Filtrada');

subplot(3,1,2); plot(T.Time_s, T.Icar, 'k:', T.Time_s, Tf.Icar, 'r');
title('Icar - Corriente'); ylabel('[A]'); grid on;
legend('Original', 'Filtrada');

subplot(3,1,3); plot(T.Time_s, T.Icap, 'k:', T.Time_s, Tf.Icap, 'g');
title('Icap - Corriente'); ylabel('[A]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
legend('Original', 'Filtrada');

```

```

%% 4. Graficar señales originales vs filtradas (voltaje)
figure('Name','Voltajes Originales vs Filtradas','Color','w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s, T.Vf, 'k:', T.Time_s, Tf.Vf, 'b');
title('Vf - Voltaje'); ylabel('[V]'); grid on;
legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,2); plot(T.Time_s, T.Vcar, 'k:', T.Time_s, Tf.Vcar, 'r');
title('Vcar - Voltaje'); ylabel('[V]'); grid on;
legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,3); plot(T.Time_s, T.Vcap, 'k:', T.Time_s, Tf.Vcap, 'g');
title('Vcap - Voltaje'); ylabel('[V]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
legend('Original','Filtrada');

%% 5. Graficar señales filtradas (corriente)
figure('Name','Gráficas de corrientes ','Color','w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s, Tf.If, 'b');
title('Ifuente'); ylabel('Corriente [A]'); grid on;
%legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,2); plot(T.Time_s, Tf.Icar, 'r');
title('Icarga'); ylabel('Corriente [A]'); grid on;
%legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,3); plot(T.Time_s, Tf.Icap, 'g');
title('Icap'); ylabel('Corriente [A]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
%legend('Original','Filtrada');

% 5.1 Graficar señales filtradas (corriente)
figure('Name','Gráficas de corrientes ','Color','w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s, Tf.If-7.2, 'b','LineWidth', 1.5);
title('Ifuente'); ylabel('Corriente [A]'); grid on;
xlim([2.10688 2.5222]);
%legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,2); plot(T.Time_s, Tf.Icar, 'r','LineWidth', 1.5);
title('Icarga'); ylabel('Corriente [A]'); grid on;
xlim([2.10688 2.5222]);
%legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,3); plot(T.Time_s, Tf.Icap+7.9151, 'g','LineWidth', 1.5);
title('Icap'); ylabel('Corriente [A]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
xlim([2.10688 2.5222]);
%legend('Original','Filtrada');

%% 6. Graficar señales filtradas (voltaje)
figure('Name','Voltajes Originales vs Filtradas','Color','w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s, Tf.Vf, 'b');
title('Vfuente'); ylabel('Voltaje [V]'); grid on;
%legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,2); plot(T.Time_s, Tf.Vcar, 'r');
title('Vcarga'); ylabel('Voltaje [V]'); grid on;
%legend('Original','Filtrada');

```

```

subplot(3,1,3); plot(T.Time_s, Tf.Vcap, 'g');
title('Vcap'); ylabel('Voltaje [V]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
%legend('Original','Filtrada');

%6.1 Graficar señales filtradas (voltaje)
figure('Name','Voltajes Originales vs Filtradas','Color','w');
subplot(3,1,1); plot( T.Time_s, Tf.Vf, 'b','LineWidth', 1.5);
title('Vfuente'); ylabel('Voltaje [V]'); grid on;
xlim([2.10688 2.5222]);
%legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,2); plot(T.Time_s, Tf.Vcar, 'r','LineWidth', 1.5);
title('Vcarga'); ylabel('V[V]'); grid on;
xlim([2.10688 2.5222]);
%legend('Original','Filtrada');

subplot(3,1,3); plot(T.Time_s, Tf.Vcap, 'g','LineWidth', 1.5);
title('Vcap'); ylabel('Voltaje [V]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
xlim([2.10688 2.5222]);
%legend('Original','Filtrada');

%%
% 5.1 Graficar señales filtradas (corriente)
figure('Name','Gráficas de corrientes ','Color','w');
plot(T.Time_s, Tf.If-7.2,'b','LineWidth', 1.2);
xlabel('Tiempo [s]','FontSize',11); % eje X
ylabel('Corriente [A]','FontSize',11); % eje Y
title('Grafica de corrientes experimental supercap 165[F]'); grid on;
hold on
xlim([2.10688 2.5222]);
plot(T.Time_s, Tf.Icar,'r','LineWidth', 1.2);
plot(T.Time_s, Tf.Icap+7.9151,'g','LineWidth', 1.2);

legend({'I_{Fuente}','I_{Carga}','I_{Cap}'}, ...
'Location','best','Interpreter','tex');

%% === 7-bis) Corrientes – eje X reiniciado =====
% Ventana de interés
t_ini = 2.10688;
t_fin = 2.52220;

idx = (T.Time_s >= t_ini) & (T.Time_s <= t_fin); % máscara
t_rel = T.Time_s(idx) - t_ini; % tiempo relativo [0 ... 0.415 s]

figure('Name','Gráficas de corrientes – eje X en 0','Color','w');
plot(t_rel, Tf.If(idx) - 7.2 , 'b','LineWidth',1.5); hold on;
xlim([0 0.41226]);
ylim([-0.1 5]);
plot(t_rel, Tf.Icar(idx) , 'r','LineWidth',1.5);
plot(t_rel, Tf.Icap(idx) + 7.9151 , 'g','LineWidth',1.5);
grid on;
xlabel('Tiempo [s]');
ylabel('Corriente [A]');
title('Grafica de corrientes experimental supercap 165[F]');
legend({'I_{Fuente}','I_{Carga}','I_{Cap}'}, ...

```

```

'Location','best','Interpreter','tex');

%% === 4-bis) Corrientes filtradas – eje X reiniciado =====
t_ini_c = 2.10688;           % instante inicial de la ventana
t_fin_c = 2.52220;          % instante final   de la ventana

idxC = (T.Time_s >= t_ini_c) & (T.Time_s <= t_fin_c); % máscara
t_relC = T.Time_s(idxC) - t_ini_c;                    % 0 ... ~0.415 s

figure('Name','Corrientes filtradas – eje X en 0','Color','w');

subplot(3,1,1)
plot(t_relC, Tf.If(idxC) - 7.2, 'b','LineWidth',1.5);
title('Ifuente'); ylabel('Corriente [A]'); grid on;
xlim([0 t_fin_c - t_ini_c]);

subplot(3,1,2)
plot(t_relC, Tf.Icar(idxC), 'r','LineWidth',1.5);
title('Icarga'); ylabel('Corriente [A]'); grid on;
xlim([0 t_fin_c - t_ini_c]);

subplot(3,1,3)
plot(t_relC, Tf.Icap(idxC) + 7.9151, 'g','LineWidth',1.5);
title('Icap'); ylabel('Corriente [A]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
xlim([0 t_fin_c - t_ini_c]);

%% === 6-bis) Voltajes filtrados – eje X reiniciado =====
t_ini_v = 2.10688;           % instante inicial de la ventana
t_fin_v = 2.52220;          % instante final   de la ventana

idxV = (T.Time_s >= t_ini_v) & (T.Time_s <= t_fin_v); % máscara
t_relV = T.Time_s(idxV) - t_ini_v;                    % 0 ... ~0.415 s
t_span = t_fin_v - t_ini_v;                          % duración ventana

figure('Name','Voltajes filtrados – eje X en 0','Color','w');

subplot(3,1,1)
plot(t_relV, Tf.Vf(idxV), 'b','LineWidth',1.5);
title('Vfuente'); ylabel('Voltaje [V]'); grid on;
xlim([0 t_span]);

subplot(3,1,2)
plot(t_relV, Tf.Vcar(idxV), 'r','LineWidth',1.5);
title('Vcarga'); ylabel('Voltaje [V]'); grid on;
xlim([0 t_span]);

subplot(3,1,3)
plot(t_relV, Tf.Vcap(idxV), 'g','LineWidth',1.5);
title('Vcap'); ylabel('Voltaje [V]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
xlim([0 t_span]);

```

7.1.2 Script para gráficas de banco de capacitores

```

clc; clear; close all;

%% 1. Leer archivo -----
fileName = 'cap28ufResultadosFinales.csv';
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables",12);
opts.DataLines = 18;
opts.Delimiter = ",";
opts.VariableNames = {'t_If','If','t_Icar','Icar','t_Icap','Icap', ...
                      't_Vf','Vf','t_Vcar','Vcar','t_Vcap','Vcap'};
opts.SelectedVariableNames = {'t_If','If','Icar','Icap','Vf','Vcar','Vcap'};
opts.VariableTypes = repmat({'double'},1,12);

T = readtable(fileName,opts,"ReadVariableNames",false);
T.Properties.VariableNames = {'Time_s','If','Icar','Icap','Vf','Vcar','Vcap'};

%% 1.1 polaridad del capacitor -----
T.Icap = T.Icap;

%% 2. Filtrado (mediana) -----
ventana = 800;
Tf = T;
Tf.If = medfilt1(T.If, 1300);
Tf.Icar = medfilt1(T.Icar, 1);
Tf.Icap = medfilt1(T.Icap, 500);
Tf.Vf = medfilt1(T.Vf, ventana);
Tf.Vcar = medfilt1(T.Vcar, ventana);
Tf.Vcap = medfilt1(T.Vcap, ventana);

%% 3. Fig. 1 - Corrientes originales vs filtradas -----
figure('Name','Corrientes Originales vs Filtradas','Color','w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,T.If,'k:',T.Time_s,Tf.If,'b');
title('If - Corriente'); ylabel('[A]'); grid on; legend('Original','Filtrada');
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,T.Icar,'k:',T.Time_s,Tf.Icar,'r');
title('Icar - Corriente'); ylabel('[A]'); grid on; legend('Original','Filtrada');
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,T.Icap,'k:',T.Time_s,Tf.Icap,'g');
title('Icap - Corriente'); ylabel('[A]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
legend('Original','Filtrada');

%% 4. Fig. 2 - Voltajes originales vs filtradas -----
figure('Name','Voltajes Originales vs Filtradas','Color','w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,T.Vf,'k:',T.Time_s,Tf.Vf,'b');
title('Vf - Voltaje'); ylabel('[V]'); grid on; legend('Original','Filtrada');
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,T.Vcar,'k:',T.Time_s,Tf.Vcar,'r');
title('Vcar - Voltaje'); ylabel('[V]'); grid on; legend('Original','Filtrada');
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,T.Vcap,'k:',T.Time_s,Tf.Vcap,'g');
title('Vcap - Voltaje'); ylabel('[V]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
legend('Original','Filtrada');

```

```

%% 5. Fig. 3 - Corrientes filtradas (rango completo) -----
figure('Name','Gráficas de corrientes ','Color','w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,Tf.If,'b'); title('Ifuente'); ylabel('[A]'); grid on;
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,Tf.Icar,'r'); title('Icarga'); ylabel('[A]'); grid on;
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,Tf.Icap,'g'); title('Icap'); ylabel('[A]');
xlabel('Tiempo [s]'); grid on;

%% 6. Preparativos para ventana y offsets -----
win = [7.38886 8.26668]; % ventana de peak
idxW = (T.Time_s >= win(1)) & (T.Time_s <= win(2));

off.If = mean(Tf.If(idxW));
off.Icar = mean(Tf.Icar(idxW));
off.Icap = mean(Tf.Icap(idxW));

off.Vf = mean(Tf.Vf(idxW));
off.Vcar = mean(Tf.Vcar(idxW));
off.Vcap = mean(Tf.Vcap(idxW));

shift.If = 0.85685;
shift.Icar = 0.77350;

%% 7. Fig. 4 - Corrientes filtradas (ventana centrada + shift) ----
figure('Name','Gráficas de corrientes ','Color','w');
subplot(3,1,1);
plot(T.Time_s, Tf.If - off.If + shift.If , 'b', 'LineWidth', 1.5);
title('Ifuente'); ylabel('[A]'); grid on; xlim(win);

subplot(3,1,2);
plot(T.Time_s, Tf.Icar - off.Icar + shift.Icar, 'r', 'LineWidth', 1.5);
title('Icarga'); ylabel('[A]'); grid on; xlim(win);

subplot(3,1,3);
plot(T.Time_s, Tf.Icap - off.Icap, 'g', 'LineWidth', 1.5);
title('Icap'); ylabel('[A]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on; xlim(win);

%% 8. Fig. 5 - Voltajes filtrados (rango completo) -----
figure('Name','Voltajes Originales vs Filtradas','Color','w');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,Tf.Vf,'b'); title('Vfuente'); ylabel('[V]'); grid on;
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,Tf.Vcar,'r'); title('Vcarga'); ylabel('[V]'); grid on;
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,Tf.Vcap,'g'); title('Vcap'); ylabel('[V]');
xlabel('Tiempo [s]'); grid on;

%% 9. Fig. 6 - Voltajes filtrados (ventana centrada) -----
figure('Name','Voltajes Originales vs Filtradas','Color','w');
subplot(3,1,1);
plot(T.Time_s,Tf.Vf,'b','LineWidth',1.5);
title('Vfuente'); ylabel('[V]'); grid on; xlim(win);

subplot(3,1,2);
plot(T.Time_s,Tf.Vcar,'r','LineWidth',1.5);
title('Vcarga'); ylabel('[V]'); grid on; xlim(win);

subplot(3,1,3);
plot(T.Time_s,Tf.Vcap,'g','LineWidth',1.5);
title('Vcap'); ylabel('[V]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on; xlim(win);

```

```

%% 10. Fig. 7 - Corrientes filtradas (ventana completa + shift) ---
figure('Name','Gráficas de corrientes ','Color','w');
plot(T.Time_s, Tf.If - off.If + shift.If , 'b','LineWidth',1.2); hold on;
xlim([0 0.41226]);
plot(T.Time_s, Tf.Icar - off.Icar + shift.Icar, 'r','LineWidth',1.2);
plot(T.Time_s, Tf.Icap - off.Icap, 'g','LineWidth',1.2); grid on;
xlim(win); xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Corriente centrada [A]');
title('Gráfica de corrientes experimental supercap 28  $\mu$ F');
legend({'I_{Fuente}','I_{Carga}','I_{Cap}'},'Location','best','Interpreter','tex');

%% 11. Fig. 8 - Corrientes - eje X reiniciado en 0 (+ shift) -----
t_rel = T.Time_s(idxW) - win(1);
figure('Name','Gráficas de corrientes - eje X en 0','Color','w');
plot(t_rel, Tf.If(idxW) - off.If + shift.If , 'b','LineWidth',1.5); hold on;
xlim([0 0.41226]);
plot(t_rel, Tf.Icar(idxW) - off.Icar + shift.Icar, 'r','LineWidth',1.5);
xlim([0 0.41226]);
plot(t_rel, Tf.Icap(idxW) - off.Icap , 'g','LineWidth',1.5); grid on;
xlim([0 0.41226]);
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Corriente [A]');
title('Gráfica de corrientes experimental supercap 0.0268  $\mu$ F');
legend({'I_{Fuente}','I_{Carga}','I_{Cap}'},'Location','best','Interpreter','tex');

%% 11a) — Guardar los datos de la Figura 8 en CSV —————

tbl8 = table( ...
    t_rel(:), ... % Tiempo relativo
    Tf.If(idxW) - off.If + shift.If , ... % I_Fuente
    Tf.Icar(idxW) - off.Icar + shift.Icar, ... % I_Carga
    Tf.Icap(idxW) - off.Icap, ... % I_Cap
    'VariableNames', {'Tiempo_s','I_Fuente_A','I_Carga_A','I_Cap_A'});

writetable(tbl8, 'corrientes_fig8.csv');

%% 12. Fig. 9 - Corrientes filtradas (subplots, eje X = 0 + shift) -
figure('Name','Corrientes filtradas - eje X en 0','Color','w');
subplot(3,1,1);
plot(t_rel, Tf.If(idxW) - off.If + shift.If , 'b','LineWidth',1.5);
title('Ifuente'); ylabel('Corriente [A]'); grid on;
xlim([0 0.41226]);
subplot(3,1,2);
plot(t_rel, Tf.Icar(idxW) - off.Icar + shift.Icar, 'r','LineWidth',1.5);
title('Icarga'); ylabel('Corriente [A]'); grid on;
xlim([0 0.41226]);
subplot(3,1,3);
plot(t_rel, Tf.Icap(idxW) - off.Icap , 'g','LineWidth',1.5);
title('Icap'); ylabel('Corriente [A]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;
xlim([0 0.41226]);

%% 13. Fig. 10 - Voltajes filtrados (subplots, eje X = 0) -----
figure('Name','Voltajes filtrados - eje X en 0','Color','w');
subplot(3,1,1);
plot(t_rel, Tf.Vf(idxW), 'b','LineWidth',1.5);
xlim([0 0.41226]);
title('Vfuente'); ylabel('Voltaje [V]'); grid on;

```

```

subplot(3,1,2);
plot(t_rel, Tf.Vcar(idxW),'r','LineWidth',1.5);
xlim([0 0.41226]);
title('Vcarga'); ylabel('Voltaje [V]'); grid on;

subplot(3,1,3);
plot(t_rel, Tf.Vcap(idxW),'g','LineWidth',1.5);
xlim([0 0.41226]);
title('Vcap'); ylabel('Voltaje [V]'); xlabel('Tiempo [s]'); grid on;

```

7.1.3 Script para gráficas energía de banco de capacitores

```

clc, clear, close all

%% === Estilo global =====
reset(groot) % restaurar valores factory
set(groot,'defaultTextInterpreter','tex');
set(groot,'defaultAxesFontSize',11);
set(groot,'defaultTextFontSize',11);
set(groot,'defaultLineLineWidth',1.5);
set(groot,'defaultAxesLineWidth',1);
set(groot,'defaultFigureColor','w'); % todas las figuras fondo blanco
% -----

%% 1. Leer y filtrar datos -----
fileName = 'cap28ufResultadosFinales.csv';
opts = delimitedTextImportOptions("NumVariables",12);
opts.DataLines = 18;
opts.Delimiter = ",";
opts.VariableNames = {'t_If','If','t_Icar','Icar','t_Icap','Icap', ...
                     't_Vf','Vf','t_Vcar','Vcar','t_Vcap','Vcap'};
opts.SelectedVariableNames = {'t_If','If','Icar','Icap','Vf','Vcar','Vcap'};
opts.VariableTypes = repmat({'double'},1,12);

T = readtable(fileName,opts,"ReadVariableNames",false);
T.Properties.VariableNames = ...
    {'Time_s','If','Icar','Icap','Vf','Vcar','Vcap'};

% --- filtrado -----
vent = 800;
Tf = T;
Tf.If = medfilt1(T.If, 1300);
Tf.Icar = medfilt1(T.Icar, 1);
Tf.Icap = medfilt1(T.Icap, 500);
Tf.Vf = medfilt1(T.Vf, vent);
Tf.Vcar = medfilt1(T.Vcar, vent);
Tf.Vcap = medfilt1(T.Vcap, vent);

%% 2. Ventanas y offsets -----
win = [7.38886 8.26668]; % dinámica completa

```

```

peak_abs = [7.40126 7.43554];           % peak principal ABS

idxW = (Tf.Time_s >= win(1)) & (Tf.Time_s <= win(2));
t_rel = Tf.Time_s(idxW) - win(1);       % 0 en 7.38886 s

off.If = mean(Tf.If(idxW));
off.Icar = mean(Tf.Icar(idxW));
off.Icap = mean(Tf.Icap(idxW));
off.Vf = mean(Tf.Vf(idxW));
off.Vcar = mean(Tf.Vcar(idxW));
off.Vcap = mean(Tf.Vcap(idxW));

shift.If = 0.85685;
shift.Icar = 0.77350;

%% ===== FIGURAS 1 - 10 (originales) =====

% Fig. 1 - Corrientes originales vs filtradas
figure('Name','Fig 1 - Corrientes Orig/Filtradas');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,T.If,'k:',T.Time_s,Tf.If,'b');
grid on, title('If'); ylabel('[A]'); legend('Original','Filtrada');
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,T.Icar,'k:',T.Time_s,Tf.Icar,'r');
grid on, title('Icar'); ylabel('[A]'); legend('Original','Filtrada');
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,T.Icap,'k:',T.Time_s,Tf.Icap,'g');
grid on, title('Icap'); ylabel('[A]'); xlabel('Tiempo [s]');
legend('Original','Filtrada');

% Fig. 2 - Voltajes originales vs filtradas
figure('Name','Fig 2 - Voltajes Orig/Filtradas');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,T.Vf,'k:',T.Time_s,Tf.Vf,'b');
grid on, title('Vf'); ylabel('[V]'); legend('Original','Filtrada');
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,T.Vcar,'k:',T.Time_s,Tf.Vcar,'r');
grid on, title('Vcar'); ylabel('[V]'); legend('Original','Filtrada');
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,T.Vcap,'k:',T.Time_s,Tf.Vcap,'g');
grid on, title('Vcap'); ylabel('[V]'); xlabel('Tiempo [s]');
legend('Original','Filtrada');

% Fig. 3 - Corrientes filtradas (completo)
figure('Name','Fig 3 - Corrientes filtradas (full)');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,Tf.If,'b'); grid on
title('If'); ylabel('[A]');
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,Tf.Icar,'r'); grid on
title('Icar'); ylabel('[A]');
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,Tf.Icap,'g'); grid on
title('Icap'); ylabel('[A]'); xlabel('Tiempo [s]');

% Fig. 4 - Corrientes ventana centrada
figure('Name','Fig 4 - Corrientes ventana');
subplot(3,1,1);
plot(T.Time_s, Tf.If-off.If+shift.If,'b'); grid on
xlim(win), title('If'); ylabel('[A]');
subplot(3,1,2);
plot(T.Time_s, Tf.Icar-off.Icar+shift.Icar,'r'); grid on
xlim(win), title('Icar'); ylabel('[A]');
subplot(3,1,3);
plot(T.Time_s, Tf.Icap-off.Icap,'g'); grid on

```

```

xlim(win), title('Icap'); ylabel('[A]'); xlabel('Tiempo [s]');

% Fig. 5 - Voltajes filtrados (full)
figure('Name','Fig 5 - Voltajes filtrados (full)');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,Tf.Vf,'b'), grid on
title('Vf'); ylabel('[V]');
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,Tf.Vcar,'r'), grid on
title('Vcar'); ylabel('[V]');
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,Tf.Vcap,'g'), grid on
title('Vcap'); ylabel('[V]'); xlabel('Tiempo [s]');

% Fig. 6 - Voltajes ventana
figure('Name','Fig 6 - Voltajes ventana');
subplot(3,1,1); plot(T.Time_s,Tf.Vf,'b'), grid on, xlim(win)
title('Vf'); ylabel('[V]');
subplot(3,1,2); plot(T.Time_s,Tf.Vcar,'r'), grid on, xlim(win)
title('Vcar'); ylabel('[V]');
subplot(3,1,3); plot(T.Time_s,Tf.Vcap,'g'), grid on, xlim(win)
title('Vcap'); ylabel('[V]'); xlabel('Tiempo [s]');

% Fig. 7 - Corrientes (líneas únicas ventana)
figure('Name','Fig 7 - Corrientes ventana completa');
plot(T.Time_s,Tf.If-off.If+shift.If,'b'); hold on
plot(T.Time_s,Tf.Icar-off.Icar+shift.Icar,'r');
plot(T.Time_s,Tf.Icap-off.Icap,'g');
grid on, xlim(win)
xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Corriente centrada [A]');
title('Corrientes - C = 26.8 mF');
legend({'I_{Fuente}','I_{Carga}','I_{Cap}'},'Interpreter','tex');

% Fig. 8 - Corrientes (t=0)
figure('Name','Fig 8 - Corrientes eje 0');
plot(t_rel,Tf.If(idxW)-off.If+shift.If,'b'); hold on
plot(t_rel,Tf.Icar(idxW)-off.Icar+shift.Icar,'r');
plot(t_rel,Tf.Icap(idxW)-off.Icap,'g');
grid on, xlabel('t_{rel} [s]'); ylabel('Corriente [A]');
title('Corrientes (eje 0)');
legend({'I_{Fuente}','I_{Carga}','I_{Cap}'},'Interpreter','tex');

% Fig. 9 - Corrientes subplots eje 0
figure('Name','Fig 9 - Corrientes subplots eje 0');
subplot(3,1,1); plot(t_rel,Tf.If(idxW)-off.If+shift.If,'b'), grid on
title('If'); ylabel('[A]');
subplot(3,1,2); plot(t_rel,Tf.Icar(idxW)-off.Icar+shift.Icar,'r'), grid on
title('Icar'); ylabel('[A]');
subplot(3,1,3); plot(t_rel,Tf.Icap(idxW)-off.Icap,'g'), grid on
title('Icap'); ylabel('[A]'); xlabel('t_{rel} [s]');

% Fig. 10 - Voltajes subplots eje 0
figure('Name','Fig 10 - Voltajes subplots eje 0');
subplot(3,1,1); plot(t_rel,Tf.Vf(idxW),'b'), grid on
title('Vf'); ylabel('[V]');
subplot(3,1,2); plot(t_rel,Tf.Vcar(idxW),'r'), grid on
title('Vcar'); ylabel('[V]');
subplot(3,1,3); plot(t_rel,Tf.Vcap(idxW),'g'), grid on
title('Vcap'); ylabel('[V]'); xlabel('t_{rel} [s]');

```

```

%% ===== POTENCIA y ENERGÍA =====
Icap_win = Tf.Icap(idxW) - off.Icap;
Vcap_win = Tf.Vcap(idxW);
Pcap_W   = Vcap_win .* Icap_win;

E_win_J   = trapz(t_rel, Pcap_W);
E_win_Wh  = E_win_J / 3600;

peak_rel  = peak_abs - win(1);
idxP      = t_rel >= peak_rel(1) & t_rel <= peak_rel(2);
E_peak_J  = trapz(t_rel(idxP), Pcap_W(idxP));
E_peak_Wh = E_peak_J / 3600;

fprintf('\n>>> RESULTADOS\n');
%fprintf('• Ventana completa : %.3f J (%.4f Wh)\n',E_win_J,E_win_Wh);
fprintf('• Peak principal   : %.3f J (%.4f Wh)\n\n',E_peak_J,E_peak_Wh);

%% ===== NUEVAS FIGURAS 11 - 14 =====

% Fig. 11 - I,V,P ventana
figure('Name','Fig 11 - I,V,P ventana');
subplot(3,1,1); plot(t_rel,Icap_win,'b'), grid on
title('Icap'); ylabel('[A]');
subplot(3,1,2); plot(t_rel,Vcap_win,'r'), grid on
title('Vcap'); ylabel('[V]');
subplot(3,1,3); plot(t_rel,Pcap_W,'g'), grid on
title(sprintf('Pcap - E_{win}=%.3f J',E_win_J));
ylabel('[W]'); xlabel('t_{rel} [s]');

%% Fig. 12 - I,V,P peak (eje X desde 0)
figure('Name','Fig 12 - I,V,P peak');

t_peak = t_rel(idxP) - peak_rel(1);

subplot(3,1,1)
plot(t_peak, Icap_win(idxP),'b'), grid on
title('Corriente del capacitor'); ylabel('Icap [A]');
xlim([0 0.03428])

subplot(3,1,2)
plot(t_peak, Vcap_win(idxP),'r'), grid on
title('Voltaje del capacitor'); ylabel('Vcap [V]');
xlim([0 0.03428])

subplot(3,1,3)
plot(t_peak, Pcap_W(idxP),'g'), grid on
title(sprintf('Potencia Instantánea - E_{peak}=%.3f J',E_peak_J));
ylabel('Pcap [W]'); xlabel('Tiempo [s]');
xlim([0 0.03428])

% Fig. 13 - Área ventana
cyan = [0.55 1 1];
figure('Name','Fig 13 - Área ventana');
area(t_rel, Pcap_W,'FaceColor',cyan,'FaceAlpha',0.5,'EdgeAlpha',0); hold on
plot(t_rel, Pcap_W,'k')

```

```

legend({'Área integrada (trapz)', 'Potencia'}, 'Location', 'northwest')
grid on, xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Potencia [W]');
title(sprintf('Potencia - Área Integrada (E = %.3f J)', E_win_J));

%% Fig. 14 - Área integrada del peak (eje X desde 0)
figure('Name', 'Fig 14 - Área peak');

t_peak = t_rel(idxP) - peak_rel(1);

area(t_peak, Pcap_W(idxP), 'FaceColor', cyan, 'FaceAlpha', 0.5, 'EdgeAlpha', 0); hold on
plot(t_peak, Pcap_W(idxP), 'k')
legend({'Área integrada (trapz)', 'Potencia'}, 'Location', 'northwest')
grid on, xlabel('Tiempo [s]'); ylabel('Potencia [W]');
title(sprintf('Potencia - Área integrada (E = %.3f J)', E_peak_J));
xlim([0 t_peak(end)])

%% =====
%% VALIDACIÓN ENERGÍA - expresión  $\frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{ini}^2 - V_{fin}^2)$ 
% -----
%% ===== VALIDACIÓN para el peak =====
C = 26.8e-3; % 26.8 mF

% --- tensiones en los extremos del peak (descarga) -----
V_ini = Vcap_win(find(idxP, 1, 'first')); % V al inicio
V_fin = Vcap_win(find(idxP, 1, 'last')); % V al final

E_teorica_J = 0.5 * C * (V_ini^2 - V_fin^2); % siempre positiva

% --- energía integrada -----
t_peak = t_rel(idxP) - peak_rel(1);
E_peak_J = trapz(t_peak, Pcap_W(idxP));

fprintf('-----\n');
fprintf('Validación del Peak con  $\frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{ini}^2 - V_{fin}^2)$ \n');
fprintf('• Vini = %.3f V | Vfin = %.3f V\n', V_ini, V_fin);
fprintf('• C = 0.0268 F\n', C);
fprintf('• E_teorica = %.3f J\n', E_teorica_J);
fprintf('• E_integrada = %.3f J\n', E_peak_J);
fprintf('• Diferencia = %.2f %%\n', ...
    100*(abs(E_teorica_J - E_peak_J)/E_peak_J);
fprintf('-----\n');

```

7.1.4 Script SCPI

```

*RST
MODE CC

REM — protecciones y umbrales
CONF:OCP DIS
CONF:OPP DIS
CONF:VOLT:LATC OFF
CONF:VOLT:ON 0

REM — baseline —————
CURR:SLEW MAX
CURR 0.25
LOAD ON
WAIT 50MS           ; colchón de arranque

REM ===== TRAMO 1 (0.25 → 4.672 A) — Slew 10 A/ms —————
CURR:SLEW 20
CURR 4.672
WAIT 3MS           ; ≥2 ms → dejamos 3 ms de margen

REM ===== PUNTO INTERM. 1 (5.672 → 4.50 A) —————
CURR:SLEW 0.010
CURR 4.50
WAIT 117MS

REM ===== PUNTO INTERM. 2 (4.50 → 3.50 A) —————
CURR 3.50
WAIT 100MS

REM ===== PUNTO INTERM. 3 (3.50 → 2.80 A) —————
CURR 2.80
WAIT 70MS

REM ===== TRAMO ORIGINAL 2 (2.80 → 1.975 A) —————
CURR 1.975
WAIT 82MS
WAIT 191MS         ; pausa original para cuadrar 0.804 s total

REM ===== PUNTO INTERM. 4 (1.975 → 1.20 A) —————
CURR 1.20

```

WAIT 78MS

REM ===== PUNTO INTERM. 5 (1.20 → 0.50 A) —————

CURR 0.50

WAIT 70MS

REM ===== TRAMO ORIGINAL 3 (0.50 → 0.435 A) —————

CURR 0.435

WAIT 7MS

WAIT 392MS ; pausa original hasta ~1.40 s

REM — FIN DEL PERFIL — regresar al nivel reposo

CURR:SLEW MAX

CURR 0.25